

Workshop lansare proiect KBS-Weld: Sistem bazat pe cunoștințe pentru structuri sudate și tehnologii

CONSIDERAȚII PRIVIND CORELAREA DINTRE PARAMETRII DE SUDARE GMAW A OȚELURILOR ȘI CARACTERISTICILE MECANICE ALE ÎMBINĂRILOR REALIZATE

Autor: Dr. Ing. Victor Verbițchi (ISIM Timișoara)

Timisoara, 31 Mai 2018

CUPRINSUL

1. Introducere
2. Experimente pentru determinarea influenței parametrilor asupra rezistenței la rupere la tracțiune
3. Determinarea rezistenței la rupere la tracțiune prin metoda regresiei în funcție de parametri
 - 3.1. Rezultatele experimentelor
 - 3.2. Analiza varianței pentru rezistența la rupere la tracțiune
 - 3.3. Modelul pentru rezistența la rupere la tracțiune (UTS)
 - 3.4. Maximizarea rezistenței la rupere la tracțiune prin optimizarea parametrilor
4. Experimente pentru determinarea influenței parametrilor asupra limitei de curgere la tracțiune
5. Determinarea limitei de curgere la tracțiune prin metoda regresiei în funcție de parametri
6. Determinarea ecuației de regresie pentru limita de curgere la tracțiune
7. Determinarea ecuației de regresie pentru adâncimea de pătrundere
8. Analiza varianței
9. Concluzii

Bibliografie

1. Introducere

- În orice proces de sudare, parametrii de sudare joacă un rol important în calitatea produselor, deoarece afectează proprietățile mecanice și geometria îmbinărilor sudate [1-6]. Totuși, selectarea parametrilor optimi pentru a îndeplini specificațiile cerute este complicată, deoarece calitatea sudurii poate fi afectată de mai multe variabile, cum ar fi compozițiile chimice ale materialului piesei de prelucrat și electrodului-sârmă, gazul de protecție și orice tratament termic [3, 7]. Mai mult decât atât, optimizarea experimentală prin încercare și eroare este foarte consumatoare de timp și costisitoare [5, 6, 8].
- În consecință, au fost utilizate mai multe metode și abordări, cum ar fi proiectarea experimentului (DoE) și tehnicile statistice pentru a depăși această problemă [3-5, 8]. Dintre diferitele metode utilizate, un proiect factorial fracțional a fost utilizat pe scară largă pentru a identifica parametri semnificativi ai procesului și pentru a optimiza calitatea produsului, deoarece este util pentru modelarea și analizarea problemelor care implică mai mulți parametri [9].
- În lucrarea [1], proiectarea factorială fracționată a fost utilizată pentru a determina efectul parametrilor de sudură MAG asupra rezistenței la rupere la tracțiune (ultimate tensile strength, UTS) a unui oțel nealiat.

1. Introducere (continuare)

- Tabla de oțel S45C este un semifabricat important din oțel cu conținut mediu de carbon, care este adecvat pentru structuri metalice, clădiri și aplicații marine. Este disponibilă sub formă laminată sau normalizată. Aceste table excelează în capacitatea de sudare și prelucrare mecanică și pot fi supuse diferitelor tratamente termice bazate pe standardul JIS G 4051-2009. Acest oțel oferă o limită de curgere de minimum 460 MPa în toate formele structurale și în plăci de până la 200 mm grosime [2, 17].
- Proiectarea experimentului (DOE) prin Metoda Taguchi și tehnicile experimentale factoriale fracționate au fost utilizate pentru a efectua experimentele. Analiza regresiei și alte proceduri statistice au fost utilizate de către cercetători pentru a dezvolta relația matematică dintre parametrii procesului de sudare și variabilele de ieșire ale îmbinării sudate, cum ar fi geometria rândului de sudură [2, 18, 19].

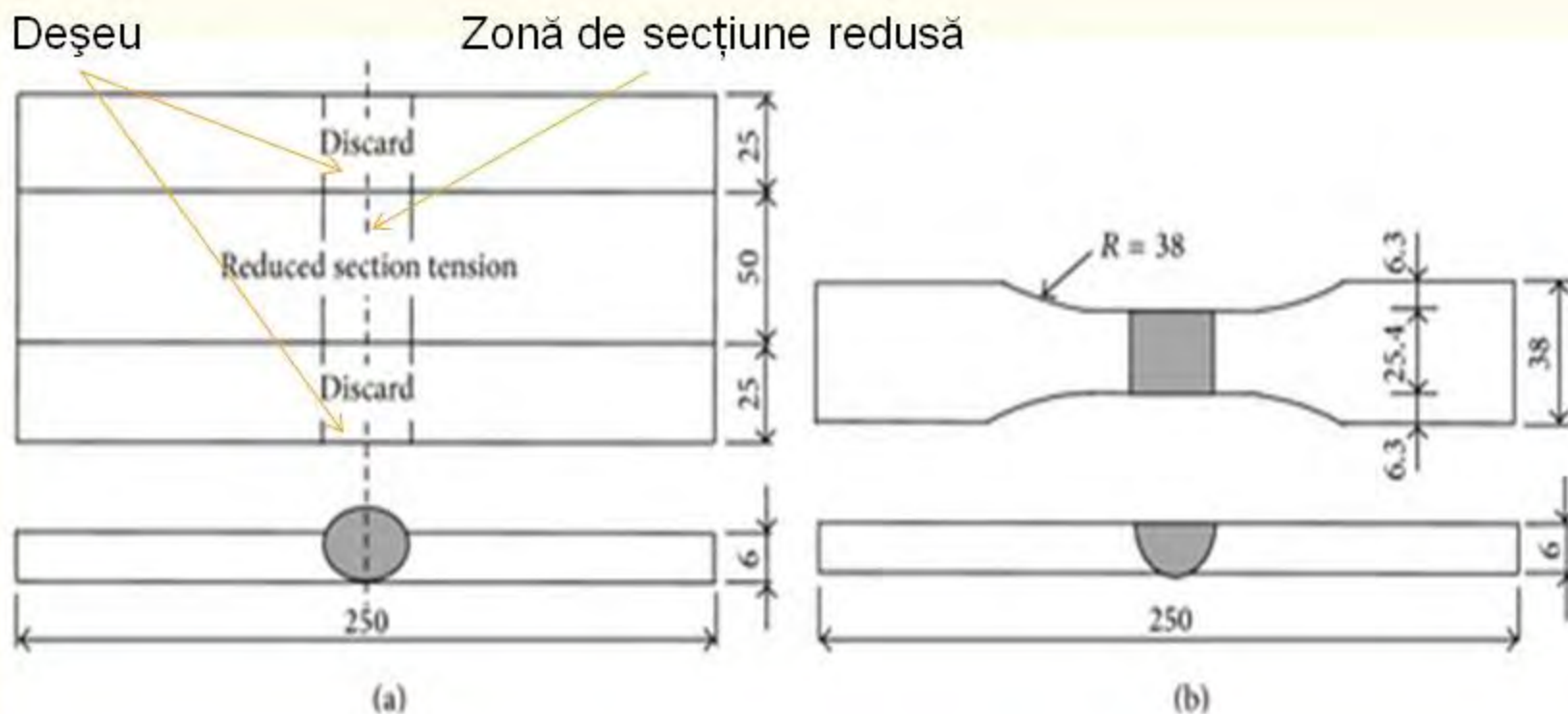
2. Experimente pentru determinarea influenței parametrilor asupra rezistenței la rupere la tracțiune [1]

2.1. Pregătirea probelor

- Oțelul nealiat ST37-2 cu grosimea de 6 mm a fost metalul de bază; acesta are limita de curgere de 340 MPa și o rezistență maximă la tracțiune de 470 MPa; compoziția sa chimică este prezentată în Tabelul 1. S-au pregătit probe de 125 mm × 100 mm și s-au curățat cu o perie, pentru o calitate mai bună a sudurii.
- Cu o singură trecere prin sudare MAG s-a format o îmbinare cap la cap cu rost zero, cum se prezintă în figura 1 (a).
- După sudare, au fost prelevate epruvetele pentru încercarea finală de rezistență la rupere la tracțiune (ultimate tensile strength, UTS), în conformitate cu Codul ASME, Secțiunea IX, cum se arată în figura 1 (b). Încercarea la tracțiune (UTS) a fost efectuată la temperatura camerei, folosind o mașină de încercare universală cu forța nominală (capacitatea) de 100 kN.

Figura 1. Schița unei îmbinări sudate [1]

(a) îmbinare cap la cap cu rost zero;
(b) epruvetă de încercare la tracțiune (dimensiuni în mm)



2.2. Echipamentul de sudare și materialele de adaos

- O sursă de sudare tip WIM MIG 350SEF, pentru sudare cu tensiune constantă și cu polaritate pozitivă la electrodul-sârmă (DC+), a fost utilizată pentru sudare.
- Electrodul-sârmă de tip AWS A5.18 ER70S-6, cu diametrul de 0,8 mm a fost metalul de adaos pentru sudare. Compoziția chimică a acestui electrod-sârmă este prezentată în tabelul 1. Ca gaz de protecție, pentru a preveni reacțiile chimice dintre suprafața fierbinte a piesei de lucru și atmosferă, a fost utilizat dioxid de carbon comercial (99,98% CO₂).

Tabelul 1. Compoziția chimică a metalului de bază și a sârmei-electrod [% de masă] [1]

Nr. crt.	Material						
		C	Si	Mn	S	P	Fe
1	Metal de bază St 37-2	0,12	0,04	0,82	0,003	0,012	Rest
2	Sârmă-electrod ER 70S-6	0,08	0,58	1,15	0,01	0,014	Rest

2.3. Selectarea parametrilor de sudare GMAW (MAG) și a nivelurilor acestora

- S-au investigat șase parametri de intrare cu intervale recomandate de un ghid de sudare [11] și limitate de caracteristicile sursei.
- Cele două niveluri ale factorilor de intrare utilizați sunt prezentați în tabelul 2.

Tabelul 2. Parametrii de intrare ai sudării și nivelurile lor [1]

Nr. crt.	Parametrul	Unitatea de măsură	Notăție	Nivel redus (-1)	Nivel înalt (+1)
1	Viteza de avans a sârmei-electrod	m / min	F	7	19
2	Tensiunea de sudare	Volt [V]	V	20	30
3	Viteza de sudare	mm / min	S	200	500
4	Unghiul de deplasare	Grade [°]	A	60	80
5	Distanța duză-piesă	mm	D	7	15
6	Debitul gazului de protecție	Litri / min	G	10	20

2.4. Proiectarea experimentelor

- Programul de experimentări a folosit un proiect factorial fracțional 2^{6-2} , ceea ce înseamnă 16 combinații. Două repetări au fost executate pentru fiecare combinație, dând un total de $2 \times 16 = 32$ de experimente.
- Schema experimentală a fost generată de software-ul MINITAB [12] unde eroarea sistematică a fost evitată prin atribuirea aleatorie a parametrilor, cum se arată în tabelul 3.

3. Determinarea rezistenței la rupere la tracțiune prin metoda regresiei în funcție de parametri [1]

3.1. Rezultatele experimentelor

- Tabelul 3 prezintă rezultatele obținute.
- Software-ul statistic, MINITAB, a analizat datele și a generat modelul pentru determinarea rezistenței la rupere la tracțiune (UTS).

Tabelul 3. Matricea proiectului de experimente și rezultatele [1]

Ordinea de execuție	F	V	S	A	D	G	UTS [MPa]	Ordinea de execuție	F	V	S	A	D	G	UTS [MPa]
1	1	-1	1	-1	-1	1	173	17	1	1	-1	1	-1	-1	211
2	1	1	-1	-1	-1	1	265	18	1	-1	-1	1	1	1	250
3	-1	-1	-1	-1	-1	-1	57	19	-1	-1	1	-1	1	1	73
4	1	-1	1	1	-1	-1	533	20	-1	-1	-1	-1	-1	-1	549
5	-1	1	1	1	-1	1	124	21	1	1	-1	1	-1	-1	137
6	1	1	1	1	1	1	278	22	-1	1	-1	-1	1	1	325
7	-1	1	-1	-1	1	1	124	23	-1	-1	1	1	1	-1	93
8	1	-1	1	1	-1	-1	306	24	-1	-1	1	-1	1	1	306

Tabelul 3. Matricea proiectului de experimente și rezultatele [1] (continuare)

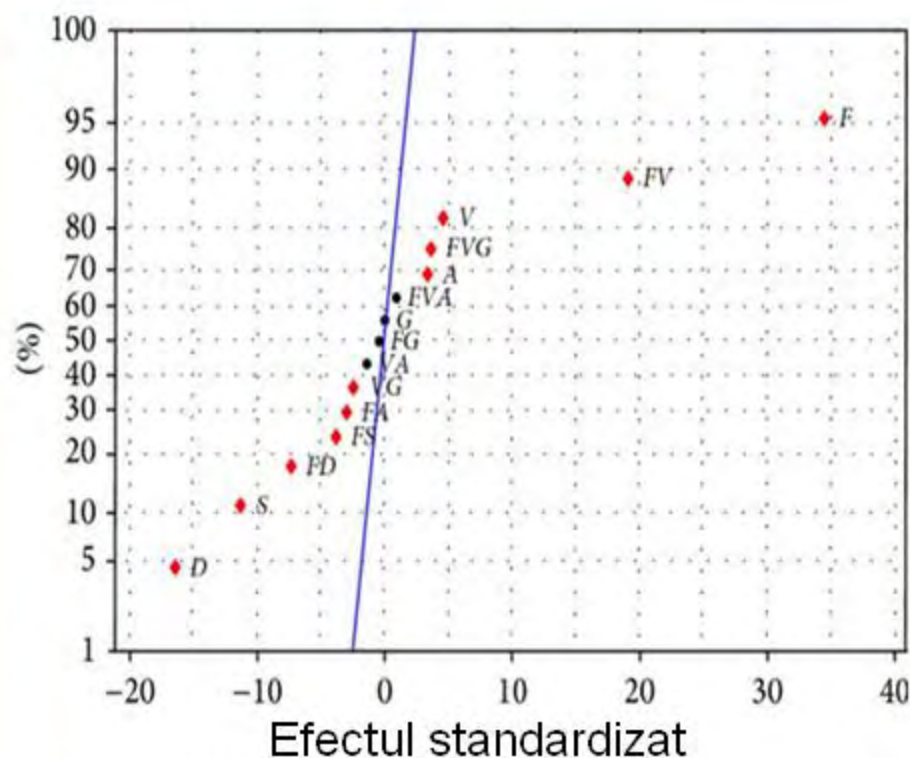
Ordinea de execuție	F	V	S	A	D	G	UTS [MPa]	Ordinea de execuție	F	V	S	A	D	G	UTS [MPa]
9	1	-1	-1	-1	1	-1	307	25	-1	1	1	-1	-1	-1	264
10	1	-1	-1	-1	1	-1	246	26	1	-1	-1	1	1	1	263
11	1	1	1	-1	1	-1	122	27	-1	-1	-1	1	-1	1	124
12	1	1	1	1	1	1	551	28	-1	1	-1	1	1	-1	537
13	-1	-1	1	1	1	-1	151	29	-1	1	1	-1	-1	-1	135
14	-1	1	1	1	-1	1	312	30	1	1	1	-1	1	-1	321
15	-1	1	-1	1	1	-1	118	31	1	1	-1	-1	-1	1	80

3.2. Analiza varianței pentru rezistența la rupere la tracțiune

Diagrama de probabilitate normală a efectelor din Figura 2 a fost utilizată pentru a identifica vizual efectele importante asupra rezistenței la rupere la tracțiune (UTS). Efectele importante sunt mari și mai departe față de linia fixată, în timp ce efectele neimportante sunt mai mici și centrate în jurul valorii de zero [9, 12].

În figura 2, efectele semnificative care rezultă din această analiză constau în fiecare efect puternic: F, V, S, A și D; interacțiunile cu 2 căi: FD, FS, FA, FV și VG, precum și interacțiunea cu 3 căi, FVG. Efectele nesemnificative constau în efectul slab al lui G și interacțiunile FG, VA și FVA. Toate efectele nesemnificative ar trebui eliminate din analiză, însă efectele slabe nu ar trebui eliminate atunci când sunt implicate în interacțiuni semnificative [10]. Prin urmare, efectul slab G este inclus în model datorită interacțiunilor sale semnificative (VG și FVG).

Figura 2. Graficul probabilității normale a efectelor (la $\alpha = 0,05$) [1]



Tipul efectului:

- Nesemnificativ
- ◆ Semnificativ

Probabilitatea normală a efectelor
(la $\alpha = 0,05$) [1]

3.2. Analiza varianței pentru rezistența la rupere la tracțiune (continuare)

- După eliminarea termenilor nesemnificativi, a fost testată semnificația modelului UTS redus, prezentată în Tabelul 4. De asemenea, efectele estimate și coeficienții modelului redus sunt prezentate în Tabelul 4. O valoare absolută mai mare a efectului estimat indică o influență mai mare a termenului model asupra UTS.
- În consecință, a fost evident faptul că viteza de avans a sârmei (**F**) a avut cel mai mare efect asupra UTS a îmbinării sudate, urmată de interacțiunea dintre viteza de avans a sârmei și tensiunea de sudare (**FV**), distanța duză-piesă (**D**), viteza de sudare (**S**), interacțiunea dintre viteza de avans a sârmei și distanța duză-piesă (**FD**), tensiunea de sudare (**V**), interacțiunea dintre viteza de avans a sârmei și viteza de sudare (**FS**), interacțiunea triplă dintre viteza de avans a sârmei- tensiunea de sudare- debitul gazului de protecție (**FVG**), unghiul de deplasare (**A**), interacțiunea dintre viteza de avans a sârmei și unghiul de deplasare (**FA**), interacțiunea tensiunii de sudare cu debitul de gaz (**VG**), respectiv debitul gazului de protecție (**G**).
- Această concluzie a fost prezentată grafic în figura 2. Valoarea extrem de scăzută a lui p , mult mai mică de 0,05, a sugerat că termenul model a fost foarte semnificativ. Coeficientul de determinare, R^2 , de 0,9907 a fost în acord rezonabil cu R^2 ajustat, de 0,9848. Prin urmare, termenii modelului redus s-au arătat adecvați din punct de vedere statistic pentru a dezvolta modelul de predicție pentru UTS.

Tabelul 4. Efectele estimate și coeficienții pentru rezistența la rupere la tracțiune (UTS, unități codate) [1]

Nr. crt.	Termenul	Efectul	Coeficient	t-statistic	Valoarea p
1	Constantă		248,69	80,45	< 0,001
2	Viteza de avans a sârmei-electrod, F	210,751	105,38	34,09	< 0,001
3	Tensiunea de sudare, V	27,12	13,56	4,39	< 0,001
4	Viteza de sudare, S	-68,13	-34,06	-11,02	< 0,001
5	Unghiul de deplasare, A	22,00	11,00	3,56	0,002
6	Distanța duză-piesă, D	-99,50	-49,75	-16,09	< 0,001

Tabelul 4. Efectele estimate și coeficienții pentru rezistența la rupere la tracțiune (UTS, unități codate) [1] (continuare)

Nr. crt.	Termenul	Efectul	Coeficient	t-statistic	Valoarea p
7	Debitul de gaz de protecție, G	-0,25	-0,13	-0,04	0,968
8	FV	116,00	58,00	18,76	< 0,001
9	FS	-22,00	-11,00	-3,56	0,002
10	FA	-16,63	-8,31	-2,69	0,015
11	FD	-43,63	-21,81	-7,06	< 0,001
12	VG	-16,00	-8,00	-2,59	0,018
13	FVG	21,12	10,56	3,42	0,003

S = 17,4857 R²=99,07% R²(ajustat)=98,48 Eroare standard de coeficient = 3,1

3.3. Modelul pentru rezistența la rupere la tracțiune (UTS)

- Analiza regresiei multiple pentru predicția UTS a fost efectuată pe datele experimentale din Tabelul 3. Modelul de regresie (în unități necodate, uncoded units) din (1) a fost dezvoltat prin calcularea coeficienților de regresie ai termenilor modelului redus [1]:

UTS (unități necodate) =

$$288,912 - 6,79774F - 17,5458V - 0,0681944S + 2,90104A - 0,62240D + 7,97500G + 1,92756F * V - 0,0122222F * S - 0,138542 F * A - 0,908854F * D - 0,325V * G + 0,00038462F * V * G \quad (1)$$

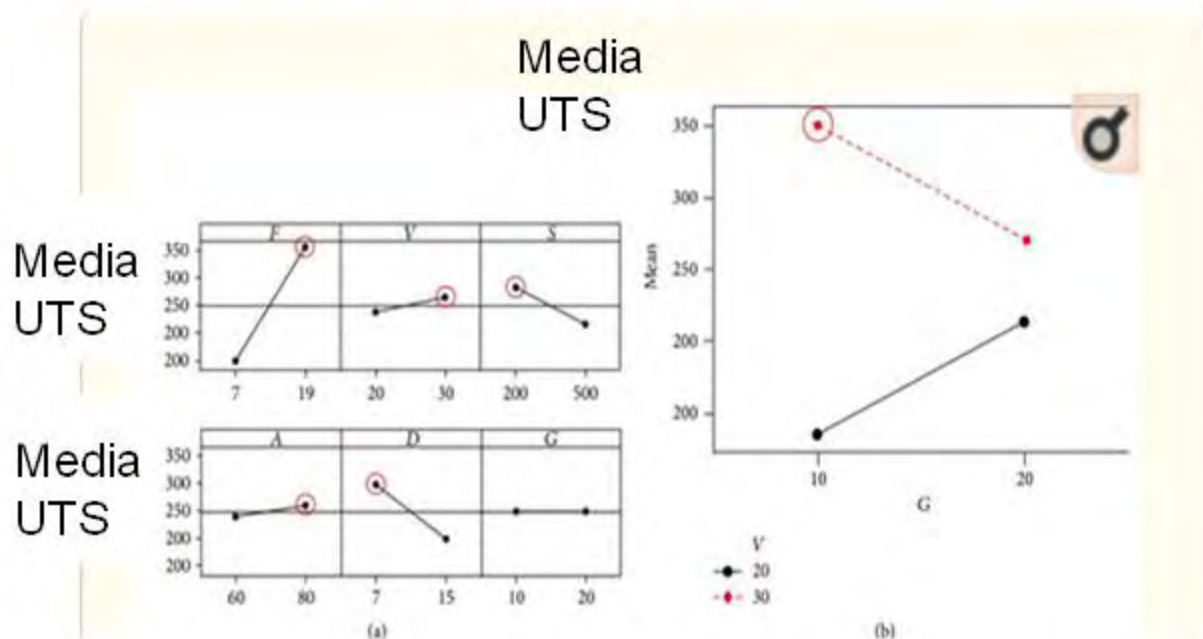
unde: **UTS** este rezistența maximă la tracțiune (MPa), **F** este viteza de avans a sârmei (m / min), **V** este tensiunea de sudare (Volt), **S** este viteza de sudare (mm / min), **A** este unghiul de deplasare, **D** este distanța duză-piesă (mm) și **G** este debitul gazului de protecție (litri / min).

- La rularea unui experiment factorial pe două nivele, se potrivește, de obicei, un model de primă ordine care include numai efectele principale și termenii de interacțiune [9], după cum se constată din relația (1).

3.4. Maximizarea rezistenței la rupere la tracțiune (UTS) prin optimizarea parametrilor de sudare

Pentru a selecta parametrii optimi de sudare, a fost luat în considerare efectul principal al fiecărui parametru din figura 3 (a). Figura 3 (a) a arătat că viteza de avans a sârmei (F), tensiunea de sudură (V) și unghiul de deplasare (A) au avut efecte pozitive asupra UTS, iar creșterea acestor variabile conduce la UTS mai mari. În schimb, viteza de sudare (S) și distanța duză-piesă (D) au avut efecte negative, de aceea creșterea acestor variabile a redus UTS. Debitul gazului de protecție (G) în intervalul de 10-20 l / min a arătat un efect mai redus, astfel încât nivelul grafic VG semnificativ de interacțiune a fost utilizat pentru a determina starea optimă. Figura 3 (b) a arătat că tensiunea de sudare a avut un efect mare la debit scăzut al gazului, dar un efect mai mic la debit mare de gaz. Întrucât s-a dorit UTS maxim, parametrii optimi de proces pentru sudarea MAG au fost: **viteza de avans a sârmei de 19 m / min, tensiunea de sudare de 30 V, viteza de sudare de 200 mm / min, unghiul de deplasare la 60 de grade, distanța duză-piesă de 7 mm și debitul de gaz de protecție de 10 litri / min; a se vedea figura 3. Valoarea maximă a UTS calculată din (1) a fost de 553 MPa.**

Figura 3. Graficul principalelor efecte [1]



- (a) Graficul principalelor efecte ale: F, V, S, A, D, G;
(b) Graficul interacțiunii dintre tensiunea de sudare și debitul de gaz (VG), pentru UTS [1]

3.5. Testul de confirmare

- Pentru a verifica modelul de regresie multiplă din relația (1) și optimizarea parametrilor de sudare, au fost utilizate șase experimente în condițiile de sudare optime. Valorile UTS obținute prin modelul de prezicere și prin experimente au fost comparate, iar erorile procentuale sunt prezentate în Tabelul 5. UTS previzionat a fost de acord cu UTS măsurat. Abaterile au fost între -2% și 4%.
- Este de remarcat că rezistența la rupere UTS maximă obținută din experiment (558,3 MPa în medie) a fost mai mare decât UTS a metalului de bază (470 MPa). În timpul încercării la tracțiune, s-a observat că ruperea (destrămarea) epruvetei sudate a apărut mai degrabă în îmbinarea sudată decât în metalul de bază. A fost important să se sublinieze că valoarea UTS înaltă a putut fi obținută chiar și atunci când pătrunderea rândurilor de sudare nu a fost completă pe întreaga grosime a piesei de sudat.

Tabelul 5. Rezultatele experimentului de confirmare pentru rezistența la rupere la tracțiune (UTS) [1]

Nr. crt.	Numărul experimentului	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5	Nr. 6	Media	SD
1	Valoarea reală [MPa]	541	537	564	564	569	575	558,3	15,6
2	Valoarea prezisă [MPa]	553	553	553	553	553	553	553	
3	Eroare [%] *	-2	-3	2	2	3	4		

* Eroarea procentuală a fost calculată cu relația:

$$\text{Eroare [\%]} = [(\text{Valoarea reală} - \text{Valoarea prezisă}) / \text{Valoarea prezisă}] * 100 \%$$

4. Experimente pentru determinarea influenței parametrilor asupra limitei de curgere la tracțiune [2]

4.1. Pregătirea probelor

- Au fost pregătite table de oțel S45C cu dimensiunile de 100 mm X 50 mm X 6 mm pentru îmbinări cap la cap cu rost V, așa cum se arată în figura 4. Rostul V pe o parte este profilat aproximativ 2 mm (adâncime). Proprietățile (caracteristicile) mecanice ale îmbinărilor prin sudură sunt determinate utilizând mașina UTM, iar adâncimea de pătrundere a rândurilor de sudură este măsurată cu ajutorul unui microscop pentru metalurgie.
- A fost utilizată sârma de adaos de tip ER70S-6. Deoarece este utilizat metalul de bază cu grosimea de 6 mm $\pm$ 0,5 mm, s-a folosit sârmă de adaos cu diametrul de 0,8 mm.
- Compoziția chimică a ambelor materiale este prezentată în tabelul 6.
- Combinația parametrilor de sudare a fost identificată prin efectuarea unui studiu de fezabilitate. Gama de parametri selectați pentru acest studiu este prezentată în tabelul 7

Figura 4. Rostul V pe o parte, pe metalul de bază S45C [2]



Tabelul 6. Compoziția chimică a metalului de bază și a sârmei-electrod [2]

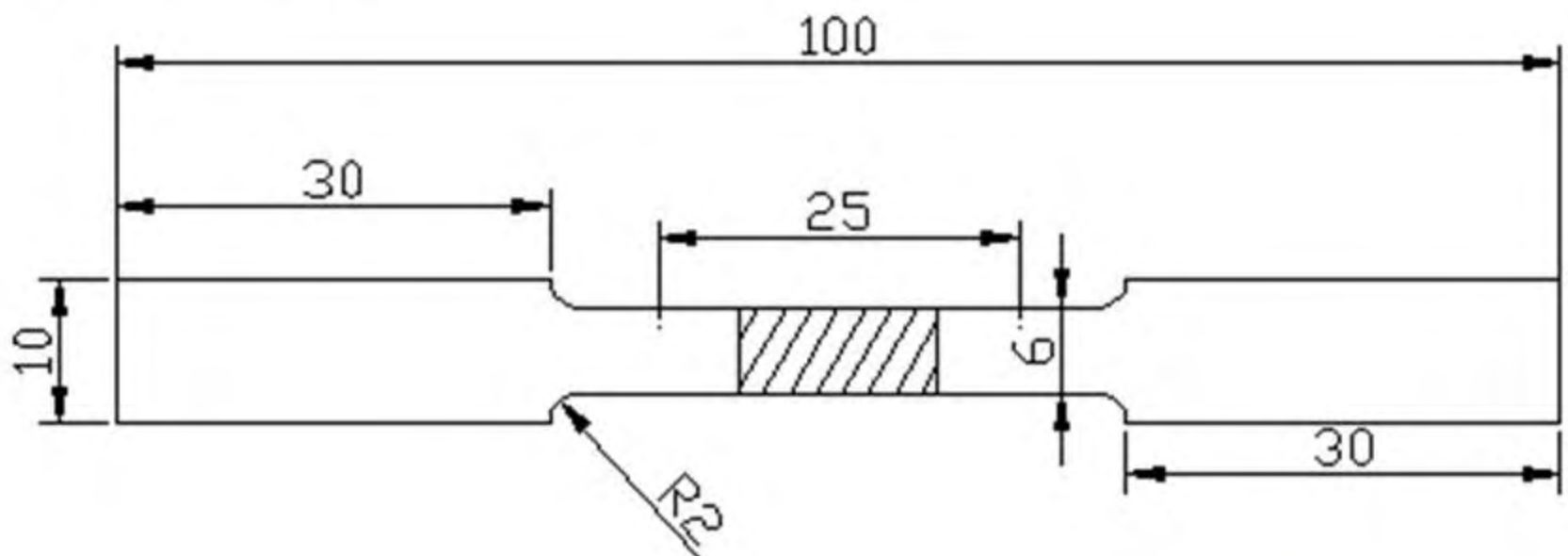
Nr. crt.	Material	C	Mn	Si	S	P
1	JIS S45C	0,42 – 0,48	0,6 – 0,9	0,15 – 0,35	S < 0,035	< 0,03
2	ER70S-6	0,07	1,55	0,88	0,012	0,015

Tabelul 7. Matricea de proiectare a parametrilor de intrare pentru procesul de sudare [2]

Nr. crt.	Parametri	Unitate de măsură	Notăție	Nivelul factorului		
				-1	0	1
1	Viteza de avans a sârmei-electrod (WFR)	m/min	I	3,6	6,2	9,1
2	Tensiunea arcului electric (de sudare)	V	V	25	35	45
3	Tipul gazului de protecție	-	G	-	CO ₂	Ar

Figura 5. Dimensiunile epruvetei pentru încercarea la tracțiune, conform ASTM E8 / E8M [2]

Epruveta pentru încercarea la tracțiune se pregătește conform ASTM E8, așa cum se arată în figura 5.



5. Determinarea limitei de curgere la tracțiune prin metoda regresiei în funcție de parametri [2]

- Parametrii de sudare, rezultatele experimentale ale limitei de curgere la tracțiune și valoarea măsurată a adâncimii de pătrundere sunt prezentate în tabelul 8. Pentru tipul de gaz, notația 1 indică gazul CO_2 , în timp ce 2 indică gazul Argon (Ar).
- Modelarea matematică prin analiza regresiei se realizează utilizând software-ul statistic Minitab 17.

Tabelul 8. Matricea de proiectare a experimentelor și rezultatele [2]

Numărul rândului de sudură	Viteza de avans a sârmei- electrod [m / min]	Tensiunea de sudare [V]	Tipul de gaz [G]	Limita de curgere la tracțiune, măsurată [MPa]	Adâncimea de pătrundere, măsurată [mm]
1	3,6	25	1	187,348	1,87
2	6,2	25	1	227,926	2,21
3	9,1	25	1	190,971	2,43
4	3,6	35	1	119,527	2,21
5	6,2	35	1	208,923	2,00
6	9,1	35	1	221,844	2,00

Tabelul 8. Matricea de proiectare a experimentelor și rezultatele [2] (continuare)

Numărul rândului de sudură	Viteza de avans a sârmei- electrod [m / min]	Tensiunea de sudare [V]	Tipul de gaz [G]	Limita de curgere la tracțiune, măsurată [MPa]	Adâncimea de pătrundere, măsurată [mm]
7	3,6	45	1	120,36	2,50
8	6,2	45	1	137,001	2,00
9	9,1	45	1	201,229	1,53
10	3,6	25	2	219,969	1,80
11	6,2	25	2	14,885	1,56
12	9,1	25	2	268,673	1,91

Tabelul 8. Matricea de proiectare a experimentelor și rezultatele [2] (continuare)

Numărul rândului de sudură	Viteza de avans a sârmei- electrod [m / min]	Tensiunea de sudare [V]	Tipul de gaz [G]	Limita de curgere la tracțiune, măsurată [MPa]	Adâncimea de pătrundere, măsurată [mm]
13	3,6	35	2	81,44	2,49
14	6,2	35	2	163,068	1,89
15	9,1	35	2	249,799	2,11
16	3,6	45	2	125,758	2,61
17	6,2	45	2	42,206	2,58
18	9,1	45	2	100,398	1,50

6. Determinarea ecuației de regresie pentru limita de curgere la tracțiune [2]

Din moment ce rândurile de sudură cu numerele cinci (5), zece (10) și doisprezece (12) nu corespund rezultatului așteptat sau fezabil, rezultatele acestor suduri sunt eliminate din analiza regresiei. Datele experimentale rămase obținute din proiectul experimentelor sunt folosite pentru a dezvolta un model matematic între parametrii de intrare ai procesului și limita de curgere la tracțiune, respectiv adâncimea de pătrundere. Analiza regresiei se efectuează utilizând software-ul MINITAB și se optimizează pentru a atinge valoarea R^2 în intervalul de la 0,95 până la 0,99.

Ecuația de regresie este generată ca model general multiplu liniar, sub forma:

$$Y = a + b_0 * x_1 - b_1 * x_2 + b_3 * x_3 - b_4 x_1 * x_1 + b_5 x_2 * x_2 + \dots \quad (2)$$

unde:

x_1 = Viteza de avans a sârmei; x_2 = Tensiunea arcului electric; x_3 = Tipul de gaz de protecție;

Y = parametrul de ieșire: limita de curgere la tracțiune, respectiv adâncimea de pătrundere.

6. Determinarea ecuației de regresie pentru limita de curgere la tracțiune [2] (continuare)

- Ecuția rezultată pentru limita de curgere la tracțiune este:

$$Y = -196 x_1 - 14 x_2 + 1521 x_3 - 13,6 x_1^*x_1 - 0,29 x_2^*x_2 - 211 x_3^*x_3 + 19,3 x_1^*x_2 + 40 x_1^*x_3 - 71,7 x_2^*x_3 + 0,161 x_1^*x_1^*x_2 + 4,4 x_1^*x_1^*x_3 - 0,261 x_1^*x_2^*x_2 - 3,60 x_1^*x_2^*x_3 + 1,59 x_2^*x_2^*x_3 \quad (3) [2]$$

7. Determinarea ecuației de regresie pentru adâncimea de pătrundere [2]

- Ecuația rezultată pentru adâncimea de pătrundere este:

$$Y = 1,73 x_1 + 1,154 x_2 - 17,6 x_3 - 0,086 x_1 * x_1 - 0,0137 x_2 * x_2 + 10,2 x_3 * x_3 - 0,048 x_1 * x_2 - 0,53 x_1 * x_3 - 0,706 x_2 * x_3 + 0,00308 x_1 * x_1 * x_2 + 0,0027 x_1 * x_1 * x_3 - 0,00021 x_1 * x_2 * x_2 + 0,0129 x_1 * x_2 * x_3 + 0,00944 \quad (4) [2]$$

8. Analiza varianței (ANOVA)

Se efectuează analiza varianței (ANOVA), pentru a verifica parametrii semnificativi care determină parametrii de ieșire, respectiv limita de curgere (rezistența) la tracțiune și adâncimea de pătrundere.

- S-a observat din tabelul 9 și din tabelul 10 ale analizei varianței (ANOVA) că **viteza de avans a sârmei-electrod și tensiunea arcului electric (de sudare) au efect semnificativ** asupra ieșirilor, adică asupra limitei de curgere la tracțiune și asupra adâncimii de pătrundere.

Tabelele de analiză ANOVA arată că parametrul privind gazul de protecție are foarte puțin sau niciun efect, atât pentru limita de curgere (rezistența) la tracțiune, cât și pentru adâncimea de pătrundere.

Tabelul 9. Analiza varianței (ANOVA) a parametrilor care influențează limita de curgere la tracțiune [2]

Nr. crt.	Sursa	DF	SS ajustat	MS ajustat	Valoarea F	Valoarea P
1	WFR	2	18864	9424	2,10	0,239
2	V	2	12928	6464	1,44	0,339
3	G	1	3119	3119	0,69	0,452
4	WFR * V	4	18400	4600	1,02	0,492
5	WFR * G	2	9720	4860	1,08	0,422
6	V * G	2	6247	3124	0,69	0,551
7	Eroare	4	18008	4502		
8	Total	17	87287			

Tabelul 10. Analiza varianței (ANOVA) a parametrilor care influențează adâncimea de pătrundere [2]

Nr. crt.	Sursa	DF	SS ajustat	MS ajustat	Valoarea F	Valoarea P
1	WFR	2	0,21149	0,105746	0,29	0,760
2	V	2	0,28091	0,140456	0,39	0,700
3	G	1	0,00045	0,000450	0,00	0,973
4	WFR * V	4	0,43916	0,109789	0,30	0,862
5	WFR * G	2	0,00701	0,003505	0,01	0,990
6	V * G	2	0,31967	0,159837	0,44	0,670
7	Eroare	4	1,44069	0,360172		
8	Total	17	2,69938			

9. Concluzii

1. A fost aplicat un proiect factorial fracționat la sudarea cap la cap cu rost zero a unui oțel nealiat, folosind procedeul MAG. Studiul s-a axat pe efectul parametrilor de sudare asupra rezistenței la rupere la tracțiune (ultimate tensile strength, UTS) a îmbinării sudate și asupra parametrilor optimi (condițiilor optime) de sudare pentru a obține UTS maxim.
2. Parametrii de proces care au prezentat cele mai mari până la cele mai mici efecte asupra UTS a îmbinărilor sudate au fost în ordine: viteza de avans a sârmei-electrod, distanța duză-piesă, viteza de sudare, tensiunea de sudare și unghiul de deplasare. Debitul de curgere a gazului de protecție în intervalul selectat s-a dovedit a avea un efect redus.
3. UTS a crescut cu creșterea vitezei de avans a sârmei, a tensiunii de sudare și a unghiului de deplasare. În contrast, UTS a crescut cu reducerea vitezei de sudare și a distanței duză-piesă.

9. Concluzii (continuare)

4. UTS maximă a unei îmbinări sudate, în medie 558 MPa, a fost obținută la următoarele valori ale parametrilor de sudare MAG: viteză de avans a sârmei 19 m / min, tensiune de sudare 30 V, viteză de sudare 200 mm / min, unghi de deplasare 60° , distanța duză-piesă 7 mm și debitul gazului de protecție 10 L / min.
5. Rezultatele UTS maxime din modelul de regresie au corespuns cu experimentele în limita de 4%. Prin urmare, acest model poate fi utilizat pentru a prezice rezistența la rupere la tracțiune (UTS) a sudurii, cu suficientă precizie.
6. Este important de subliniat faptul că modelul obținut în urma acestei cercetări este modelul de prim ordin, în care sunt incluse numai efectele principale și termenii de interacțiune. Cu toate acestea, există posibilitatea ca modelul de ordinul doi sau un model neliniar să fie mai adecvat. Prin urmare, este util să se studieze metodele de suprafață de răspuns (RSM) pentru a investiga optimizarea proceselor.

9. Concluzii (continuare)

7. Modelul de regresie (1) determinat în această lucrare poate fi aplicat pentru a prescrie parametrii de sudare GMAW (MAG) a oțelului S235, echivalent cu St37-2, în scopul de a obține o anumită rezistență la rupere la tracțiune a sudurii, respectând aceleași condiții pentru procesul de sudare.

8. A fost elaborat modelul matematic al dependenței dintre limita de curgere la tracțiune și parametrii de sudare, în scopul de a prezice limita de curgere la tracțiune la îmbinarea cap la cap cu rost V pe o parte.

9. S-a elaborat relația matematică privind dependența dintre adâncimea de pătrundere și parametrii de sudare, în scopul de a prezice adâncimea de pătrundere.

10. Modelul de regresie (3) determinat în această lucrare poate fi aplicat pentru a prescrie parametrii de sudare GMAW (MAG) a oțelului C45, echivalent cu S45C, în scopul de a obține o anumită limită de curgere la tracțiune a sudurii, respectând aceleași condiții pentru procesul de sudare.

11. Aceste modele pot fi folosite pentru a selecta parametrii de proces pentru a obține rezistența necesară a unei îmbinări cap la cap, la anumite sarcini în exploatare.

Bibliografie

[1] Anusit Ampaiboon,(Rajamangala University of Technology Isan, Thailand); On-Uma Lasunon* (Manufacturing and Materials Research Unit, Faculty of Engineering, Makhasrakham University, Maha Sarakham, Thailand) and Bopit Bubphachot (Makhasrakham University, Maha Sarakham, Thailand): "Optimization and Prediction of Ultimate Tensile Strength in Metal Active Gas Welding". The Scientific World Journal. 2015: 831912. Published online 2015 Sep 17. doi: 10.1155/2015/831912. PMCID: PMC4600529, PMID: 26491719. Corresponding author*: onuma.l@msu.ac.th. Hindawi Publishing Corporation, The Scientific World Journal, Volume 2015, Article ID 831912, 5 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/831912>.

<https://www.researchgate.net/publication/283203021>.

[2] P Srinivasa Rao, Pragash Ramachandran and Jebaraj S (Department of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi PETRONAS, Bandar Seri Iskandar, 32610 Perak, Malaysia): "Models for selecting GMA Welding Parameters for Improving Mechanical Properties of Weld Joints". iMEC-APCOMS 2015 IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 114 (2016) 012027 doi:10.1088/1757-899X/114/1/012027.

¹srinivasa.pedapati@petronas.com.my, ²pragash_90@yahoo.com

Bibliografie (continuate)

- [3] Klarić S., Samardžić I., Kladarić I. MAG welding process—analysis of welding parameter influence on joint geometry. Proceedings of the 12th International Research/Expert Conference; August 2008; Istanbul, Turkey. pag. 185.
- [4] Kim I. S., Son K. J., Yang Y. S., Yaragada P. K. D. V. Sensitivity analysis for process parameters in GMA welding processes using a factorial design method. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2003;43(8):763–769. doi: 10.1016/S0890-6955(03)00054-3. [Cross Ref]
- [5] Benyounis K. Y., Olabi A. G. Optimization of different welding processes using statistical and numerical approaches—a reference guide. Advances in Engineering Software. 2008;39(6):483–496. doi: 10.1016/j.advengsoft.2007.03.012. [Cross Ref]
- [6] Correia D. S., Gonçalves C. V., Junior S. S. C., Ferraresi V. A. GMAW welding optimization using genetic algorithms. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences & Engineering. 2004;26(1):28–32. doi: 10.1590/s1678-58782004000100005. [Cross Ref]
- [7] Cool T., Bhadeshia H. K. D. H., MacKay D. J. C. The yield and ultimate tensile strength of steel welds. Materials Science and Engineering A. 1997;223(1-2):186–200. doi: 10.1016/s0921-5093(96)10513-x.[Cross Ref]
- [8] Sathiya P., Abdul Jaleel M. Y., Katherasan D., Shanmugarajan B. Optimization of laser butt welding parameters with multiple performance characteristics. Optics and Laser Technology. 2011;43(3):660–673. doi: 10.1016/j.optlastec.2010.09.007. [Cross Ref]
- [9] Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments. New York, NY, USA: John Wiley & Sons; 2001.
- [10] Shojaeefard M. H., Khalkhali A., Akbari M., Tahani M. Application of Taguchi optimization technique in determining aluminum to brass friction stir welding parameters. Materials and Design. 2013;52:587–592. doi: 10.1016/j.matdes.2013.06.003. [Cross Ref]
- [11] American Welding Society. Welding Handbook. 9th. Vol. 2. Miami, Fla, USA: American Welding Society; 1991. Welding processes, part 1; pp. 148–205.
- [12] Minitab. MINITAB Release 14—Stat Guide. Minitab; 2000–2003.

Bibliografie (continuate)

- [13] Lee J. and Um K. (2000). A prediction of welding process parameters by prediction of back-bead geometry. *Journal of Materials Processing Technology*, 108(1), 106-113.
- [14] Park, H., Kim, D., Kang M. and Rhee S. (2008). Optimisation of the wire feed rate during pulse MIG welding of Al sheets. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 27(1), pp.83-86.
- [15] P Srinivasa Rao, O P Gupta, S S N Murty.(2005), Influence of process parameters on bead geometry in pulsed gas metal arc welding, IIW International Congress, Mumbai India.
- [16] Brockenbrough R L. (2006) Properties of Structural Steels and Effects of Steel making and Fabrication. Hand book for Structural Steel Design Chapter, McGraw-Hill Professional, Fourth Edition.
- [17] P. Srinivasa Rao, O P Gupta, S S N Murty, ABK Rao.(2009) Effect of process parameters and mathematical model for the prediction of bead geometry in pulsed GMA welding, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **45** (5-6), 496-505.
- [18] K. Manikya Kanti, P S Rao, Rangajanrdhan, AMA Rani (2014), Mathematical Modeling for the Prediction of Depth of Penetration in Double Pulse GMA Welding Using Fractional Factorial Method, *Applied Mechanics and Materials*, **660**, 347-351.