

DOPRINOS PRIMJENI PRAŠKOM PUNJENIH ŽICA ZA ZAVARIVANJE MAG POSTUPKOM

Samardžić, Ivan
Kolumbić, Zvonimir
Marko Baotić

Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu
Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu
Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu

Ključne riječi: praškom punjene žice, zavarivanje, količina nataljenog materijala, On-line monitoring, parametri zavarivanja, stabilnost procesa

CONTRIBUTION TO FLUX CORED WIRES APPLICATION BY MAG WELDING PROCESS

Key words: flux cored wires, welding, material deposit rate, On-line monitoring, welding parameters, process stability

Sažetak: U radu se obrazlaže istraživanje količine nataljenog dodatnog materijala (depozita) u jedinici vremena kod zavarivanja MAG postupkom uz primjenu praškom punjenih žica (bazičnog i rutilnog tipa) i punih žica. Pored toga se daju rezultati istraživanja stabilnosti glavnih parametara zavarivanja (napona i jakosti struje) tijekom zavarivanja praškom punjenim i punim žicama.

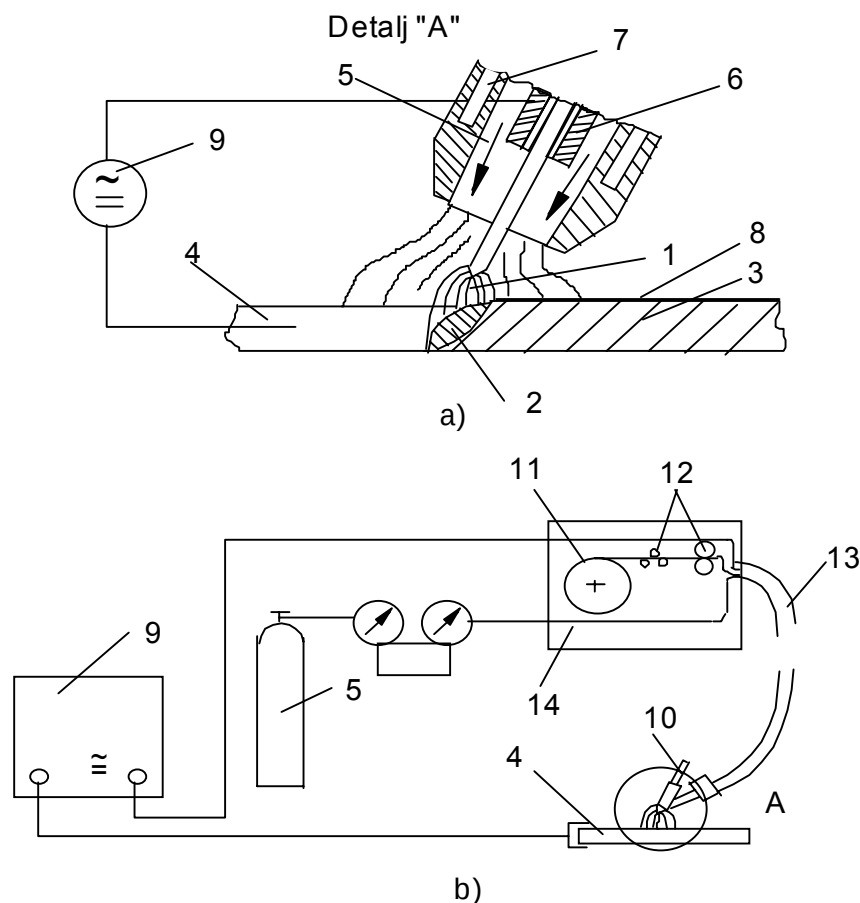
1. UVOD

Zavarivanje je spajanje dvaju ili više, istorodnih ili raznorodnih materijala, taljenjem ili pritiskom, sa ili bez dodavanja dodatnog materijala, na način da se dobije homogeni spoj zadovoljavajuće kvalitete. Zavarivanje je kao tehnika spajanja materijala bilo poznato još u starom vijeku. [1] No, moderno se zavarivanje počelo razvijati u drugoj polovini XIX stoljeća, dok je većina danas poznatih postupaka zavarivanja otkrivena u XX stoljeću. Danas se može slobodno reći da je bez zavarivanja nezamislivo spajanje nekih materijala u gotove proizvode, koji su nužno potrebni čovjeku (automobili, brodovi, termoenergetska postrojenja i oprema, ...). Kod izrade zavarenih konstrukcija pred tehnologa zavarivanja se postavljaju različiti kriteriji. Prije svega to su zahtjevi za kvalitetu i pouzdanost (sigurnost) zavarenih spojeva na konstrukciji, minimalne troškove izrade, minimalan utrošak materijala i energije, te minimalno onečišćenje čovjekove okoline. Jedan od putova ka ispunjenju spomenutih zahtjeva je primjena visokoučinskih postupaka zavarivanja, konkretno primjena praškom punjenih žica kod elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina ili plinske mješavine, te praškom punjenih žica bez dodatne vanjske plinske zaštite. Kako bi se dobili kvantitativni pokazatelji za usporedbu produktivnosti kod zavarivanja praškom punjenih žica i punih žica, provedena su istraživanja količine nataljenog dodatnog materijala (kg/h) za praškom punjene žice i punu žicu. Tijekom eksperimentalnih zavarivanja mjereni su i registrirani parametri zavarivanja koji su korišteni za procjenu stabilnosti procesa zavarivanja.

2. OPĆENITO O MAG ZAVARIVANJU PRAŠKOM PUNJENIM ŽICAMA

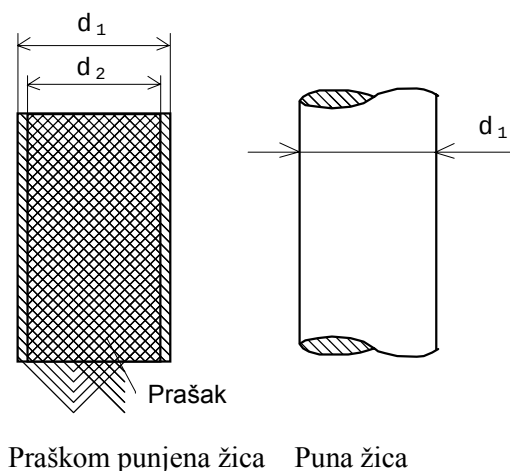
MAG (engl. Metal Aktiv Gas) postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina. Pojavljuje se 1953. godine u bivšem SSSR-u.[1] No, prethodilo mu je pojavljivanje MIG (eng. Metal Inert Gas) postupka zavarivanja, tj. elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina, godine 1948. Taj je postupak poznat i pod nazivom Sigma postupak (Shielded Inert Gas Metal Arc). Pored razlike u području praktične primjene ovih postupaka, temeljna je razlika između ova dva postupka vrsta zaštitnog plina i dodatnog materijala – žice za zavarivanje. MAG postupak zavarivanja značajno je zastupljen kod zavarivanja općekonstrukcijskih čelika, a u velikoj je prednosti u odnosu na ručno elektrolučno zavarivanje obloženim elektrodama (REL) s obzirom na količinu rastaljenog materijala u jedinici vremena, bilo da se radi o poluautomatskom, automatskom ili robotiziranom MAG postupku. Postupak je vrlo pogodan za robotizaciju, tako da je značajan udio robota za MAG zavarivanje u odnosu na sveukupni broj robota u svijetu. Dodatni se materijali za MAG zavarivanje po obliku mogu svrstati u jednu od dvije skupine: pune i praškom punjene elektrode (metalna cijevčica punjena praškom predviđena za upotrebu sa ili bez dodatnog zaštitnog plina). Na slici 1 se daje shematski prikaz poluautomatskog MAG/MIG postupka zavarivanja, dok se na slici 2 daje shematski prikaz pune i praškom punjene žice.

Prvo zavarivanje praškom punjenom žicom provedeno je prije 70-ak godina, ali u obliku elektroda za REL postupak zavarivanja koje su bile punjene praškom. Isti postupak zavarivanja primjenjivan je neko vrijeme, ali se zbog skupe proizvodnje prešlo na elektrode čija je obloga bila izvana. Mehanizacija i automatizacija u zavarivanju ukazuje na potrebu za razvojem praškom punjenim žicama namotanom na kolut ("beskonačna žica"). Godine 1956. izum pod nazivom "Acros patent" definirao je način proizvodnje tankih žica za zavarivanje koje su bile punjene rutilnim praškom, a zavarivalo se u zaštiti plina. Idući korak u razvoju punjenih žica bilo je zavarivanje punjenim žicama bez dodatne zaštite plina odnosno "žicama sa samozaštitom". Danas postupak zavarivanja punjenim žicama uzima sve veće učešće u industriji posebno u nekim granama kao što je brodogradnja, zavarivanje nosivih čeličnih konstrukcija, zavarivanje posuda itd.[2]



1 - električni luk, 2 - rastaljeni materijal, 3 - skrutnuti zavar, 4 - osnovni materijal, 5 - zaštitni plin, 6 - kontaktna vodilica, 7 - prisilno hlađenje vodom, 8 - troska, 9 - izvor struje, 10 - pištolj za zavarivanje, 11 - kolut sa žicom, 12 - valjčići za pogon žice, 13 - provodnici, 14 - komandni ormarić

Slika 1. Shema elektrolučnog zavarivanja taljivom metalnom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plinova (MAG/MIG zavarivanje): a) proces taljenja, b) poluautomat za MAG/MIG – shema kompletne opreme za zavarivanje



Slika 2. Shematski prikaz praškom punjene i pune žice

Neke od prednosti ovog postupka u odnosu na ostale postupke ili na MAG postupak punom žicom su:

- velika količina nataljenog metala u jedinici vremena,
- manja mogućnost nastanka karakterističnih grešaka MAG postupka zavarivanja (naljepljivanje),
- mogućnost zavarivanja u svim položajima bez promjene parametara,
- manja "prskanja" za vrijeme zavarivanja i bolji vizuelni izgled zavara (bez naknadne potrebe za obradom zavara),
- bolja stabilnost procesa zavarivanja,
- bolja mehanička svojstva zavarenog spoja , posebno svojstvo žilavosti.

Najznačajniji nedostaci poluautomatskog MAG zavarivanja su: preveliko zračenje topline kod zavarivanja, posebno jak električni luk, te velika količina plinova razvijenih iz praška (zbog veće jakosti struje zavarivanja). U usporedbi sa punim žicama, praškom punjene žice imaju veću koncentraciju količine topline (Q) za zadanu konstantnu vrijednost jakosti struje (I), a zbog manje ploštine presjeka praškom punjene žice (A).[3]

Usprkos spomenutim nedostacima, ovaj postupak zavarivanja sve više se uvodi u industriju. Kako bi se kvantitativno iskazale neke od prednosti MAG zavarivanja praškom punjenim žicama, u nastavku se obrazlažu rezultati vlastitih eksperimentalnih istraživanja količine nataljenog materijala i stabilnosti procesa zavarivanja kod praškom punjenih žica i punih žica.

3. ISTRAŽIVANJE KOLIČINE NATALJENOG MATERIJALA KOD ZAVARIVANJA PRAŠKOM PUNJENIM ŽICAMA I PUNOM ŽICOM

Ova su istraživanja predviđena s ciljem utvrđivanja utjecaja vrste praškom punjene žice na količinu nataljenog dodatnog materijala u jedinici vremena (produktivnost) pri različitim parametrima zavarivanja, kao i utjecaja parametara zavarivanja na količinu nataljenog dodatnog materijala kod iste žice. Pored toga, se želi usporediti produktivnost kod praškom punjenih žica i punih žica.

3.1 Plan pokusa istraživanja

Predviđeno je navarivanje probne ploče dimenzija 600x200x12 mm, kvalitete 15Mo3 sa tri različita dodatna materijala (bazičnim praškom punjenom žicom, rutilnim praškom punjenom žicom i punom žicom), uz tri različita režima (niže, srednje i više vrijednosti parametara zavarivanja). Dodatno je navaren prolaz ("gusjenica") bazičnim praškom punjenom žicom, tako da je elektroda (žica) bila priključena na "+" električni pol struje. Taj je prolaz analiziran sa stajališta stabilnosti parametara zavarivanja u dijelu istraživanja stabilnosti parametara zavarivanja, a nosi oznaku; Eksperiment "4". Kod svih slučajeva zavarivanja bila je prisutna vanjska zaštita aktivnog plina CO_2 . Plan pokusa i stanja eksperimenta su prikazani u tablici 1.

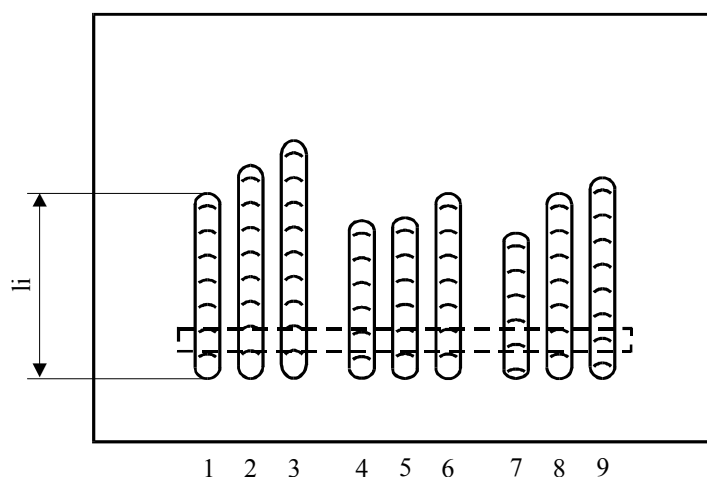
Tablica 1. Plan pokusa kod navarivanja probne ploče različitim dodatnim materijalima, uz različite vrijednosti parametara zavarivanja.

Vrsta žice	Bazičnim praškom punjena žica	Rutilnim praškom punjena žica	Puna žica
Parametri zavarivanja			
Niže vrijednosti	Eksperiment "1.1"	Eksperiment "2.1"	Eksperiment "3.1"
Srednje vrijednosti	Eksperiment "1.2"	Eksperiment "2.2"	Eksperiment "3.2"
Više vrijednosti	Eksperiment "1.3"	Eksperiment "2.3"	Eksperiment "3.3"

3.2 Provedba navarivanja probne ploče

Zavarivanje je provedeno sa tri različite žice (vidjeti tablicu 1 i tablicu 2), gdje se sa svakom zavarivalo različitim parametrima s ciljem postizanja različitih načina prijenosa metala u električnom luku. Tako je prvi navar zavarivan nižim, drugi srednjim, a treći višim parametrima zavarivanja.

Navari su polagani na limenu ploču prethodno očišćene od nečistoća i korozije. Izgled ploče s navarima prikazan je na slici 3, iz koje su nakon zavarivanja plinski izrezani uzorci za makro analizu.



Slika 3. Izgled probne ploče s navarenim gusjenicama

Zavarivanje je izvedeno poluautomatskim MAG postupkom uređajem LAH 500 tvrtke ESAB sa dodavačem žice A10 – MED 44. Vanjska zaštita je bila aktivni plin CO_2 . Na slici 4 prikazan je detalj provedbe eksperimentalnog zavarivanja. Vrste, oznaka i promjer žica za zavarivanje navedeni su u tablici 2, dok su u tablici 3 navedeni parametri zavarivanja mjereni uz pomoć običnog verificiranog digitalnog amper-volt-ohm metra koji se koristi u zavarivačkom pogonu.



Slika 4. Detalj kod provođenja eksperimentalnog navarivanja praškom punjenom i punom žicom MAG postupkom.

Na slici 3 se vidi probna ploča sa navarenim prolazima (“gusjenicama”), izvorno struje za zavarivanje i On-line monitoring sustavom – sustavom za praćenje, registriranje i obradu glavnih parametara zavarivanja (napona i jakosti struje zavarivanja).

Tablica 2. Korištene žice pri zavarivanju

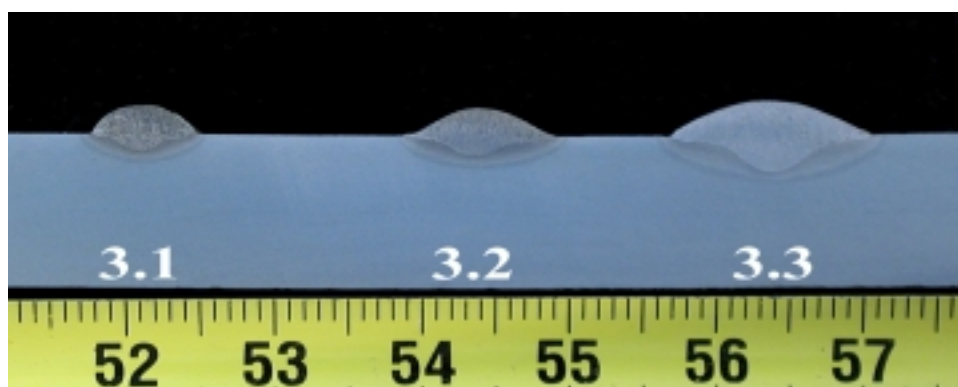
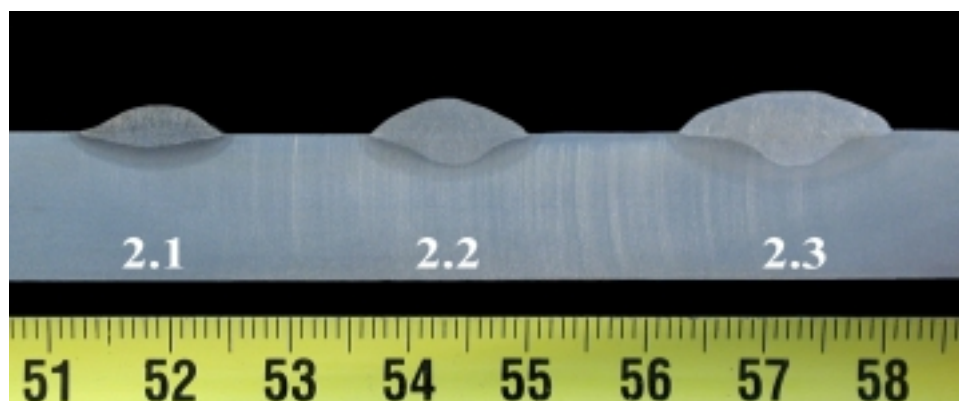
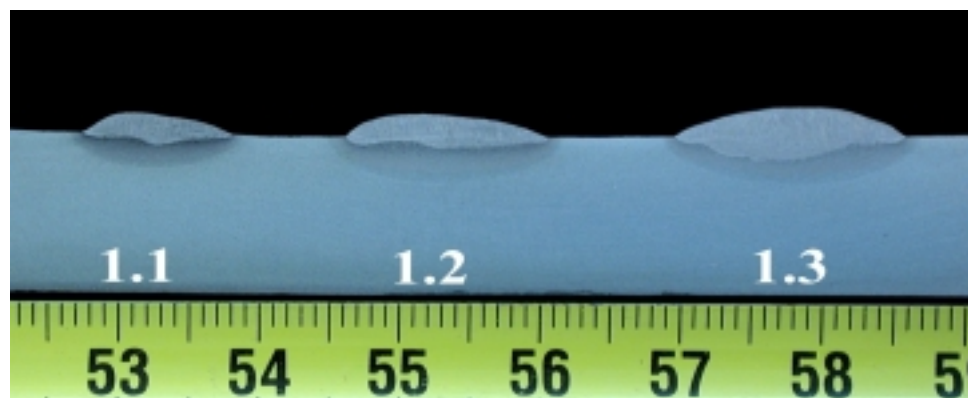
TIP ŽICE	Oznaka žice prema standardu	Promjer žice Ø (mm)	Trgovačka oznaka	Proizvođač
Puna žica	SGMo (DIN 8575)	1.2	DMO-IG	Böhler
Rutilnim praškom punjena žica	SGMo (DIN 8575)	1.2	DMO-TiFD	Böhler
Bazičnim praškom punjena žica	SGMo (DIN 8554)	1.2	DMOKbFD	Böhler

Tablica 3. Parametri zavarivanja pri izvođenju eksperimenta za pojedina stanja eksperimenta .

Vrsta električnog luka	Parametri	Bazična punjena žica	Rutilna punjena žica	Puna žica
Niže vrijednosti parametara zavarivanja	Stanje eksperimenta – broj uzorka	1.1	2.1	3.1
	Jakost struje I (A)	165	175	125
	Napon el. luka U (V)	27	25	20
	Brzina dovođenja žice, v (m/min)	6.5	5	3
	Promjer žice Ø (mm)	1.2	1.2	1.2
	Zaštitni plin (l/min)	15	15	12
	Polaritet (+ / –)	(-)	(+)	(+)
Srednje vrijednosti parametara zavarivanja	Stanje eksperimenta – broj uzorka	1.2	2.2	3.2
	Jakost struje zavarivanja , I (A)	240	240	190
	Napon električnog luka, U (V)	30	26.5	23
	Brzina dovođenja žice, v (m/min)	11	7.5	5.5
	Promjer žice, Ø (mm)	1.2	1.2	1.2
	Količina zaštitni plin, (l/min)	16	18	14
	Polaritet (+ / –)	(-)	(+)	(+)
Više vrijednosti parametara zavarivanja	Stanje eksperimenta – broj uzorka	1.3	2.3	3.3
	Jakost struje I (A)	296	300	280
	Napon električnog luka U (V)	34	32.5	27
	Brz. dovođenja žice, v (m/min)	9.4	9.5	11.5
	Promjer žice Ø (mm)	1.2	1.2	1.2
	Zaštitni plin (l/min)	18	20	16
	Polaritet (+ / –)	(-)	(+)	(+)

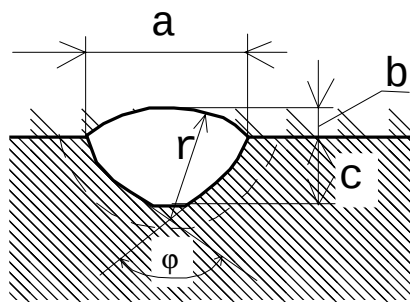
3.3 Određivanje količine nataljenog materijala u jedinici vremena

Nakon zavarivanja izrezani su uzorci koji su pripremljeni za metalografska ispitivanja (slika 5). Ispod svakog je uzorka oznaka stanja pokusa rastumačenog u tablici 1. Uzorci su metodom planimetriiranja i metodom analitičkog izračunavanja površine presjeka zavarenog spoja međusobno uspoređivani tako da je bilo moguće utvrditi količinu nataljenog materijala u jedinici vremena (produktivnost) za pojedina stanja eksperimentalnog istraživanja.



Slika 5. Makro uzorci zavarenih spojeva za pojedina stanja eksperimenta prema tablici

Sa makro uzoraka sa slike 5 izmjerene su vrijednosti širine, nadvišenja i dubine navara (slika 6 i tablica 4).



a - širina navara, mm
b - nadvišenje navara, mm
c - dubina navara, mm
r – radijus zakrivljenja nadvišenja zavora, mm
 φ - središnji kut, °

Slika 6. Poprečni presjek zavora s svim potrebnim dimenzijama za izračunavanje količine nataljenog materijala

Tablica 4. Vrijednosti širine navara (a), nadvišenja navara (b) i dubine navara (c) izmjerena sa makrouzoraka prikazanih na slici 5. Duljina izvlačenja prolaza (“gusjenice zavora”) je izmjerena kod eksperimentalnog zavarivanja na probnoj ploči.

Stanje eksperimenta - broj uzorka	Izmjerene vrijednosti			
	a, (mm)	b, (mm)	c, (mm)	Duljina izvlačenja, (mm)
1.1	10.6	1.9	0.7	310
1.2	15,0	2.2	1.1	345
1.3	16.7	3.1	1.7	385
2.1	11.7	2.3	1.4	255
2.2	12.9	3.1	2.3	260
2.3	17.4	4,0	2.3	300
3.1	7.3	2.8	1.1	235
3.2	10.2	2.2	1.2	300
3.3	13.6	3.3	2.1	325

Na temelju mjerenjem dobivenih podataka o osnovnoj geometriji navara za pojedina stanja eksperimenta (tablica 3), te korištenjem analitičkih izraza za izračun količine nataljenog materijala, dobiveni su podaci o količini nataljenog materijala za praškom punjene i punu žicu. Isti su navedeni u tablici 5, a grafički prikazani na slici 7.

Količina nataljenog materijala u jedinici vremena računala se prema izrazu:[8]

$$\dot{m} = \frac{m}{t}, \text{ kg/min, gdje je:}$$

$$m = \rho \cdot V, \text{ kg} \quad \dots \text{ masa nataljenog materijala}$$

$$V = A_n \cdot l, \text{ mm}^3 \quad \dots \text{ volumen navara}$$

$$A_n = \frac{r^2}{2} \cdot (\varphi - \sin \varphi), \text{ mm}^2 \quad \dots \text{ površina poprečnog presjeka navara}$$

$$r = \frac{a^2 + 4 \cdot b^2}{8 \cdot b}, \text{ mm} \quad \dots \text{ radijus zakrivljenja nadvišenja zavora}$$

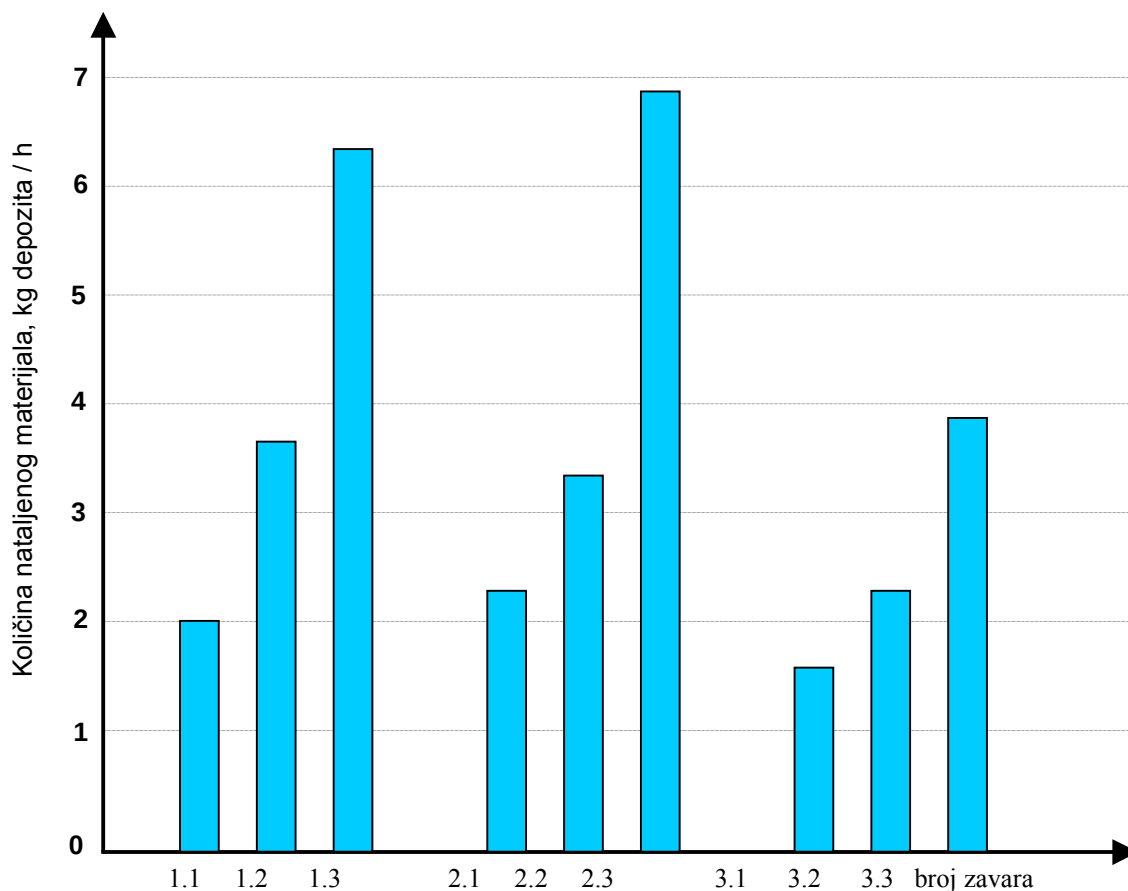
$$\sin \varphi = \frac{a \cdot (r - b)}{r^2}, \quad (\varphi = \frac{\pi}{180} \cdot \arcsin \varphi, \text{ rad}) \quad \dots \text{ središnji kut}$$

U tablici 5 daju se izračunate vrijednosti količine nataljenog materijala u jedinici vremena za pojedina stanja eksperimenta.

Tablica 5. Izračunate vrijednosti količine nataljenog materijala u jedinici vremena za pojedina stanja eksperimenta.

Stanje eksperimenta - broj navara	Izračunate vrijednosti navara				
	r, (mm)	sin φ	$\hat{\varphi}$	A, (mm ²)	k _t , (kg depozita/h)
1.1	8.34	0.9809	1.374	13.67	2.0
1.2	13.76	0.9136	1.15	22.61	3.674
1.3	12.89	0.9860	1.40	34.70	6.292
2.1	8.49	0.9988	1.52	18.86	2.255
2.2	8.14	0.9695	1.81	28.17	3.415
2.3	11.49	0.9887	1.72	48.37	6.825
3.1	3.81	0.5273	2.58	14.99	1.655
3.2	6.95	0.9969	1.64	15.76	2.195
3.3	8.67	0.9728	1.80	31.27	4.767

Zaključno se na slici 7 daje dijagramski prikaz količine nataljenog materijala u jedinici vremena za različite vrste praškom punjenih žica i punu žicu.



Slika 7. Prikaz količina nataljenog metala uz primjenu različitih žica

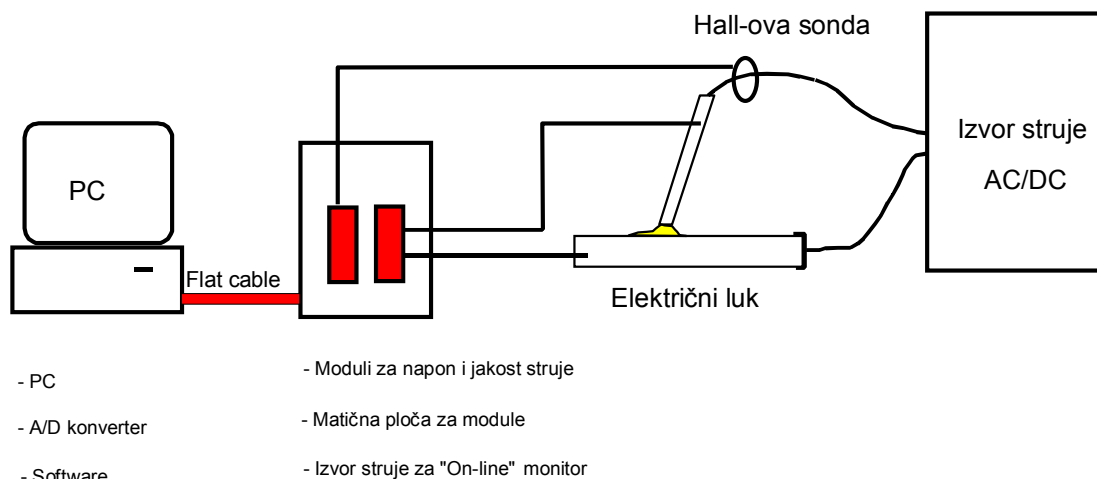
Na slici 7 je vidljivo da je kod pune žice (stanje pokusa 3.1, 3.2, 3.3) manja količina nataljenog materijala u odnosu na bazičnim praškom punjenu žicu (stanje pokusa 1.1, 1.2, 1.3) i rutilnim praškom punjenu žicu (stanje pokusa 2.1, 2.2, 2.3), kod svih ispitivanih razina parametara zavarivanja (niže, srednje i više vrijednosti parametara zavarivanja).

Budući da je poznato da kod zavarivanja općekonstrukcijskih čelika trajanje zavarivanja i osobni dohodak zavarivača predstavlja dominantni trošak u ukupnim troškovima zavarivanja (koji pored spomenutog uključuju još trošak električne energije, trošak dodatnog materijala i trošak opreme za zavarivanje), primjena praškom punjenih žica smanjit će potrebno vrijeme zavarivanja konstrukcije, pa tako i ukupne troškove zavarivanja.

4. ISTRAŽIVANJE STABILNOSTI GLAVNIH PARAMETARA MAG ZAVARIVANJA PRAŠKOM PUNJENIM I PUNIM ŽICAMA

4.1 On-line prikaz distribucije parametara zavarivanja

Tijekom zavarivanja u sklopu predhodno opisanog istraživanja količine nataljenog materijala, registrirani su glavni parametri zavarivanja: napon i jakost struje u električnom luku. Parametri zavarivanja su registrirani pomoću vlastitog On-line monitoring sustava koji ima mogućnost praćenje, akvizicije i naknadne off-line obrade registriranih parametara zavarivanja. Detaljnije analize registriranih parametara zavarivanja obično se provode nakon zavarivanja, odnosno "Off-line". Uređaj ima ugrađenu AD karticu ATMIO 16-X koja u sklopu sistema pruža mogućnost registracije do 15000 zapisa u sekundi po jednom kanalu. [4,5,6,7] Zapisi mogu biti vremenski $I=f(t)$, $U=f(t)$, $E_{ef}=f(t)$ ili odnosi dviju varijabli npr. $U=f(I)$. "Off-line" obradom zapisa uz primjenu odgovarajućeg software-a (Excel, Statgraphics, SPSS, LabView, Statistica, ...) moguće su različite analize kao napr. analiza broja kratkih spojeva, vrijeme trajanja kratkog spoja i električnog luka, frekvencije prijenosa metala, uspon struje di/dt , spektralna analiza, autokorelacijska analiza i dr. . Na slici 8 se daje shematski prikaz On-line monitoring sustava, dok se na slici 9 daje prikaz spomenutog sustava tijekom provedbe eksperimentalnih istraživanja.



Slika 8. Shematski prikaz On-line monitoring sustava za praćenje, akviziciju i obradu parametara zavarivanja



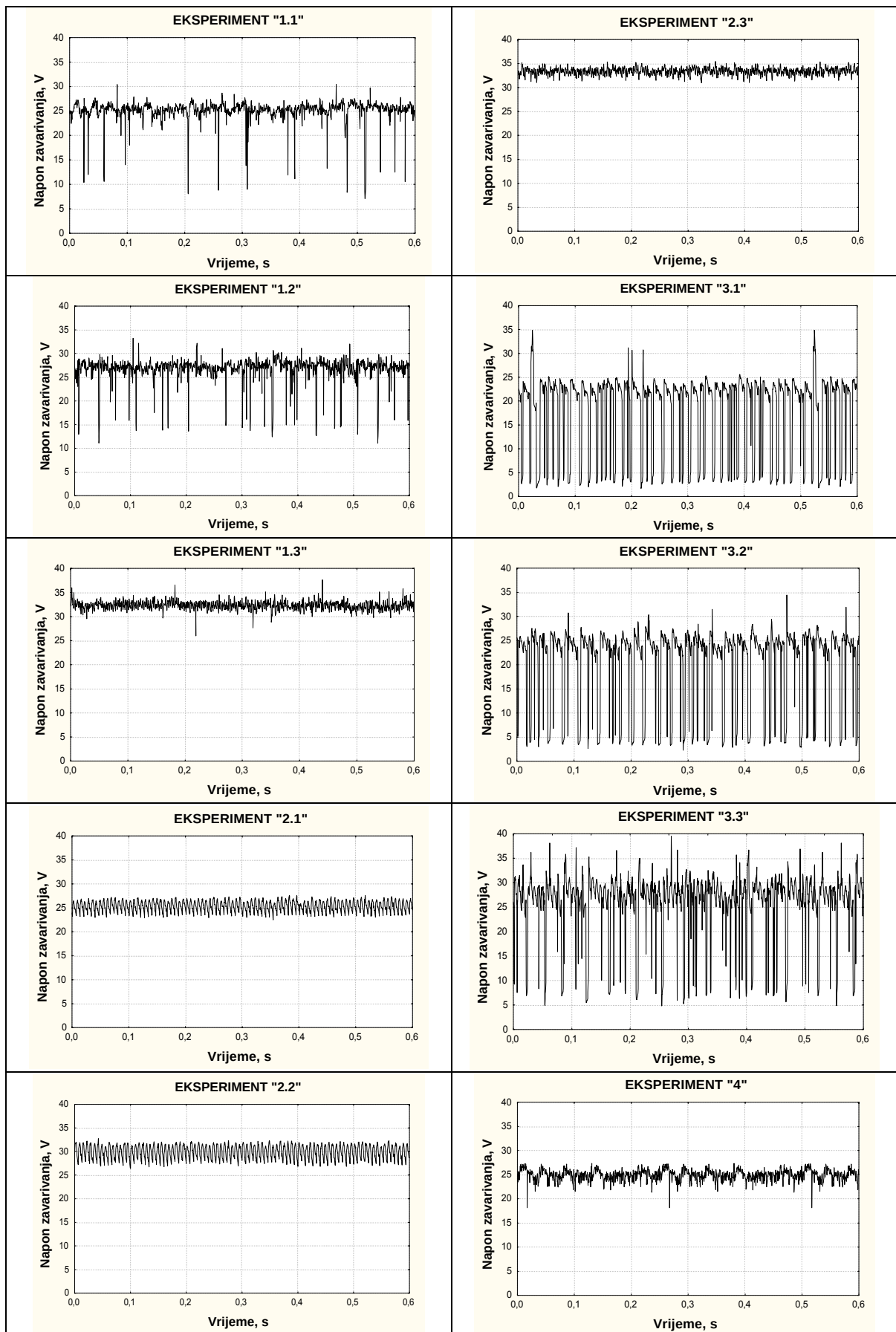
Slika 9. On-line monitoring sustav pri registraciji parametara zavarivanja praškom punjenom žicom

Tijekom MAG zavarivanja praškom punjenim žicama i punom žicom detaljnije opisanim u prethodnoj točki, praćeni su i registrirani parametri zavarivanja za sva stanja pokusa (tablica 1 i 2). Frekvencija uzimanja uzoraka tijekom mjerenja i registracije parametara zavarivanja je bila 1kHz. Dodatno je provedeno navarivanje i registracija parametara zavarivanja bazičnom praškom punjenom žicom na “+” polu (stanje pokusa pod nazivom: Eksperiment “4”). Kod prethodnih je zavarivanja žica bila na “-” polu, zbog povećanja količine nataljenog materijala.

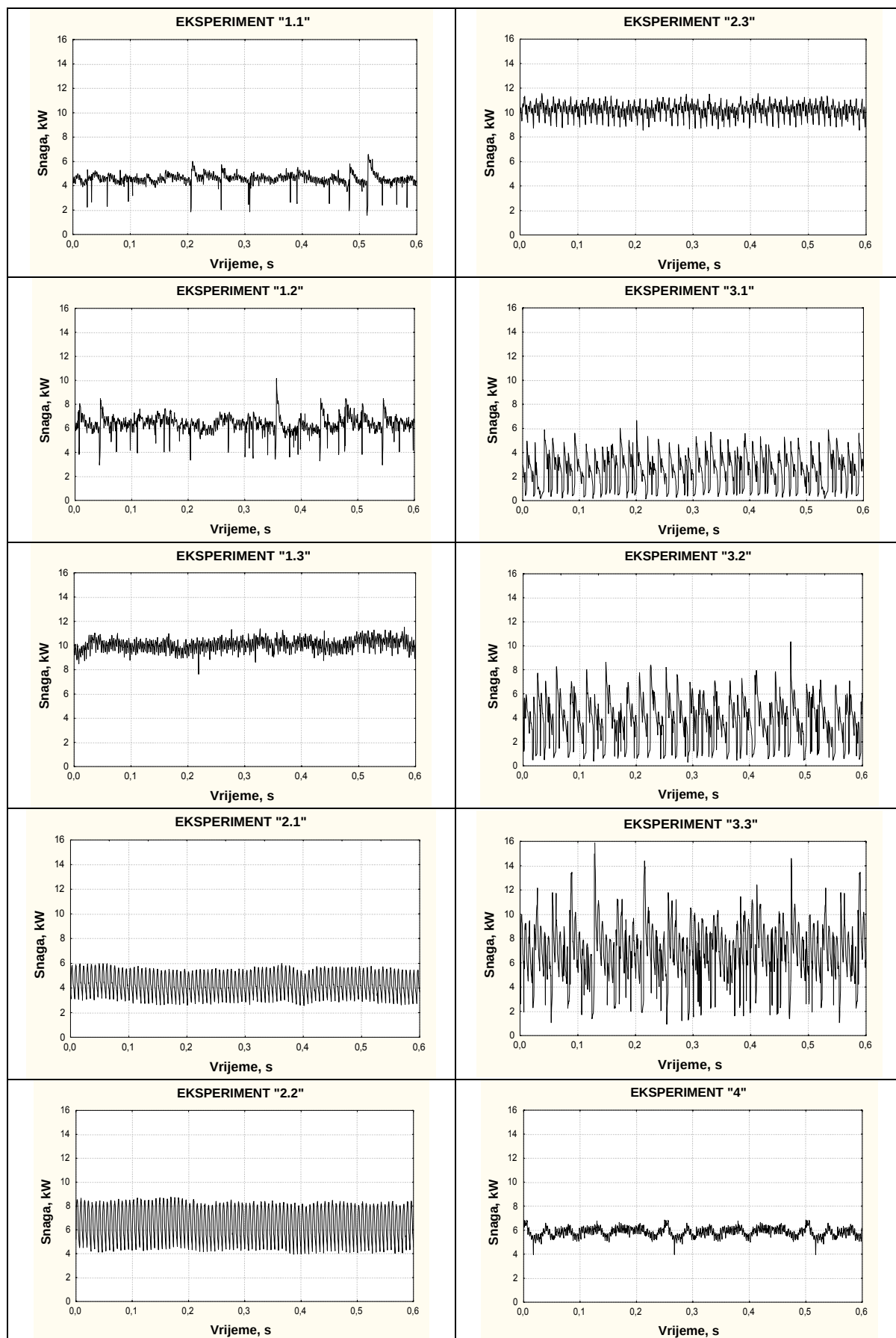
Na slikama 10 do 13 daje se prikaz stvarne distribucije napona i snage u električnom luku tijekom zavarivanja. Na slikama 10 i 11 odabran je vremenski interval trajanja uzorkovanja 0,6 sekundi, dok je na slikama 12 i 13 izdvojen (povećan) vremenski interval od 0,15 sekundi. Kako bi se lakše vizualno uspoređivalo zapise, za sva stanja pokusa je korišteno isto mjerilo prikazivanja podataka na svakoj slici.

Procjena stabilnosti procesa zavarivanja na osnovu parametara zavarivanja podrazumjeva usporedbu registriranih parametara zavarivanja (napr. napona i/ili snage zavarivanja) sa nekim referentnim ili alternativnim. Mora se naglasiti da do sada u svijetu nisu usvojeni standardi koji jasno definiraju ovaj problem. Jedan od glavnih problema je kompleksnost i dinamičnost procesa zavarivanja.

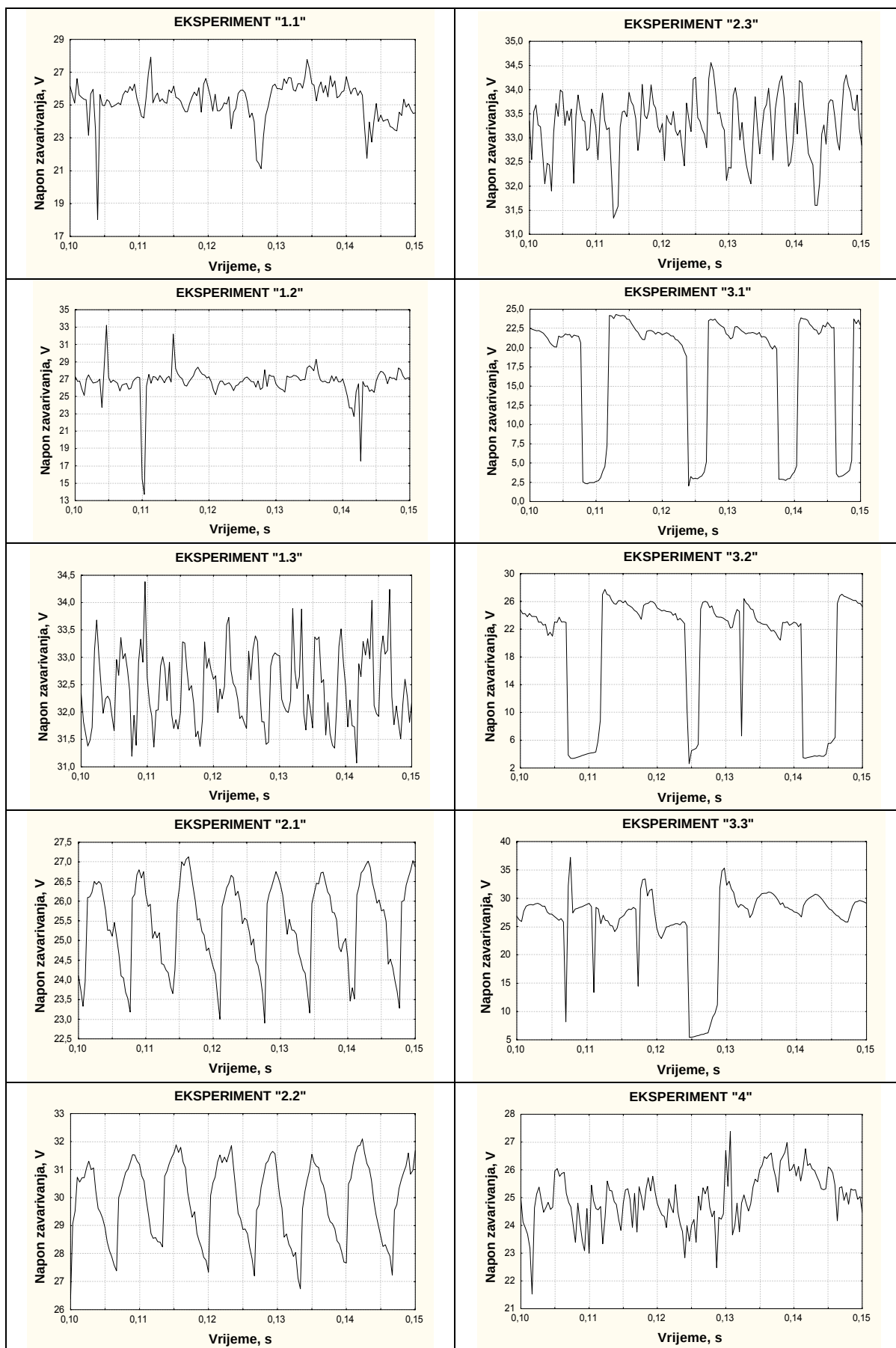
Usporedba stabilnosti parametara zavarivanja ima smisla ako se uspoređuju procesi zavarivanja kod istih ili približno istih parametara zavarivanja, odnosno za iste modele prijenosa materijala u električnom luku. Glavni su modeli prijenosa materijala u električnom luku: prijenos slobodnim letom kapljica (javlja se kod viših vrijednosti parametara zavarivanja), prijenos kratkim spojevima (javlja se kod nižih vrijednosti parametara zavarivanja), te mješoviti prijenos materijala (nešto između dva prethodno spomenuta prijenosa materijala, koji se javlja kod srednjih vrijednosti parametara zavarivanja). Sa slika 10 i 11 može se uočiti da se kod različitih stanja eksperimenta pojavljuju svi modeli prijenosa materijala u električnom luku. Može se reći da je kod provedenog zavarivanja rutilnim praškom punjenim žicama kod svih vrijednosti parametara zavarivanja prijenos materijala slobodnim letom kapljica. Kod provedenog zavarivanja bazičnim praškom punjenom žicom prijenos materijala slobodnim letom kapljica pojavljuje se samo kod viših vrijednosti parametara zavarivanja, a u preostala dva slučaja pojavljuje se mješoviti prijenos. Kod provedenog zavarivanja punom žicom za niže vrijednosti parametara zavarivanja prijenos materijala u električnom luku je kratkim spojevima. Povećavanjem parametara zavarivanja povećava se udio mješovitog prijenosa materijala, no nije moguće postići prijenos slobodnim letom kapljica.



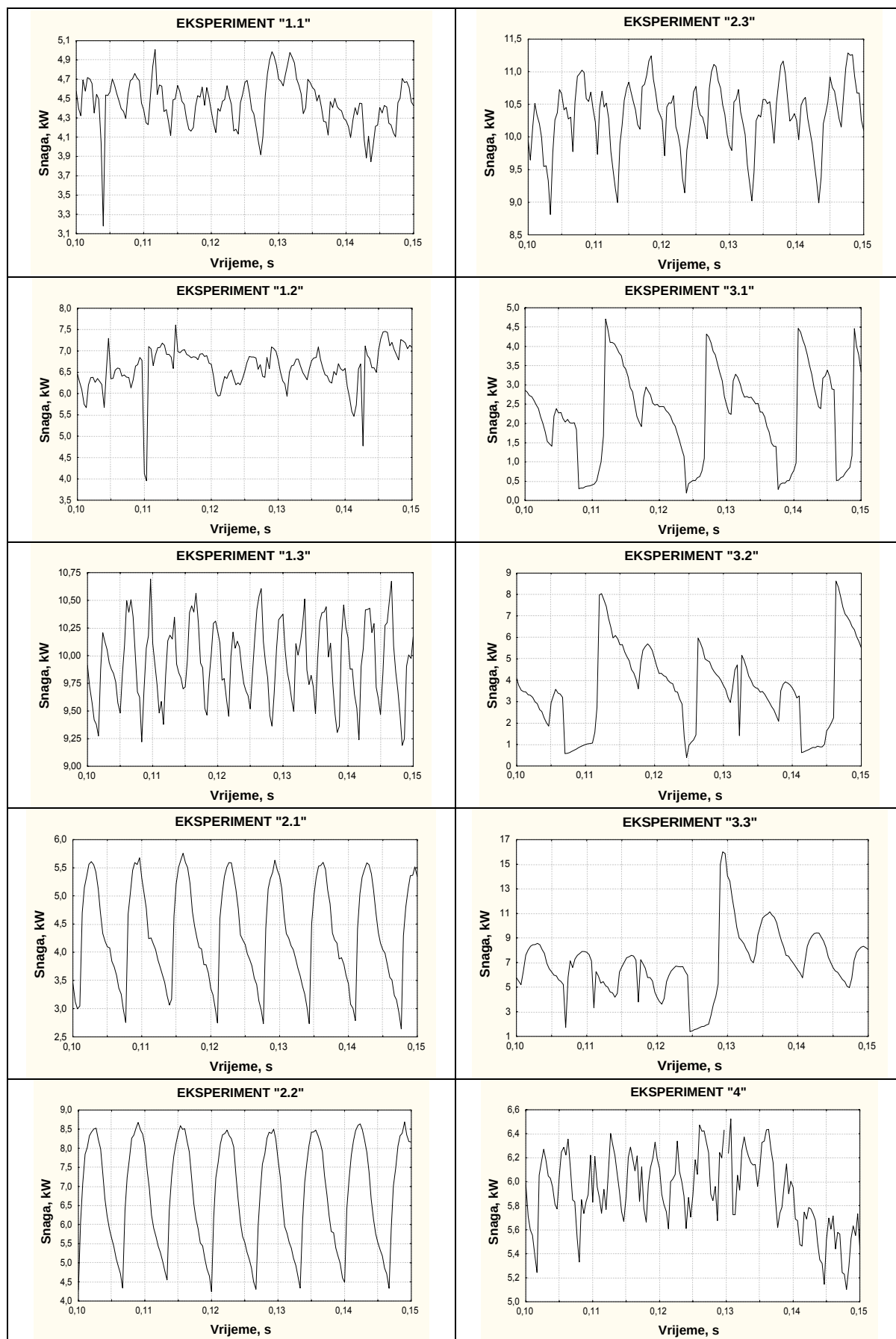
Slika 10. Distribucija napona zavarivanja tijekom 0,6 sekundi trajanja eksperimentalnog zavarivanja praškom punjenim žicama i punom žicom za stanja pokusa prema tablici 2. Dodatno je prikazan eksperiment br. 4 zavarivanje bazičnim praškom punjenom žicom priključenom na "+" pol. Frekvencija uzimanja uzoraka je bila 1 kHz.



Slika 11. Distribucija snage (umnožak napona i jakosti struje) zavarivanja tijekom 0,6 sekundi trajanja eksperimentalnog zavarivanja praškom punjenim žicama i punom žicom za stanja pokusa prema tablici 2. Dodatno je prikazan eksperiment br. 4 zavarivanje bazičnim praškom punjenom žicom priključenom na "+" pol. Frekvencija uzimanja uzoraka je bila 1 kHz.



Slika 12. Distribucija napona zavarivanja tijekom 0,15 sekundi trajanja eksperimentalnog zavarivanja praškom punjenim žicama i punom žicom za stanja pokusa prema tablici 2. Dodatno je prikazan eksperiment br. 4 zavarivanje bazičnim praškom punjenom žicom priključenom na "+" pol. Frekvencija uzimanja uzoraka je bila 1kHz.



Slika 13. Distribucija snage (umnožak napona i jakosti struje) zavarivanja tijekom 0,15 sekundi trajanja eksperimentalnog zavarivanja praškom punjenim žicama i punom žicom za stanja pokusa prema tablici 2. Dodatno je prikazan eksperiment br. 4 zavarivanje bazičnim praškom punjenom žicom priključenom na "+" pol. Frekvencija uzimanja uzoraka je bila 1 kHz.

4.2 Off-line analiza parametara zavarivanja

Nakon zavarivanja provedena je naknadna statistička obrada podataka. U nastavku se u tablici 6 daju neki rezultati statističke obrade uzorka parametara zavarivanja.

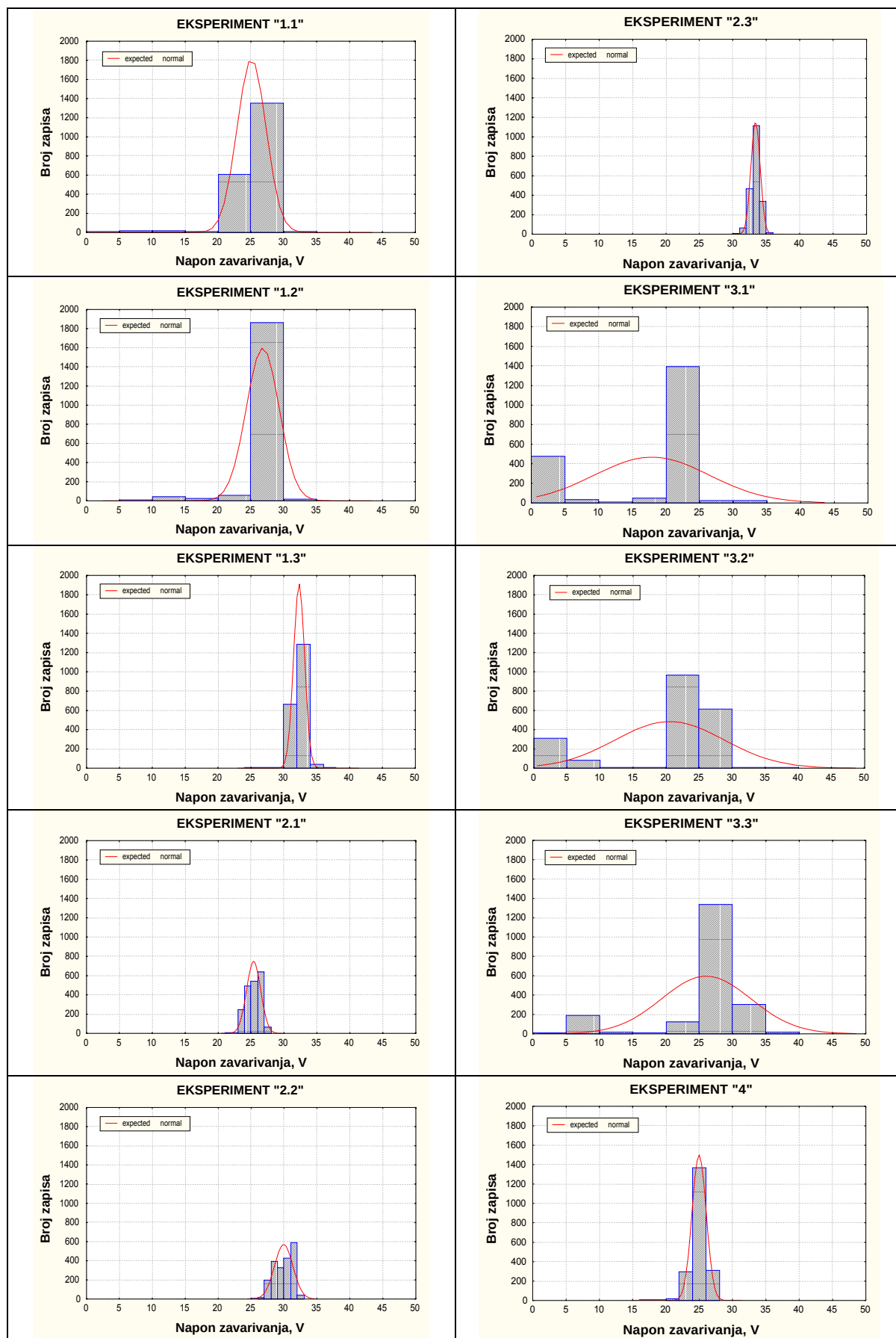
Tablica 6. Rezultati naknadne off-line statističke obrade mjerenjem dobivenih podataka za sva stanja pokusa

Stanje pokusa	Variabla	Broj uzoraka	Srednja vrijednost	Median	Suma svih podataka	Minimalna vrijednost	Maksimalna vrijednost	Standardna Devijacija
1.1	Jakost struje, A	2000	183.35	182.00	366690.90	147.40	269.90	13.33
	Napon, V	2000	25.09	25.39		7.07	30.50	2.19
	Snaga, kW	2000	4.59	4.59	9175.20	1.59	6.58	0.45
1.2	Jakost struje, A	2000	239.99	238.25	479972.90	195.10	352.20	18.94
	Napon, V	2000	26.79	27.24		11.12	33.21	2.50
	Snaga, kW	2000	6.41	6.44	12826.68	2.94	10.16	0.70
1.3	Jakost struje, A	2000	311.62	312.10	623238.30	271.50	344.40	13.02
	Napon, V	2000	32.32	32.33		25.98	37.65	0.83
	Snaga, kW	2000	10.07	10.10	20140.60	7.63	11.53	0.48
2.1	Jakost struje, A	2000	170.99	167.90	341970.00	109.00	224.50	28.38
	Napon, V	2000	25.38	25.42		22.48	27.64	1.07
	Snaga, kW	2000	4.37	4.25	8733.76	2.56	5.99	0.88
2.2	Jakost struje, A	2000	217.16	220.85	434315.90	143.70	277.90	36.93
	Napon, V	2000	29.95	30.17		26.37	32.72	1.40
	Snaga, kW	2000	6.55	6.66	13103.30	3.95	8.76	1.38
2.3	Jakost struje, A	2000	307.12	308.10	614231.60	265.80	335.40	12.05
	Napon, V	2000	33.39	33.44		31.00	35.45	0.70
	Snaga, kW	2000	10.26	10.30	20518.37	8.55	11.56	0.53
3.1	Jakost struje, A	2000	146.91	144.60	293825.19	29.68	273.20	41.02
	Napon, V	2000	17.91	22.19		1.71	34.88	8.54
	Snaga, kW	2000	2.50	2.69	4997.09	0.14	6.66	1.37
3.2	Jakost struje, A	2000	190.45	185.20	380896.82	76.14	354.50	46.00
	Napon, V	2000	20.53	24.04		2.26	35.29	8.23
	Snaga, kW	2000	3.81	3.96	7618.25	0.30	10.34	1.83
3.3	Jakost struje, A	2000	268.63	266.00	537261.00	158.00	471.00	51.35
	Napon, V	2000	26.04	27.90		4.78	39.50	6.70
	DC power, kW	2000	6.97	7.07	13932.51	0.93	16.01	2.37
4	Jakost struje, A	2000	234.73	236.75	469465.80	193.60	272.80	14.42
	Napon, V	2000	24.97	25.07		18.16	27.38	1.06
	Snaga, kW	2000	5.86	5.84	11713.14	3.96	6.86	0.38

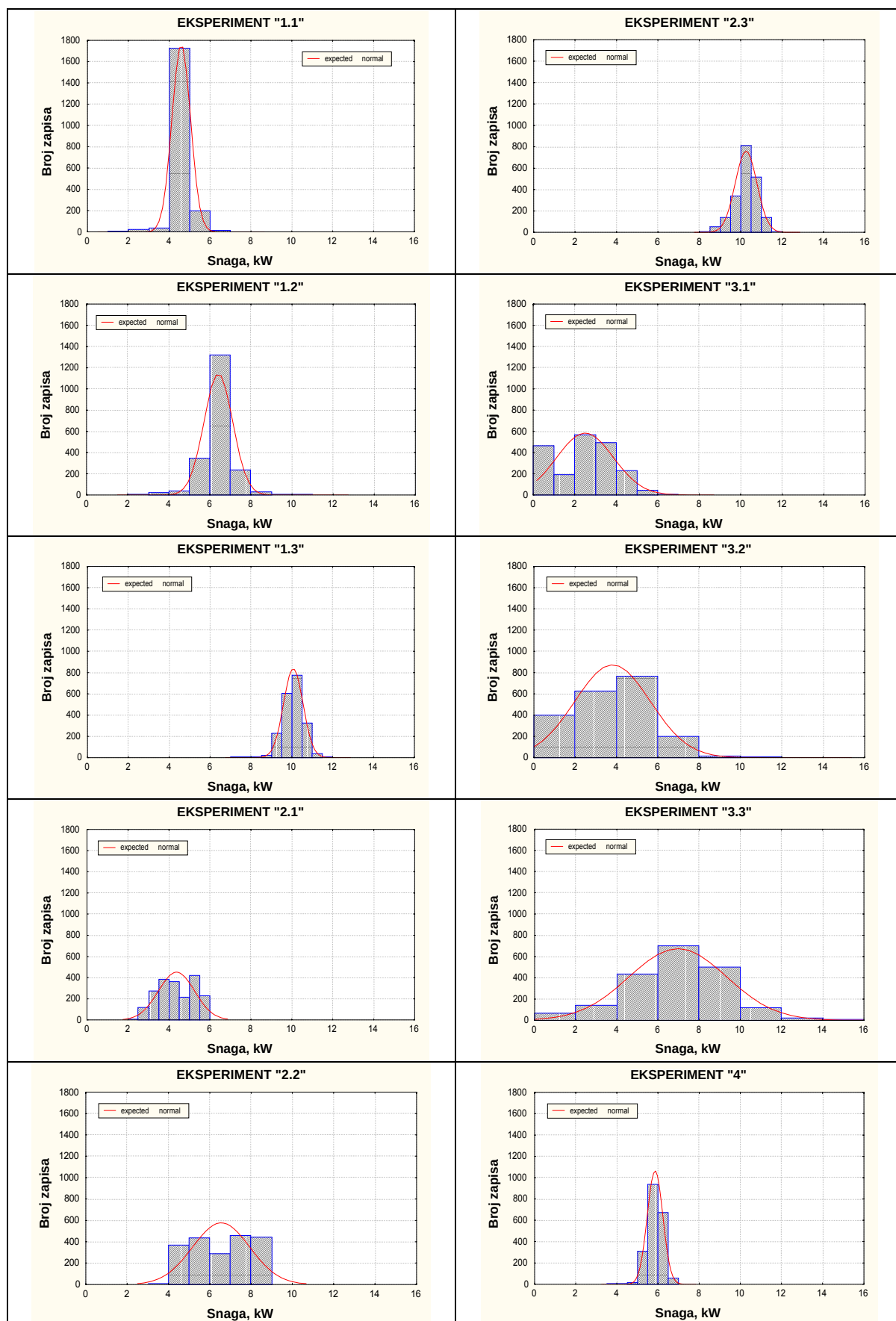
Usporede li se podaci o parametrima zavarivanja dobiveni uz pomoć običnog amper-volt-ohm metra koji se koristi u zavarivačkom poginu (tablica 2) sa podacima dobivenim uz pomoć On-line monitoring sustava i naknadno statistički obrađeni (tablica 6), mogu se uočiti određene razlike. One prvenstveno proizilaze iz metodološkog pristupa mjerenju. Sa stajališta iskustva autora ovog rada, te su razlike u okviru provedenog eksperimentalnog istraživanja prihvatljive. No, to svakako nije pravilo. Uz pomoć On-line monitoring sustava mjerenje parametara zavarivanja je točnije i preciznije.

Slike 14 i 15 pokazuju histogram frekvencija napona i snage u električnom luku za podatke prikazane na slici 10, odnosno 11. Radi bolje vizualne interpretacije svi su podaci u dijagramima (pa tako i u dijagramima histograma frekvencija) prikazani u istom mjerilu. Funkcija razdiobe podataka ovisi o modelu prijenosa materijala u električnom luku, a kreće se od bimodalne razdiobe (prijenos materijala “kratkim spojevima, tzv. kratki luk”, engl. short arc) do približno normalne razdiobe (prijenos materijala “slobodnim letom kapljica, tzv. štrcajući luk”, engl. spray arc). Na slikama se jasno uočavaju dominantne frekvencije, a moguća je i procjena modela prijenosa materijala u električnom luku. Slika 16 prikazuje odnos napona i jakosti struje tijekom zavarivanja. Na toj se slici najjasnije može uočiti i procijeniti model prijenosa materijala u električnom luku.

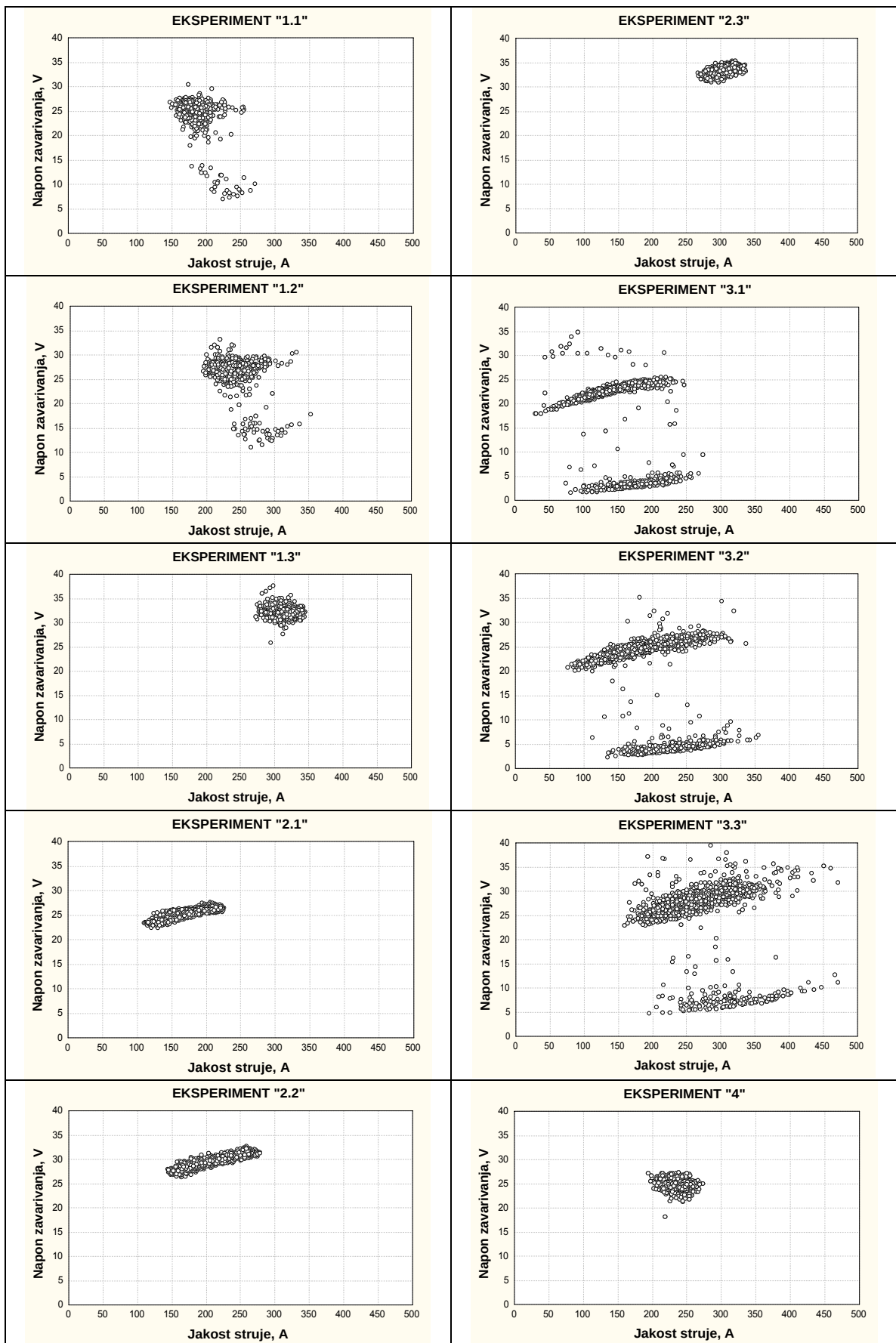
Slike 17 i 18 pokazuju spektralnu analizu podataka dobivenih za napon i snagu u električno luku. Na osnovu tih dijagrama moguća je procjena i usporedba stabilnosti procesa. Šire rasipanje spektra frekvencija znači veću nestabilnost procesa, i obrnuto. Na dijagramima se mogu jasno uočiti dominantne frekvencije za pojedina stanja eksperimenta. Sa stajališta stabilnosti parametara zavarivanja najbolji je zavarivanje rutilnim praškom punjenim žicama, a najlošije punom žicom.



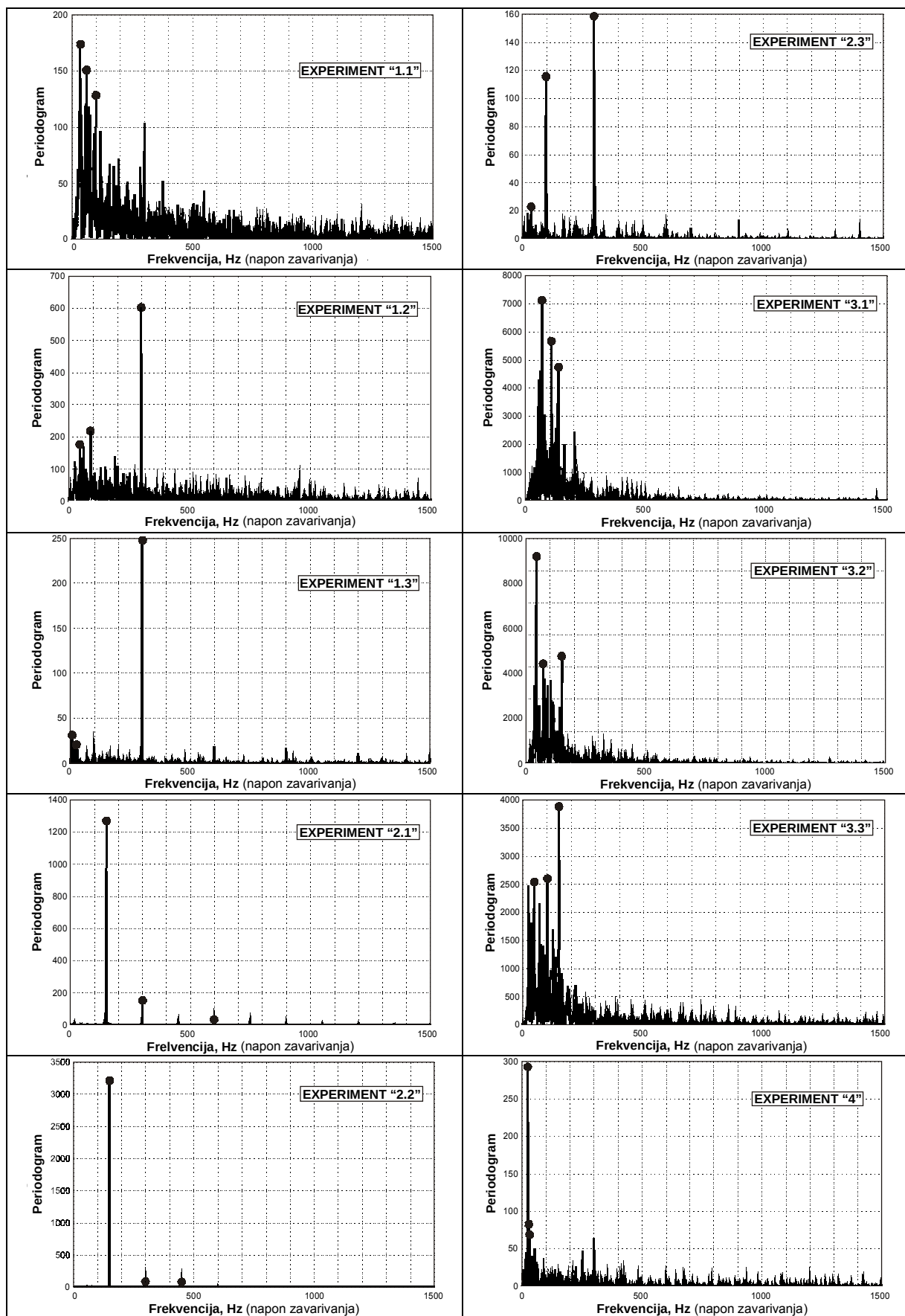
Slika 14. Histogram frekvencija napona zavarivanja tijekom 0,6 sekundi trajanja eksperimentalnog zavarivanja praškom punjenim žicama punom žicom za stanja pokusa prema tablici 2. Dodatno je prikazan eksperiment br. 4 zavarivanje bazičnim praškom punjenom žicom priključenom na “+” pol. Frekvencija uzimanja uzoraka je bila 1 kHz.



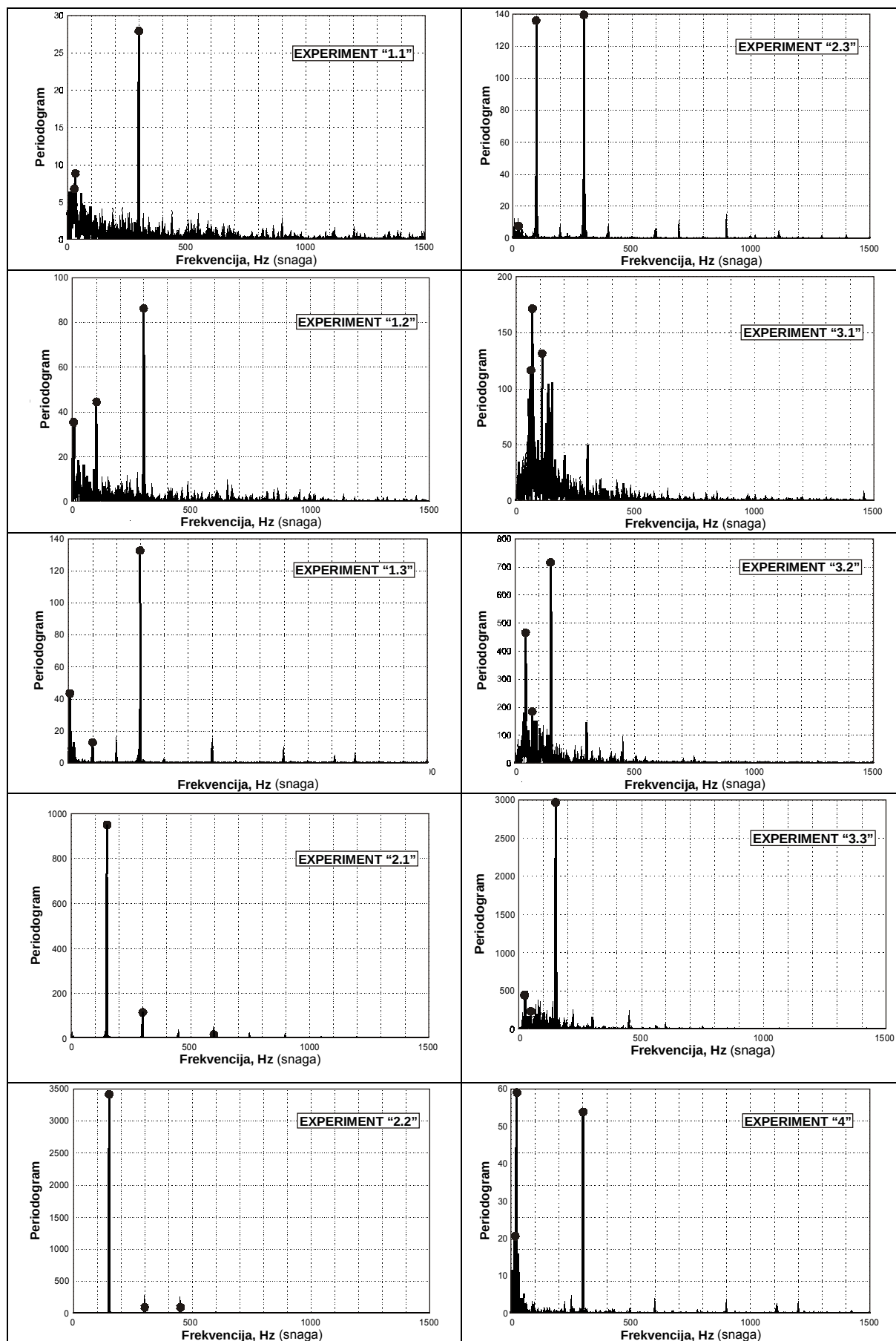
Slika 15. Histogram frekvencija snage (umnožak napona i jakosti struje) zavarivanja tijekom 0,6 sekundi trajanja eksperimentalnog zavarivanja praškom punjenim žicama punom žicom za stanja pokusa prema tablici 2. Dodatno je prikazan eksperiment br. 4 zavarivanje bazičnim praškom punjenom žicom priključenom na "+" pol. Frekvencija uzimanja uzoraka je bila 1kHz.



Slika 16. Međusobna ovisnost napona i jakosti struje zavarivanja tijekom 0,6 sekundi trajanja eksperimentalnog zavarivanja praškom punjenim žicama i punom žicom za stanja pokusa prema tablici 2. Dodatno je prikazan eksperiment br. 4 zavarivanje bazičnim praškom punjenom žicom priključenom na “+” pol. Frekvencija uzimanja uzoraka je bila 1kHz.



Slika 17. Dijagrami spektralne analize vrijednosti napona zavarivanja tijekom 0,6 sekundi trajanja eksperimentalnog zavarivanja praškom punjenim žicama i punom žicom za stanja pokusa prema tablici 2. Dodatno je prikazan eksperiment br. 4 zavarivanje bazičnim praškom punjenom žicom priključenom na "+" pol. Frekvencija uzimanja uzoraka je bila 1kHz.



Slika 18. Dijagrami spektralne analize vrijednosti snage (umnožak napona i jakosti struje) zavarivanja tijekom 0,6 sekundi trajanja eksperimentalnog zavarivanja praškom punjenim žicama i punom žicom za stanja pokusa prema tablici 2. Dodatno je prikazan eksperiment br. 4 zavarivanje bazičnim praškom punjenom žicom priključenom na “+” pol. Frekvencija uzimanja uzoraka je bila 1kHz.

ZAKLJUČAK

Istraživanja koja su obrazložena u ovome radu jasno pokazuju glavne prednost primjene praškom punjenih žica u zavarivanju općekonstrukcijskih čelika, a to su povećana količina nataljenog materijala i skraćanje vremena potrebnog za zavarivanje (što su značajni pokazatelji produktivnosti), te povećana stabilnost procesa zavarivanja procjenjena na osnovu praćenja i mjerenja glavnih parametara zavarivanja. Ova su istraživanja pokazala bolju stabilnost procesa zavarivanja rutilnim praškom punjenom žicom u odnosu na bazičnim praškom punjenu žicu. To se i moglo očekivati, no bilo bi zanimljivo usporediti mehanička svojstva zavarenih spojeva kod primjene ovih žica. Pitanje koje se nameće je sljedeće: Koliko se dobiva kroz povećanu stabilnost, a koliko se gubi na mehaničkim svojstvima kod zavarivanja rutilnim praškom punjenom žicom. Iako danas mnogi proizvođači praškom punjenih žica ističu da su uspjeli poboljšati mehanička svojstva rutilnim praškom punjenih žica (što je posebno problematično na niskim temperaturama), pravi će odgovor na ovo i druga pitanja iz područja primjene praškom punjenih žica dati odgovarajuća znanstvena i stručna istraživanja.

Zahvala: Autori zahvaljuju kolegama: dipl. ing. Božidaru Desptoviću (EWE), Branimiru Brechelmacheru (EWT) i ing. Tihomiru Marseniću iz tvornice Babcock Borsing Power, ĐĐ TEP d.d., kao i ing. Vladimiru Peciću sa Strojarskog fakulteta iz Slavonskog Broda na aktivnoj pomoći kod realizacije provedenih istraživanja.

LITERATURA

- [1] Lukačević, Zvonimir: Zavarivanje, knjiga, Slav. Brod 1998, Strojarski fakultet
- [2] Despotović, Božo; Brechelmacher, Branimir; Marsenić, Tihomir: Neka gledišta u primjeni punjenih žica, Zavarivanje 1/2, 1999.
- [3] Siewert, Thomas; Samardžić, Ivan; Kolumbić, Zvonimir: Procjena stabilnosti MAG postupka zavarivanja na osnovu monitoringa glavnih parametara zavarivanja. Zbornik radova znanstveno-stručnog savjetovanja „Ekonomski i kvalitativni aspekti visokoučinskih postupaka zavarivanja“, Slavonski Brod, „Đuro Đaković“, Holding, 2001.
- [4] Lukačević, Z.; Samardžić, I.: Possibilities of dynamic monitoring of the main parameters in arc welding processes. Zavarivanje 42(1998)1/2, page 11-18. Croatian Welding Society, Zagreb, 1999.
- [3] Lukačević, Z. Samardžić, I., Siewert, T.: Characterization of a Welding Procedure Based on Monitoring of Welding Variables. International Institute of Welding (IIW) Conference Doc. XII-1627-00, Firenca, 9-14 July 2000.
- [6] Samardžić, I.; Grubic, K.: Computer aided welding parameters monitoring. Zavarivanje 39(1996)1/2, page 23-28. Croatian Welding Society, Zagreb, 1996.
- [7] Samardžić, I.; Köves, A.: Weldments quality assurance supported by welding parameters monitoring and processing system. Proceedings of International Conference “Welding in Shipbuilding”, Croatian Welding Society, Zagreb, 1998.
- [8] Interna dokumentacija tvornice Babcock Borsing Power, ĐĐ TEP d.d.