



Mechanical Properties of Weldments of High Strength Steel S700MC Made at Different Joint Preparation

Danail GOSPODINOV, Nikolay FERDINANDOV, Mariana ILIEVA, Rossen RADEV

Department of Material Science and Technology at the University of Ruse, Ruse, Bulgaria,
e-mail: nferdinandov@uni-ruse.bg; dgospodinov@uni-ruse.bg

Abstract

During the last years high strength steels find wide applications for heavily loaded welded constructions such as bridges, tanks, containers, cranes, civil and industrial engineering that work at room or elevated temperatures. As the carbon content of these steels is low they possess good weldability when manufacturers' recommendations are followed.

Mechanical properties of the weldments of high strength steels depend on different factors such as the cooling time $t_{8/5}$ that is defined by the maximal allowed values of the hardness and impact toughness of the heat affected zone. The used filler materials and protection methods are among the numerous factors that affect the mechanical properties of the weldments. However, the information about the joint preparation and especially about the weld gap is scanty or missing. Usually joint preparation of high strength steels is done according to EN ISO 9692-1:2013 and EN ISO 9692-2:2001 standards. But when the weld gap differs significantly from the standards recommendations it is important to research and determine its influence.

The present work introduces findings on the influence of joint preparation on some mechanical properties and structure of weldments of high strength steel S700MC welded using submerged arc welding.

Keywords: High strength steels, mechanical properties, welds structure

Механични характеристики на заварени съединения от високояка стомана S700MC при различна подготовка на частите

Данаил ГОСПОДИНОВ, Николай ФЕРДИНАНДОВ, Мариана ИЛИЕВА, Росен РАДЕВ

1. Увод

Създаването и прилагането на стомани с висока (HSS) и свръхвисока якост (UHSS) е резултатът от многогодишните усилия за усъвършенстване на съществуващите и разработване на нови видове стомани. Необходимостта от такива стомани е свързана със съвременните изисквания за оптимизиране на конструкциите от гледна точка на намаляване на тяхната маса при същевременно увеличаване на носещата им способност и тяхната надеждност.

Подобреният комплекс от механични свойства, съчетаващ висока якост и граница на провлачване при запазване на висока пластичност и жилавост се постига чрез комбинираното използване на различни механизми за уякчаване. Най-често се използват методите на комплексно микролегиране, съчетано с контролирано пластично деформиране и охлаждане.

Тези стомани са предназначени основно за изработване на отговорни, високо натоварени заварени конструкции, като: мостове, резервоари, кранове, съдове под налягане, промишлено и гражданско строителство, тръбопроводи, минно строителство и други проектирани за работа при стайна или понижена температура [1, 5, 6, 8].

Все по-масовото навлизане на строителните стомани с висока якост в инженерната практика е предопределено от предимствата им пред досега използваните стомани, а именно: по-малко конструкционно тегло, по-малки транспортни разходи, занижен обем на заваръчните шевове, увеличаване на сигурността срещу крехко разрушаване, на икономическата изгода и много други.

При използването на дребнозърнестите стомани е необходимо да се отчитат и някои техни особености, като например: конструкционните части трябва по възможност да бъдат натоварени предимно статично на опън; намаляването на дебелината на стената е по принцип ограничено от влиянието на околната атмосфера. Корозионната устойчивост на тези стомани е еднаква с тази на конвенционалните стомани. Якостта на умора на дребнозърнестите високояки стомани не е пропорционална на границата на провлачане, налице е силно изразена не пропорционалност. Поради силната им чувствителност към надрезно действие и най-малките дефекти влияят на склонността към образуване и разпространение на пукнатините.

За разлика от нормализираните стомани, за които може да се приеме, че съдържанието на въглерод е приблизително до 0,2%, при термомеханично уякчените стомани (например S700MC) то е подчертано по-ниско - 0,05...0,15%. Намаленото въглеродно съдържание, в съчетание с начинът на валцоване на ТМ-стоманите, техният химичен състав и много високата чистота гарантират добрата им обработваемост чрез студено пластично деформиране, намалена структурна слоистост и ивичност на неметалните включвания [2, 7, 9]. Тези стомани, в сравнение с конвенционалните такива, използвани за изработване на конструкции, са с подобрена сигурност срещу крехко разрушаване, поради по-добрите показатели на ударната жилавост, както при стайна, така и при понижена температура.

Дребнозърнестите стомани притежават гарантирана заваропригодност по всички ръчни, полумеханизирани и механизирани процеси на електродъгово заваряване, като 111, 135 и 121. Въпреки това при заваряването им е възможно да възникнат три основни проблема свързани с образуване на студени пукнатини, окрехкостяване на участъка на уедряване на зърното и разякчаване на зоната на термично влияние [3, 4].

Най-благоприятна изходна структура по отношение на жилавостта им се постига при малка линейна енергия на заваряване и използване на предварително нагриване (доколкото е необходимо то) главно в диапазона 80 ... 120°C. Температурата между отделните преходи не трябва да превишава 200°C, а най-подходящото време за охлаждане $t_{8/5}$ е в интервала от 10 до 25 s.

При подготовката на краищата за заваряване на тази група стомани се използват най-често препоръките на стандартите EN ISO 9692. Когато обаче заваръчната междина се различава съществено от препоръките поради обективни причини (явява се затварящо звено при производството на конструкцията) е важно влиянието на този фактор да бъде изследвано и установено.

2. Методика

Използваната в изследването стомана е високояка, дребнозърнеста термомеханично валцована стомана марка S700MC, под формата на листов прокат с дебелина 8 mm. Произведена е от фирма Voestalpine Stahl GmbH, Австрия.

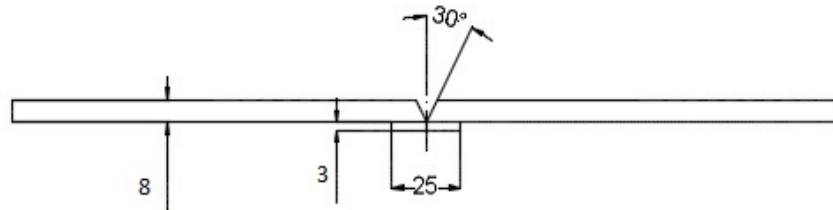
Химичният състав, по сертификата от фирмата производител е поместен в табл. 1

За получаване на заварените съединения е използвано подфлюсово заваряване с постоянен ток и обратна полярност на свързване DC (+). Използваните заготовки са с размери 500x150x8 mm, като са съобразени с изискванията на ISO 15614-1:2017.

Таблица 1. Химичен състав на стомана 700МС (по сертификат)

Химичен състав, [%]													
C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Nb	Ti	B
0.065	0.049	1.83	0.006	0.0006	0.051	0.025	0.009	0.002	0.009	0.008	0.049	0.123	0.0002

Подготовката на частите е съобразена до голяма степен с EN ISO 9692-2:2001, като изключение прави заваръчната междина, чието влияние се изследва. Скосяването е осъществено механично и е на 30° (общо 60°) без притъпяване (фиг.1).



Фигура 1. Подготовка на частите за заваряване

Използваните в изследването заваръчни междини са 0, 4, 6 и 8mm (според EN ISO 9692-2:2001 при дебелина на заваряваните части 8 mm междината трябва да е $b \leq 2mm$). Изследвания диапазон от междини се налага, тъй като при производството на реални конструкции (например телескопични стрели) калиброването на заготовките с цел постигане на изискванията на EN ISO 9692-2:2001 е много трудоемко и скъпо.

В процеса на работа са използвани оставащи подложки с размери 500x25x3 mm (фиг.1) и входно-изходни планки, върху които започва и завършва процеса на заваряване.

Като добавъчни материали е използван електроден тел с диаметър 1,2mm. Той е с означение: G 69 4 M Mn3Ni1CrMo съгласно EN ISO 16834:2012 (или съответно ER 100S-G съгласно AWS A 5.28). Флюсът е S A AB 1 56 AC H5 съгласно EN ISO 14174:2019.

В зависимост от заваръчната междина броят на проходите се изменя от два (без заваръчна междина) до шест (заваръчна междина 8 mm). Големината на тока се изменя от 240 до 270 А, при напрежение 31...32 V. Скоростта на заваряване се изменя в интервала 250...280 mm/min (за корена/корените на шева) и в интервала 120...180 mm/min за останалите проходи. Пълна информация за режимите на заваряване може да бъде намерена в [10].

Заварените съединения са изпълнени в позиция РА съгласно EN ISO 6947:2019. В процеса на работа е спазвана препоръката за междуслонна температура от 100°C [2]. За всяка заваръчна междина са изработени по две плочи – общо 8 за изследваната стомана.

За макроструктурният анализ е използван реактив със следния състав – 20.3 g FeCl₃, 12.5 ml HCl, дейонизирана вода до 200 ml разтвор. Макроструктурата е наблюдавана с увеличение от 1 до 10 пъти.

Твърдостта преди и след изпитване на опън на основния материал (ОМ), зоната на термично влияние (ЗТВ) и на заваръчния шев (ЗШ) е измерена по метода на Викерс, съгласно изискванията на EN ISO 6507-1:2018 с натоварване 1 kg.

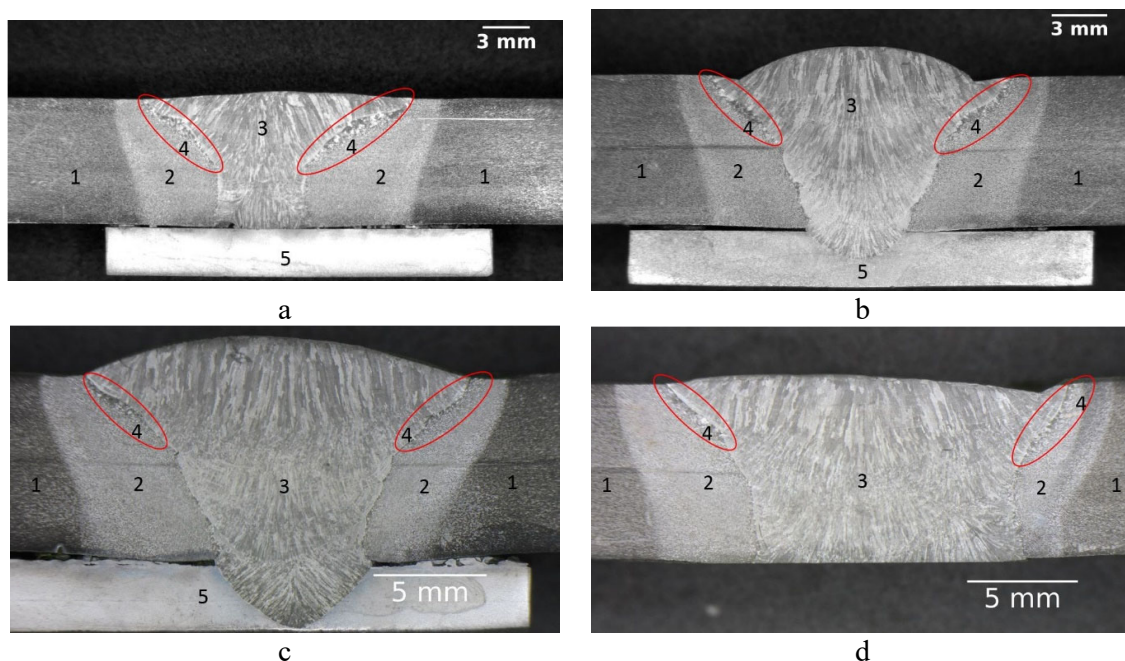
Изпитването на опън е извършено съгласно общите изисквания на EN ISO 6892-1:2020 и специфичните изисквания на EN ISO 4136:2012.

3. Резултати

3.1 Макроструктурен анализ

3.1.1 След заваряване

На фиг.2а, b, c and d са показани резултатите, получени след проявяване на макроструктурата на заварените съединения. С 1 е отбелязан основният метал; 2 – зоната на термично влияние; 3 – заваръчния шев; 4 – уедрена (частично разтопена) зона вследствие на термичното въздействие на границата зона на термично влияние – заварена зона; 5-подложка. От фигурата се вижда, че режима на заваряване оказва влияние, както на формата, така и на размерите на различните зони. Може да се отбележи липсата на дефекти в зоната на шева, както и наличието на пълен провар, което показва, че избраните добавъчни материали и режими на заваряване (скорост, ток, брой проходи) са подходящи за случая. Наличието на уедрена зона на границата между зоната на термично влияние и заваръчния шев (полуразтопена зона) е предпоставка за намалени механични свойства в тези обеми. Както се вижда от фигурата, най-ясно изразена е тази зона при режим 1.



Фигура 2. Макроструктура на заварените съединения преди изпитване на опън: а- заваръчна междина – 0 mm; б- заваръчна междина – 4mm; в- заваръчна междина – 6mm; г- заваръчна междина – 8mm.

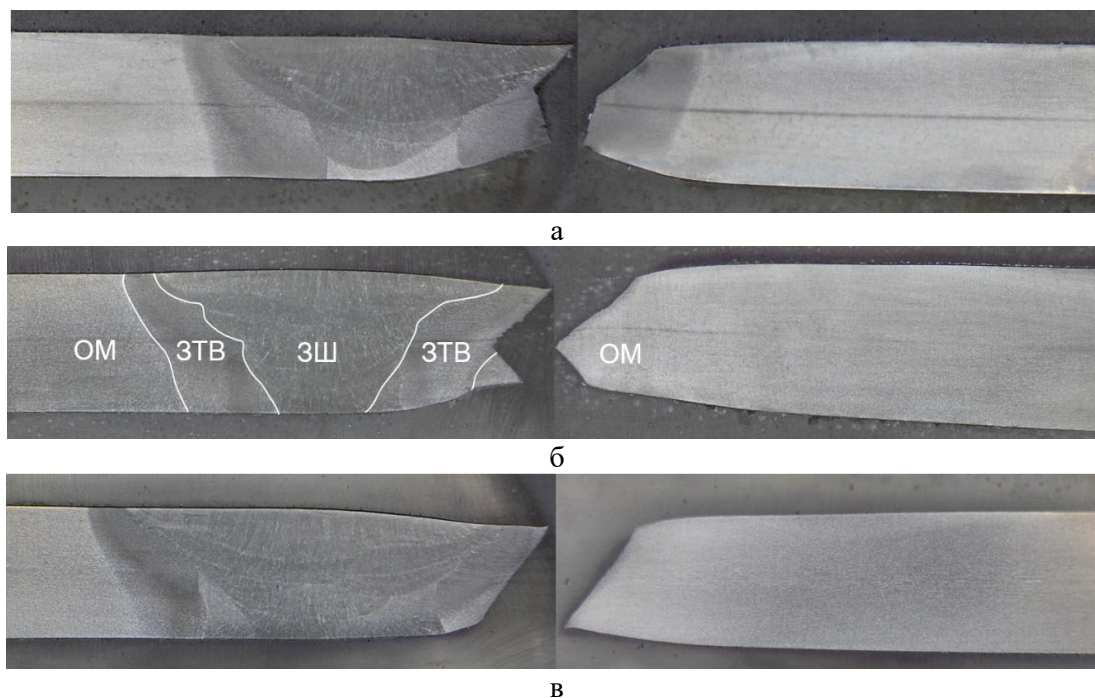
Според [2] наличието на такава зона при заваряване на термомеханично валцовани стомани е неминуемо, но то не оказва съществено влияние върху якостните свойства, ако са спазени определени технологични условия при реализиране на завареното съединение. Тези условия са свързани най-вече с количеството въвеждана топлина. Според [2, 10] при линейна енергия не по-голяма от 1 kJ/mm (за стомана 700МС и дебелина 8 mm) най-често разрушаването при изпитване на опън се наблюдава в основния материал или в заваръчния шев.

Многопроходното заваряване с ниска линейна енергия може да ограничи уедрените зони. За да се постигне максимална ударна жилавост на заварените съединения при

дебелина от 8 mm се препоръчва броят на проходите да бъде между 3 и 4 (заваръчна междина 4 mm) [2].

3.1.2 След изпитване на опън

На фигура 3 е показана макроструктурата на режими с междина 4, 6 и 8 mm след изпитване на опън. В случая макроструктурният анализ е използван за точното локализиране на мястото на разрушаване. От фигурата се вижда, че при заваръчна междина 4 mm разрушаването е комплексно, като част от него е в ЗТВ, а останалата част в зоната на прехода между ЗШ и ЗТВ.



Фигура 3. Макроструктура на заварените съединения след изпитване на опън: а - заваръчна междина – 4mm; б - заваръчна междина – 6mm; в - заваръчна междина – 8mm.

При заваръчна междина 6 mm част от разрушаването обхваща прехода между ЗТВ и ОМ, както и част от основния метал. Разрушаването при заваръчна междина 8 mm е изцяло в зоната на прехода между основния метал и зоната на термично влияние.

3.2 Твърдост

3.2.1 След заваряване

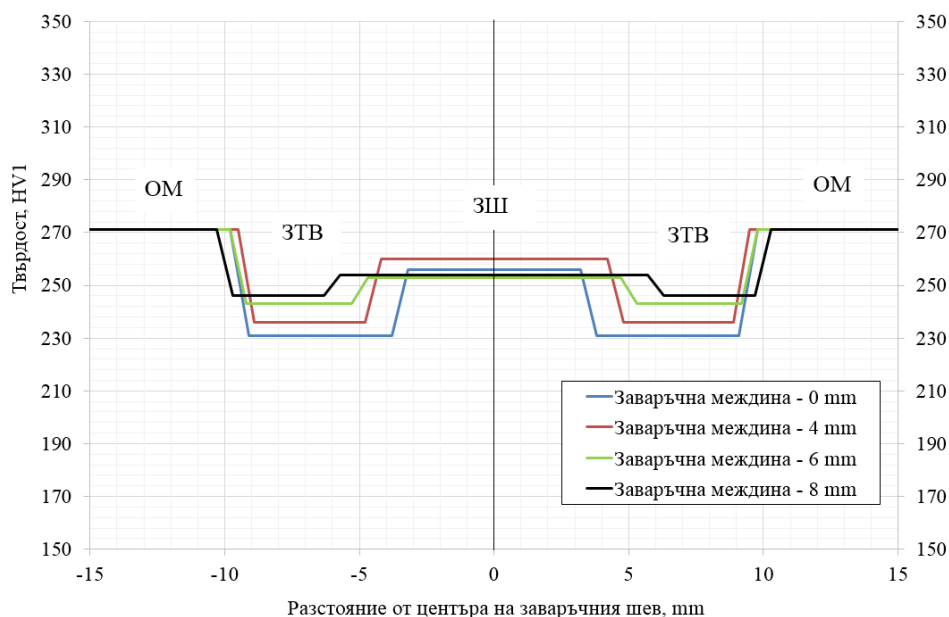
Измерването на твърдостта е извършено по метода на Викерс с натоварване 1 kg. Във всяка от изследваните зони (ОМ, ЗТВ, ЗШ) са направени по 10 измервания на равни отстояния, като разстоянието между тях варира в зависимост от широчината на зоните и се изменя в границите от 0.4 до 1 mm. В таблица 2 и на фиг. 4 са показани резултатите получени за различните режими. Те потвърждават тези поместени в специализираната литература [2, 3, 10]. Най-високите стойности са измерени в основния материал, а най-ниски в зоната на термично влияние.

Резултатите от режимите със заваръчна междина, в сравнение с тези получени без заваръчна междина показват тенденция за нарастване на твърдостта в ЗТВ, при същевременно запазване на стойностите ѝ в шева. Това е логично предвид факта, че

твърдостта в шева зависи основно от добавъчния материал, докато тази в ЗТВ зависи основно от термичния цикъл $t_{8/5}$.

Таблица 2. Твърдост след заваряване

	Твърдост, HV1		
	ОМ	ЗТВ	ЗШ
Режим 1 (заваръчна междина 0 mm)	271	231	256
Режим 2 (заваръчна междина 4 mm)		236	260
Режим 3 (заваръчна междина 6 mm)		243	253
Режим 4 (заваръчна междина 8 mm)		246	254



Фигура 4. Влияние на заваръчната междина върху размерите и твърдостта на отделните зони

Тези резултати показват, че при избраните режими на заваряване влиянието на заваръчната междина е по-скоро свързано с размерите на получаваните зони и не толкова с тяхната твърдост. Увеличаването на заваръчната междина води до нарастване на размерите на заваръчния шев и намаляване на размерите на зоната на термично влияние, както е показано на фигура 4. Предвид резултатите от макроструктурния анализ и анализа на твърдостта би следвало да се очаква подобряване на статичната якост, при нарастване на заваръчната междина поради констатираното нарастване на твърдостта в зоната на термично влияние.

3.2.2 След пластично деформиране в следствие на изпитване на опън

Резултатите, от измерването на твърдостта в ОМ, ЗТВ и ЗШ след изпитване на опън са показани в таблица 3. Сравняването на резултатите за твърдостта преди и след изпитване на опън показва, че промяна в твърдостта на ОМ няма, поради което е логично да се предположи, че основния дял на процеса на пластично деформиране е съсредоточен в ЗТВ и ЗШ. Това се доказва и от получените резултати за твърдостта в тези зони, която нараства и достига стойности близки до тези в ОМ.

Таблица 3. Твърдост на характерни зони в завареното съединение след уякчаване в следствие на изпитването на опън

	Твърдост, HV1		
	ОМ	ЗТВ	ЗШ
Режим 2 (заваръчна междина 4 mm)	272	255	276
Режим 3 (заваръчна междина 6 mm)		262	267
Режим 4 (заваръчна междина 8 mm)		272	270

3.3 Изпитване на опън

Резултатите от изпитването на опън са показани в таблица 4 и таблица 5. Поместените стойности са средно аритметични от изпитването на три пробни тела. Изработените пробни тела са стандартни, петкратни (EN ISO 6892-1:2020). Началната изчислителна дължина е съобразена допълнително с изискванията на EN ISO 4136:20120. Размери: начална изчислителна дебелина (a_0) равна на дебелината на ламарината 8 mm; начална изчислителна широчина $b_0=25$ mm; начална изчислителна дължина $L_0=80$ mm.

В таблица 4 са посочени резултатите от изпитването на опън в състояние на доставка на ламарината. Получените след заваряване и изпитване на опън механични свойства (табл.5) са отнесени към тях с цел оценяване на процентното им изменение.

Таблица 4. Резултати от изпитването на опън на основния материал в състояние на доставка

материал	$R_{p0.2}$	R_m	A_5
	MPa		%
S700MC	733	809	19

Получените и поместени в табл.5 резултати от изпитването на опън на заварените съединения показват, че както якостните, така и деформационните свойства намаляват спрямо тези на основния материал.

Таблица 5. Резултати от изпитването на опън на заварените съединения

Размер на заваръчната междина, mm	$R_{p0.2}$	R_m	A_5	Изменение на механичните свойства след заваряване		
	MPa		%	$R_{p0.2}$	R_m ,	A_5 ,
				%		
Режим 1	634	748	10	86.6	92.5	53
Режим 2	677	761	5.1	92.4	93.6	27
Режим 3	676	786	7.7	92.2	97.4	41
Режим 4	668	757	6.4	89.6	93.4	34

Намаляването на якостните характеристики не надвишава 10%, с изключение на $R_{p0.2}$ при режим едно. Намаляването на относителното удължение е значително и достига стойности до 27% (при междина 4 mm) от стойността на характеристиката в състояние на доставка. Основната причина за понижаването на пластичността е факта, че пластичната деформация е съсредоточена в ЗШ и ЗТВ, като разрушаването на образците настъпва преди деформацията да обхване зоните от основния материал.

4. Изводи

1. Все по-широкото използване на високояки стомани през последните години се дължи на само на завишените им механични характеристики/показатели, но и на сравнително добрите им технологични свойства. Повишените изисквания към заварените конструкции определят необходимостта и от по-сериозно изследване на факторите, влияещи върху поведението на високояките стомани по време на заваряване.
2. По-малката степен на уедряване на зърната в зоната, намираща се на границата между заваръчния шев и ЗТВ, се дължи на по-големия брой проходи определени от по-голямата заваръчната междина. Размерите на ЗТВ са приблизително еднакви.
3. В зоната на шева твърдостта се запазва без значение от броя на проходите. Твърдостта на ЗТВ нараства с увеличаване на броя на проходите от 231 до 246 HV1. Най-висока твърдост е измерена в ОМ, а най-ниска в ЗТВ.
4. Използването на режими на работа, осигуряващи по-високи стойности на линейната енергия (>1 kJ/mm), е свързано с нарастване на производителността за сметка на значително намаляване на пластичността (A_5). Понижаването на якостните характеристики ($R_{p0.2}$, R_m) е по-малко и е в рамките на около 10%.

Благодарности

Изследването е реализирано с финансова подкрепа по проект 2021-МТФ-01, към фонд „Научни изследвания“ на РУ „Ангел Кънчев“.

Литература

1. J. Górká, An influence of welding thermal cycles on properties and HAZ structure of S700MC steel treated using thermomechanical method, Scientific Proceedings IX International Congress "Machines, Technologies, Materials", 2012, pp. 41-44.
2. Information on [http:// www.strenx.com](http://www.strenx.com)
3. Kříž, M. Zajíček, Impact of welding process on mechanical properties of Domex 700MC steel and comparison of welded joint of S355NJ structural steel, Metal 2011, Brno, Czech Republic, 2011.
4. Dzyubyk, V. Palash, I. Khomych, S. Hrynus, Optimization of welding modes for high-strength low-alloy Domex 700 steel, Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science, Vol. 3, No. 2, 2017, pp. 47-54.
5. L. Mrňa, L. Kopecký, T. Němeček, Š. Mikmeková, I. Dohnal, Laser welding of Domex steel and heterogeneous weld with DC01, Metal 2013, Brno, Czech Republic, 2013.
6. M. Mazur, R. Ulewicz, F. Novy, P. Szataniak, The structure and mechanical properties of Domex 700MC steel, Communications, No. 4, 2013, pp. 54-57.
7. Lisiecki, Welding of thermomechanically rolled steel by Yb:Yag disk laser, Archives of metallurgy and materials, Vol. 60, 2015, pp. 2851-2859.
8. H. Ali, T. ALSultan, Study the microstructure and impact toughness of welded joints for Weldox 700MC high strength steel, International Journal of Mechanical Engineering and Technology, Vol. 9, 2018, pp. 402-408.
9. Silva, B. Szczucka-Lasota, T. Węgrzyn, A. Jurek, MAG welding of S700MC steel used in transport means with the operation of low arc welding method, Welding Technology Review, Vol. 91, 2019, pp. 23-28.
10. Ferdinandov, N., D. Gospodinov, M. Ilieva, R. Radev, Effect of the Root Gap on the Structure and Properties of High Strength Steel S700MC Welds, Key Engineering Materials Vol. 890, 2020, pp. 201-208.