

Проблеми зварювання високомарганцевих сталей

Шваб С. Л.¹, кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник, serg.schwab@gmail.com, ORCID 0000-0002-4627-9786

Семенко А. Ю.², кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник, semenko.au@gmail.com, ORCID 0000-0002-0448-1636

Скоробагатько Ю. П.², кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник, yulka.ukr@gmail.com, ORCID 0000-0002-1724-9895

Смірнов О. М.², доктор технічних наук, професор, завідувач відділу, stalevoz@i.ua, ORCID 0000-0001-5247-3908

Ворон М. М.^{2,3}, кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник, mi hail.voron@gmail.com, ORCID 0000-0002-0804-9496

Тимошенко А. М.², кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник, Marschal@i.ua, ORCID 0000-0003-4038-1744

¹Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ, Україна

²Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ, Україна

³Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

Чутливість високомарганцевих сталей до деформації та термічної обробки призводить до проблем з їх зварюванням. Вони полягають у схильності до тріщиноутворення в зоні термічного впливу під час швидкого нагрівання і охолодження. Для них також є характерною чутливість до перегріву, яка виражається у можливості виділення карбідів та гетерогенізації структури. Схильність до наклепування через напруження при зварюванні також може спричинити виникнення мікро і макродефектів та знизити якість і надійність зварного з'єднання.

В роботі проаналізовано сучасний світовий досвід зварювання високомарганцевих сталей різними способами та із застосуванням різних матеріалів. Показано важливість збереження однорідності хімічного складу між металом шва та основним матеріалом, щоб запобігти утворенню мартенситу через пониження стабільності аустеніту. При зварюванні різномірних сталей може відбуватися виділення шкідливих карбідів, тому такі з'єднання піддають попередньому підігріву з контрольованим охолодженням. Зварювання високомарганцевих аустенітних сталей не рекомендується проводити плавким електродом з нержавіючої аустенітної сталі через утворення значної структурно-фазової неоднорідності, евтектики і тріщин, які здатні пройти від шва до основного металу. В результаті проведеного аналізу досліджень встановлено, що зварювання високомарганцевих сталей найкраще проводити електродами з хімічним складом, що є близьким до матеріалів,

що зварюються. Перед зварюванням рекомендується проводити зниження рівня залишкових напружень та наклепування термічною обробкою. Зварювання потрібно проводити за умов мінімізації теплового навантаження на матеріал, що досягається низькострумовим та короткошовним зварюванням, а також попереднім підігрівом металу. Для зварювання тонких деталей із високомарганцевих сталей можна використовувати лазерне зварювання, для більших товщин зварювання плавким електродом в середовищі захисних газів (MIG\MAG) та аргонодугове зварювання неплавким електродом (TIG).

Ключові слова: високомарганцеві сталі, TWIP, зварювання, структурно-фазові особливості, дефекти.

Високомарганцеві сталі — це група легованих сталей з високим вмістом марганцю, що зазвичай коливається від 11 % до 15 % і більше, у поєднанні з високим вмістом вуглецю (близько 0,8-1,5 %). Найбільш відома серед них — це сталь Гадфілда (110Г13), яка містить 12-14 % мас. марганцю та 1 % мас. вуглецю, названа на честь її винахідника Роберта Гадфілда, який розробив її у 1882 році.

Марганець в такій кількості забезпечує повністю аустенітну будову сталі, що забезпечує її високу міцність, пластичність, ударну в'язкість, стійкість до абразивної дії та зміцнюваність при навантаженнях [1]. Завдяки своїм унікальним службовим властивостям, вона широко використовується у виготовленні залізничних колій, земснарядів, ковшів, цокових дробарках та в інших виробках, де необхідна висока стійкість до високих динамічних і ударних навантажень та зносостійкість [2]. В литому стані сталь містить фази, які додають їй крихкості [3]. Карбіди можуть також формуватися коли виливок містить більше 1,0 % мас. вуглецю, або додані карбідоутворюючі легуючі елементи такі як Cr, V, Ti та ін. При випробуванні на зносостійкість сталь Гадфілда працює краще, ніж ковані леговані сталі, литі леговані, нержавіючі, інструментальні або високохромисті сталі та білий чавун [4].

Високий вміст марганцю грає помітну роль у формуванні комплексу механічних властивостей сталей, що призвело до розвитку нових композицій за принципом створення сталі Гадфілда. Так було розроблено сталі з одночасно високим вмістом марганцю та алюмінію, які володіли перевагами сталі 110Г13, але мали нижчу густину, вищу пластичність і здатність до зміцнення при навантаженні або пластичній деформації. Порівняння складу і властивостей деяких таких сталей наведено в таблиці 1 [4-6].

Таблиця 1

Вплив вмісту марганцю на механічні властивості сталей Fe-Mn-C після аустенізації

Table 1

Effect of manganese content on the mechanical properties of Fe-Mn-C steels after austenization

Хімічний склад, % мас.					YS, МПа	UTS, МПа	δ, %	Твердість HV
Mn	Al	C	Ni	Mo				
13	—	1	—	—	414	995	40	225
16	11	2	0.8	0.05	335	740	53	178
18	10	0.9	5	—	810	1120	26	390
26	7	1	0.8	0,05	250	610	67	130

Унікальною особливістю таких сталей є балансування показниками механічних і експлуатаційних властивостей високомарганцевих сталей за рахунок хімічного складу, який забезпечує здатність впливати на фазовий склад термічною та термомеханічною обробкою в дуже широких межах. Ці сталі схильні до швидкого наклепування, дисперсійного твердіння та карбідного зміцнення, тому їхні сфери застосування постійно розширюються [7].

За останні десятиліття було запропоновано багато оригінальних варіантів аустенітних марганцевих сталей, які часто зустрічаються в патентах, але не знаходять свого широкого застосування. Найбільш впровадженими сталями даного типу являються ті, які включають варіації вуглецю, марганцю та в багатьох випадках алюмінію, з додаванням хрому, нікелю, молібдену, ванадію, титану і ванадію [8].

Важливою особливістю є те, що на механічні характеристики виробів зі сталей що розглядаються впливає не лише вміст вуглецю та марганцю, але й поперечний переріз виробів та їх ділянок, які піддаються навантаженням. Так, наприклад, відносно подовження оберненопропорційне вмісту вуглецю та товщині стінок виробів, а межа текучості прямопропорційна вмісту вуглецю, але оберненопропорційна поперечному перерізу [9].

Подібні залежності в поєднанні з чутливістю до термічної обробки та змін хімічного складу, створює помітні труднощі при деформаційній обробці та зварюванні.

Зварювання високомарганцевих сталей є складним процесом, оскільки вони мають тенденцію до утворення тріщин і деформації під час термічного впливу. Високий вміст марганцю і вуглецю в сталях, таких як сталь Гадфілда, викликає ряд негативних явищ під час зварювання, що вимагає спеціальних технік і матеріалів для забезпечення якісного і довговічного з'єднання.

Основні особливості і проблеми зварювання високомарганцевих сталей полягають в наступному:

- схильність до тріщиноутворення через високий вміст вуглецю і марганцю, які надають матеріалу високу жорсткість, що може спричинити утворення тріщин в зоні термічного впливу (ЗТВ) під час швидкого нагрівання і охолодження;

- чутливість до перегріву виражається у гетерогенізації структури та підвищенні анізотропії властивостей, що може як в комплексі, так і окремо призвести до зниження ударної в'язкості;

- схильність до наклепування. Зварювання деталей, які вже були піддані механічному навантаженню, може спричинити нерівномірне наклепування матеріалу навколо шва.

Зона термічного впливу (ЗТВ) сталі Гадфілда знижує механічні параметри зварного з'єднання і одночасно погіршує механіку руйнування матеріалу [10, 11]. Дуже швидке охолодження зони зварного з'єднання після зварювання може зменшити негативні ефекти від зварювання. Швидке охолодження сталі пригнічує виділення карбідів та зменшує неоднорідність структурного переходу до основного металу.

Зазвичай, при використанні стандартних присадних матеріалів, після зварювання хімічний склад шва та зони сплавлення має суттєво

нижчий вміст марганцю, але достатній вміст вуглецю, щоб стимулювати утворення багатофазної структури шва та утворення мартенситу, що знижує пластичність, необхідну для релаксації залишкових напружень [12]. Ці два наслідки можуть спричинити проблему утворення холодних тріщин. Якщо застосувати процес попереднього нагріву з контрольованою швидкістю охолодження аустенітної частини зварного з'єднання, то можна покращити зварюваність сталі [13].

В роботі [13] проведено аналіз типового зварювання з'єднань між трьома різними аустенітними сталями: Гадфільда, низьковуглецевою нержавіючою сталлю та сталлю ESAB OK Tubrodur 14.71 (табл. 2) у вигляді присадного матеріалу та показано важливість врахування утворення фосфідів у зварних з'єднаннях. При зварюванні сталей з високим вмістом марганцю спостерігається схильність до утворення гарячих тріщин, у тому числі через фосфідну евтектику і мікросегрегації карбідів навколо фосфідів, навіть якщо вміст фосфору складає близько 0,02 % мас. Д. Шулік в роботі [14] підтвердив теорію, що фосфідні фази в мікроструктурі після охолодження на повітрі містять менший відсоток фосфору. В таких умовах фосфідна евтектика має кулясту форму і оточена тонкими карбідами, а більш високі швидкості охолодження можуть гарантувати менш структурно помітне утворення евтектики. Лита мікроструктура сплавів з вмістом фосфору 0,051 % мас. може призводити до утворення евтектики в глобулярній формі під час фази охолодження, яка починається при 1100 °С. Оскільки сталь Гадфільда має чутливість до утворення тріщин при застосуванні більш швидкого зварювання, то другим важливим параметром формування зварного з'єднання є температура металу після кожного проходу (в т.ч. присадного матеріалу). Чим вищою вона буде – тим повільнішим і більш рівномірним буде охолодження.

Таблиця 2

Хімічний склад сталей сталей (% мас.) [13]

Table 2

Chemical composition of steels (wt. %)

Сталь	Вміст основних легуючих елементів, % мас. Fe – основа							
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Nb
Сталь Гадфільда	1,10	11,9	0,48	0,027	0,006	0,08	0,05	-
Н/Ж сталь	0,07	0,46	0,52	0,014	0,015	19,3	8,15	0,86
ESAB OK Tubrodur 14.71	0,04	6,2	0,51	0,016	0,016	19,4	8,22	-

Подібні з'єднання при лазерному зварюванні аустенітних високомарганцевих TWIP-сталей (TWinning Induced Plasticity) демонструють дендритну мікроструктуру [15]. Макроструктура зварного шва та зони сплавлення демонструють повністю аустенітну структуру зі збільшенням зерна як у перехідній зоні, так і в зоні термічного впливу (ЗТВ), де остання має ширину близько 300 мкм [16, 17]. Таким чином, перевага лазерного

зварювання полягає в однорідності хімічного складу шва та основного металу, а основним недоліком є зростання зерен та можливість утворення складних багатофазних градієнтних структур, в залежності від хімічного складу сталей.

Наразі доступно кілька публікацій, присвячених лазерному зварюванню сталей TWIP з іншими марками сталей. Основною проблемою в цих різнорідних зварних швах є поява хімічних та/або фазових неоднорідностей, які можуть ускладнювати або унеможлиблювати багатоступінчасте деформаційне зміцнення TWIP-сталей [18].

Інші складнощі при зварюванні аустенітних сталей пов'язані зі зміною їх механічних властивостей та здатністю до суттєвого зміцнення. Для приклада можна розглянути сталі марок 1.4034 (X46Cr13, найближчий аналог – 40X13) та 1.4678 (найближчий аналог – 10X14AG15), які є похідними від сталі 1.4301 (304, найближчий аналог – 08X18H10), де нікель може бути частково замінено марганцем. Вони є повністю аустенітними, як і високомарганцеві сталі, тому демонструють сильне зміцнення через TWIP-ефект, пов'язаний з двійникуванням [19]. Початкова межа текучості таких сталей на рівні 500 МПа може бути збільшена до 1100 МПа шляхом холодної деформації в усьому об'ємі, або локально під дією структурних перетворень чи великих внутрішніх напружень. Відомо, що матеріали з низьким і середнім рівнем міцності демонструють відмінну придатність до зварювання, а при межі текучості близько 800 МПа зварювання стає складним. Відповідно, для ефективного зварювання не лише структурно-фазові зміни мають бути контрольованими, але й рівень механічних властивостей високомарганцевих сталей повинен бути максимально наближеним до звичайних конструкційних сталей [20].

Проведені в роботі [17] дослідження продемонстрували утворення мартенситної фази в різнорідних зварних швах TWIP-сталі HSD600 з феритною малолегованою високоміцною сталлю S420MC, що містить в невеликій кількості ванадій та ніобій. Залежно від співвідношення змішування HSD600 та S420MC в зварних з'єднаннях, з'являлась різна кількість мартенситу. Це пояснюється зниженням концентрації марганцю та зменшенням рівня стабілізації аустеніту. Найкращого результату в даній роботі вдалося досягти при зварюванні з перекриттям зварних швів, що забезпечує максимальне зсувне зусилля та найкраще збереження хімічного складу і відповідно – аустеніту як основної фази. Це досягається завдяки зварюванню з повним проваром, зварюванню від TWIP-сталі HSD600 до листа S420MC зі швидкістю 3 м/хв. Механічна міцність на зсув різнорідних швів була не вищою, ніж у найменш міцної сталі.

Дослідження [21] різнорідних стикових з'єднань аустенітної високоміцної сталі TWIP Fe-22Mn-0.6C та феритної малолегованої сталі TRIP800 показали високий вміст марганцю в зоні сплавлення та утворення мартенситу. Також повідомлялося про виділення карбідних преципітатів вздовж меж дендритів у стиковому з'єднанні TWIP/TRIP поблизу сторони TWIP [22]. Під дією розтягуючого навантаження останнє стикове з'єднання зламалося в зоні з'єднання. Отримані різнорідні з'єднання показали низьку механічну міцність.

В роботі [17] проведено перші випробування придатності для зварювання аустенітної нержавіючої високомарганцевої сталі в подібних і різнорідних з'єднаннях. Результати в загальному розумінні показали придатність для одержання якісних зварних швів без тріщин у тонкому листовому матеріалі. Подібні зварні шви в більш масивних з'єднаннях розриваються в оплавленій зоні через ослаблення матеріалу литою структурою. У поєднанні з аустенітною нержавіючою сталлю міцність є меншою ніж у сталі 1.4301. Поведінка руйнування при зварюванні з мартенситною нержавіючою сталлю 1.4034 (X46Cr13, найближчий аналог – 40X13) є більш складною. Руйнування починається на лінії сплавлення, але тріщина поширюється на міцний основний матеріал. Усі оплавлені зони кристалізуються у вигляді аустеніту з мартенситними смугами в областях з підвищеним вмістом вуглецю. Результати показують необхідність термічної обробки зварного з'єднання з метою гомогенізації або відпуску зони термічного впливу в мартенситній сталі.

В роботі [23] описується практика використання покритого електроду для зварювання високомарганцевих сталей. В ній було досліджено характеристики зварних швів для сталевих виливків з високим вмістом марганцю з використанням покритого електрода із нержавіючої сталі ER 307. Результати показали, що зменшення розлегання від кореня до лицьової частини шва призвело до збільшення вмісту дельта-фериту в цьому ж напрямку. Крім того, тріщини виникли внаслідок одночасного утворення евтектики, низької теплопровідності та великого діапазону охолодження основного металу. Тріщини виникли в зварному шві і поширилися від нього через ЗТВ до основного металу і знизили міцність на розрив, пластичність та в'язкість зварного з'єднання приблизно на 6 %, 27 % і 33,5 % відповідно.

Велика увага приділена впливу швидкості охолодження на структуру ЗТВ після зварювання високомарганцевих сталей. Результати роботи [24] свідчать про те, що при зниженні швидкості охолодження, твердість і мікротвердість зерен зростають. У разі повітряного охолодження спостерігалися збільшення розмірів пустот, а також мікротріщини та випадання карбідів. Для зразка, охолодженого в печі, існування мікротріщин разом із розломами було очевидним, і в цьому випадку також спостерігалось значне виділення карбідів. Це пояснюється більш повним проходженням дифузійних процесів і як наслідок – утворенням більшої кількості різноманітних фаз, які мають відмінні кристалічні ґратки, питомі об'єми та можуть створювати у структурі напруження, що і викликає мікророзтріскування.

Одним з універсальних способів зварювання для сталей подібного типу є зварювання плавким електродом в середовищі захисних газів (MAG/MIG). За результатами проведених досліджень [25] був зроблений висновок, що термічні напруження, спричинені процесом зварювання, мали явний вплив на структуру і властивості матеріалів. В цьому випадку даний спосіб зварювання сталей показав погану геометрію шва, нерівномірне змочування та неоднорідне формування структури. Бездефектне зварювання вимагає удосконалення дугових процесів, таких як перенесення холодного металу або

поєднання імпульсної дуги з перенесенням холодного металу. Зварювання подібних з'єднань не досягли рівня механічних і технологічних властивостей, близьких до основного металу.

Отже, зварювання високомарганцевих сталей вимагає ретельної підготовки, оцінки структурно-фазових перетворень, залежно від вибору зварюваних сталей та зварювальних матеріалів, контролю хімічного складу, вмісту домішок, температурних режимів зварювання та охолодження металу. Основними рекомендаціями для зменшення ризику утворення тріщин та одержання високої якості зварних з'єднань високомарганцевих сталей, відповідно до проведеного аналізу, є наступні:

- для зварювання високомарганцевих сталей найкраще підходять електроди з аустенітних сталей або зварювальні дроти, які зберігають аустенітну структуру і запобігають утворенню карбідних фаз;

- перед початком зварювання важливо зняти поверхнєве наклепування та знизити рівень залишкових напружень металу, які під час зварювання можуть стати причиною тріщин. Це можна зробити шляхом шліфування, механічної та термічної обробки;

- щоб уникнути тріщиноутворення, важливо мінімізувати теплове навантаження на матеріал. Це досягається шляхом зварювання короткими швами та застосування низькострумового зварювання. Також для цього рекомендується проводити попередній підігрів зварюваних деталей до температури 200-300 °C, а після зварювання забезпечувати поступове охолодження.

Отже, найбільш раціональним та найбільш поширеним рішенням для вирішення описаних задач буде дугове зварювання плавким електродом в середовищі захисного газу (MIG/MAG). Аргонодугове зварювання (TIG) також може використовуватися, особливо для зварювання тонких деталей або при виконанні делікатних робіт. Чим вищою є твердість, міцність або здатність до зміцнювання високомарганцевих сталей, тим більш складно буде забезпечити високу якість з'єднання і знизити імовірність утворення тріщин. Одним з найбільш доступних прийомів, який деякою мірою може допомогти вирішити це питання, є попередній підігрів зварюваних деталей та їх контрольоване охолодження.

Фінансування роботи. Дослідження проведено в рамках виконання Проєкту 2023.04/0021 «Одержання елементів броні з надлегких сталей для військової техніки з використанням вторинної сировини». Проєкт реалізовано за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України, конкурс «Наука для зміцнення обороноздатності України».

Література

1. Mahlami C. S., Pan X. An Overview on high manganese steel casting // World Foundry Congress. – 2014. – No. 1. – pp. 1-10.
2. Balogan S.A. Effect of the melting temperature on the wear characteristics of Austenitic Manganese steels // Journal of minerals and material characterization and engineering. – 2008. – Vol. 3. – pp. 277-289.

3. Youn-Soo H. et al. Critical cooling rate on carbide precipitation during quenching of austenitic manganese steel // China foundry – 2010. – Vol. 7. – pp 177-182.
4. Sedmak A. Austenitic Manganese Steels. 10.04.2013. URL: <http://www.keytometals.com/art69.html>.
5. Tomaszewska A. Research of selected properties of two types of high manganese steel wires // Technologies and Properties of Modern Utilised Materials. – 2011. – Vol. 22. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/22/1/012015>
6. Piston M., Bartlett L. et al. Microstructural Influence on Mechanical Properties of a Lightweight Ultrahigh Strength Fe-18Mn-10Al-0.9C-5Ni (wt.%) // Steel. Metals. – 2020. – No. 10. – pp. 1305. <https://doi.org/10.3390/met10101305>
7. Alexandros Banis, Andrea Gomez, Vitaliy Bliznuk et. al. Microstructure evolution and mechanical behavior of Fe-Mn-Al-C low-density steel upon aging // Materials Science and Engineering: A. – 2023. – Volume 875. – Page 145109. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145109>
8. Pribulova A., Babic J. and Baricova D. Influence of Hadfield's steel chemical composition on its mechanical properties // Chemicke Listy – 2011. – pp. 430-432
9. Chakrabarti S. Cast austenitic manganese steels: some practical note. 18.04.2013. URL: http://www.cbqfoundry.com/files/Microsoft_PowerPoint_Austenitic_manganese_steel_Compatibility_Mode_2.pdf
10. Mendez J., Ghoreshy M., Mackay W. B. F. et. al. Weldability of Austenitic Manganese Steel. // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – No. 1-3. – pp. 596-602. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.033>
11. Sevcikova X., Krejci L., Konecna K. Mechanical and Corrosion Properties of Galvanic Coatings based on Zinc. // METAL 2013: 22nd International Conference on Metallurgy and Materials, pp. 1117-1122.
12. Neslusan M., Mrkvica I., Cep R., Raos P. Heat Distribution when Nickel Alloy Grinding. // Tehnicki vjesnik-Technical Gazette. – 2012. – No. 4 (19). – pp. 947-951.
13. Schmidova E., Hlavaty I., Hanus P. The weldability of the steel with high manganese // Tehnicki vjesnik. – 2016. – No. 3(23). – pp. 749-752. <https://doi.org/10.17559/TV-20150105134929>
14. Shulik D., Kamarash L., Vilchko Ya., Dzugas P. Phosphide eutectic in a Hadfield steel structure. // Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov. - 1992. - No. 2. – pp. 2-3. <https://doi.org/10.1007/BF00769871>
15. Dahmen M., Lindner S., Monfort D., Petring D. Weld metallurgy and mechanical properties of high manganese ultra-high strength steel dissimilar welds // Physics Procedia. – 2016. – Vol. 83. – pp. 344-351. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.036>
16. Dahmen M., Daamen M., Hirt G. Laser beam welding of high manganese TWIP steels produced by twin roll strip casting // Extended abstract: 2nd International Conference on High Manganese Steel, August 31 - September 4, 2014, Aachen, Germany.
17. Behm V., Otto M., Hufemann M., Huinink S., Springer A., Kaierle S. Laser welding of fully austenitic twinning induced plasticity (TWIP) steels // 32nd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2013), October 6-10, Miami. - pp. 638-646. <https://doi.org/10.2351/1.5062943>
18. Mujica L., Weber S., Pinto H., Thomy C., Vollertsen F. Microstructure and mechanical properties of laser-welded joints of TWIP and TRIP steels // Materials Science and Engineering: A. – 2010. – No. 7-8(527). – pp. 2071-2078. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.11.050>
19. O. Grässel, L. Krüger, G. Frommeyer, L. Meyer. High strength Fe-Mn-(Al, Si) TRIP/TWIP steels development-properties-application // International Journal

- of plasticity. – 2000. – Vol. 16. - No. 10-11. – pp. 1391-1409. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(00\)00015-2](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(00)00015-2)
20. S. Lindner. Joining processing advices of new Manganese-Chromium steels with high strength and without nickel for automotive-typical joining combinations // 4th International Conference on Steels in Cars and Trucks, Braunschweig. 2014.
21. L. Mujica, S. Weber, C. Thomy, F. Vollertsen. Microstructure and mechanical properties of laser welded austenitic high manganese steels // Science and Technology of Welding and Joining. – 2009. – Vol. 14. – No. 6. – pp. 517-522. <https://doi.org/10.1179/136217109X434243>
22. M. Rossini, P. Russo Spena, L. Cortese, P. Matteis, & D. Firrao. Investigation on dissimilar laser welding of advanced high strength steel sheets for the automotive industry // Materials Science and Engineering: A. – 2015. – Volume 628. – pp. 288-296. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.01.037>
23. U. Gürol. Welding of high manganese austenitic cast steels using stainless steel covered electrode // International Journal of Metalcasting. – 2023. No. 2 (17). – pp. 1021-1033. <https://doi.org/10.1007/s40962-022-00834-5>
24. E. Curiel-Reyna, A. Herrera, V. Castaco, M. Rodriguez. Influence of cooling rate on the structure of heat affected zone after welding a high manganese steel // Materials and Manufacturing Processes. – 2005. – No. 5 (20). – pp. 813-822. <https://doi.org/10.1081/AMP-200055142>
25. D. Keil, M. Zinke, H. Pries, Weldability of novel Fe-Mn high-strength steels for automotive applications // Welding in the World. – 2011. – Vol. 55. – pp. 21-30. <https://doi.org/10.1007/BF03321539>

References

1. Mahlami C. S., Pan X., World Foundry Congrees, 2014, No. 1, pp. 1-10. [in English].
2. Balogan S.A., *Journal of minerals and material characterization and engineering*, 2008, Vol. 3, pp. 277-289. [in English]. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2008.73021>
3. Youn-Soo H. et al, *China foundry*, 2010, Vol. 7, pp 177-182. [in English].
4. Sedmak A, *Austenitic Manganese Steels*, 10.04.2013, URL: <http://www.keytometals.com/art69.html>. [in English].
5. Tomaszewska A, *Technologies and Properties of Modern Utilised Materials*, 2011, Vol. 22. [in English]. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/22/1/012015>
6. Piston M., Bartlett L. et al, *Steel. Metals*, 2020, No. 10, pp. 1305. [in English]. <https://doi.org/10.3390/met10101305>
7. Alexandros Banis, Andrea Gomez, Vitaliy Bliznuk et. al, *Materials Science and Engineering: A*, 2023, Volume 875, Page 145109. [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145109>
8. Pribulova A., Babic J. and Baricova D, *Chemicke Listy*, 2011, pp. 430-432. [in English].
9. Chakrabarti S, *Cast austenitic manganese steels: somepracticalnote*, 18.04.2013, URL: http://www.cbqfoundry.com/files/Microsoft_PowerPoint_Austenitic_manganese_steel_Compatibility_Mode_2.pdf. [in English].
10. Mendez J., Ghoresly M., Mackay W. B. F. et. al, *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, No. 1 – 3, pp. 596-602. [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.033>

11. Sevcikova X., Krejci L., Konecna K, METAL 2013: *22nd International Conference on Metallurgy and Materials*, pp. 1117-1122. [in English].
12. Neslusan M., Mrkvica I., Cep R., Raos P, *Tehnicki vjesnik-Technical Gazette*, 2012, No. 4 (19), pp. 947-951. [in English].
13. Schmidova E., Hlavaty I., Hanus P, *Tehnicki vjesnik*, 2016, No. 3(23), pp.749-752. [in English]. <https://doi.org/10.17559/TV-20150105134929>
14. Shulik D., Kamarash L., Vilchko Ya., Dzugas P, *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*, 1992, No. 2, pp. 2-3. [in English]. <https://doi.org/10.1007/BF00769871>
15. Dahmen M., Lindner S., Monfort D., Petring D, *Physics Procedia*, 2016, Vol. 83, pp. 344-351. [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.036>
16. Dahmen M., Daamen M., Hirt G, *Extended abstract: 2nd International Conference on High Manganese Steel*, August 31 - September 4, 2014, Aachen, Germany. [in English].
17. Behm V., Otto M., Hufemann M., Huinink S., Springer A., Kaierle S, *32nd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2013)*, October 6-10, Miami, pp. 638-646. [in English]. <https://doi.org/10.2351/1.5062943>
18. Mujica L., Weber S., Pinto H., Thomy C., Vollertsen F, *Materials Science and Engineering: A*, 2010, No. 7-8(527), pp. 2071-2078. [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.11.050>
19. O. Grässel, L. Krüger, G. Frommeyer, L. Meyer, *International Journal of plasticity*, 2000, Vol. 16, No. 10-11, pp. 1391-1409. [in English]. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(00\)00015-2](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(00)00015-2)
20. S. Lindner, *4th International Conference on Steels in Cars and Trucks*, Braunschweig, 2014. [in English].
21. L. Mujica, S. Weber, C. Thomy, F. Vollertsen, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2009, Vol. 14, No. 6, pp. 517-522. [in English]. <https://doi.org/10.1179/136217109X434243>
22. M. Rossini, P. Russo Spena, L. Cortese, P. Matteis, & D. Firrao, *Materials Science and Engineering: A*. 2015, Volume 628, pp. 288-296. [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.01.037>
23. U. Gürol, *International Journal of Metalcasting*, 2023, No. 2 (17), pp. 1021-1033. [in English]. <https://doi.org/10.1007/s40962-022-00834-5>
24. E. Curiel-Reyna, A. Herrera, V. Castaco, M. Rodriguez, *Materials and Manufacturing Processes*, 2005, No. 5 (20), pp. 813-822. [in English]. <https://doi.org/10.1081/AMP-200055142>
25. D. Keil, M. Zinke, H. Pries, *Welding in the World*, 2011, Vol. 55, pp. 21-30. [in English]. <https://doi.org/10.1007/BF03321539>

Одержано 08.11.24

Problems of high-manganese steels welding

S. L. Schwab¹, PhD, Senior Researcher, serg.schwab@gmail.com,
ORCID 0000-0002-4627-9786

A. U. Semenko², PhD, Senior Researcher, semenko.au@gmail.com,
ORCID 0000-0002-0448-1636

Yu. P. Skorobagatko², PhD, Senior Researcher, yulka.ukr@gmail.com,
ORCID 0000-0002-1724-9895

O. M. Smirnov², Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department;
stalevoz@i.ua, ORCID 0000-0001-5247-3908

M. M. Voron^{2,3} PhD, Senior Researcher, mihail.voron@gmail.com,
ORCID 0000-0002-0804-9496

A. M. Tymoshenko², PhD, Senior Researcher, Marschal@i.ua,
ORCID 0000-0003-4038-1744

¹E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Summary

The sensitivity of high-manganese steels to deformation and heat treatment leads to problems with their welding. They consist in the tendency to crack formation in the zone of thermal influence during rapid heating and cooling. They are also characterized by sensitivity to overheating, which is expressed in the possibility of the carbides precipitation and structure heterogenization. Tendency to cold-hardening due to welding stress can also cause micro- and macro-defects and reduce the quality and reliability of the welded joint.

The work represents analysis of the modern global experience of high-manganese steels welding in various ways and with the use of various materials. The importance of maintaining the homogeneity of the chemical composition between the weld metal and the base material is shown in order to prevent the formation of martensite due to an austenite stability decrease. While welding dissimilar steels, the release of harmful carbides can occur, so such joints should be preheated with controlled cooling. Welding of high-manganese austenitic steels is not recommended to be performed with a consumable electrode made of stainless austenitic steel due to the formation of significant structural and phase heterogeneity, eutectics and cracks that can pass from the welding zone through heat affected zone to the base metal. As a result of the research analysis, it was established that the welding of high-manganese steels is best performed with electrodes with a chemical composition that is close to the materials being welded. Before welding, it is recommended to reduce the level of residual stress and cold hardening by heat treatment. Welding should be carried out under the conditions of minimizing the thermal load on the material, which is achieved by low-current and short-seam welding, as well as by preheating the metal. For welding thin parts from high-manganese steels, laser welding can be used. For larger thicknesses, welding with a fusible electrode in an environment of shielding gases (MIG\MAG) and argon arc welding with a non-fusible electrode (TIG) is applicable.

Keywords: high-manganese steels, TWIP, welding, structural and phase features, defects.