

Grinzi de oțel din elemente formate la rece asamblate cu tehnologii de sudare cu productivitate ridicată

(WELLFORMED)

Cod: PN-III-P2-2.1-PED-2016-1684

Etapa 1

CUPRINS

Rezumatul etapei	1
1. STUDIU PRELIMINAR	2
1.1 Proiectare structuri metalice	2
1.2 Tehnologii de sudare	2
2. ÎNCERCĂRI PE MATERIALUL DE BAZĂ	3
3. ÎNCERCĂRI PE EPRUVETE SUDATE	5
3.1 Epruvete sudate în puncte prin presiune	5
3.2 Epruvete sudate prin brazare MIG.....	8
4. ANALIZE METALOGRAFICE	10
4.1 Analiza chimică	10
4.3 Analiza metalografică a îmbinărilor sudate electric prin presiune	10
5. ÎNCERCĂRI PE GRINZI LA SCARĂ REALĂ	15
6. DISEMINARE	19
Referințe	19

Rezumatul etapei

În cadrul etapei 1 a proiectului WELLFORMED au fost realizate pe rând activitățile asumate în planul de cercetare. În vederea stabilirii dimensiuni grinziilor la scară reală ce se doresc a fi încercate experimental, a fost realizată o predimensionare utilizând o situație de încărcări reală, corespunzător activității 1.1 din planul de cercetare.

S-a realizat un studiu amănunțit al tehnologiilor de sudare cu productivitate ridicată astfel încât utilizarea lor în domeniul construcțiilor să fie eficientă și să satisfacă criteriile necesare structurilor din oțel. Având în vedere aspectul economic, dar și faptul că la realizarea grinziilor de oțel din elemente formate la rece sunt utilizate table subțiri, tehnologiile de sudare cu productivitate ridicată alese a fi studiate sunt sudura în puncte și sudura MIG (brazarea), tehnologii pretabile la prefabricare și execuție automatizată/robotizată. Tehnologia de realizare a acestor suduri depinde de parametri care influențează rezistența și ductilitatea conexiunii dintre tablele subțiri.

Încercările realizate au avut la bază desenele de execuție pentru: teste de tracțiune pe material, teste pe îmbinări sudate și teste pe grinzi la scară reală, conform activității 1.2.

Epruvetele și tablele din care s-au realizat speci­me­nele la scară reală au fost furnizate de SC PROFILES SRL, fabricant de table cutate și profile formate la rece, conform specificațiilor din desenele de execuție.

Din materialul furnizat au fost realizate speci­me­nele îmbinate cu sudură în puncte și prin brazare MIG precum și grinzi­le la scară reală conform activității 1.4.

Încercările experimentale au demarat conform activității 1.5 prin teste­le de tracțiune pe materialul de bază, același material din care sunt realizate îmbinările sudate și speci­me­nele la scară reală a grinzi­lor. Au fost încercate îmbinările sudate realizate în combinații diferite de grosimi de tablă, cu două sau trei table în îmbinare. Odată cu prelucrarea datelor a fost făcută și o analiză statistică pentru stabilirea gradului de siguranță a acestor îmbinări. Grosimile considerate au fost alese funcție de utilizarea lor în realizarea grinzi­lor. Speci­me­nele pentru testarea sudurii au fost încercate prin modificarea parametrilor astfel încât să se ajungă nu doar la o rezistență dorită ci și la o ductilitate sporită specifică construcțiilor de oțel.

Conform Activității 1.6 din planul de cercetare, au fost încercate grinzi­le la scară reală monitorizând încărcarea și capacitatea de deformare. În final, au fost prelucrate datele obținute în urma încercărilor, în vederea eliminării erorilor sistematice/accidentale survenite.

Rezultatele au fost diseminate prin participarea la 3 conferințe și întâlniri tehnice, respectiv publicarea în reviste de specialitate, rezultate obținute în cadrul proiectului conform Activității 1.7.

1. STUDIU PRELIMINAR

1.1 Proiectare structuri metalice

În cadrul acestei activități (Act 1.1) au fost stabilite încărcările uzuale la care pot fi solicitate grinzi­le metalice într-o structură obișnuită în cadre în care prinderea grinzi­lor se realizează prin îmbinări rigide. În urma unei analize preliminare au rezultat că elementele trebuie realizate din: profile 2xC120x2.0 – pentru tălpi, tablă cu grosime de 0.8 mm – pentru inimă, tablă de 1.0 mm ca panouri de forfecare, șuruburi M12 pentru îmbinarea încastrată de la capătul grinzi­lor. De asemenea, odată cu stabilirea dimensiunilor minime pentru părțile grinzi­lor s-au realizat și desenele de execuție conform Activității 1.2.

1.2 Tehnologii de sudare

În vederea realizării unor procedee tehnologice optime pentru domeniul construcțiilor a fost necesar un studiu preliminar al detaliilor de realizare a procedurilor de sudare a tablelor subțiri din care sunt confecționate grinzi­le cu inimă cutată. S-a observat un interes crescut al acestei soluții pentru utilizarea ca și cadre principalele ale halelor parter, respectiv la poduri metalice. Principalul avantaj ale acestui tip de element este legat de faptul că, inima fiind ondulată sau cutată duce la creștea stabilității la flambaj, care conduce la o proiectare mai economică. Utilizarea unor inimi mai subțiri conduce la costuri mai mici pentru materiale, cu o economie de 10-30% în comparație cu secțiunile tradiționale fabricate prin sudare, și peste 30% comparativ cu grinzi­le laminate la cald. Înălțimea cutelor unei table ondulate sinusoidale folosită pentru inimi, este comparabilă cu o tablă plană de 12 mm grosime sau chiar mai mult. În soluțiile elaborate până în prezent, tălpile grinzi­lor sunt realizate din table plane, sudate de foaia de tablă sinusoidală pentru inimă, ceea ce implică și o tehnologie specifică de sudare. La aceste elemente tălpile oferă în special rezistență la încovoiere grinzi­lor, cu un aport foarte mic din partea inimii sinusoidale care oferă capacitatea de forfecare. Dimensionarea grinzi­lor cu inima din tablă ondulată este reglementată prin Anexa D a EN 1993-1-5 (2006), împreună cu aspectele specifice din EN 1993-1-1 (2006) și EN 1993-1-3 (2006).

O nouă soluție tehnologică a unei astfel de grinzi, compusă din inimi realizate tablă cutată trapezoidală și tălpi paralele cu secțiune compusă, realizate din profile de oțel cu pereți subțiri formate la rece, cu secțiune de tip C, a fost dezvoltată în cadrul Centrului de Cercetare CEMSIG al Universității Politehnica Timișoara (Dubină et al., 2013, 2015), la care legăturile dintre tălpi și inimă au fost realizate cu șuruburi autoforante. Este important de subliniat faptul că noua soluție, în ansamblu, este compusă 100% din elemente din oțel formate la rece, evitând combinația a două tipuri de produse, și anume elemente formate la rece pentru inimi și laminate la cald pentru tălpi. O prezentare detaliată a acestei soluții, a literaturii de specialitate legată de acest tip de element, respectiv a diferitelor tehnologii de îmbinare, a fost prezentată de Dubină et al. (2013, 2015).

Soluția tehnică prezentată mai sus (Dubină et al., 2013), a fost extinsă și pentru grinzi cu formă trapezoidală (Nagy et al., 2016, 2017). În acest caz, s-au realizat încercări experimentale pe două grinzi cu deschiderea de 12 m, având îmbinări de legătură diferite între tălpi și inimă.

Pentru a răspunde cerințelor ridicate din industria automobilelor, s-au dezvoltat procedee de sudare noi, care împing din ce în ce mai departe limitele fizice și mecanice ale tehnologiei sudării. Fronius este lider de piață în domeniul sistemelor de sudare robotizate, cu mai mult de 50 de ani experiență în industria automobilelor și industria furnizoare de componente auto. Aceste tehnologii, datorită avantajelor oferite au început să fie preluate și de sectorul de construcții metalice.

Dintre aceste tehnologii se pot remarca:

(1) Procedeele de sudare „la rece” CMT care garantează arcul electric cel mai stabil din lume și un control precis al procesului, oferind cordoane sudate și lipite aproape fără stropi, putând realiza sudarea tablelor subțiri, începând cu grosimi de la 0.6 mm, fiind folosit în multe alte aplicații. Brazarea MIG/MAG este un proces de îmbinare cu arc în care firul pentru materialul de adaos reprezintă unul din electrozi. Diferența dintre MIG și MAG este dată de gazul protector. Pentru soluția MIG, gazul protector este inert în timp ce MAG folosește gaz activ. Depunerea de material depinde de viteza de sudare și de energia arcului electric, brazarea realizându-se cu o eficiență de topire crescută a materialului de adaos. În cazul de față s-a folosit: gaz de protecție ARGON 100%, sarma electrod: CuAl8, CuSi3, CuSn7, sarma de 0.8 mm și 1.0 mm.

(2) Sudură cu laser care combină avantajele procedeelor de sudare industriale MIG și cu fasciculul laser, dar fără dezavantajele acestora. Acest lucru permite îmbinarea automatizată a diverselor piese din oțel, cu o viteză de până la 8 metri pe minut, într-o calitate de primă clasă. O primă aplicație în domeniul construcțiilor metalice a fost realizată de Landolfo et al. (2008), care a evaluat comportarea grinzilor compuse realizate din bare cu pereți subțiri formate la rece, asamblate cu sudură cu laser.

(3) Sudura în puncte este un procedeu de îmbinare de rezistență, a două sau mai multe foi de tablă de metal, de regulă oțel, fără să se folosească material de adaos. În zona de sudat, cu ajutorul a doi electrozi din aliaje de cupru, se aplică o forță de comprimare și se transmite curent electric, care produce încălzirea pieselor la nivel local. Ca urmare, materialul dintre electrozi se topește iar după întreruperea curentului de sudură materialele se solidifică și are loc îmbinarea, realizându-se punctul de sudură.

2. ÎNCERCĂRI PE MATERIALUL DE BAZĂ

În vederea cunoașterii în detaliu a tuturor caracteristicilor ce pot influența răspunsul grinzilor la acțiuni mecanice, s-au realizat teste de tracțiune pe specimene confecționate din același material care se va folosi în continuare la celelalte încercări.

Este cunoscut faptul că există diferențe majore între caracteristicile nominale și cele reale ale oțelurilor, iar tablele subțiri nu fac excepție, de aceea testele de tracțiune pe materialul de baza sunt o necesitate, acestea realizându-se în prezentul proiect conform normativului SR EN ISO 6892-1:2016 după marcarea și măsurarea specimenelor în vederea obținerii dimensiunilor reale.

Din fiecare grosime de tablă, au fost testate câte 5 specimene. În Fig. 1 se pot vedea, spre exemplificare, modurile de cedare ale specimenelor la tracțiune.

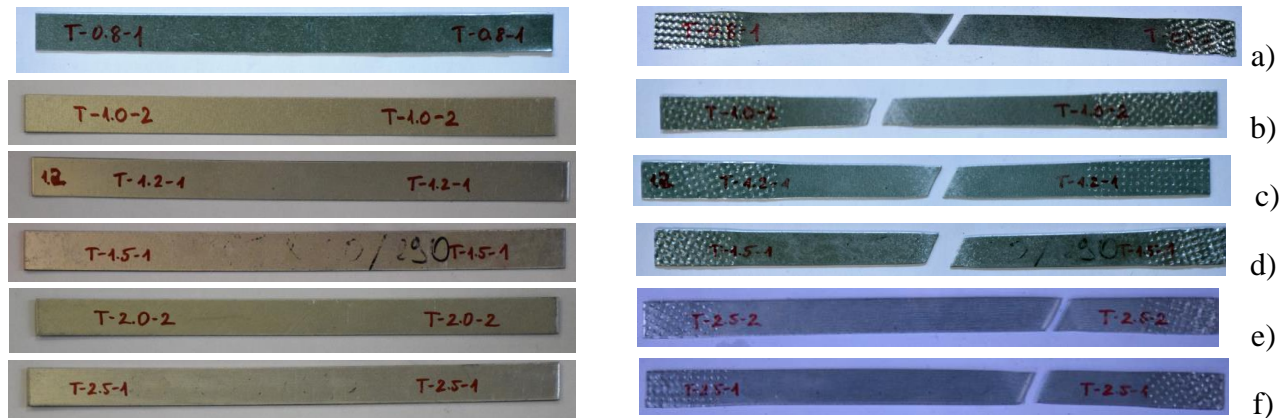


Fig. 1. Specimene de tracțiune – înainte și după testare a) $t=0.8$ mm, b) $t=1.0$ mm, c) $t=1.2$ mm, d) $t=1.5$ mm, e) $t=2.0$ mm, f) $t=2.5$ mm

În urma testelor, curbele de material sunt prezentate în Fig. 2, și au prezentat două forme diferite, cu palier de curgere (grosimi 1.2, 1.5 și 2.0 mm) și fără palier de curgere (grosimi 0.8, 1.0 și 2.5 mm).

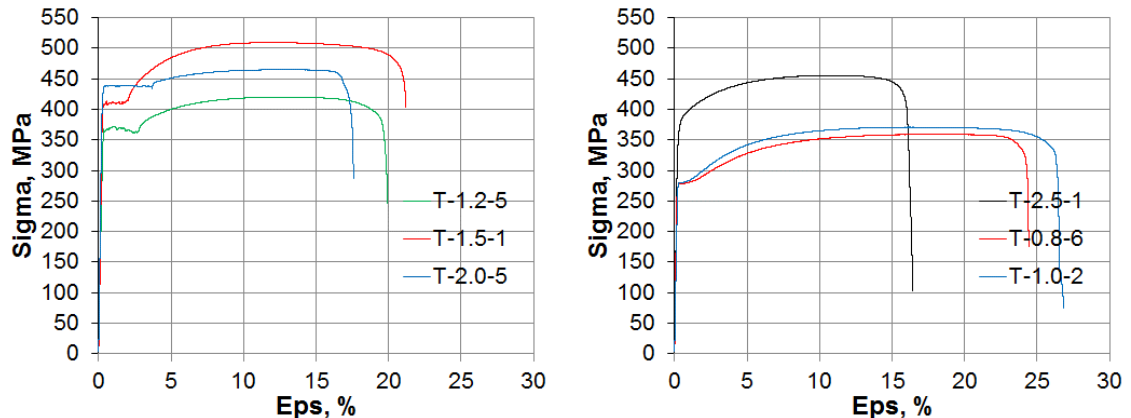


Fig. 2. Curbe de comportare material de bază

Valorile medii a încercărilor sunt redată în Tabelul 1.

Tabel 1. Caracteristici de material

Seria	L_0	$R_{p0.2}$	R_{eH}	e_{ReH}	A_c	R_{eL}	R_m	A_g	A_{gt}	A	A_t
	mm	MPa	MPa	%	%	MPa	MPa	%	%	mm	%
T=0.8	140	279.64	282.67	0.29	0.27	278.79	361.76	18.23	18.41	37.12	26.60
T=1.0	140	281.33	-	-	-	-	373.50	16.40	16.70	36.37	26.14
T=1.2	140	366.82	367.81	0.40	2.41	360.49	420.68	12.77	13.15	27.54	19.83
T=1.5	140	407.70	409.00	0.34	2.06	404.34	497.12	12.80	13.06	28.30	20.38
T=2.0	140	431.78	430.43	0.43	2.28	423.55	464.46	11.55	11.79	27.37	19.70
T=2.5	140	374.68	-	-	-	-	452.98	11.16	11.40	23.35	16.76

3. ÎNCERCĂRI PE EPRUVETE SUDATE

3.1 Epruvete sudate în puncte prin presiune

Pentru a crește viteza de fabricare a grinzilor, a fost adoptată sudarea în puncte ca tehnică de îmbinare, atât pentru țeserea tablelor cutate pentru a construi inima, cât și pentru conectarea inimii de tălpi. Combinațiile de tablă îmbinate cu sudură în puncte, încercate experimental, sunt prezentate în Tabelul 2. Mărimile t_1 și t_2 reprezintă grosimile tablelor din îmbinare, iar d_s este diametrul punctului de sudură. Au fost testate 189 de specimene. Dimensiunile specimenelor s-a ales în conformitate cu specificațiile prezentate în capitolul 8.4 din EN1993-1-3. Conform Tabelului 2 și a normei EN1993-1-3, toate tipurile de îmbinări au fost testate folosind un singur punct de sudură.

Trebuie subliniat faptul că un program experimental similar, dar concentrat pe combinații de tablă 0.7 și 0.8 mm, a fost testat de Bazar et al. (2015) în cadrul Centrului de Cercetare CEMSIG al U.P. Timișoara. Combinațiile de tablă testate mai sus au avut în vedere doar țeserea tablelor de inimă.

Echipamentul de sudură utilizat la realizarea specimenelor, Inverspotter 14000 Smart Aqua de la firma Telwin. Diametrul punctului de sudură d_s a fost determinat în conformitate cu EN 1993-1-3, pentru cazul sudurii de rezistență, adică $d_s = 5\sqrt{t}$ [cu t în mm], unde t este grosimea mai subțire a tablei conectate.

Încercările experimentale s-au efectuat la presa universală pentru încercări UTS. Distanța dintre palpatorii extensometrului a fost de 140 mm. Fig. 3 prezintă un specimen încercat cu un punct de sudură din setul SW-1.2-1.5. Modurile de cedare posibile sunt smulgerea punctului de sudură din materialul de bază și forfecarea punctului de sudură

Tabel 2. Tipuri de îmbinări prin sudură în puncte testate (un punct de sudură per specimen)

Denumire	t_1 [mm]	t_2 [mm]	Nr. teste	d_s [mm]	Denumire	t_1 [mm]	t_2 [mm]	Nr. teste	d_s [mm]
SW-0.7-0.7	0.70	0.70	7	4.2	SW-1.0-1.0	1.00	1.00	7	5.0
SW-0.7-0.8	0.70	0.80	7	4.2	SW-1.0-1.2	1.00	1.20	7	5.0
SW-0.7-1.0	0.70	1.00	7	4.2	SW-1.0-1.5	1.00	1.50	7	5.0
SW-0.7-1.2	0.70	1.20	7	4.2	SW-1.0-2.0	1.00	2.00	7	5.0
SW-0.7-1.5	0.70	1.50	7	4.2	SW-1.0-2.0	1.00	2.50	7	5.0
SW-0.7-2.0	0.70	2.00	7	4.2	SW-1.2-1.2	1.20	1.20	7	5.5
SW-0.7-2.5	0.70	2.50	7	4.2	SW-1.2-1.5	1.20	1.50	7	5.5
SW-0.8-0.8	0.80	0.80	7	4.5	SW-1.2-2.0	1.20	2.00	7	5.5
SW-0.8-1.0	0.80	1.00	7	4.5	SW-1.2-2.5	1.20	2.50	7	5.5
SW-0.8-1.2	0.80	1.20	7	4.5	SW-1.5-1.5	1.50	1.50	7	6.1
SW-0.8-1.5	0.80	1.50	7	4.5	SW-1.5-2.0	1.50	2.00	7	6.1
SW-0.8-2.0	0.80	2.00	7	4.5	SW-1.5-2.5	1.50	2.50	7	6.1
SW-0.8-2.5	0.80	2.50	7	4.5	SW-2.0-2.0	2.00	2.00	7	7.1
					SW-2.0-2.5	2.00	2.50	7	7.1

Un alt aspect important în cadrul investigației a fost regimul de sudare. Echipamentul de sudare are setări prestabilite din fabrică pentru diferite combinații de grosimi, așa numitul program „SMART”, dar și posibilitatea de a utiliza programe stabilite de utilizator. Tabelul 3 prezintă, spre exemplificare parametrii analizați pentru o serie din speciunile SW-1.2-1.5, unde următorii parametrii au fost considerați: curentul de sudură I_s (A), forța de apăsare F (daN), presiunea 1 bar și timpul de sudare, t_s (ms), pentru tipul electrodului cu diametrul 13 mm și raza curbura 32 mm.

Tabel 3. Regimuri diferite de sudură pentru setul de specimene SW-1.2-1.5

Regim	Denumire	I_s	Putere	F	Presiune	t_s
		(A)	(%)	(daN)	(bar)	(ms)
REG 1	SW-1.2-1.5-1	10366	70	365	6	380
REG 2	SW-1.2-1.5-2	10336	70	365	-	380
REG 3	SW-1.2-1.5-3	11088	75	483	6.8	600
REG 4	SW-1.2-1.5-4	11088	75	472	6.6	600
REG 5	SW-1.2-1.5-5	11055	-	457	6.4	600
REG 6	SW-1.2-1.5-6	11775	80	449	6.2	600

Fig. 3 prezintă setul de cinci epruvete SW-1.2-1.5 cu parametrii prezentați în Tabelul 3, înainte și după testare. Se poate observa că în toate cazurile modul de cedare a fost smulgerea punctului de sudură din materialul de bază.

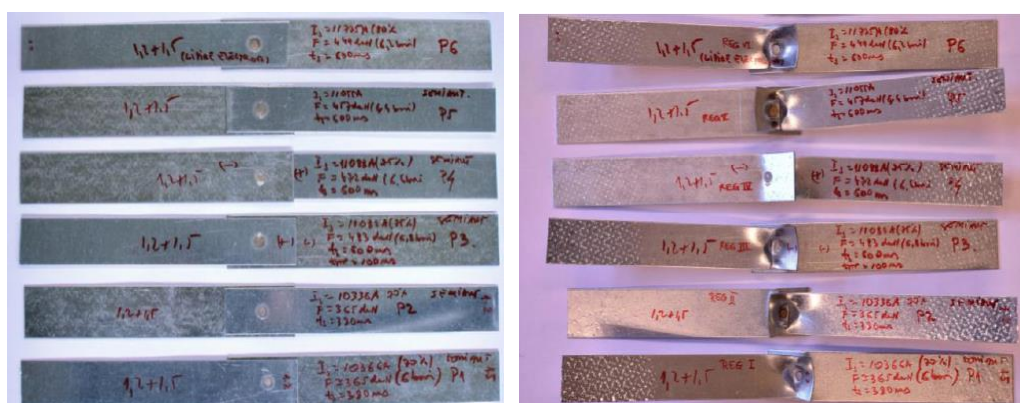


Fig. 3. Specimene sudate cu diferite regimuri de sudare

Fig. 4 prezintă comparativ curbele forță-deplasare pentru setul de specimene de mai sus. Se poate observa că toate speci-menele prezentate au capacitate și ductilitate foarte bune, forța maximă fiind în jurul valorii de 12 kN.

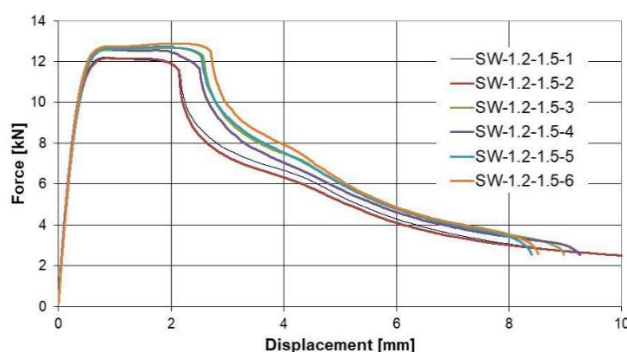


Fig. 4. Curbe forță-deplasare pentru diferite regimuri de sudare

În urma testelor efectuate pe toate speci-menele prezentate în Tabelul 3 se poate trage următoarea concluzie generală, și anume, atât capacitatea cât și ductilitatea obținută pentru speci-menele testate este foarte bună. Mai mult, comparativ cu aceleași speci-mene testate cu șuruburi autoforante (Dubina et al., 2015), capacitatea speci-menelor testate este dublă, dar mai puțin ductile comparativ cu speci-menele folosind șuruburi autoforante.

În Fig. 5 sunt redată curbele reprezentative pentru fiecare combinație de îmbinare a diferitelor grosimi de tablă.

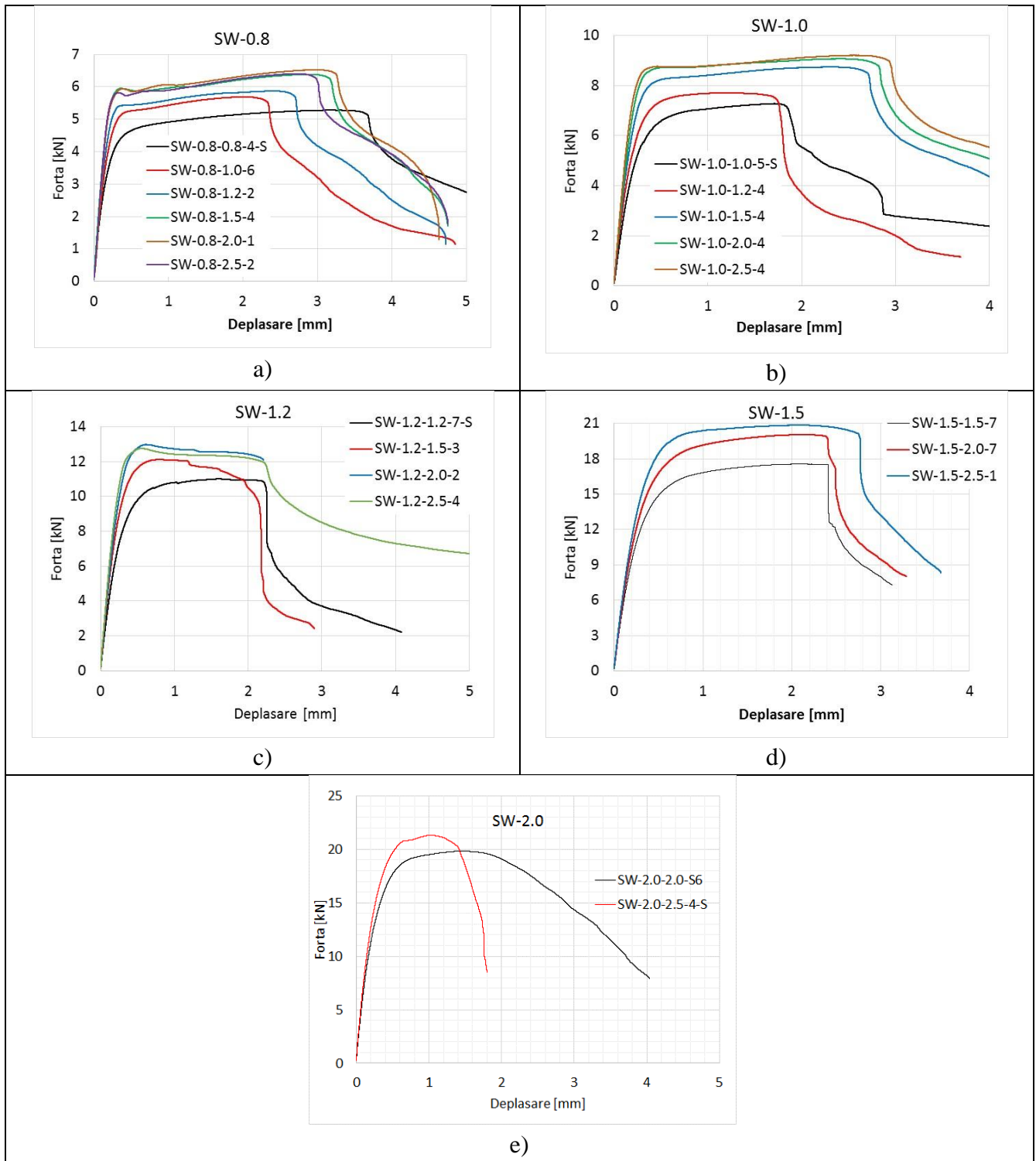
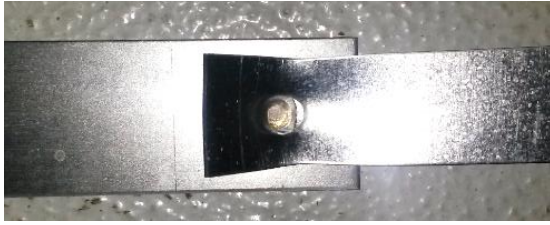


Fig. 5. Curbe forță-deplasare pentru combinațiile de table

Pe parcursul încercărilor au fost observate două moduri de cedare și anume debutonare, Fig. 6a, și ruperea interfețe Fig. 6b. Prima dintre acestea conferă o ductilitate sporită îmbinărilor și a rezultat pentru tablele subțiri, cu grosimea mai mică de 1.5 mm, în timp ce ruperea interfețe este o rupere fragilă și a rezultat la îmbinarea tablelor groase cu grosimea mai mare de 1.5 mm.



a)



b)

Fig. 6. Cedarea epruvetelor sudate în puncte prin presiune: a) debutonare, b) rupere interfețe

3.2 Epruvete sudate prin brazare MIG

Tehnologia de sudare prin brazare este asemănătoare sudării clasice, cu diferența ca temperatura la care este folosit materialul de adaos este mai mică ($\approx 900^{\circ}\text{C}$), evitând arderea materialului de bază.

În investigațiile preliminare, datorită cordoanelor de sudură necesare de dimensiuni reduse, s-a încercat realizarea unei suduri manuale însă parametrii geometrici ai acesteia variază semnificativ, Fig. 7a. Pentru evitarea acestei variații a sudurii, s-a realizat un stand pentru fixarea dispozitivului de sudare și automatizarea procesului de sudare, ajungându-se la forma dorită a acestei îmbinări, Fig. 7b.



a)

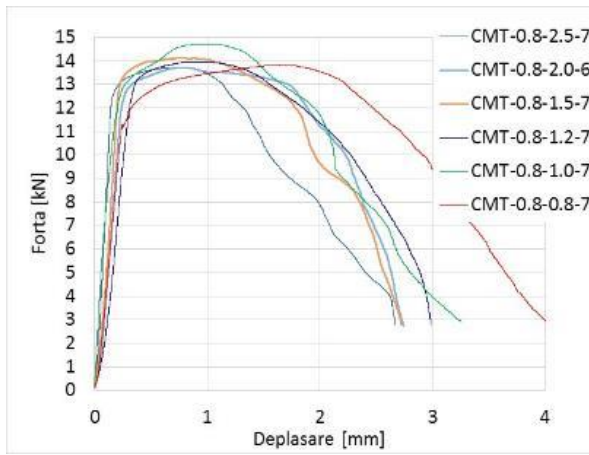


b)

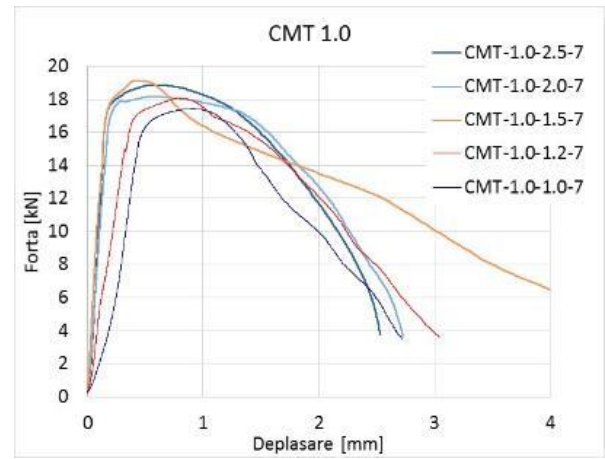
Fig. 7. Brazare MIG: a) manual, b) mecanizat

Și în cazul acestei tehnologii de sudare au fost încercați diferiți parametri pentru optimizarea procesului de sudare și a răspunsului îmbinării epruvetelor la solicitări mecanice.

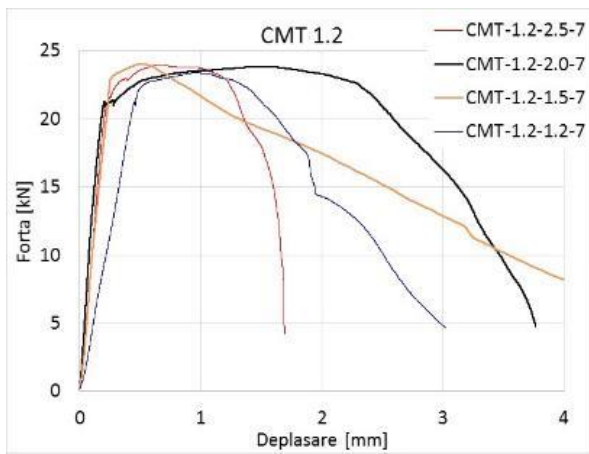
În Fig. 8 sunt redată curbele reprezentative pentru fiecare combinație de îmbinare a diferitelor grosimi de tablă.



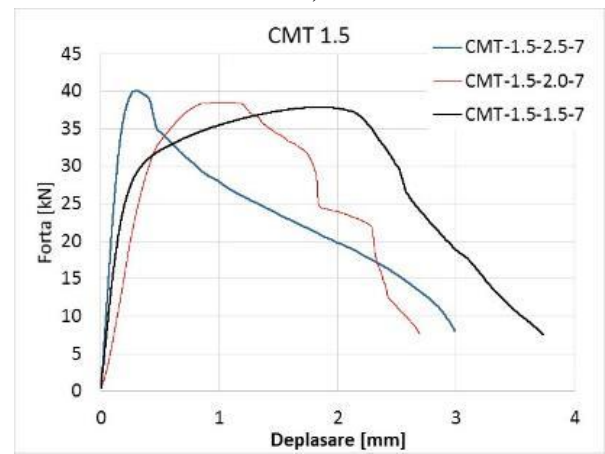
a)



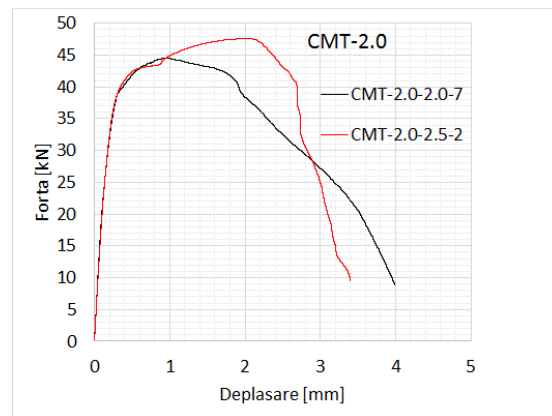
b)



c)



d)



e)

Fig. 8. Curbe forță-deplasare pentru combinații de grosimi de table

În cazul brazării MIG, există un singur mod de cedare acela al ruperii materialului în zona din apropierea îmbinării tablelor, în zona influențată termic, Fig. 9.



Fig. 9. Cedarea epruvetelor sudate prin brazare MIG

4. ANALIZE METALOGRAFICE

4.1 Analiza chimică

Materialele de bază au fost livrate conform standardului SR EN 10346:2010 - Produse plate din oțel acoperite continuu prin imersie la cald. Condiții tehnice de livrare (identice cu standardul european EN 10346:2009), impune o compoziție chimică conform celei din Tabelul 4.

Tabelul 4. Compoziția chimică a oțelului S250

Oțel	Element chimic, %				
	C max.	Si max.	Mn max.	P max.	S max.
S350	0,20	0,60	1,70	0,10	0,045

Verificarea acestei compoziții chimice (Tabel 5) a relevat diferențe față de standard pentru tablele cu grosime de 1.5 mm, respectiv 2.0 mm.

Tabel 5. Compoziția chimică a eșantioanelor de tablă S350

Element chimic, %	Grosime table, mm				
	0.8	1.2	1.5	2.0	2.5
Fe	94.4700	99.3400	92.4800	98.2700	99.1700
C	0.1412	0.1044	0.2764	0.4097	0.0316
Si	0.4354	0.0134	1.0350	0.2156	0.0159
Mn	0.2327	0.2548	0.6270	0.6600	0.5768
P	0.0009	0.0000	0.0231	0.0233	0.0000
S	0.0402	0.0162	0.0279	0.0089	<0.000
Cr	0.0430	0.0248	0.0965	0.0979	<0.005
Ni	0.0809	0.0299	0.1671	0.0637	<0.004
Mo	0.2469	0.0230	0.9361	0.0306	0.0310
Cu	0.0393	0.0516	0.0597	0.0806	0.0103
Al	>1.155	0.0415	>1.056	0.0248	0.0280
Ti	0.1180	<0.002	0.3456	<0.005	0.0181
V	0.0621	<0.000	<0.007	<0.002	<0.000
Co	0.2000	<0.000	0.4265	0.0076	<0.000
Nb	0.1095	<0.000	<0.011	<0.001	<0.007
W	>2.527	<0.000	>2.332	<0.000	<0.000

Conținutul de carbon ridicat la tablele cu grosime de 1.5 mm (0.2764%) și 2.0 mm (0.4097) poate avea implicații asupra calității îmbinărilor sudate realizate cu aceste table, putând conduce la obținerea unor structuri metalografice similare unui tratament termic de călire, care vor produce fragilizarea îmbinării sudate.

4.3 Analiza metalografică a îmbinărilor sudate electric prin presiune

Îmbinările sudate realizate au fost analizate cu ajutorul microscopului metalografic, stereoscopic (MS), utilizând mărimi de până la 4x, pentru a pune în evidență aspectele macroscopice specifice punctelor sudate. După cum se poate observa și în Fig. 10, toate punctele sudate au un aspect corespunzător.

Dimensiunile diametrelor punctelor sudate realizate, prezentare în Tabelul 6, confirmă calitatea corespunzătoare a îmbinărilor sudate și validează corectitudinea parametrilor tehnologici utilizați (atât după standardul specific producătorilor de autovehicule ($4 \cdot \sqrt{t}$) cât și după standardul SR EN ISO 14373:2015 ($3.5 \cdot \sqrt{t}$), unde t este grosimea tablei care se sudează).

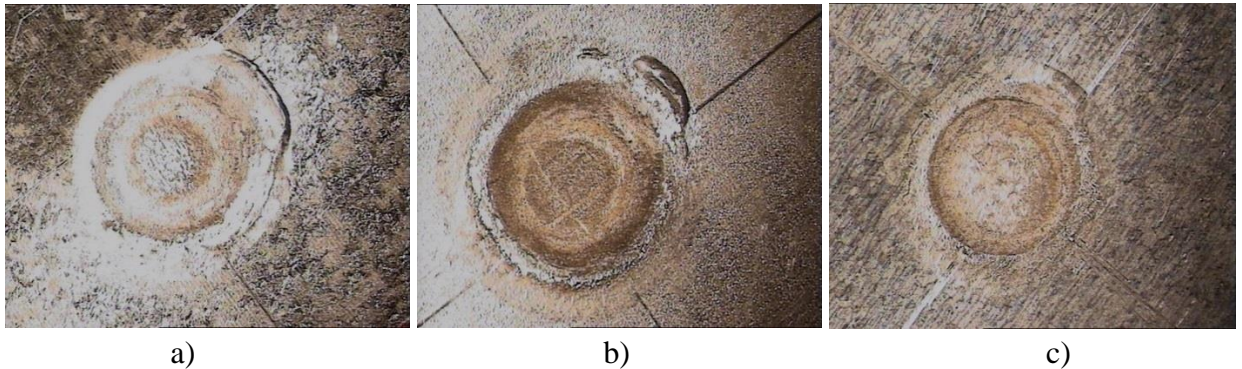


Fig. 10. Punct sudat, MS x1 Planul de prelevare a probelor metalografice:
a) table 1.5-1.5; b) table 2.0-2.0; c) table 1.2-1.2

Tabel 6. Dimensiune puncte de sudură

Simbolizare	t_1 mm	t_2 mm	d_{\min} mm	$d_{\text{măsurat}}$ mm
<u>Z1</u>	0.8	0.8	4.47	5.1
<u>Z2</u>	0.8	1.0	4.47	5.1
<u>Z3</u>	0.8	1.2	4.47	5.3
<u>Z4</u>	0.8	1.5	4.47	5.5
<u>Z5</u>	0.8	2.0	4.47	5.5
<u>Z6</u>	0.8	2.5	4.47	6.0
<u>AA</u>	1.0	1.0	5.00	5.4
<u>AB</u>	1.0	1.2	5.00	5.4
<u>AC</u>	1.0	1.5	5.00	5.5
<u>AD</u>	1.0	2.0	5.00	6.0
<u>AE</u>	1.0	2.5	5.00	6.2
<u>Y1</u>	1.2	1.2	5.48	5.6
<u>Y2</u>	1.2	1.5	5.48	5.8
<u>Y3</u>	1.2	2.0	5.48	6.0
<u>Y4</u>	1.2	2.5	5.48	6.4
<u>CA</u>	1.5	1.5	6.12	6.5
<u>CB</u>	1.5	2.0	6.12	7.0
<u>CC</u>	1.5	2.5	6.12	7.5
<u>X1</u>	2.0	2.0	7.07	7.5
<u>X2</u>	2.0	2.5	7.07	7.8

Analiza microscopică efectuată cu ajutorul microscopului stereoscopic pe fața interioară a punctului sudat, a arătat existența unor expulzări de Zn din stratul ce acoperă tablele sudate, din zona punctului sudat, ca urmare a temperaturii dezvoltate în timpul procesului de sudare și a presiunii dezvoltate între componentele sudate (Fig. 11).

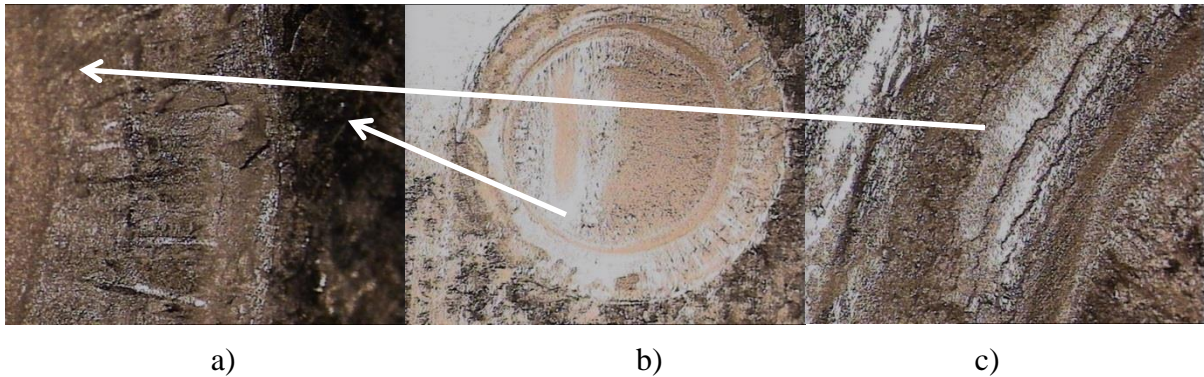


Fig. 11. Fisuri ale stratului de Zn și expluzări de Zn pe interiorul punctului sudat la îmbinarea 1.5-1.5; MS x4: a) imagine interior punct sudat; b) fisuri în stratul de Zn; c) expluzări de Zn

Pentru analize microstructurală au fost prelevate probe metalografice transversale, de de-a lungul unui plan perpendicular pe punctul sudat, care trece exact prin axa de simetrie verticală a acestuia (Fig. 12).



Fig. 12. Planul de prelevare a probelor metalografice

Suprafața transversală a fost șlefuită cu hârtii metalografice, de diferite granulații (200, 400, 600, 800), mergând de la granulație mare până la granulație fină, folosind permanent apă, pentru a evacua particulele de material îndepărtate de pe suprafața aflată în pregătire și pentru a evita încălzirea probei și modificarea astfel a structurii metalografice a eșantionului studiat.

Lustruirea suprafețelor astfel pregătite s-a realizat cu o pâslă și a pastă de lustruire cu particule de diamant cu diametrul de 4 μm .

Atacul metalografic s-a realizat cu NITAL 3%, punându-se în evidență structura metalografică, limitele dintre grăunți, forma și dimensiunea lor, precum și eventualele defecte de tipul fisurilor, porilor, incluziunilor nemetalice, etc.

Materialul de bază are o structura predominant feritică (grăunți de ferită, cu mici separări de perlită pe marginea grăunților feritici), tipică unui oțel hipoeutectoid (Fig. 13).

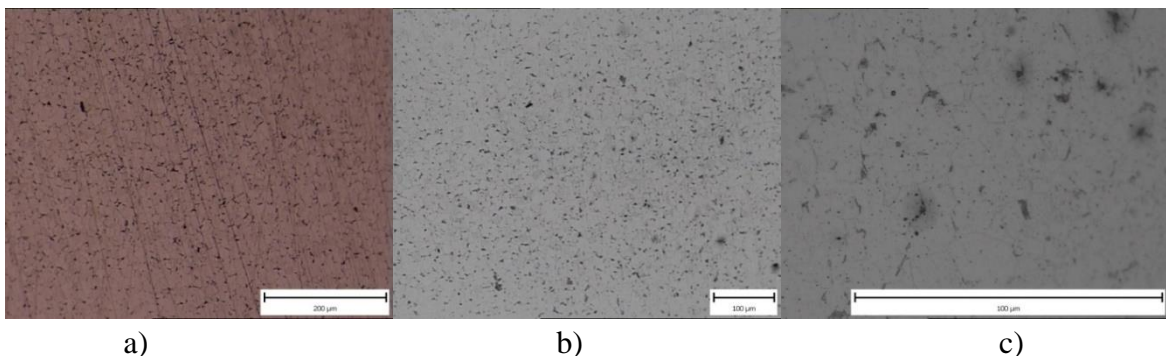


Fig. 13. Material de bază S350: a) MO x100; b) MO x100; c) MO x200

În zona de început a nucleului sudat, structura materialului de bază este modificată, ca urmare a efectului cumulat al temperaturii și al presiunii (forțelor de apăsare pe cele două componente). Se poate observa în Figura 14 că grăunții materialului de bază sunt fragmentați ca urmare a deformării plastice (în ZIT), iar în zona nucleului apar grăunți columnari, alungiți, orientați pe direcția de evacuare a căldurii, aspect specific unei solidificări din topitură.

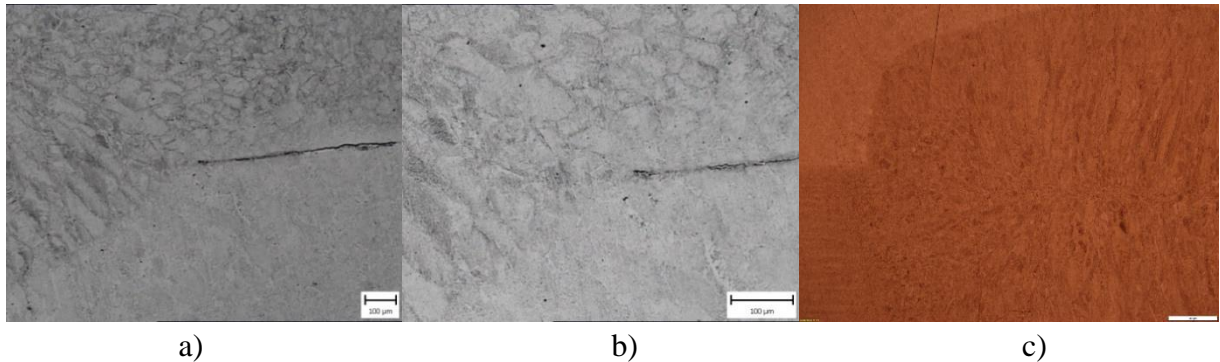


Fig. 14. Zona de început a nucleului a) MO x50; b) MO x100; c) MO x100

Zona nucleului (Fig. 15) este caracterizată prin grăunți columnari mari, orientați perpendicular pe planul de separație dintre cele două materiale de bază.

Analizând mai atent o îmbinare dintre o tablă subțire (de 1.2 mm) și una mai groasă (de 2.5 mm), în zona de separație dintre nucleu și ZIT (Fig. 15.c) se observă clar diferența dintre aspectul columnar al grăunților din zona nucleului și aspectul de grăunți fini din zona ZIT, trecerea fiind asigurată de un strat de grăunți echiaxiali (cu lățimea de 3-5 grăunți), în tabla mai groasă. Comparativ cu acest aspect, în zona similară din tabla mai subțire (Fig. 15.c), stratul de grăunți echiaxiali din zona de trecere dintre nucleu și ZIT este mult mai subțire, mai puțin pusă în evidență, iar grăunții sunt mult mai fini, ca urmare a deformării mai puternice a materialului în timpul procesului de sudare și a răcirii mai rapide, comparativ cu zona similară din tabla mai groasă.

O imagine generală a zonei nucleului este prezentată în Fig. 16, punând în evidență clar planul îmbinării dintre cele două componente, respectiv planul pe care sunt perpendiculari grăunții columnari din nucleu. Totodată această imagine generală evidențiază calitatea corespunzătoare a îmbinării sudate realizate.

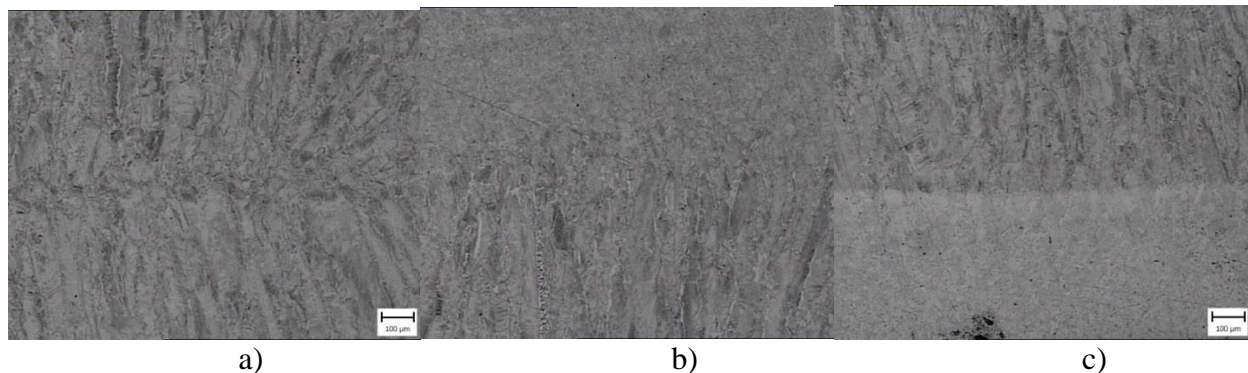


Fig. 15 Zona nucleului a) MO x50; b) MO x50; c) MO x50

Analizând, din punct de vedere al transformărilor fazice și structurale, îmbinările sudate la care participă tablele cu grosime 1.5 mm și cele cu grosime de 2.0 mm, se poate observa efectul conținutului ridicat de carbon.



Fig. 16. Zona nucleului MO x50

Ca urmare a încălzirii rapide, la temperaturi ridicate, peste temperatura de fuziune, urmată de o răcire cu viteză ridicată (ca urmare a evacuării căldurii atât în componentele reci, cât și în electrozii de sudare, care sunt răciți cu apă și sunt realizați dintr-un aliaj bun conducător de căldură), în zona nucleului se formează o structură cu grăunți columnari, puternic alungiți pe direcția evacuării căldurii (Fig. 17.a și b). Totodată, în unele regiuni ale nucleului, structura din interiorul acestor grăunți columnari este formată din martensită aciculară, fragilă, care va fragiliza întreaga îmbinare sudată (Fig. 18a, b și c).

Totodată, în ZIT, unde temperatura de încălzire a fost între temperaturile de transformare Ac1 și Ac3, structura este numai parțial martensitică (Fig. 19).

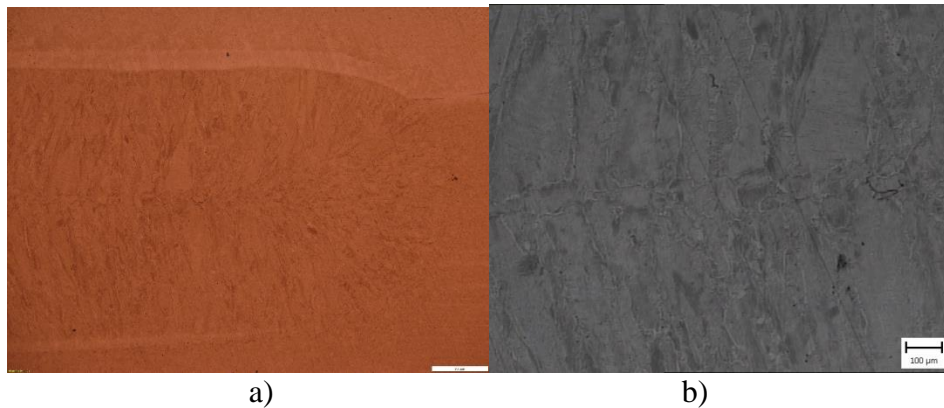


Fig. 17. Îmbinări sudate tablă 2.5 mm (în partea de jos a imaginilor) și 0.8 mm (în partea de sus a imaginilor): a) MS x5; b) MO x50

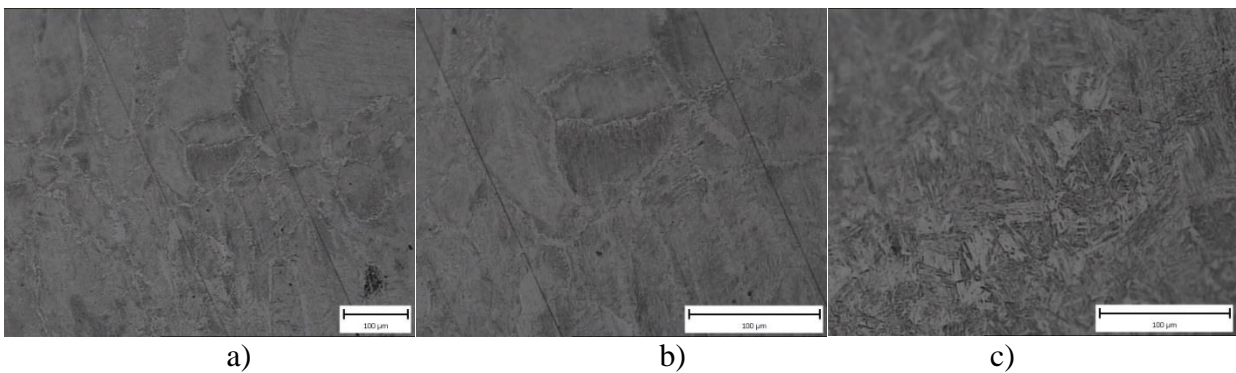


Fig. 18. Îmbinări sudate tablă 2.5 mm (în partea de jos a imaginilor) și 0.8 mm (în partea de sus a imaginilor): a) MS x100; b) MO x200; c) MO x200

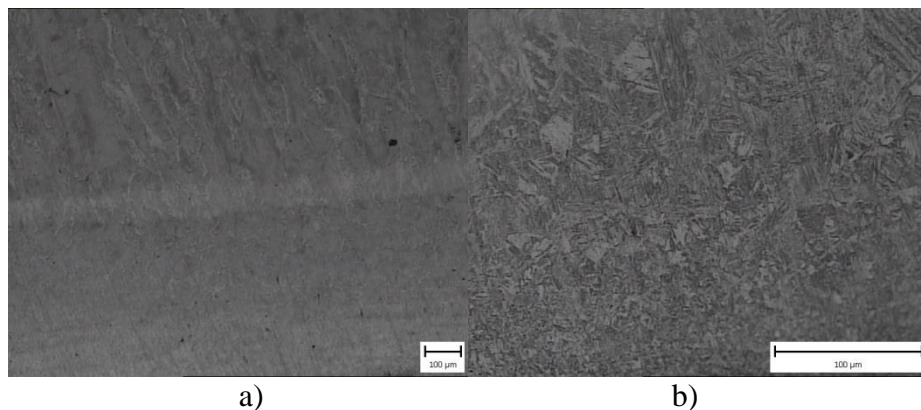


Fig. 19. ZIT la tabla de 2.5 mm: a) MS x50; b) MO x100; c) MO x200

5. ÎNCERCĂRI PE GRINZI LA SCARĂ REALĂ

Având parametrii tehnologiilor de sudare și rezultatele acestora pe epruvete, speciunile la scară reală au fost realizate considerând aceleași caracteristici de îmbinare a tablelor, cu scopul de a valida mai apoi modelele numerice.

S-au considerat a fi realizate 5 speciunile la scară reală, două adoptând soluția sudurii în puncte și trei speciunile folosind tehnologia de brazare MIG. Din punct de vedere al gabariturii cele 5 speciunile au dimensiuni egale, diferența constând în înălțimea tablei cutate, 60 mm și 45 mm pentru soluția sudurii în puncte, respectiv pentru brazarea MIG.

Pentru a avea o siguranță sporită a datelor de intrare, toate tablele și profilele folosite în realizarea grinzilor la scară reală, au fost numerotate și măsurate în vederea dispunerii acestora respectiv a cunoașterii dimensiunilor reale.

Indiferent de soluția de sudare, speciunile la scară reală au fost realizate în următoarea ordine: (1) prinderea tablelor cutate ce reprezintă inima continuă a grinzii, (2) fixarea panourilor de forfecare de la capetele speciunilor, (3) fixarea profilelor C formate la rece ca tălpi ale grinzilor metalice, Fig. 20.

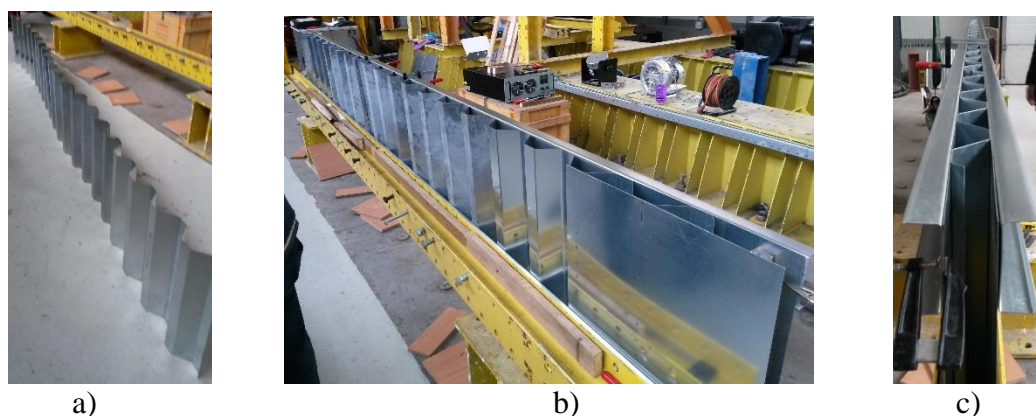


Fig. 20. Etapele realizării grinzilor la scară reală: a) prindere table cutate; b) prindere panouri de forfecare; c) Prindere tălpi - profile C formate la rece

Cele două grinzi realizate prin sudură în puncte (SW1 și SW2) au caracteristici asemănătoare cu excepția panourilor de forfecare care au grosimile de 1.0 mm respectiv 1.2 mm, și dispunerea punctelor de sudură pentru tabla cutată pe laturile înclinate ale tablei cutate respectiv pe ultima cută din planul grinzii (Fig. 21).

Țeserea tablelor cutate pentru a obține inima grinzilor s-a putut realiza doar folosind brațul CA4 al aparatului de sudare TELWIN, care permite distribuirea punctelor de sudură pe întreaga înălțime de

600 mm a grinzii. Profilele C formate la rece au putut fi prinse de inima grinzii cu ajutorul brațului CA1 care are avantajul dimensiunilor reduse care poate intra între cutele inimii grinzii.

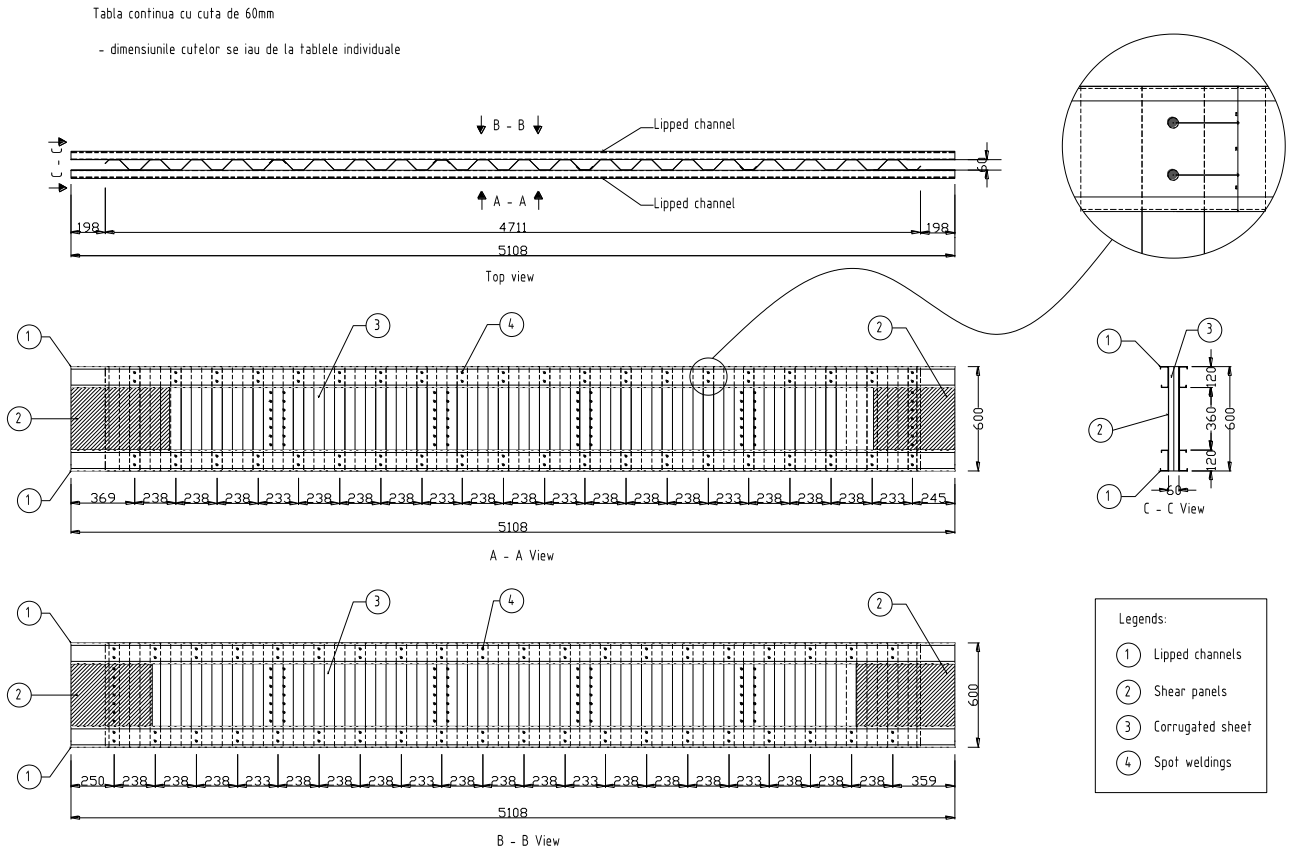


Fig. 21. Stadiu final grinda SW1

Grinzile la scară reală realizate prin brazare MIG au putut fi realizate după realizarea dispozitivului de fixare a tablelor sudate pentru a preveni deformațiile datorate temperaturilor mai ridicate de topire a materialului de adaos.

Specimenele realizate cu tehnologia de brazare MIG, CMT1, CMT 2 și CMT3, au gabarite similare diferența constând în grosimea panourilor de forfecare de la capetele grinzii unde s-au dispus table plane de 0.8 mm, 1.0 mm respectiv 1.2 mm.

O particularitate a montajului tablei cutate la grinzile CMT o reprezintă necesitatea fixării cu puncte de sudură a tablelor ce formează inima. Pentru a realiza speciamele conform pieselor desenate, au fost aplicate 3 puncte de sudură care se poate considera ca au un efect neglijabil față de capacitatea brazării MIG.

Pe parcursul montării ambelor grinzi a fost remarcată ușurința cu care au putut fi manipulate grinzile în vederea fixării diferitelor părți componente. Totuși spre deosebire de grinzile SW, grinzile CMT au avut nevoie de dispozitive special realizate în vederea evitării depărtării tablelor subțiri.

Încercarea grinzilor s-a realizat în standul de încercări al laboratorului Departamentului de Construcții Metalice și Mecanica Construcțiilor, în cadrul de încercări 2D cu rigiditatea mare.

Disponerea speciamelelor s-a realizat conform Fig. 23, luând în considerare încărcarea în planul grinzii, aplicată în 4 puncte prin dispunerea unui sistem de pârghii, și stabilizarea speciamelelor la deplasări în afara cadrului de încercare, prin folosirea unui sistem constructiv independent în care forțele de frecare sunt reduse la minim.

Tabla continua cu cuta de 45mm

- dimensiunile cutelor se iau de la tablele individuale

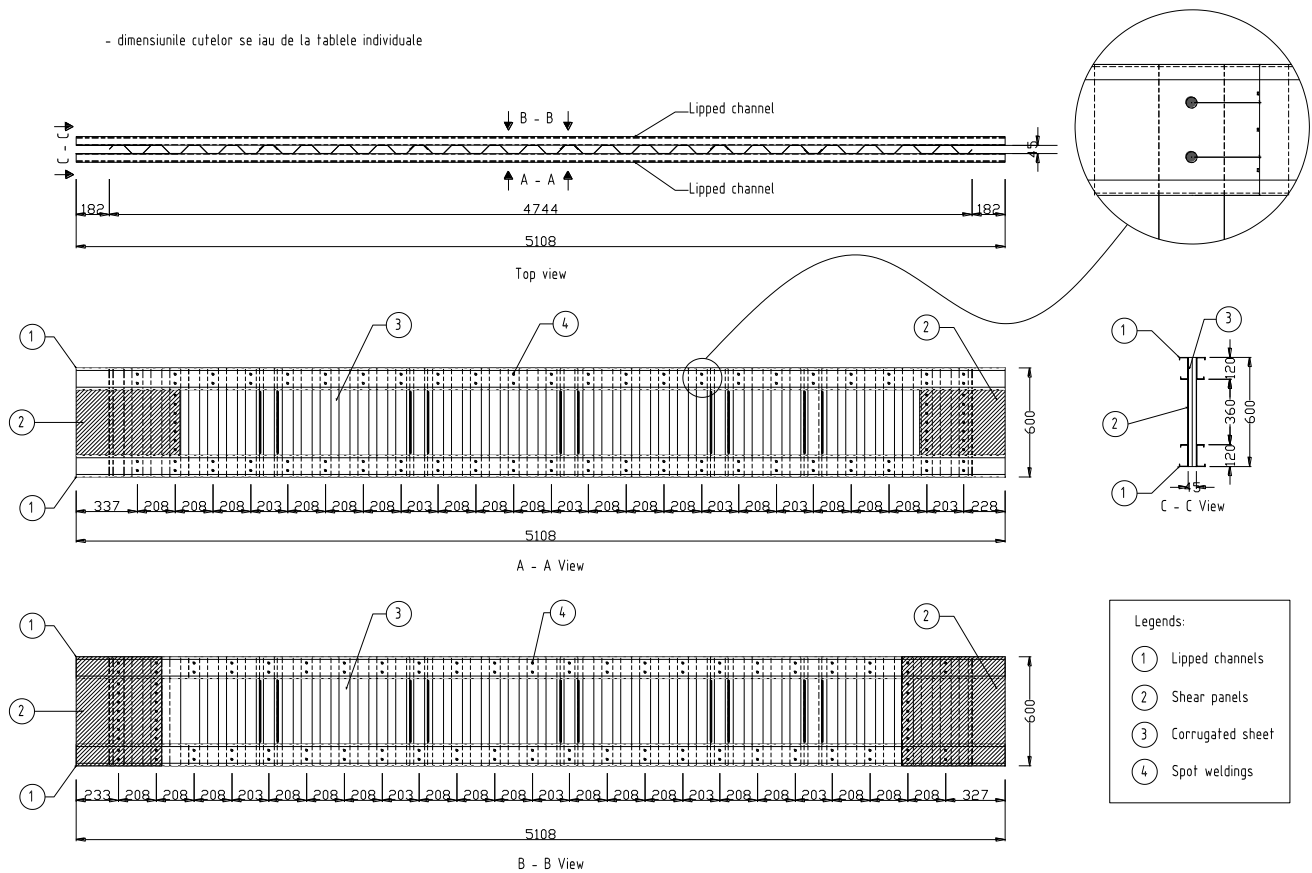


Fig. 22. Stadiu final al grinzilor CMT

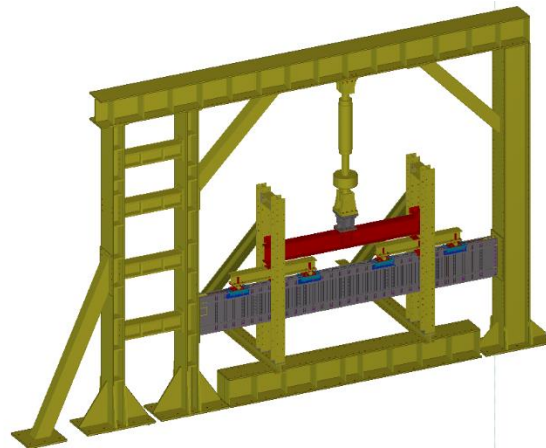


Fig. 23. Stand de încercare al grinzilor la scară reală

În vederea stabilirii răspunsului grinzilor de oțel, au fost înregistrate cu ajutorul stației de achiziție deplasările verticale ale grinzii și forța aplicată. Deplasările au fost determinate cu ajutorul captorilor de deplasare în timp ce forța a fost preluată de la traductorul pistonului hidraulic.

În urma rezultatelor obținute, se poate considera ca au fost obținute rezultate consecvente și corecte ceea ce va face posibilă realizarea următoarei etape de validare a modelelor numerice.

În ceea ce privește răspunsul grinzilor cu inimă cutată cu profile formate la rece se poate aprecia că ambele soluții au o comportare care asigură criteriile de rezistență și stabilitate structurală însă datorită dezavantajelor din timpul montajului, grinzile CMT sunt mai puțin productive decât grinzile

realizate cu soluția sudurii în puncte prin presiune unde viteza de realizare este una consistent superioară.



Fig. 24. Grinda cu inimă cutată SW1 înainte de încercare

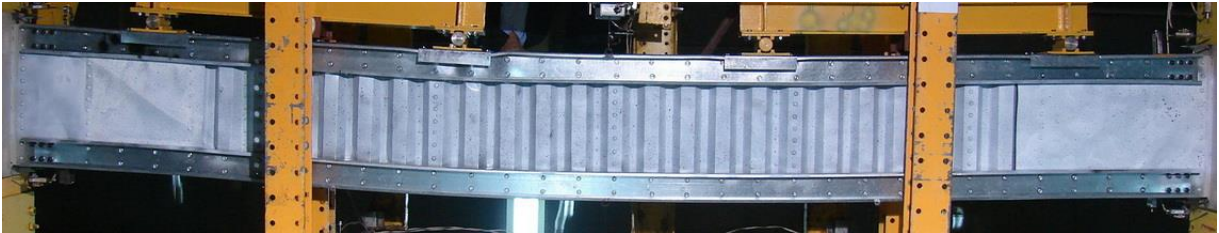


Fig. 25. Grinda cu inimă cutată SW1 după încercare

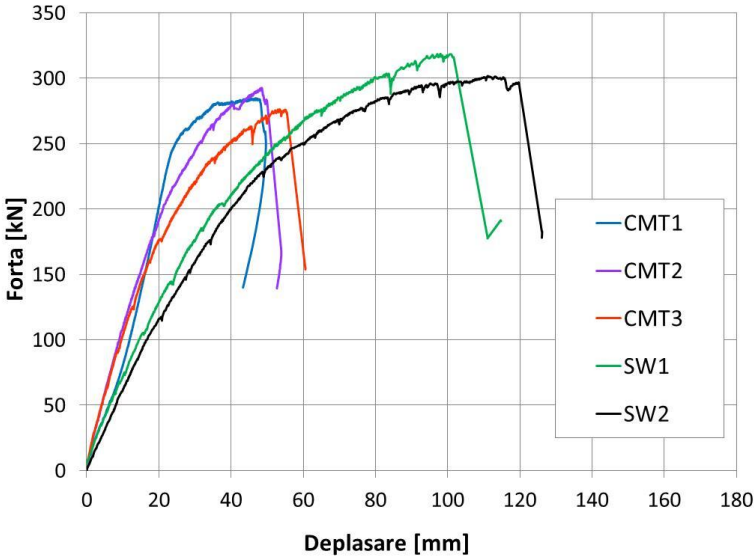


Fig. 26. Răspunsul grinzilor cu inimă cutată realizată din profile formate la rece

6. DISEMINARE

Rezultatele obținute în activitățile de încercări experimentale au fost trimise spre publicare într-o revistă de prestigiu, respectiv prezentate în cadrul conferințelor naționale și internaționale și a întâlnirilor tehnice TC7 după cum urmează:

- Ungureanu Viorel, Both Ioan, Burca Mircea, Benzar Ștefan, Nguyen Thai Hoang, Neagu Calin, Dubina Dan (2017). *Experimental Investigations on Spot Welded Built-Up Cold-Formed Steel Beams*. Advanced Materials Research/Trans Tech Publications, ISSN: 1662-8985 (acceptată spre publicare).
- Ungureanu Viorel, Both Ioan, Burca Mircea, Benzar Ștefan, Nguyen Thai Hoang, Neagu Calin, Dubina Dan (2017). *Experimental Investigations on Spot Welded Built-Up Cold-Formed Steel Beams*. The 12th International Conference on 'Structural integrity of welded structures - ISCS17, 09.11-10.11.2017, Timișoara, Romania (prezentare orală).
- Ungureanu Viorel, Both Ioan, Burca Mircea, Nguyen Thai Hoang, Neagu Calin, Dubina Dan (2017). Grinzi compuse realizate din profile formate la rece și inimă din tablă cutată, asamblate cu suduri în puncte. Lucrările celei de-a 15-a CONFERINȚE NAȚIONALE DE CONSTRUCȚII METALICE, 16-17/11/2017, Iași, Romania, Editura PIM Iași, ISSN 2559-0812, pp. 141-148.
- Ungureanu Viorel, Benzar Ștefan (2017). Experimental investigations on resistance spot welding of built-up cold-formed steel corrugated web beams. Proceedings of the International Conference Coordinating Engineering for Sustainability and Resilience. Dead Sea, Jordan, 3 – 8 May 2017, Jordan University of Science and Technology.
- Ungureanu Viorel, Dubina Dan (2017). *Experimental investigations on built-up cold-formed steel corrugated web beams assembled with welding*. ECCS TC7 – TWG 7.5 Meeting, Helsinki, Finland, 28.06-01.07.2017 (prezentare orală).

Referințe

- [1] EN 1993-1-5, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements, CEN, Brussels, 2006.
- [2] EN 1993-1-1, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN, Brussels, 2005.
- [3] EN 1993-1-3, Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-3: General Rules. Supplementary rules for cold-formed thin gauge members and sheeting, CEN, Brussels, 2006.
- [4] D. Dubina, V. Ungureanu, L. Gîlia, Experimental investigations of cold-formed steel beams of corrugated web and built-up section for flanges, *Thin-Walled Structures* 90 (2015) 159-170.
- [5] D. Dubina, V. Ungureanu, L. Gîlia, Cold-formed steel beams with corrugated web and discrete web-to-flange fasteners, *Steel Construction*, 6(2) (2013) 74-81.
- [6] Zs. Nagy, V. Ungureanu, D. Dubina, R. Ballok, Experimental investigations of cold-formed steel trapezoidal beams of screwed corrugated webs, *Proc. of the International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures - SDSS'2016*, Timisoara, Romania, 30 May-01 June 2016, pp. 387-394.
- [7] S. Benzar, V. Ungureanu, D. Dubina, M. Burca, Built-up cold-formed steel beams with corrugated webs connected with spot welding, *Advanced Materials Research*, 1111 (2015) 157-162.
- [8] G. Urbikain, J.M. Perez, L.N. Lopez de Lacalle, A. Andueza, Combination of friction drilling and form tapping processes on dissimilar materials for making nutless joints, *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2016.

- [9] A. Calleja, I. Taberero, A. Fernández, A. Celaya, A. Lamikiz, L.N. López de Lacalle, Improvement of strategies and parameters for multi-axis laser cladding operations, *Optics and Lasers in Engineering*, 56 (2014) 113-120.
- [10] P. Briskham, N. Blundell, L. Han, R. Hewitt, K. Young, D. Boomer, Comparison of self-pierce riveting, resistance spot welding and spot friction joining for aluminium automotive sheet, SAE 2006 Congress, Technical paper, 2006-01-0774, 2006.
- [11] N. Guenfoud, R. Tremblay, C.A. Rogers, Arc-Spot Welds for Multi-Overlap Roof Deck Panels, Twentieth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, St. Louis, Missouri, U.S.A., 3-4 November 2010, pp. 535-549.
- [12] G. Snow, Strength of arc spot welds made in single and multiple steel sheets, MsC Thesis, Blacksburg, Virginia, USA, 2008.
- [13] Y.J. Chao, Ultimate Strength and Failure Mechanism of Resistance Spot Weld Subjected to Tensile, Shear or Combined Tensile/Shear Loads, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 125 (2003) 125-132.
- [14] J. Radakovic, M. Tumuluru, Predicting Resistance Spot Weld Failure Modes in Shear Tension Tests of Advanced High-Strength Automotive Steels, *Welding Journal*, 87 (2008) 96-105.
- [15] Y. Miyazaki, S. Furusako, Tensile Shear Strength of Laser Welded Lap Joints, Nippon Steel Technical Report, No. 95, 2007, pp. 28-34.
- [16] S. Kodama, Y. Ishida, S. Furusako, M. Saito, Y. Miyazaki, T. Nose, Arc Welding Technology for Automotive Steel Sheets, Nippon Steel Technical Report, No. 103, 2013, pp. 83-90.
- [17] S.-W. Baek, D.-H. Choi, C.-Y. Lee, B.-W. Ahn, Y.-M. Yeon, K. Song, S.-B. Jung, Structure-Properties Relations in Friction Stir Spot Welded Low Carbon Steel Sheets for Light Weight Automobile Body, *Materials Transactions*, 51(2) (2010) 399-403.
- [18] D. Martínez Krahmer, R. Polvorosa, L.N. López de Lacalle, U. Alonso-Pinillos, G. Abate¹, F. Riu¹, Alternatives for specimen manufacturing in tensile testing of steel plates, *Experimental Techniques*, 40(6) (2006) 1555–1565.
- [19] R. Landolfo, O. Mammanna, F. Portioli, G. DiLorenzo, M.R. Guerrieri, Laser welded built-up cold-formed steel beams: Experimental investigations, *Thin-Walled Structures*, 46(7-9) (2008) 781–91.
- [20] E. Rusinski, A. Kopczyński, J. Czmochońska, Tests of thin-walled beams joined by spot welding, *Journal of Materials Processing Technology*, 157–158 (2004) 405–409.
- [21] EN ISO 6892-1, Metallic materials - tensile testing. Part 1: Method of test at room temperature, CEN, Brussels, 2009.