

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
MATERIÁLOVOTECHNOLOGICKÁ FAKULTA SO SÍDLOM V TRNAVE

Ing. Martin Hnilica

Autoreferát dizertačnej práce

Výskum zvariteľnosti koróziivzdornej ocele s meďou laserovým lúčom

Na získanie akademického titulu: doktor (philosophiae doctor, v skratke PhD.)

V doktorandskom študijnom programe: Strojárske technológie a materiály

V študijnom odbore: 5.2.7 Strojárske technológie a materiály

Forma štúdia: denná

Miesto a dátum: Trnava, dňa 30.5.2022

Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Ústave výrobných technológií, Materiálovotechnologickej fakulty so sídlom v Trnave, Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ:

Ing. Martin Hnilica

Ústav výrobných technológií Materiálovotechnologická
fakulta so sídlom v Trnave Slovenská technická
univerzita v Bratislave

Jána Bottu 2781/25

91724 Trnava

Školiteľ:

doc. Dr. Ing. Pavel Kovačocy

Ústav výrobných technológií Materiálovotechnologická
fakulta so sídlom v Trnave Slovenská technická univerzita
v Bratislave

Jána Bottu 2781/25

91724 Trnava

Konzultant

.....
.....
.....

Autoreferát bol rozoslaný:.....

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa

o

h. na

**Materiálovotechnologickej fakulte so sídlom v Trnave, Slovenskej technickej
univerzity v Bratislave**

.....

prof. Ing. Miloš Čambál, CSc.

dekan Materiálovotechnologickej fakulty STU

OBSAH

ZOZNAM ILUSTRÁCIÍ A OBRÁZKOV	4
ZOZNAM TABULIEK	6
ÚVOD.....	7
1 SÚČASNÝ STAV DANEJ PROBLEMATIKY:.....	9
2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	16
3 TEPELNÁ A NAPÄŤOVO-DEFORMAČNÁ ANALÝZA SIMULAČNÉHO MODELU	17
3.1 Verifikácia simulačného modelu	17
3.2 Napät'ovo-deformačná analýza	23
4 ŠTRUKTÚRNA ANALÝZA ZVAROVÝCH SPOJOV A ICH HODNOTENIE	27
4.1 Makroskopická analýza	27
4.2 Mikroskopická analýza	29
5 SKÚMANIE VPLYVU PARAMETROV NA MECHANICKÉ VLASTNOTI ZVAROVÝCH SPOJOV	32
5.1 Analýza variantnosti pre medzu pevnosti	32
5.2 Analýza variantnosti pre maximálnu teplotu	35
6 VÝSLEDKY A PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	38
7 ZÁVER	39
8 ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV	42
ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI.....	44

ZOZNAM ILUSTRÁCIÍ A OBRÁZKOV

Obrázok 1: Aplikácia zvarovania kombinácie materiálov oceľ-med' (laserfocusworld, 2021)	7
Obrázok 2: Zdroj tepla s Gaussovskou distribúciou (Manca., 1995)	9
Obrázok 3: Namerané tvrdosti podľa Vickersa (Moharana, 2020)	10
Obrázok 4: Graf dosahovaných teplôt v procese zvarovania (Katiar, 2012)	11
Obrázok 5: Pór vo vzorke korózievzdornej ocele a medi zvaranej laserom (Li, 2020)	11
Obrázok 6: Rovnovážny binárny diagram Fe-Cu(Lukyanov, 2014)	12
Obrázok 7: Proces likvačného praskania (Li, 2020)	12
Obrázok 8: Graf závislosti reflektivity od vlnovej dĺžky (Chen., 2015)	13
Obrázok 9: Určenie kladného a záporného vybočenia lúča (Sahul, 2020)	14
Obrázok 10: Vplyv parametrov na medzu pevnosti v ťahu (Sahul, 2020)	15
Obrázok 11: Použitý tvar a rozmery skúšobného telieska na skúšku ťahom	17
Obrázok 12: Makroskopický prierez vzorky s najväčšou medzou pevnosti	19
Obrázok 13: Simulačný prierez vzorky s najväčšou medzou pevnosti	19
Obrázok 14: Schematické zobrazenie umiestnenia termočlánkov na vzorke	20
Obrázok 15: Zvarovanie vzorky s prizváranými termočlánkami	21
Obrázok 16: Graf zaznamenaných teplotných cyklov vzorky s termočlánkami	21
Obrázok 17: Teplotné polia v čase 2,1 sekundy	22
Obrázok 18: Teplotné polia v čase 3,4 sekundy	22
Obrázok 19: Deformačná analýza vzorky v čase 2,1 sekundy	23
Obrázok 20: Deformačná analýza vzorky v čase 3,4 sekundy	24
Obrázok 21: Elastické deformácie v čase 2,1 sekundy	25
Obrázok 22: Elastické deformácie v čase 2,1 sekundy pohľad v reze A-A	25
Obrázok 23: Problémy zvaranej vzorky Cu ETP a AISI 304	27
Obrázok 24: Chemická analýza vzorky	28
Obrázok 25: Zhrubnuté zrno v TOO oblasti zo strany medi	29
Obrázok 26: Rozhranie medzi zvarovým kovom a teplom ovplyvnenej oblasti zo strany AISI 304	30
Obrázok 27: Ukážka ostrovov Cu vo zvarovom kove	30
Obrázok 28: Schematické znázornenie vzniku guľočok medi vo zvarovom kove (Chen, 2013)	31
Obrázok 29: Vplyv parametrov na medzu pevnosti	33
Obrázok 30: Paretova tabuľka štandardizovaných efektov pre medzu pevnosti	33

Obrázok 31: Vrstevnicové grafy sledujúce medzu pevnosti	34
Obrázok 32: Vplyv parametrov na teplotu v procese zvarovania.....	35
Obrázok 33: Paretova tabuľka štandardizovaných efektov pre maximálnu teplotu	36
Obrázok 34: Vrstevnicové grafy sledujúce maximálnu teplotu.....	37

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1: Kombinácie parametrov zvarovania (Sahul, 2020).....	14
Tabuľka 2: Zostavené DOE so sledovanými premennými	18
Tabuľka 3: Odchýlky v procese verifikácie modelu.....	20
Tabuľka 4: Namerané teploty v procese zvarovania	21
Tabuľka 5: Analýza variantnosti pre medzu pevnosti	32
Tabuľka 6: Analýza variantnosti pre maximálnu teplotu	35

ÚVOD

Technológia zvárania laserom patrí medzi progresívne metódy zvárania, ktorá je neodmysliteľnou súčasťou dnešnej doby. Daná technológia je zaradená medzi technológie s koncertovaným zdrojom energie a vďaka jej podstate, nám dokážu vznikajúť úzke a hlboké zvary rôznych materiálov. Výsledné vyhotovenie zvarov v je omnoho rýchlejšie, ako zvary vyrobené inými konvenčnými tavnými technológiami. Pre možnosť automatizácie laserového zvárania sa zváranie využíva hlavne v automobilovom, ropnom, leteckom a jadrovom priemysle. V tejto práci boli zvolené dva materiály, nehrdzavejúca oceľ 304 a čistá meď. Táto kombinácia materiálov sa v minulosti najviac používala ako rúrkové alebo medené chladiče, kde sa využíva kombinácia ich vlastností ako je korózna odolnosť a tepelná vodivosť.

Cieľom dizertačnej práce je vyhotoviť adekvátny simulačný model zvarového spoja AISI 304 – Cu - ETP použiteľný na testovanie zvaracích parametrov a ich vplyvov na dosahovanie teplotných polí, deformácií a napätí v procese zvárania. Dôvodom prečo boli vybrané tieto materiály je, že meď má výbornú elektrickú vodivosť, odolnosť voči korózii, obrábateľnosť a ťažnosť. Nehrdzavejúca oceľ má výborné mechanické vlastnosti a dobrú zvariteľnosť. Aktuálne aplikácie zvárania rozdielných kombinácií tenkých materiálov čelia zvýšenému priemyselnému záujmu vďaka svojim implikáciám v oblasti e-mobility. V automobilovom priemysle prevláda aplikácia, keď je potrebné pripojiť cylindrické články k akýmkoľvek prvkom tvoriacim batériu, ako sú dosky plošných spojov alebo prípojnice. Ukážka aplikácie pripojenia batérie sa nachádza na obrázku 1.



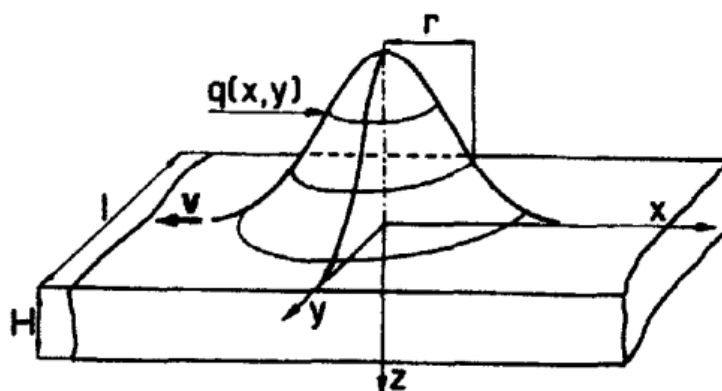
Obrázok 1: Aplikácia zvárania kombinácie materiálov oceľ-med' (laserfocusworld, 2021)

Simulácia sa používa na napodobňovanie fungovania procesu alebo systému v reálnom svete v priebehu času. V prípade zvarovania sa simulácie presúvajú do virtuálneho sveta, čo so sebou prináša výhody ako znížená náročnosť na potrebný materiál, lepšia predikcia teplotných polí, deformácií a napätí, optimalizácia zvaracích parametrov a lepšie pozorovanie zvaracích procesov v reálnom čase.

1 SÚČASNÝ STAV DANEJ PROBLEMATIKY:

Táto kapitola sa zaoberá teoretickými východiskami problematiky laserového zvarovania, problémami zvariteľnosti kombinácie materiálov AISI 304 – Cu ETP, stratami energie v procese zvarovania, prípadne výsledkami makroskopickej analýzy a mechanických skúšok pre danú kombináciu zvarovaných materiálov. Vytváranie adekvátnych simulačných modelov je náročný proces a preto je potrebné mať široký záber teoretického štúdia, aby sa mohli minimalizovať prípadné odchýlky od reality.

Manca et al., 1995, a Oronzo et al., 1993, skúmali matematické vyjadrenie tepelného zdroja odvodeného podľa Jaegera pre štvoruholníkové tepelné zdroje a rozdielne tvarované tepelné zdroje podľa Rosenthala pre polonekonečné a konečné telesá. Jedným z ich cieľov bolo dosiahnuť zdroj tepla s Gaussovskou distribúciou. Nimi uvažovaná geometria zdroja tepla sa nachádza na obrázku 2. (Manca, 1995; Oronzo, 1993)



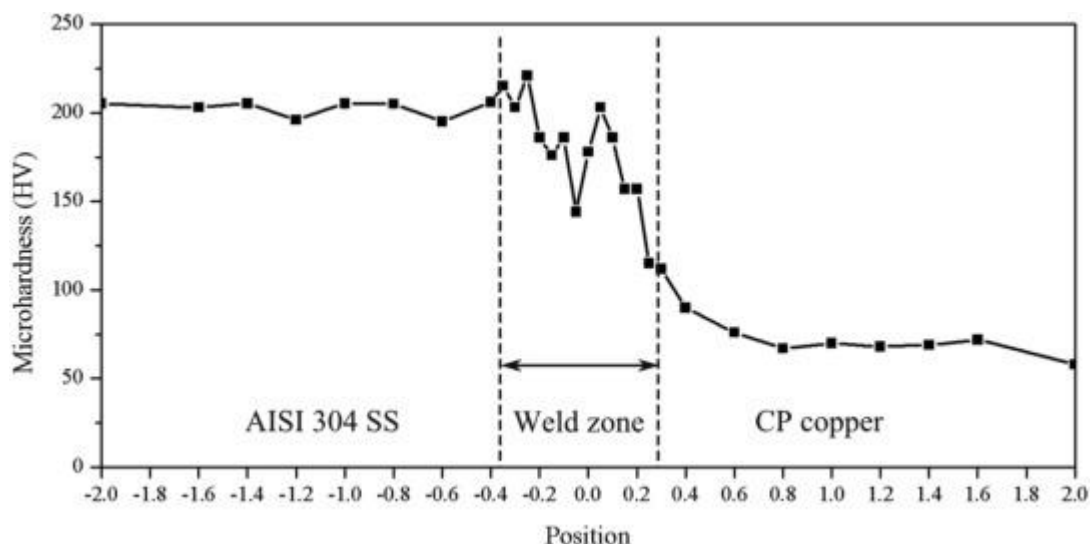
Obrázok 2: Zdroj tepla s Gaussovskou distribúciou (Manca., 1995)

Následne analyzovali ich tepelné polia v strednej rovine solidov a výsledky prezentovali ako funkciu Pecletovho čísla, hrúbky solidu a jeho šírky. Pecletovo číslo bolo použité v kontexte prevodu tepla ako pomer rýchlosti advekcie ku rýchlosti difúzie, čo je považované za ekvivalent k súčinu Reynoldsovho čísla a Prandtlvho čísla. (Manca, 1995)

Vadde et al., 2015 simulovali metódou konečných prvkov formovanie paroplynového kanála v procese mikrozvarovania laserovým lúčom a skúmali vplyv parametrov na finálny tvar paroplynového kanála charakterizované pomocou šírky, výšky a teplom ovplyvnenej oblasti. Na simuláciu zvarovania korózievzdornej ocele AISI 304 použili softvér ANSYS APDL a experimentálne výsledky porovnali s výsledkami

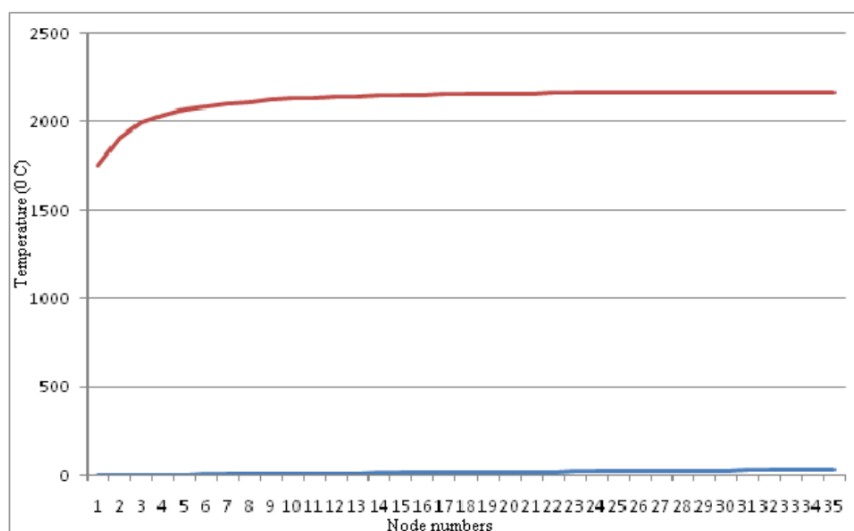
simulovanými. Na simuláciu zdroja tepla použili Gaussovskú distribúciu a na reálne vzorky bol použitý ND:YAG laser. Výsledkom ich výskumu bolo zmapovanie vytvárania paroplynového kanála a zozbieranie výsledkov. (Vadde, 2015)

Ich vzorky boli zároveň podrobené skúškam tvrdosti podľa Vickersa kde sa ukázalo, že v oblasti zvaru dochádza k výraznej nelineárnej zmene tvrdosti. (Moharana, 2020)



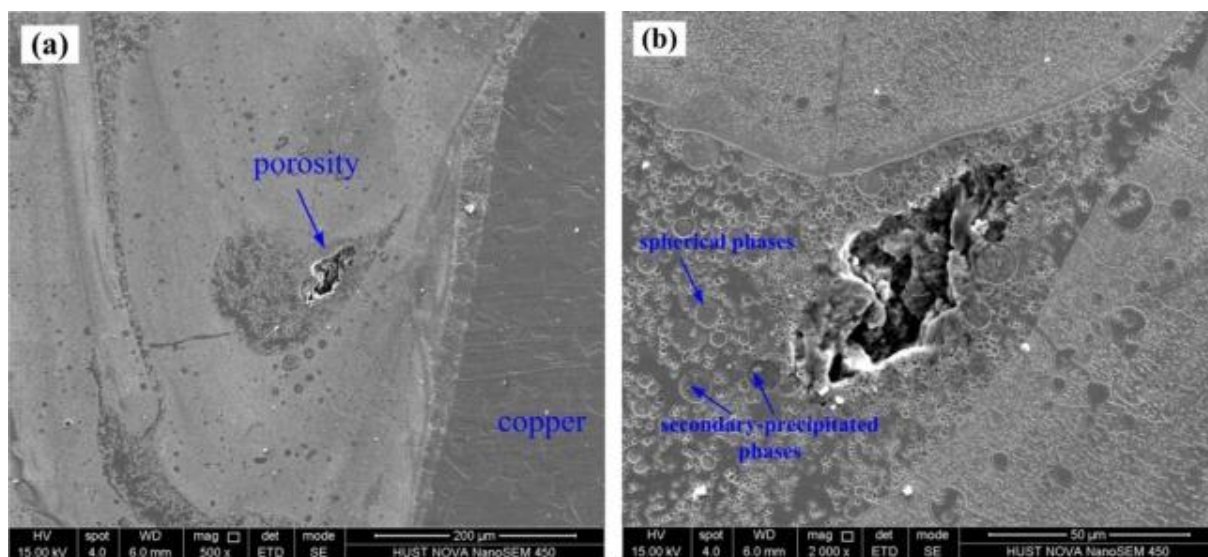
Obrázok 3: Namerané tvrdosti podľa Vickersa (Moharana, 2020)

Katiar, K et al 2012 simulovali proces zvarovania ND:YAG laserom v programe ANSYS APDL za použitia pulzného módu zvarovania. Uvažovali so zvaraním korózievzdornej ocele AISI 304 a technickej meďi. Postupovali tak, že si vytvorený solid rozdelili na konečné prvky a do uzlových bodov v trajektórii zvarovania zadefinovali tepelný príkon, ktorý mal reprezentovať pulzy. Jeden z ich výsledkov ukazoval graf maximálnej teploty dosahovaných v procese zvarovania, tento graf sa nachádza na obrázku 4. Z tohto grafu je možné vyčítať, že po nábehu zvarovania, prejde proces do druhej fázy, kde maximálna teplota v procese sa mení minimálne. Z toho sa dá usúdiť, že ak chceme zistiť maximálne teploty v procese simulácie zvarovania, tak vzorku je možné skrátiť a pri rovnakom výpočtovom výkone aj nahustiť sieť a dosiahnuť kvalitnejšiu simuláciu. (Katiar, 2012)



Obrázok 4: Graf dosahovaných teplôt v procese zvarovania (Katiar, 2012)

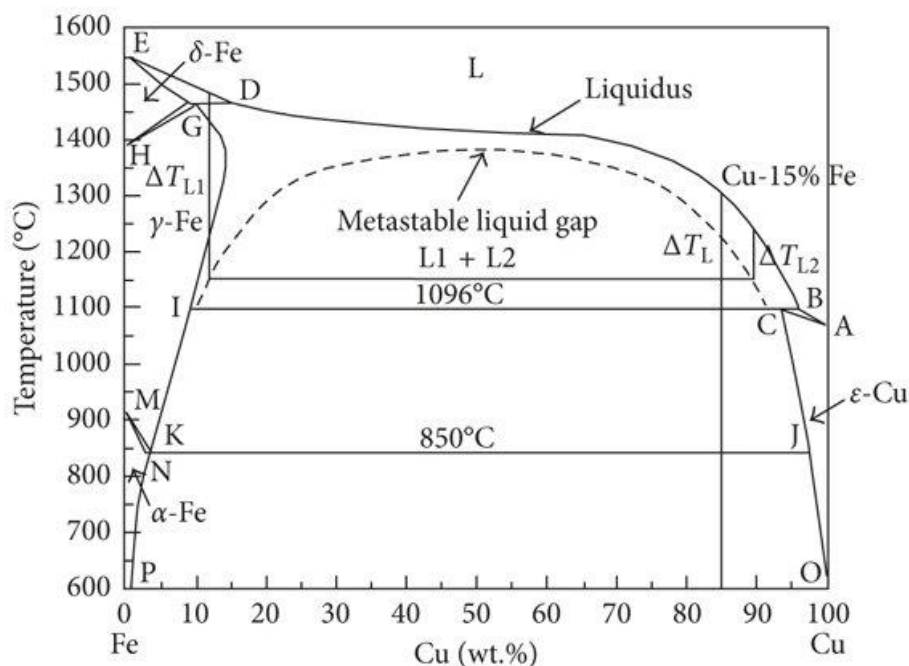
Li et al., 2020 skúmali problémy zvariteľnosti medi a koróziezdornej ocele. Na zváranie použili vláknový laser o maximálnom výkone 3kW s priemerom stopy lúča 0,3mm. V experimente upravovali parametre ako výkon použitý pri zvaraní, fokusácia laserového lúča, rýchlosť zvarovania a uhol naklopenia lúča. Po vyhotovení vzoriek ich podrobili mikroskopickej analýze. Pri skúmaní narazili na dva problémy zvariteľnosti - porozitu a likvačné praskanie zváraných spojov. Príklad nájdeného póru sa nachádza na obrázku 5 v dvoch zväčšeniach. (Li, 2020)



Obrázok 5: Pór vo vzorke koróziezdornej ocele a medi zvaranej laserom (Li, 2020)

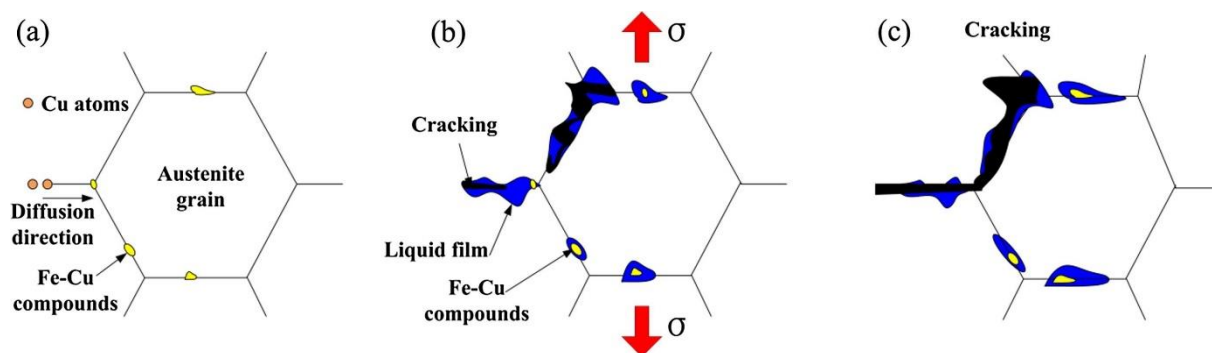
Takéto lokálne nerovnomerné štruktúry sú spojené hlavne so segregáčnym tuhnutím legujúcich prvkov. Vychádzajúc z fázového diagramu Fe-Cu, ktorý spomína vo svojej výskumnej práci A Lukyanov a kol. na obrázku 6, je z neho možné vyčítať, že

vzhľadom na rozdielnú teplotu tavenia materiálov a v procese solidifikácie nastane precipitácia železa do roztavenej oblasti bohatej na meď.



Obrázok 6: Rovnovážny binárny diagram Fe-Cu(Lukyanov, 2014)

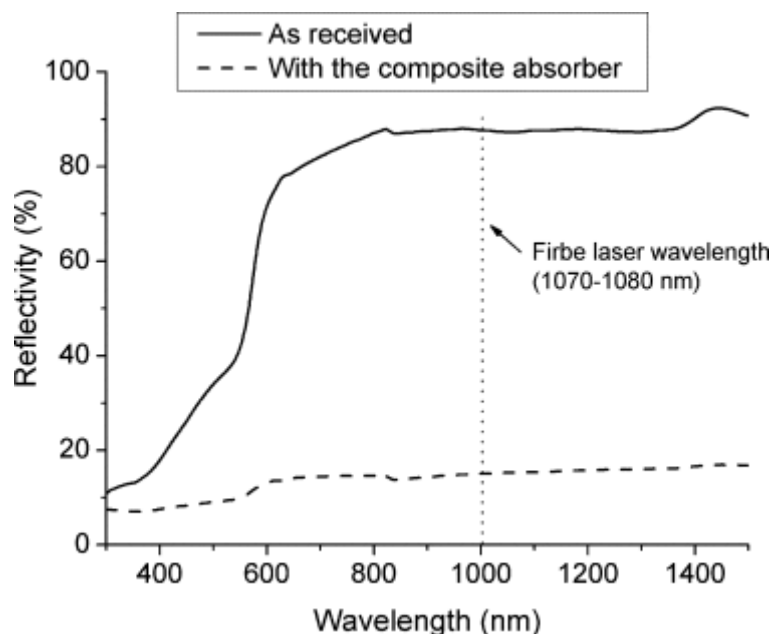
Druhým pozorovaným problémom bolo likvačné praskanie. Pozdĺž skvapalnených hraníc zŕn v teplom ovplyvnenej oblasti objavovalo likvačné praskanie s nepravidelnou morfológiou. V prípade zliatin Fe-Cu likvačné praskanie súvisí s difúziou atómov Cu pozdĺž hranice austenitického zrna. Nimi zdokumentovaný proces likvačného praskania pri chladnutí je znázornený na obrázku 7. (Li, 2020)



Obrázok 7: Proces likvačného praskania (Li, 2020)

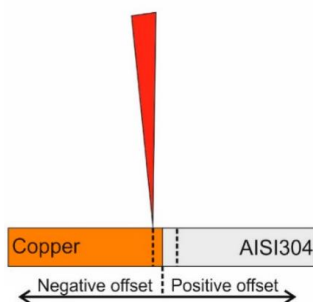
Chen H., et al., 2015 skúmali problematiku reflektivity čistej medi a ich zliatin. Na skúmanie bola použitá čistá meď, ktorú zvárali tupým spojom. Na zváranie použili

vláknový laser s vlnovou dĺžkou 1070-1080 nm a pohyb lúča bol zabezpečený pomocou priemyselného robota. Následne nastriekali na medené pláty kompozitný absorbér zložený zmiešaním z 99,8% čistou meďou a zvyšok tvorila transparentná živica. Následne odrazivosť materiálu v procese zvarovania bola meraná za pomoci spektrofotomera Shimadzu UV-3101PC UV-VIS-NIR. Výsledkom vznikol graf závislosti reflektivity od vlnovej dĺžky a je zobrazený na obrázku 8. Pri vlnovej dĺžke 1070 nm bola odrazivosť čistej medi okolo 88% a po nastriekaní kompozitným absorbércom sa odrazivosť výrazne znížila až o cca 73%. Z experimentu vyplýva, že kompozitná absorbčná vrstva vie zohrať dôležitú rolu v odrazivosti čistej medi. Absorbér použitý v danom experimente sa skladal z podobného zloženia ako samotný materiál, len pri nanášaní sa vytvorila drsnejšia povrchová vrstva, ktorá spôsobila daný rozdiel v reflektivitě a nespôsobila by výrazné zmeny v chemickom zložení výsledného zvaru. (Chen, 2015)



Obrázok 8: Graf závislosti reflektivity od vlnovej dĺžky (Chen., 2015)

Sahul a kol. 2020, skúmali vplyv vybočenia lúča na mechanické vlastnosti a vývoj mikroštruktúr pri zvarovaní AISI 304 a technickej medi. Nastrihané vzorky boli podrobené optickej emisnej spektrometrii na zistenie presného chemického zloženia a následne opracované frézovaním hrán, aby bol dosiahnuté perfektné priliehanie zvarovaných plôch. Na zvarovanie bol použitý diskový laser TruDisk 4002. Určenie hodnoty kladnosti/zápornosti vybočenia lasera bolo uskutočňované podľa nákresu na obrázku 9. (Sahul, 2020)



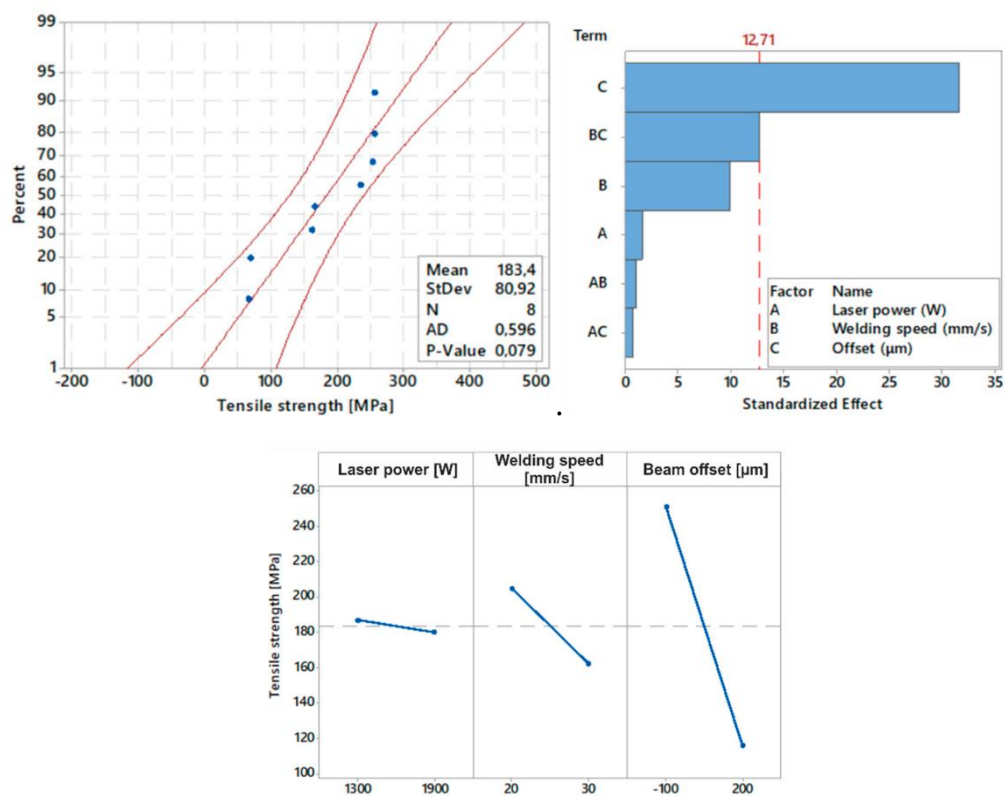
Obrázok 9: Určenie kladného a záporného vybočenia lúča (Sahul, 2020)

Pri zváraní bolo uvažované s dvomi úrovňami rýchlosti – 20 a 30 mm/s, dvoma úrovňami výkonu lasera - 1,3 a 1,9 kW a s vybočením až do 200 μm do oboch strán. Na zostavenie experimentu bolo vybraných 8 rôznych kombinácií vstupných parametrov zvárania. Sledovaný parameter v ich experimente bola medza pevnosti v ťahu. Po vyhotovení vzoriek boli z nich vytvorené vzorky na ťahovú skúšku. Použité kombinácie zvárania a hodnoty namerané ťahovými skúškami sa nachádzajú v tabuľke 1. (Sahul, 2020)

Tabuľka 1: Kombinácie parametrov zvárania (Sahul, 2020)

Welded Joint No.	Laser Power (kW)	Welding Speed (mm/s)	Beam Offset (μm)	Heat Input (J/mm)	Weld Width (mm)	Tensile Strength [MPa]
1	1.9	20	+200	95	1.969	162
2	1.3	30	+200	43.3	1.034	70
3	1.3	20	+200	65	1.228	166
4	1.3	30	-100	43.3	1.097	261
5	1.9	20	-100	95	1.249	236
6	1.9	30	+200	63.3	1.246	66
7	1.9	30	-100	63.3	0.89	256
8	1.3	20	-100	65	1.063	254

Na základe lineárneho modelu mohla byť zostavená analýza variantnosti a zistiť matematickú závislosť, na základe ktorej vedeli zostaviť graf pravdepodobnosti pre medzu pevnosti v ťahu zobrazený na obrázku 10 a), Pareto diagram štandardizovaných vplyvov parametrov, nachádzajúci sa na obrázku 10 b) a ich kombinácií a následne zostaviť graf vplyvov parametrov na medzu pevnosti v ťahu zobrazený na obrázku 10 c). (Sahul, 2020)



Obrázok 10: Vplyv parametrov na medzu pevnosti v ťahu (Sahul, 2020)

Z výsledku experimentu a určenia štatistickej významnosti parametrov zvarania bolo vyhodnotené, že samotné vychýlenie lúča do strany malo najväčší vplyv na dosahované mechanické vlastnosti. (Sahul, 2020)

2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Na základe poznatkov získaných z dostupnej literatúry, publikácií a využiteľnosti výskumu v projekte APVV-18-0116 boli stanovené nasledovné ciele dizertačnej práce:

1. Zostavenie simulačného modelu

Dôvodom stanovenia tohto cieľa je vytvoriť metodiku a vytvoriť simulačný model, ktorý je možné rozdeliť na nezávislé moduly, aby bol aplikovateľný aj na iné problémy v oblasti zvarovania. Model pozostáva z troch základných na sebe nezávislých častí: materiálový model, geometrický model, príkazové riadky pohybujúceho zdroja tepla.

2. Verifikácia simulačného modelu

Dôvodom stanovenia tohto cieľa je verifikovať dôveryhodnosť simulačného riešenia a jeho následné možnosti použitia. Po následnej verifikácii je možné vykonať na simulačnom modeli meranie teplôt v procese a zároveň použiť ho do napäťovo-deformačnej analýzy.

3. Zostavenie experimentu s použitím fyzických vzoriek

V tomto celi je sledovaný vplyv jednotlivých parametrov na sledovanú premennú medzi pevnosti. Cieľ bude uskutočnený vyhotovením experimentu 33 následným vyhotovením 27 zvarovaných vzoriek z ktorých budú spravené po 3 skúšobné telieska podľa normy ISO 6892-1 a ich priemerná hodnota bude sledovaná premenná. Následne s využitím štatistických metód plánovania a vyhodnocovania experimentu bude vyhodnotená štatistická významnosť parametrov.

4. Zostavenie experimentu s použitím simulačných výsledkov

V tomto celi je sledovaný vplyv jednotlivých parametrov na premennú - teplotu v procese zvarovania, kde sa vychádza z verifikovaného simulačného modelu. Simulačný model bude odsimulovaný pre každú kombináciu parametrov. Sledovaná premenná bude braná z polovice času zvarovania a následne s využitím štatistických metód plánovania a vyhodnocovania experimentu bude vyhodnotená štatistická významnosť parametrov na danú sledovanú premennú.

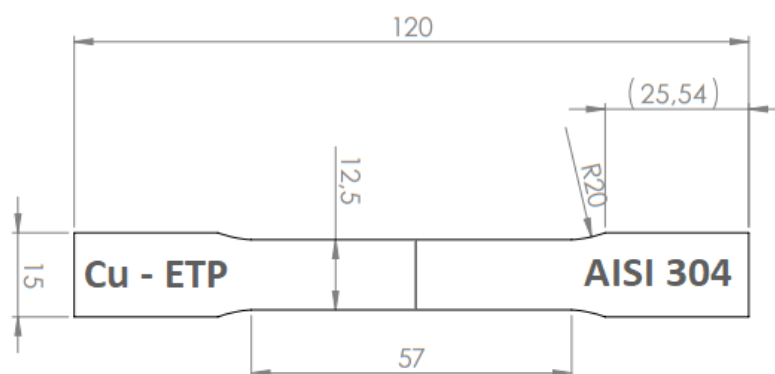
3 TEPELNÁ A NAPÄŤOVO-DEFORMAČNÁ ANALÝZA SIMULAČNÉHO MODELU

Experimentálna časť dizertačnej práce pozostávala z verifikácie simulačného modelu za pomoci tepelnej analýzy, kde boli skúmané teplotné polia dosiahnuté simulačne s reálnou vzorkou. Následne dané výstupné hodnoty boli použité ako vstupné premenné do napäťovo-deformačnej analýzy.

3.1 Verifikácia simulačného modelu

Na verifikáciu teplotných polí v procese zvárania sa použili dva spôsoby. Bolo vyhotovených 27 zváraných vzoriek s kombináciou parametrov. Fyzické vyhotovenie vzoriek prebiehalo v laboratóriách Materiálovotechnologickej fakulty STU.

Prvý spôsob bol na základe makroskopickej analýzy a teplotných polí voči simulácii a druhý bol na základe termočlánkov a teplôt dosiahnutých v procese zvárania. Výber vzorky na confirmáciu simulačného modelu bol uskutočnený vyhotovením 27 vzoriek s kombináciou parametrov, následným vyrezaním ťahových teliesok za pomoci vodného lúča podľa normy STN EN ISO 6892-1 s rozmermi na obrázku 11. Z každej vzorky boli takto vyhotovené 3 telieska a výsledná hodnota je priemer z troch meraní.



Obrázok 11: Použitý tvar a rozmery skúšobného telieska na skúšku ťahom

Tabuľka 2: Zostavené DOE so sledovanými premennými

Výkon [W]	Rýchlosť [mm/s]	Offset (- medz; + ocel') [mm]	Sila na medzi pevnosti [N]	Sila na medzi pevnosti [N]	Sila na medzi pevnosti [N]	Priemerná hodnota [N]	Ultimate Stress [MPa]	Ultimate Stress [MPa]	Ultimate Stress [MPa]	Priemerná hodnota [MPa]	Maximálna teplota v t/2 zvarovania [°C]	Tepelný príkon podľa vzťahu $Q=P/v$ [J/mm]	Roztrhnutie vzorky
1800	20	-0,15	3050	3040	3050	3046,7	244	244	244	244	1492,4	90	med' TOO
1800	25	-0,15	3080	3070	3065	3071,7	246	243	248	245,67	1345,4	72	med' TOO
1800	30	-0,15	3040	3055	3050	3048,3	243	242	244	243	1281	60	med' TOO
1800	20	0	2900	3060	3060	3006,7	232	245	245	240,67	1990,8	90	med' TOO
1800	25	0	3130	3130	3120	3126,7	251	250	250	250,33	1846,6	72	med' TOO
1800	30	0	2730	2720	2740	2730	199,2	200	197	198,73	1754,2	60	zvar
1800	20	0,15	979	1110	1650	1246,3	78,1	88,8	132	99,633	2766,4	90	zvar
1800	25	0,15	1090	939	1390	1139,7	87	75,1	111	91,033	2633,4	72	zvar
1800	30	0,15	2800	2850	2830	2826,7	226,4	220	228	224,8	2545,2	60	med' TOO
2000	20	-0,15	3050	3030	3040	3040	244	246	245	245	1873,34	100	med' TOO
2000	25	-0,15	3050	3050	3040	3046,7	244	244	242	243,33	1482,74	80	med' TOO
2000	30	-0,15	3100	3120	3150	3123,3	248	245	247	246,67	1360,8	66,667	med' TOO
2000	20	0	3210	3120	3220	3183,3	257	250	255	254	2319,94	100	med' TOO
2000	25	0	3040	3050	3030	3040	243	244	243	243,33	2016,84	80	med' TOO
2000	30	0	2500	2520	2480	2500	224	221	223	222,67	1908,76	66,667	med' TOO
2000	20	0,15	1890	2610	1910	2136,7	151	209	153	171	3105,2	100	zvar
2000	25	0,15	2550	1280	1570	1800	204	103	126	144,33	2899,4	80	zvar
2000	30	0,15	1630	2860	2170	2220	130	229	174	177,67	2777,6	66,667	zvar
2200	20	-0,15	3050	3030	3045	3041,7	244	241	240	241,67	2206,4	110	med' TOO
2200	25	-0,15	3070	3060	3055	3061,7	246	242	240	242,67	1817,2	88	med' TOO
2200	30	-0,15	3050	3060	3045	3051,7	244	240	245	243	1488,2	73,333	med' TOO
2200	20	0	3050	3050	3060	3053,3	244	244	245	244,33	2689,4	110	med' TOO
2200	25	0	3080	3070	3050	3066,7	246	245	244	245	2312,8	88	med' TOO
2200	30	0	3020	3040	3070	3043,3	242	243	246	243,67	2146,2	73,333	med' TOO
2200	20	0,15	2750	2800	2750	2766,7	220	225	220	221,67	3518,2	110	Zvar
2200	25	0,15	3060	2310	2140	2503,3	245	185	171	200,33	3203,9	88	Zvar
2200	30	0,15	2310	1850	1570	1910	185	148	125	152,67	3085,6	73,333	Zvar

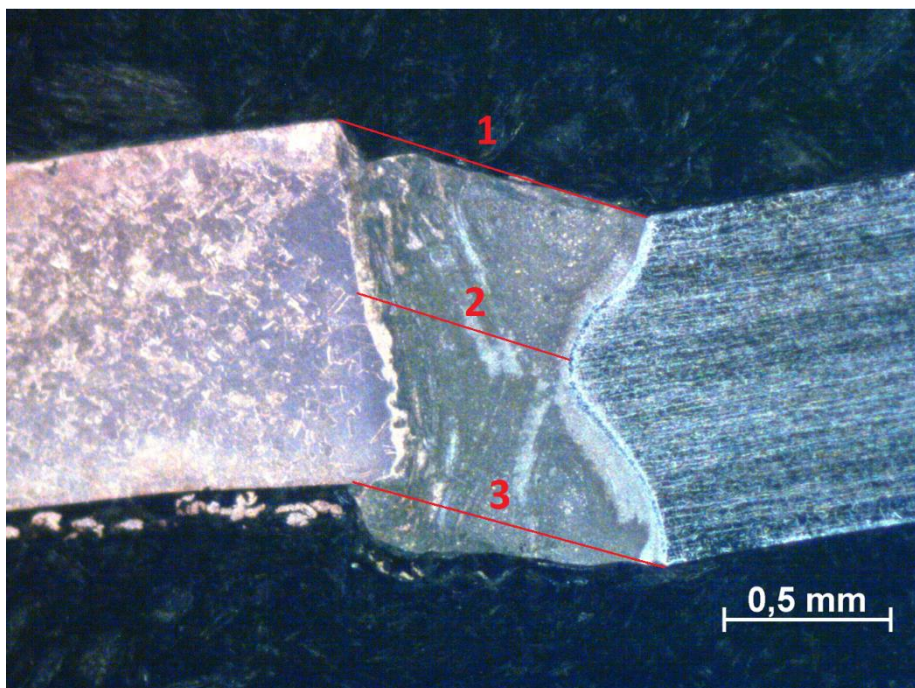
Na základe nadizajnovaného DOE s meranou hodnotou medza pevnosti a s výberovým kritériom najväčšia hodnota na medzi pevnosti bola vybraná vzorka vyznačená v tabuľke 2 modrou farbou s nasledovnými parametrami zvarovania:

$$P = 2000 \quad [\text{W}]$$

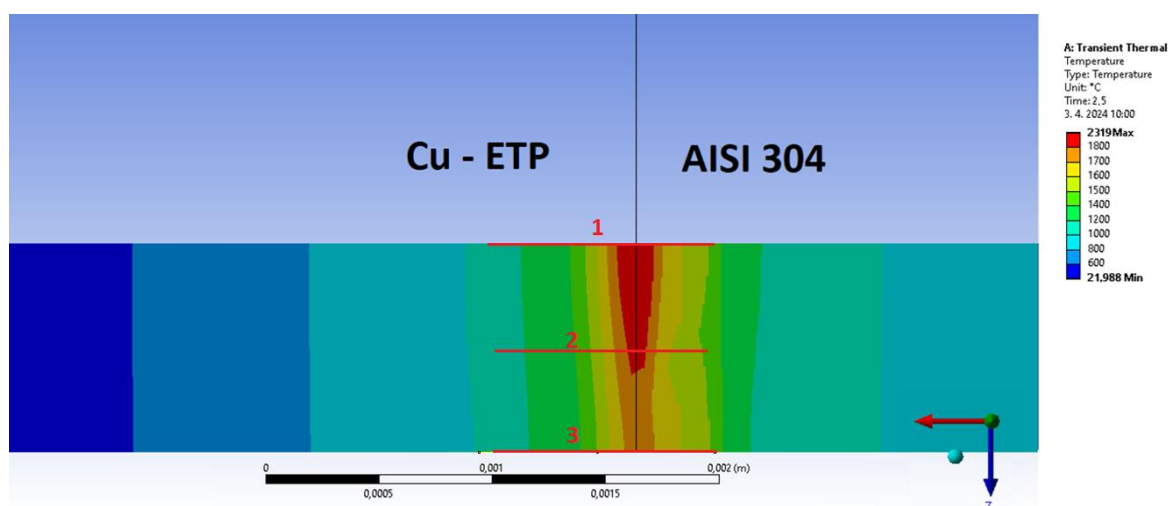
$$V = 20 \quad [\text{mm/s}]$$

$$\text{Offset} = 0 \text{ (fokusácia presne na hranu medzi Cu – ETP a AISI 304)}$$

Dané parametre boli použité do simulácie v prostredí ANSYS na overenie komformity teplotných polí. Vzorka na obrázku 12 pochádza z cca. polovice času zvarovania preto aj simulácia na obrázku 13 je v čase 2,5 sekundy.



Obrázok 12: Makroskopický prierez vzorky s najväčšou medzou pevnosti



Obrázok 13: Simulačný prierez vzorky s najväčšou medzou pevnosti

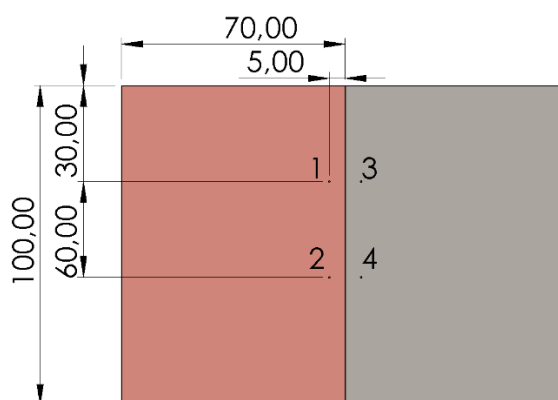
Na obrázkoch 56 a 57 je vidieť, že teplota dosahovaná aj v koreni zvaru je nad teplotou tavenia, takže sa zabezpečil prievár v celej hrúbke materiálu a zároveň tvar zvaru má podobné charakteristické črty ako simulačný model. Nakoľko zvar dosiahol chybu prevýšenia, meranie šírky zvaru bolo problematické aj za použitia programu ImageJ. Bola zvolená technika porovnania šírky zvaru za spôsobu zmerania spojnice medzi základným materiálom AISI 304 a Cu – ETP, označená číslom 1. Následne boli vedené rovnobežky s úsečkou 1 medzi vzorkami v strede hrúbky materiálov a v koreni zvaru. Výsledné namerané hodnoty boli zapísané do tabuľky 13. V prípade prvej a tretej úsečky bola

odchýlka okolo 1%, ale prevýšenie zvaru spôsobilo, že úsečka 2, mala oproti simulácií odchýlku cca 25%.

Tabuľka 3: Odchýlky v procese verifikácie modelu

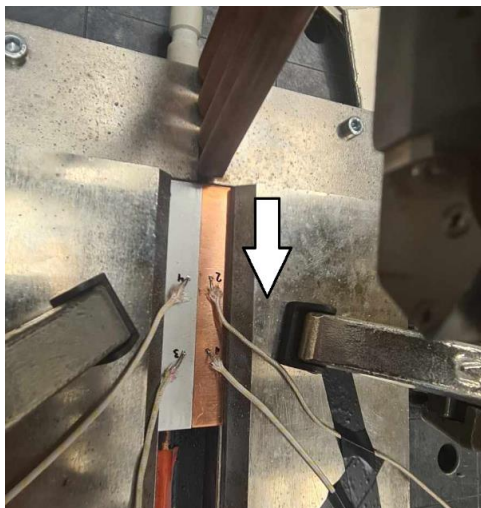
Číslo úsečky	Nameraná dĺžka pri makroskopickej analýze [mm]	Nameraná dĺžka pri simulácií [mm]	Odchýlka v %
1	1.001	0.99	1,01
2	0.665	0.89	25,28
3	0.993	0.98	1,01

Druhé porovnanie bolo pomocou meraní termočlánkov. Na meranie boli použité termočlánky typu K. Reálne zvarané vzorky pozostávali z technickej medi o hrúbke 1 mm a koroziivzdornej oceli AISI 304 o rozmeroch 70x100x1. Schematicky sú zobrazené na obrázku 14.



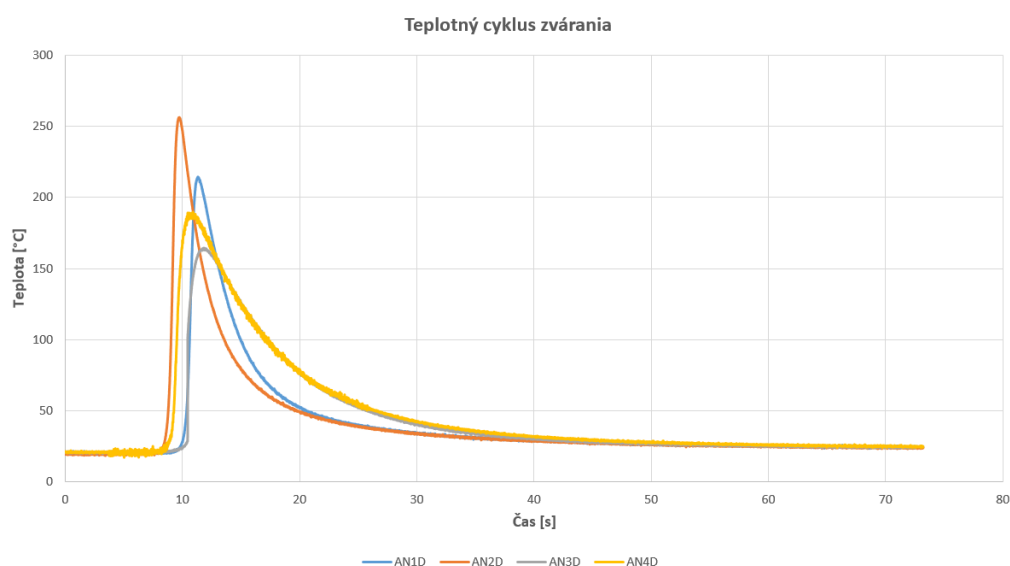
Obrázok 14: Schematické zobrazenie umiestnenia termočlánkov na vzorke

Na obrázku 14 sa nachádzajú aj body 1;2;3;4. tieto body slúžia ako ukážka miest, kde boli termočlánky pripevnené. Body boli zvolené vo vzdialenosti 5 mm od trajektórie zvarania. Pripevňovanie termočlánkov bolo uskutočnené ich privarením k povrchu materiálu za pomoci lasera. Následne bola vzorka upnutá do prípravku ako na obrázku 15.



Obrázok 15: Zváranie vzorky s prizváranými termočlámkami

Biela šípka na obrázku 15 ukazuje smer zvárania. Po pozváraní vzoriek boli zaznamenané hodnoty dosiahnuté v procese. Obrázok grafu dosiahnutých teplôt z procese zvárania je zobrazený pod označením 16. Hodnoty nameraných teplôt sú v tabuľke 4.

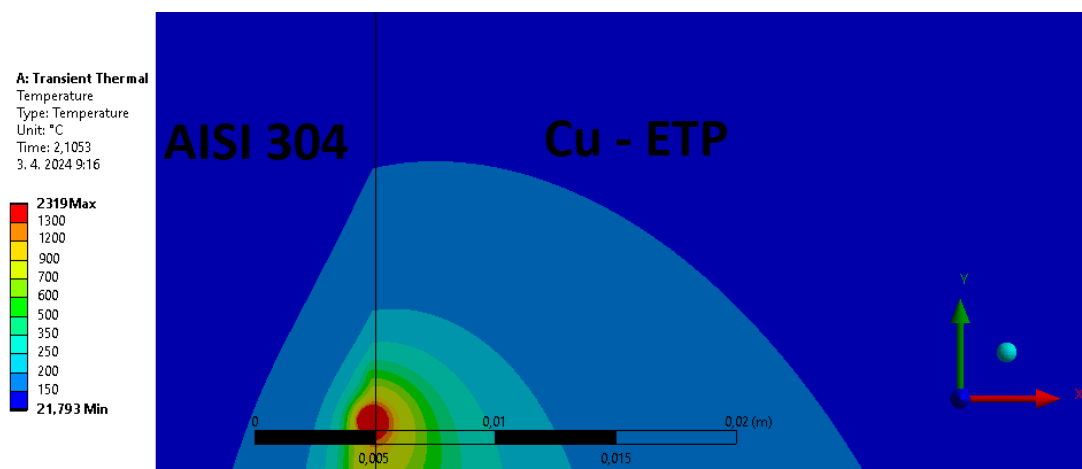


Obrázok 16: Graf zaznamenaných teplotných cyklov vzorky s termočlámkami

Tabuľka 4: Namerané teploty v procese zvárania

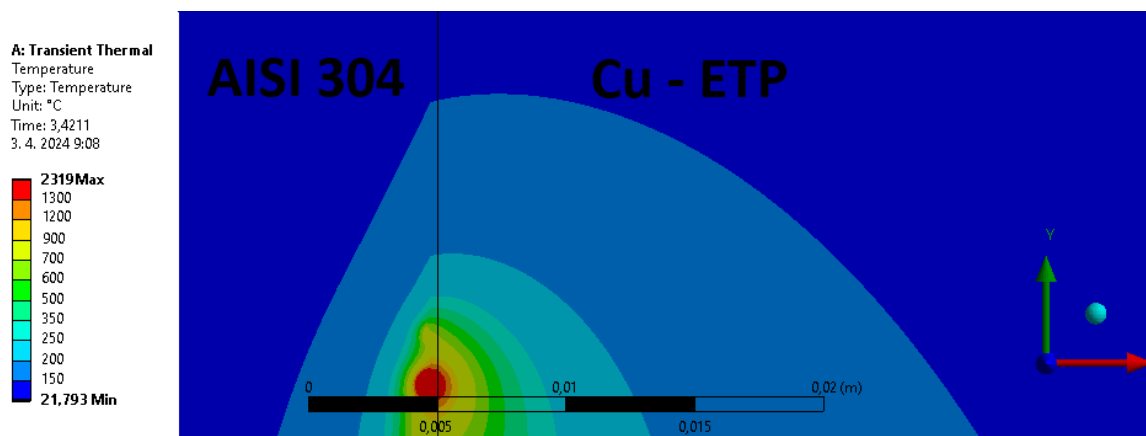
Termočlánok	Materiál	Najvyššia nameraná teplota [°C]	Čas [s]
1	Cu – ETP	206	11,12
2	Cu – ETP	253	9,82
3	AISI 304	153	11,12
4	AISI 304	155	9,82

Z grafu vyplýva, že termočlánok č. 4 nameral teplotu 253 °C v Cu - ETP a termočlánok č. 2 cca 155 °C v AISI 304. Simulácia z času 2,1 sekundy na obrázku 17 ukazuje teplotné polia, ktoré zodpovedajú nameraným hodnotám.



Obrázok 17: Teplotné polia v čase 2,1 sekundy

Druhý pár termočlánkov nameral teploty v čase 3,5 sekundy. Pre termočlánok č. 1 v medi bola nameraná hodnota cca. 206 °C a termočlánok č. 3 cca. 153 °C. Na obrázku 18 je zobrazená simulácia z času 3,4 sekundy ktorá taktiež zodpovedá nameraným hodnotám.



Obrázok 18: Teplotné polia v čase 3,4 sekundy

Na základe dvojstupňovej verifikácie je možné usúdiť, že aj maximálna teplota v procese zvarovania za pomoci simulácie sa bude približovať realite. A preto výsledky z nej sú použiteľné ako výsledok a zároveň aj ako vstupné hodnoty do napät'ovo-deformačnej analýzy.

3.2 Napät'ovo-deformačná analýza

V ANSYS Workbench sú deformácie dvoch typov – celková deformácia a smerová deformácia. Obe deformácie sa používajú na nájdenie posunu prostredníctvom napätia. Smerová deformácia pôsobí v smeroch ako X, Y a Z. V prípade celkovej deformácie sa výsledok počíta pre každý uzlový bod podľa vzorca 48:

$$D_T = \sqrt{(X^2 + Y^2 + Z^2)} \quad [\text{m}] \quad (48)$$

Kde:

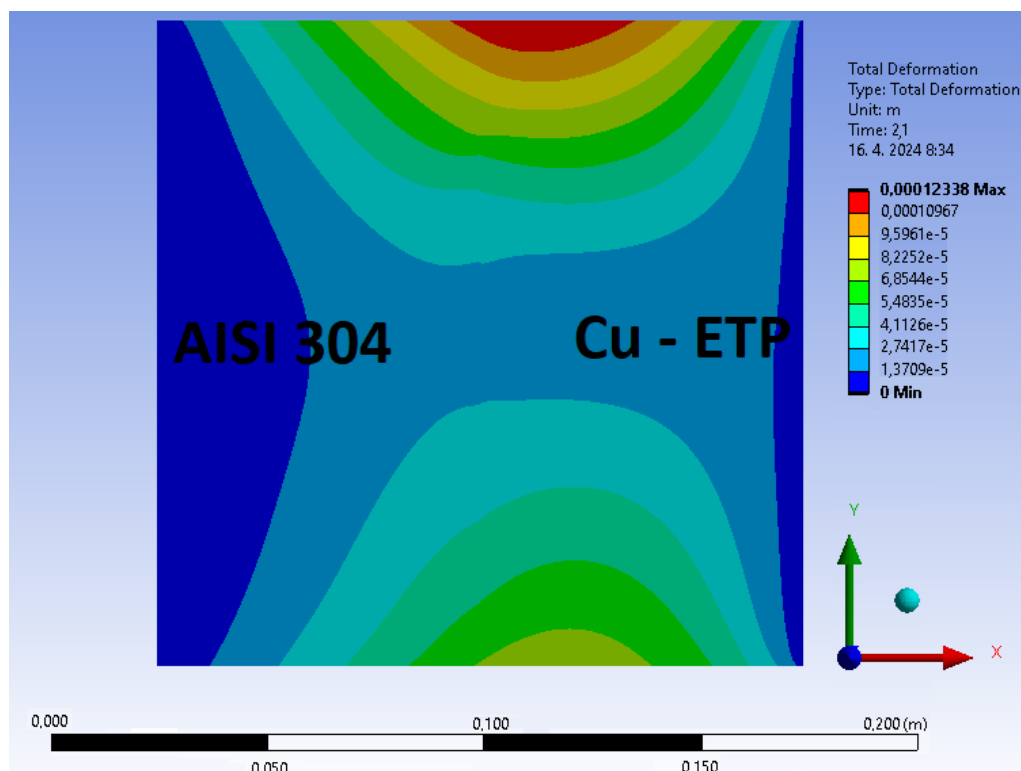
D_T – označuje totálnu deformáciu [m]

X – smerová deformácia v x-ovej osi [m]

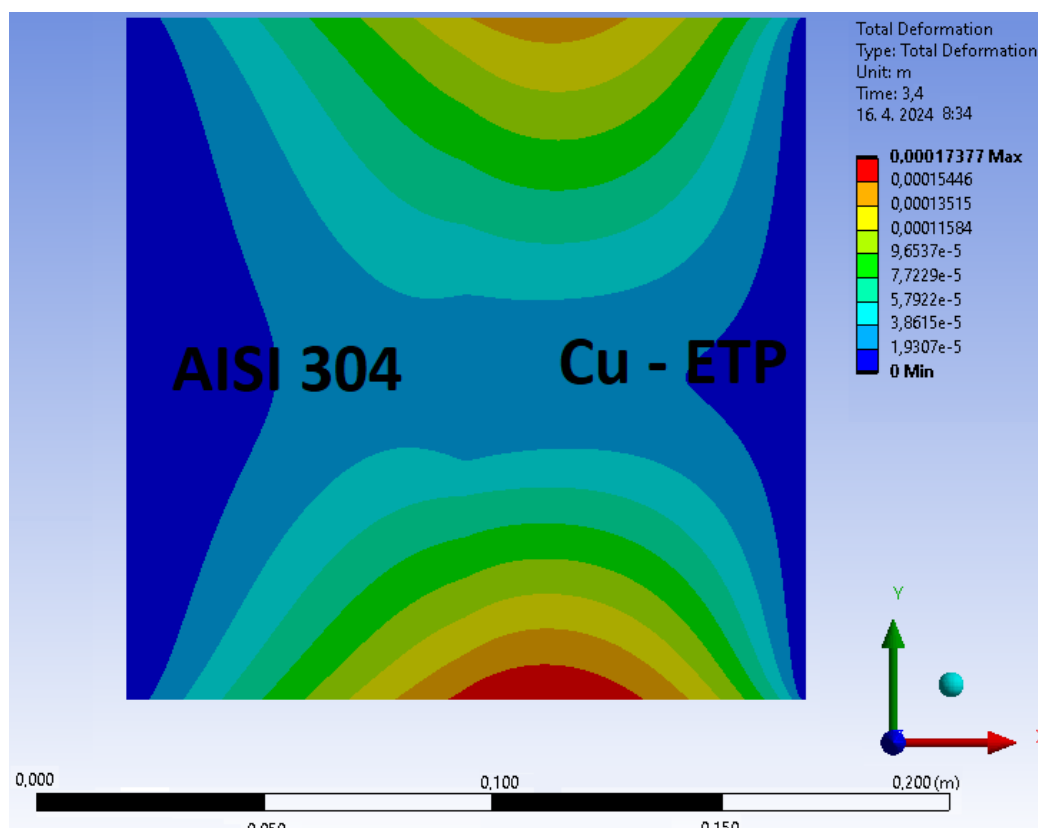
Y – smerová deformácia v y-ovej osi [m]

Z – smerová deformácia v z-ovej osi [m]

Na základe verifikovaného simulačného modelu a je možné zostaviť napät'ovo-deformačnú analýzu. Ako vstup do nej slúži teplotné zaťaženie v daných časových okamihoch. Deformačná analýza bola vykonaná pre čas 2,1 (obr. 19) a čas 3,4 (obr. 20) sekundy.

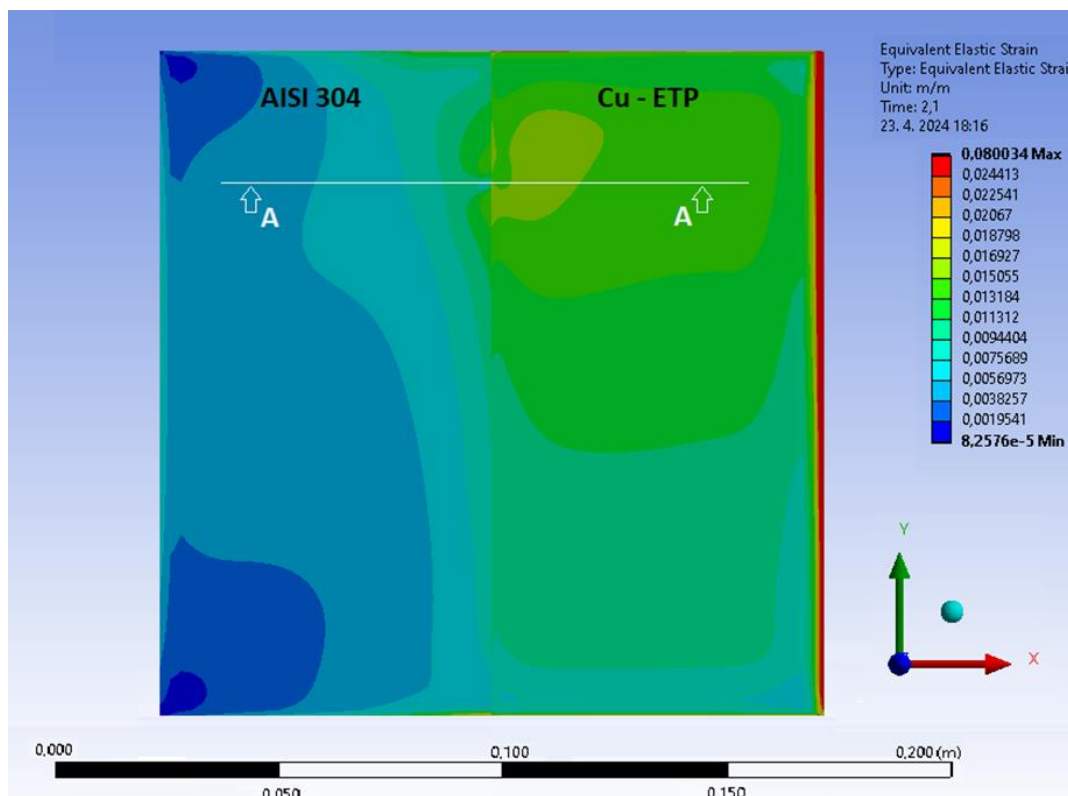


Obrázok 19: Deformačná analýza vzorky v čase 2,1 sekundy



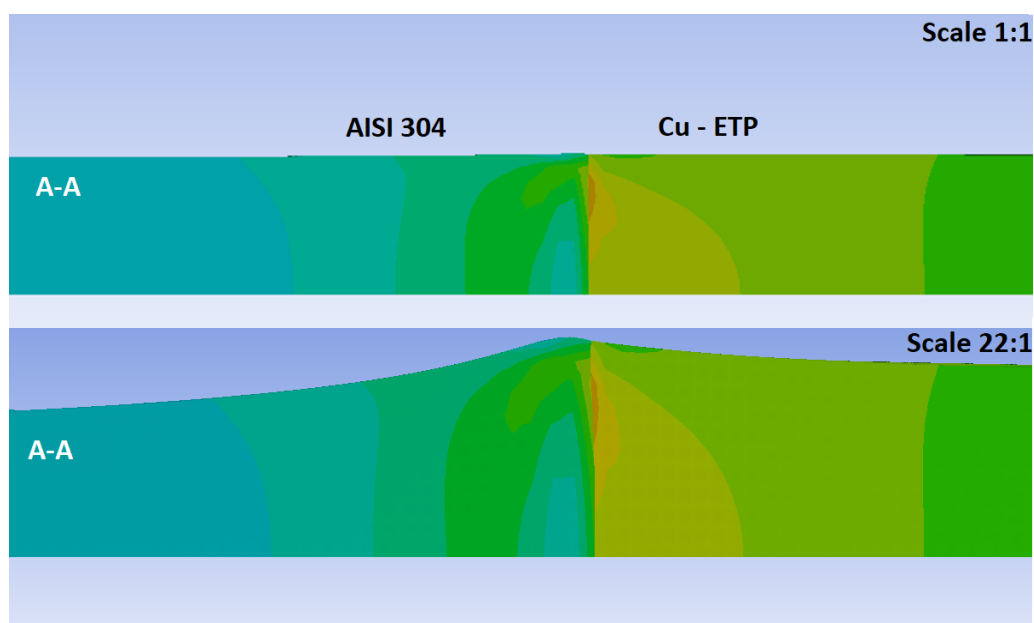
Obrázok 20: Deformačná analýza vzorky v čase 3,4 sekundy

V oboch prípadoch bol vplyv na výslednú deformáciu v oblasti medzi väčší ako v oceli. Každá nevratná deformácia predchádza aj deformácia elastická – vratná. Tieto elastické deformácie sú jedným z hlavných problémov pri vzniku zvyškových napätí. V prostredí ANSYS Workbench je ekvivalentná elastická deformácia definovaná ako limit pre hodnoty deformácie, ktoré sa úplne obnovia po odstránení aplikovaného zaťaženia. Táto definícia zahŕňa tak elastickú deformáciu, ktorá vzniká napínaním a krútením, ako aj anelastickú deformáciu, ktorá vzniká z atómových rekonfigurácií (napr. pohybov defektov). Hranica pružnosti je definovaná ako bod na krivke napätie-deformácia, kde objekt mení svoje elastické správanie na plastické správanie. Vzorka bola podrobená skúmaniu elastických napätí, skúmalo sa pomerné elastické predĺženie pri tepelnom zaťažení v časovom okamihu 2,1 sekundy. Na obr. 21 je znázornená vzorka pri pohľade zhora.



Obrázok 21: Elastické deformácie v čase 2,1 sekundy

Na obrázku je možné vidieť na pravom kraji červenú oblasť v medi, ktorá je spôsobená pevným upnutím. Dôležitá je oblasť medzi medťou a oceľou, kde je možné odpozorovať šírenie elastických deformácií. Výhodou simulačného prostredia je, že je sa možné pozrieť aj na elastické deformácie v procese a reze, ako sú znázornené na obrázku 22.



Obrázok 22: Elastické deformácie v čase 2,1 sekundy pohľad v reze A-A

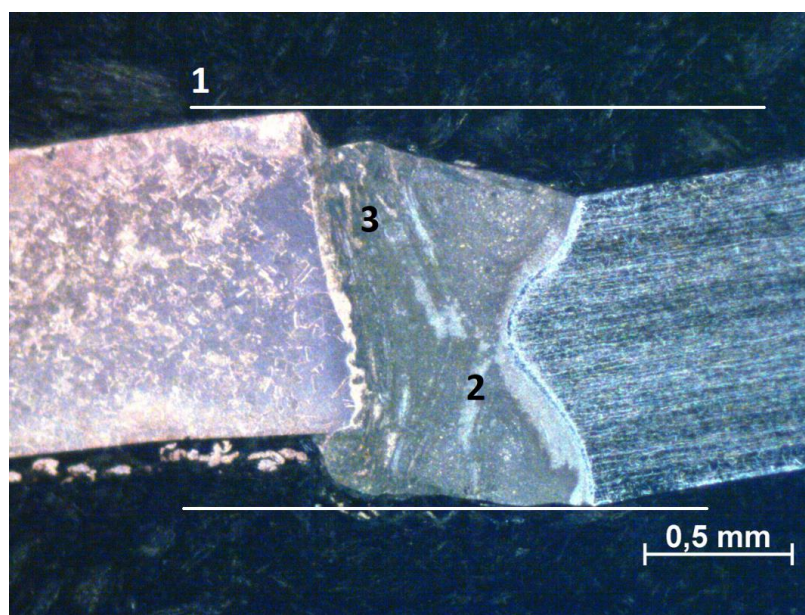
Na obrázku 22 sú znázornené elastické deformácie v reze A-A. Na základe elastických deformácií je možné predpokladať problematické oblasti, kde v procese chladnutia budú vznikať napätia. Horná časť obrázku 22 reprezentuje elastické deformácie v mierke 1:1 a spodná reprezentuje elastické deformácie v mierke 22:1. Na spodnej vidno najväčšiu možnú elastickú deformáciu v medi. Porovnanie elastických a totálnych deformácií ukazuje, že vzorka sa vráti do takmer pôvodnej veľkosti nakoľko totálne deformácie sú rádovo o dve desatiné miesta menšie ako elastické.

4 ŠTRUKTÚRNA ANALÝZA ZVAROVÝCH SPOJOV A ICH HODNOTENIE

Vzorky boli podrobené makroskopickej, chemickej a mikroskopickej analýze, Príprava vzoriek pozostávala najprv z výberu zo zvyškového materiálu po vyrezaní teliesok na skúšku ťahom, čím bol odrazený reálny stav zvaraných vzoriek a neboli úmyselne vyberané bezchybné vzorky, ktoré by mohli zakrývať problémy ako prevýšenie vo zvare, prípadne nedostatočné prevarenie materiálov. Dané vzorky boli narezané na ručnej píle, zaliate a následne brúsené a vykonané leštenie.

4.1 Makroskopická analýza

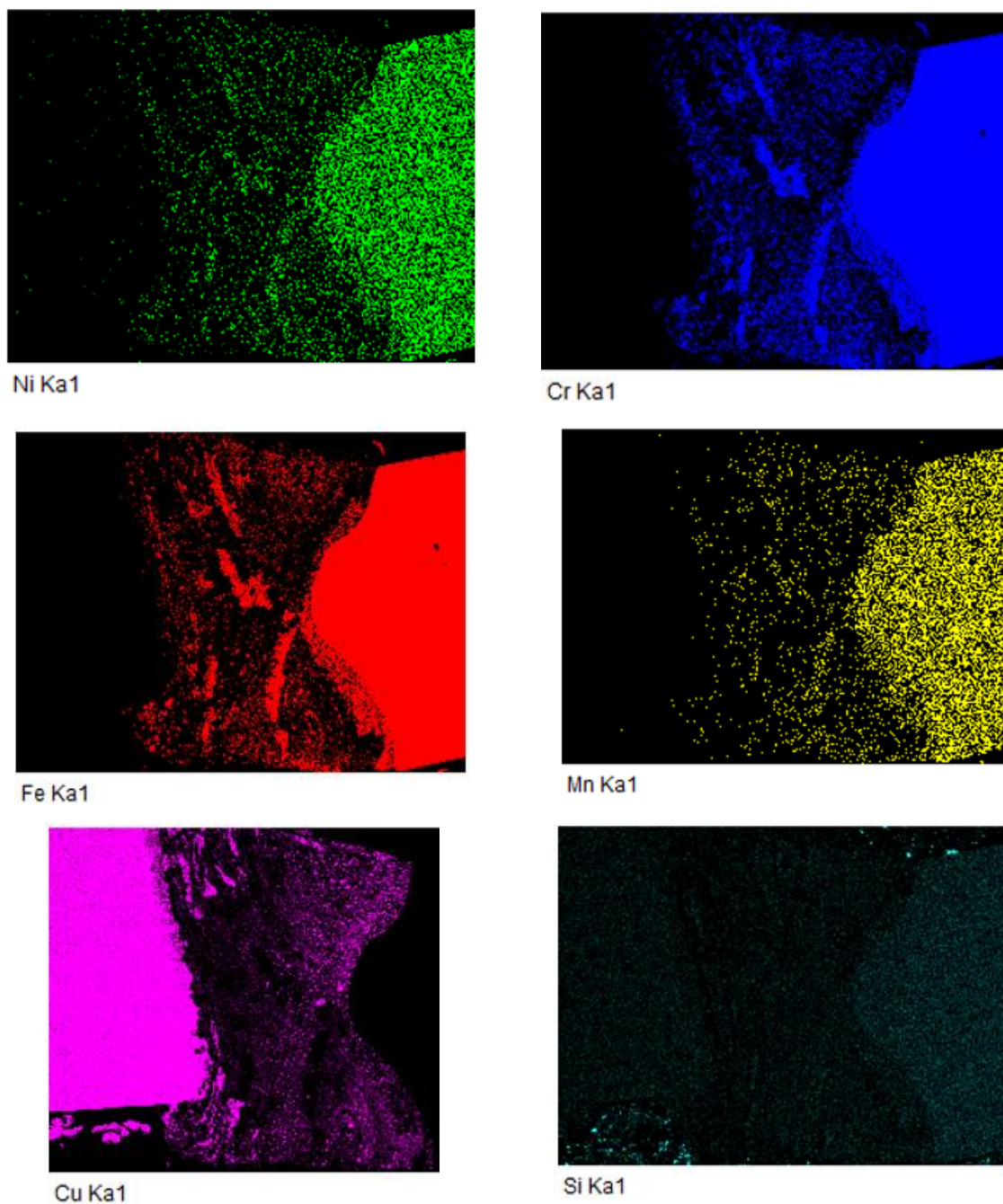
Makroskopická analýza je pozorovanie makroskopických prvkov, ako je tvar, trhliny, morfológia atď. voľným okom. Fotografie prierezov zvarov sa nachádzajú v prílohe dizertačnej práce 1. Vybraná vzorka na základe ťahovej skúšky a najväčšej medze pevnosti. Je zobrazená na obrázku 23.



Obrázok 23: Problémy zváranej vzorky Cu ETP a AISI 304

Zvar bol bez prasklín, bez pórov, s plnou penetráciou zvaraných materiálov a teda s prevareným koreňom. Problémy nájdené pri danom konkrétnom zvare boli, že oceľ a meď neostali v jednej rovine, ale vďaka malej hrúbke, vysokej tepelnej vodivosti medi a tepelnej rozťažnosti došlo k miernej deformácii. Druhý problém je viditeľný vo zvarovom kove na obr. 23. Nachádzajú sa v ňom svetlé ostrovy, ktoré predikujú, že tam

nedošlo k rovnomernej difúzií medzi AISI 304 a Cu - ETP. Ako tretí problém boli nájdené ostrovčeky neroztavenej medi. Na overenie bola vykonaná chemická analýza. Výsledky chemickej analýzy sa nachádzajú na obrázku 24.



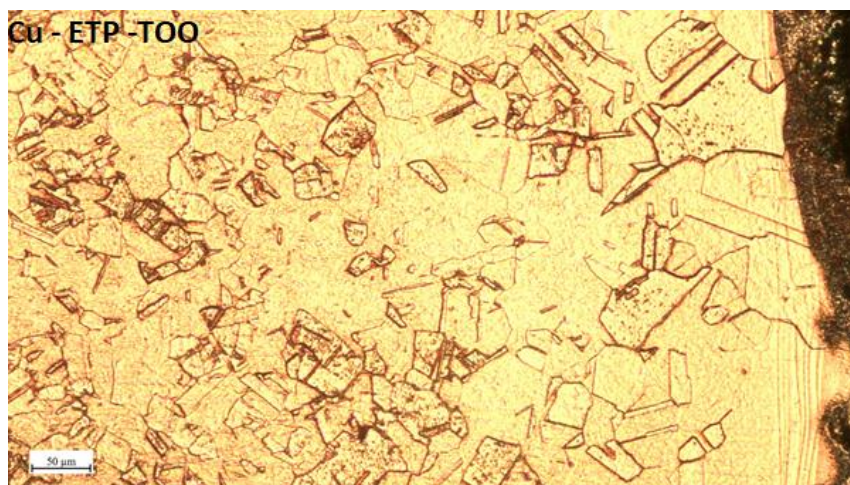
Obrázok 24: Chemická analýza vzorky

Na základe chemickej analýzy sa potvrdilo, že svetlé oblasti sú nepremiešané oblasti chrómu a železa. Taktiež sa preukázalo, že sa na vzorke nachádzajú aj oblasti s neroztavenou meďou. Chemická analýza však upriamila pozornosť aj na zvýšenú

koncentráciu medi pri okolí prechodu zo zvarového kovu do oceli, ktorá bola podrobená mikroskopickému pozorovaniu.

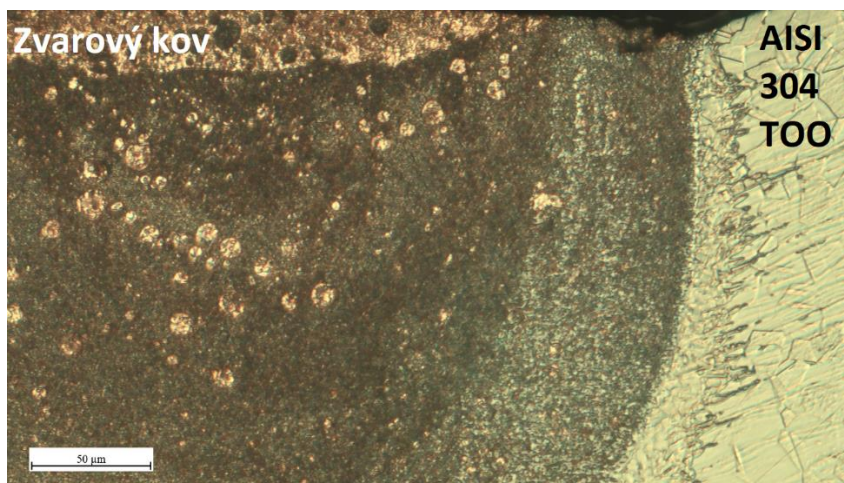
4.2 Mikroskopická analýza

Mikroštruktúra zvarového kovu, teplom ovplyvnená oblasť a základný materiál na uvažovanej vzorke boli pozorované v mikroskopickej analýze. Na obrázku 25 je vidieť základný materiál medi na ľavej strane postupne prechádzajúci do TOO so zhrubnutým zrnom medi, ktoré tvorili najmäjšiu časť zvaru. V tejto oblasti bola očakávané, aby sa pri skúške ťahom vzorka pretrhla.

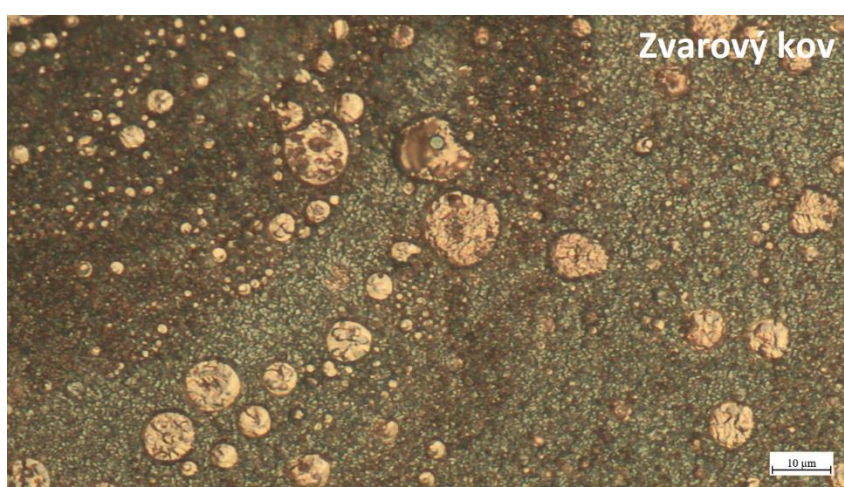


Obrázok 25: Zhrubnuté zrno v TOO oblasti zo strany medi

Rozhranie medzi zvarovým kovom – AISI 304 TOO je znázornené na obrázku 26, kde bol pozorovaný na rozhraní delta ferit. Podobnú mikroštruktúru pozoroval Mannucci a kol. ich štúdia bola vykonaná s Yb:YAG laserom. Na rozdiel od zistení z pozorovania mikroštruktúry v tejto dizertačnej práci, oni spozorovali aj horúce trhliny. (Mannucci 2018). Boli však pozorované ostrovy neroztavenej Cu vo zvarovom kove zobrazené na obr 26 a 27.



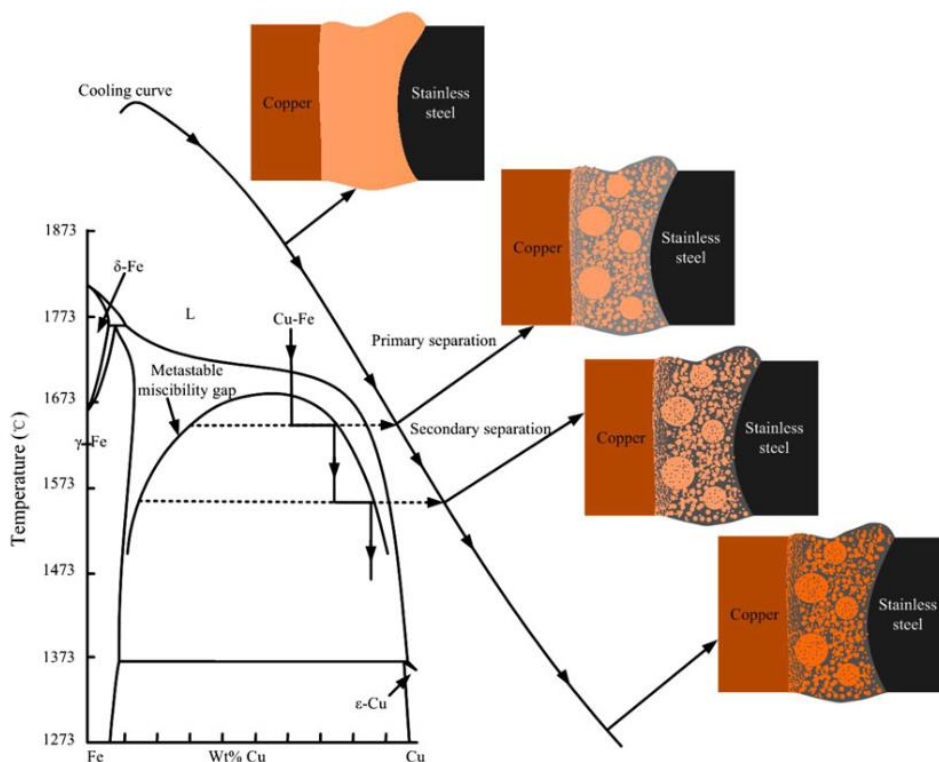
Obrázok 26: Rozhranie medzi zvarovým kovom a teplom ovplyvnenej oblasti zo strany AISI 304



Obrázok 27: Ukážka ostrovov Cu vo zvarovom kove

Mechanizmus vzniku ostrovov medi v procese chladnutia zvarového kovu boli popísané v publikácii Chena z roku 2013, kde bolo spomenuté, že vznikajú separáciou sekundárnej kvapalnej fázy, ku ktorej dochádza v zvarovom kove. Keď sa tavenina ochladzuje v mieste premiešania dve oddelené fázy sa pokúšajú difúziou sledovať hranice nemiešateľnosti. V neprítomnosti úplnej difúzie dochádza k separácii sekundárnych fáz s nepretržite klesajúcou teplotou, čo vedie k presýteniu jednej alebo oboch primárnych oddelených fáz. Stupeň presýtenia, ktorý je možné dosiahnuť závisí od troch faktorov:

- Rýchlosť ochladzovania, ktorá zabezpečí, že primárna fáza dosiahne dostatočnú úroveň podchladenia na vyvolanie separácie sekundárnej kvapalnej fázy,
- rýchlosť difúzie atómov,
- tvar zvarového kúpeľa.



Obrázok 28: Schematické znázornenie vzniku guľôčok medi vo zvarovom kove (Chen, 2013)

Pri laserovom zvaraní tuhne meď vo forme guľôčok, oceľ vo forme matrice. Matrica z nehrdzavejúcej ocele a sférická meď sú pozorované vo vnútri fúznej zóny, zatiaľ čo medená matrica a sférické častice z nehrdzavejúcej ocele sú pozorované na rozhraní medzi fúznou zónou a medťou. Množstvo tekutej medi a nehrdzavejúcej ocele sa riadia pákovým pravidlom. Ak kvapalina obsahuje menej ako 50 hmotn. % medi, potom guľôčky pochádzajú z tekutej medi. Ak priemerná kvapalina obsahuje viac ako 50 hmotn. % medi, potom guľôčky pochádzajú zo separácie z tekutej nehrdzavejúcej ocele. (Chen, 2013)

5 SKÚMANIE VPLYVU PARAMETROV NA MECHANICKÉ VLASTNOTI ZVAROVÝCH SPOJOV

Na základe zadefinovaných parametrov uvedených v tabuľke 2, je možné nadizajnovat' experiment, ktorého kombinácie a výsledné hodnoty sú zobrazené v tabuľke 5. Na základe kombinácií parametrov z tabuľky 5 boli vyhotovené simulačné a aj fyzické vzorky, z ktorých boli vyhodnocované výsledky ako medza pevnosti a maximálna teplota v polovici procesu zvarovania.

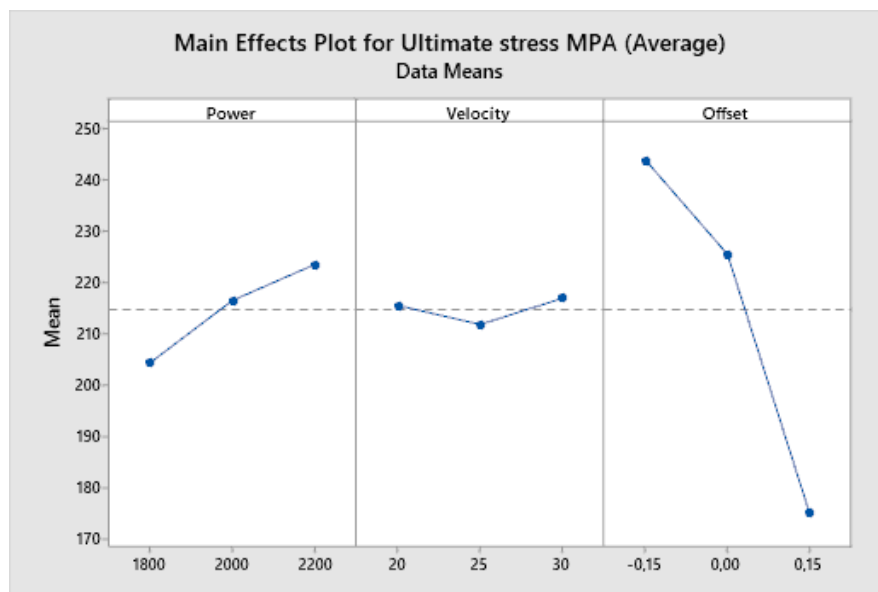
5.1 Analýza variantnosti pre medzu pevnosti

Metóda ANOVA sa použila na stanovenie štatistickej významnosti parametrov na základe zostaveného DOE. Tabuľka 5 obsahuje hodnoty F a P. Vzťah medzi hodnotami je, že čím je väčšia F-hodnota a zároveň, čím menšia je P-hodnota, tak znamená to, že nulová hypotéza je zdiskreditovaná a je možné tvrdiť, že medzi meranou premennou a prediktormi existuje všeobecný vzťah. Ak bude vo výsledku analýzy variantnosti malá F-hodnota a veľká P-hodnota, tak bude to znamenať, že medzi vstupnými parametrami neexistujú žiadne asociácie k vplyvu na výsledok.

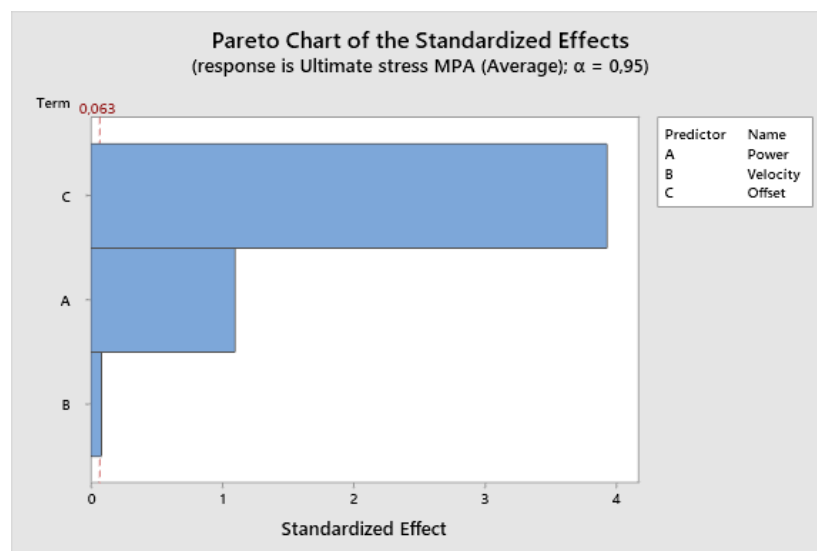
Tabuľka 5: Analýza variantnosti pre medzu pevnosti

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Power	2	1717.9	859.0	0.57	0.575
Velocity	2	126.1	63.1	0.04	0.959
Offset	2	23014.7	11507.4	7.62	0.003
Error	20	30196.1	1509.8		
Total	26	55054.9			

Grafy ilustrujúce závislosť, ako parametre ovplyvňujú nameranú odozvu, sú vytvorené na základe tabuľky 5. Na základe výsledkov analýzy variantnosti je možné aj graficky ukázať, že posun mal najväčší vplyv, následne výkon a rýchlosť.



Obrázok 29: Vplyv parametrov na medzu pevnosti



Obrázok 30: Paretova tabuľka štandardizovaných efektov pre medzu pevnosti

Z Paretovho diagramu na obrázku 30 je možné určiť, že všetko nad hladinou 6,3 % štatistickej významnosti by nebolo možné odstrániť. Na základe týchto poznatkov je možné eliminovať všetko pod 5 % štatistickej významnosti. Na všeobecnú regresnú rovnicu bola použitá spätná eliminácia členov s α na odstránenie 0,95. Výsledok všeobecnej rovnice po spätnej eliminácii je uvedený ako číslo 1.

$$R_m = d + x * A + y * B + z * C \quad (1)$$

Kde:

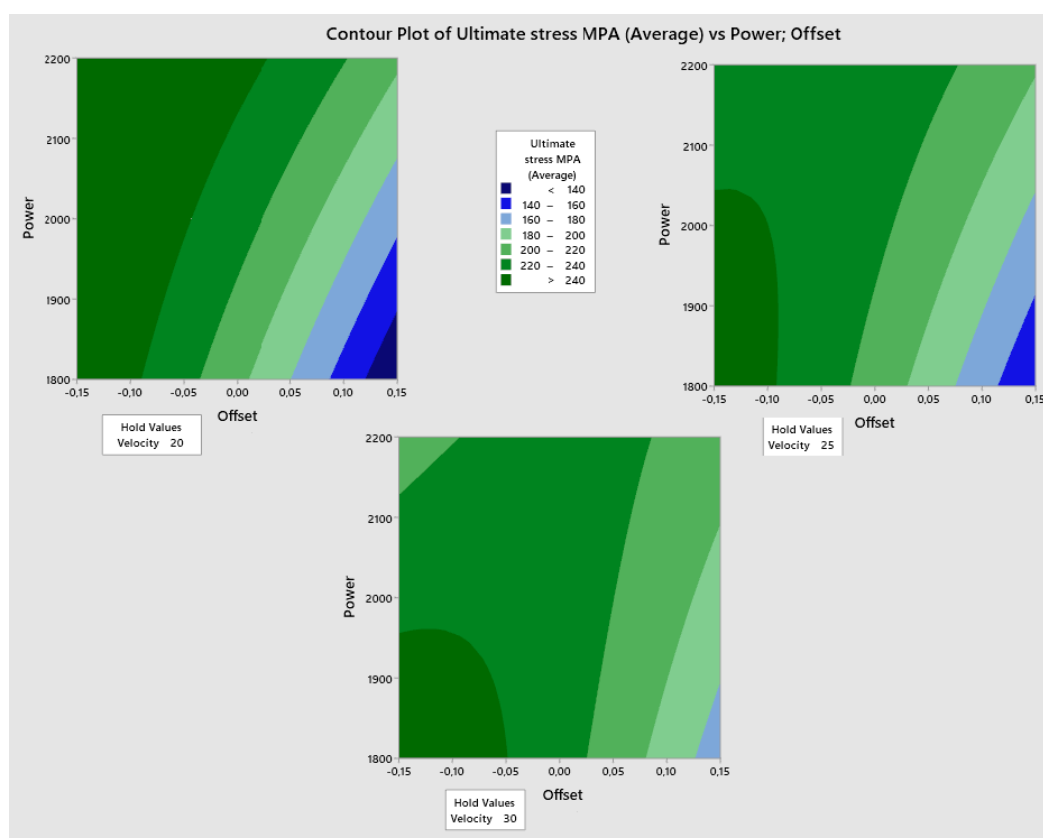
R_m	– medza pevnosti	[MPa]
d	– konštanta	[-]

x	– vplyv 1. parametra	[-]
y	– vplyv 2. parametra	[-]
z	– vplyv 3. parametra	[-]
A	– úroveň parametra 1	[W]
B	– úroveň parametra 2	[mm*s ⁻¹]
C	– úroveň parametra 3	[mm]

Rovnica 2 bola doplnená o hodnoty predstavujúce vplyv na premenné.

$$R_m = 114.6 + 0.0483 * \text{Power} + 0.14 * \text{Velocity} - 230.2 * \text{Offset} \quad (2)$$

Po spätnej eliminácii môže konečná regresná rovnica predpovedať hodnotu medze pevnosti v intervaloch s presnosťou 60,95 %. Táto presnosť je znížená kombináciami parametrov, kde zvar bol slabší ako materiál, ktorý spája. Súčasťou výsledkov sú vrstevnicové grafy na obrázku 80, ktoré ukazujú vplyv parametrov na meranú premennú.



Obrázok 31: Vrstevnicové grafy sledujúce medzu pevnosti

Z vrstevnicových grafov na obrázku 31 je možné pozorovať, kde bola nameraná najvyššia hodnota medze pevnosti. Z grafom vyplýva, že je nevhodné fokusovať do ocele, ale ideálne je fokusovať lúč na hranu, prípadne do medi. Hraničné hodnoty pre medzu

pevnosti medi sú približne od 220 MPa, takže všetko nad 220 MPa sa trhalo v teplom ovplyvnenej medi, prípadne až v základnom materiále.

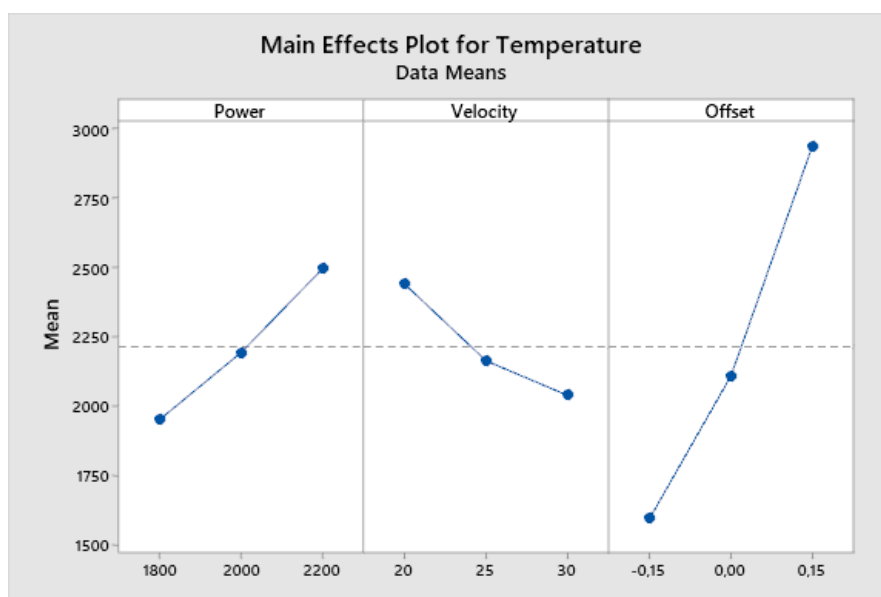
5.2 Analýza variantnosti pre maximálnu teplotu

Aj pre zistenie štatistickej významnosti parametrov pre teplotu v procese zvárania bola použitá technika ANOVA na základe zostaveného DOE. Postup zostavenia bol ekvivalentný ako v predchádzajúcom prípade.

Tabuľka 6: Analýza variantnosti pre maximálnu teplotu

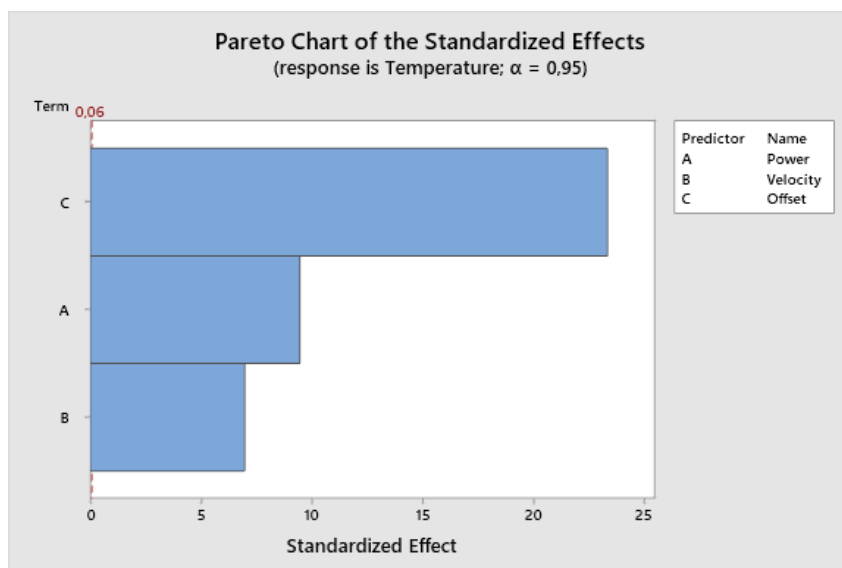
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Power	2	1339826	669913	86,73	0,000
Velocity	2	760126	380063	49,21	0,000
Offset	2	8280628	4140314	536,03	0,000
Error	20	154480	7724		
Total	26	10535059			

Na základe ANOVA je možné vyhodnotiť hypotézu z dizertačnej práce, kde na základe zostaveného experimentu a zistenej štatistickej významnosti parametrov mal offset má najväčší vplyv na maximálnu teplotu zvárania. Taktiež je možné zhotoviť grafy ilustrujúce závislosť, ako parametre ovplyvňujú nameranú odozvu a aj graficky zodpovedať hypotézu. Pomocou grafov a výsledkov analýzy variantnosti je možné ukázať, že aj v prípade maximálnej teploty mal posun mal najväčší vplyv, následne výkon a rýchlosť.



Obrázok 32: Vplyv parametrov na teplotu v procese zvárania

Pareto diagram štandardizovaných efektov ukazuje, že v tomto prípade má parameter rýchlosť výrazne väčší vplyv, než malo pri predikovaní medzi pevnosti.

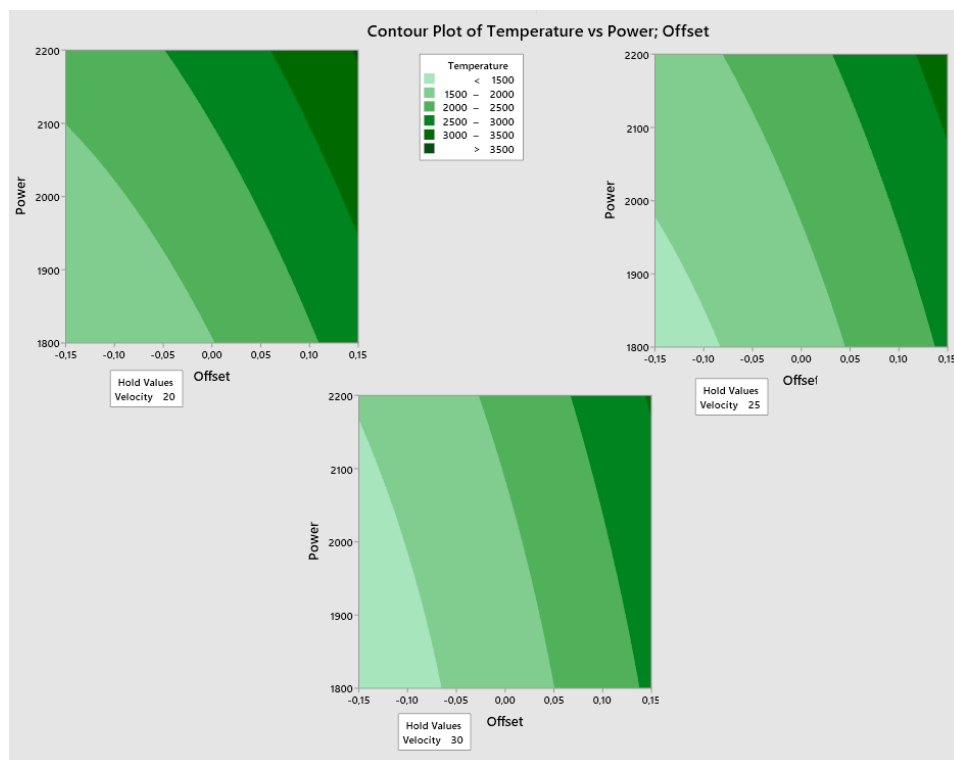


Obrázok 33: Paretova tabuľka štandardizovaných efektov pre maximálnu teplotu

Pre zachovanie rovnakých podmienok sa použije aj v tomto prípade spätná eliminácia s odstránením všetkého pod hladinu 5% štatistickej významnosti. Vznikne rovnaký všeobecný tvar rovnice 1, len sledovaná výsledná premenná bude teplota. Následne sa do nej dosadia hodnoty a vznikne rovnica 3.

$$T = 114,6 + 0,0483 * Výkon + 0,14 * Velocity - 230,2 * Offset \quad (3)$$

Po vykonaní spätnej regresie môže konečná regresná rovnica predpovedať hodnotu maximálnej teploty v procese zvarovania s presnosťou 96,75 %. Súčasťou výsledkov sú vrstevnicové grafy na obrázku 84, ktoré ukazujú vplyv parametrov na meranú premennú.



Obrázok 34: Vrstevnicové grafy sledujúce maximálnu teplotu

Z výsledov vrstevnicových grafov je možné odpozorovať, že najvyššia teplota bola dosahovaná, keď bola fokusácia smerovaná do ocele, s najvyšším výkonom a najnižšou rýchlosťou. Problém nevhodnosti takéhoto fokusovania môže byť vytavovanie legúr zo zvarového spoja. Jednotlivé materiály majú aj hranicu teploty vyparovanie, konkrétne je pre Si 3200 °C, Ni 2900 °C, Fe 2800 °C, Cr 2700 °C, Cu 2500 °C a Mn 2100 °C. Po prekročení teploty a vytavení chemických prvkov môže byť zvar náchylný napríklad na zníženú koróznú odolnosť, zníženú tvrdosť a nižšiu pevnosť.

6 VÝSLEDKY A PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE

Daná kapitola obsahuje sumár dosiahnutých výsledkov a prínosov dizertačnej práce.

Medzi hlavné výsledky predkladanej dizertačnej práce patrí prínos pre vedu vo forme zhotovenia simulačného modelu vytvoreného tak, že jeho časti sú samostatne nastaviteľné a je možné ho použiť aj na iné kombinácie materiálov, v prípade úprav geometrického modelu aj na iné typy zvarových spojov. Prípadne pri úprave príkazových riadkov aj na iné trajektórie pohybu lúča. Takýmto spôsobom sú otvorené možnosti sledovania zvaracích procesov v rovnakých a ideálnych podmienkach. Taktiež je možné robiť naviazané tepelno a napäťovodeformačné simulácie a sledovať vplyv tepelného príkonu vždy v rovnakých a ideálnych podmienkach. Daným spôsobom je možné ušetriť aj nemalé finančné prostriedky z projektových prostriedkov.

Z hľadiska prínosov dizertačnej práce pre prax je možné konštatovať prínos predikovania slabých miest v zvaroch na základe napäťovo-deformačnej analýzy. Na základe tepelných analýz je možná predikcia teplôt v procese zvarovania a následná eliminácia vytavovania legujúcich prvkov. Taktiež sa zníži náročnosť na ľudské zdroje, nakoľko odhaľovanie potenciálnych problémov je možné predikovať dopredne a nie retrospektívne.

Pre využitie simulácií zvarovania v pedagogickom procese je možné nájsť uplatnenie najmä na inžinierskom stupni štúdia v akreditovanom študijnom programe výrobné technológie a výrobný manažment, konkrétne v module zvarovanie a spájanie materiálov. Svoje miesto by si mohli nájsť na predmetoch ako: teória zvarovania, modelovanie a simulácia technologických procesov, prípadne progresívne metódy zvarovania.

7 ZÁVER

Cieľom tejto práce bolo nájsť spôsob ako vytvoriť adekvátny simulačný model zvárania, následne verifikovať ho za použitia fyzicky zváraných vzoriek, analyzovať a vyhodnotiť namerané výsledky a zistiť vplyv sledovaných parametrov na medzu pevnosti a teplotu v procese zvárania. V prvom kroku bolo potrebné zostaviť simulačný model, ktorý pozostával zo štyroch hlavných krokov:

- **Vytvorenie geometrického modelu.**

Geometrický model bol vyhotovený na základe reálnych vzoriek. Na vytvorenie solidov bol použitý integrovaný modelovací modul ANSYS-u – SpaceClaim. Pri sieťovaní modelu bolo treba uvažovať, že ANSYS počíta zaťaženie pre jednotlivé uzlové body. Ak je potrebné vytvoriť kontinuálny pohyb lúča, tak priemer fokusovaného lúča musí byť väčší ako medziuzlová vzdialenosť,

- **vytvorenie materiálového modelu.**

Zostavenie materiálového modelu pozostávalo z určenia chemického zloženia na základe materiálových listov. Dané chemické zloženie bolo použité za pomoci softvéru JMatPro na určenie materiálových vlastností v závislosti od teploty. Následne boli materiálové vlastnosti vložené do knižnice ANSYS-u a pridelené jednotlivým solidom,

- **APDL príkazy.**

Zostavenie APDL príkazových riadkov bolo na základe riešenia rovnice kváziustáleného trojrozmerného problému, ktoré bolo rozšírené o možnosť pohybu po ypsilonovej osi za pomoci rovnice dotyčnice ku kružnici, kde poloha na y osi bola vyjadrená za pomoci času a rýchlosti. Taktiež bolo pridané pôsobenie lúča v zetovej osi za pomoci koeficientu absorpcie. Táto rovnica následne bola aplikovaná do ANSYS APDL Function Editor, ktorý vytvoril príkazové riadky, ktoré potrebovali formálne úpravy, aby ich dokázal Workbench prečítať,

- **definovanie simulácie.**

Simulácia bola zadefinovaná ako jednokroková, ktorá mala pokryť tepelnú a tepelno-deformačnú analýzu. Na overenie funkčnosti zdroja a príkazových riadkov postačovala nestatická tepelná analýza, pri tepelno-deformačnej už výsledok z jednej analýzy priamo vplýval na výsledok analýzy druhej a preto musela byť zvolená analýza s označením coupled. Taktiež bolo potrebné si

zadefinovať upnutia vzorky podľa reálneho stavu, ktorý bol vo fyzickom procese zvárania. Posledným krokom bolo nutné si zadefinovať spôsob odvodu tepla do okolia.

V druhom kroku práce bola vykonaná tepelná a napäťovo-deformačná analýza simulačného modelu. Tepelná simulácia pozostávala z overenia konformity teplotných polí. Táto analýza sa robila dvomi spôsobmi. Prvý bol na základe makroskopickej analýzy, kde sa porovnal kolmý rez zvaru na smer zvárania so simulovaným modelom. Druhý bol na základe nameraných teplôt v procese zvárania za pomoci termočlánkov a ich porovnaním so simulovaným modelom. Po vyhodnotení zhodnosti oboch variánt bola vykonaná deformačná analýza a analýza na zistenie elastických napätí v procese zvárania.

Tretí krok bol venovaný štruktúrnej analýze. Na štruktúrnu analýzu bola využitá makroskopická a mikroskopická analýza. V prílohe dizertačnej práce A sa nachádzajú makroskopické fotografie pre všetky kombinácie parametrov. Hlavnými problémami bola kombinácie malej hrúbky materiálu a tepelnej rozťažnosti medi, ktorá spôsobovala presadenie zvarového spoja. Makroskopická analýza ukázala svetlé oblasti v zvarovom kove, čo následne bolo potvrdené aj chemickou analýzou. Jednalo sa o ostrovy chrómu a železa, ktoré pochádzali z koróziivzdornej ocele. Po podrobení mikroskopickej analýzy bolo pozorované zhrubnuté zrno v teplom ovplyvnenej oblasti medi. Vo zvarovom kove boli pozorované ostrovy medi. Med' pri procese laserového zvárania tuhne vo forme guľôčok. Tieto ostrovy medi sa nachádzali naprieč celým zvarovým kovom.

Na skúmanie vplyvu parametrov na mechanické vlastnosti bola použitá štatistická technika plánovania a vyhodnocovania experimentu, kde sa skúmali tri parametre na troch úrovniach. Na základe toho bolo vyhotovených 27 zváraných vzoriek a z každej z nich boli vodným lúčom vyrezané 3 skúšobné telieska. Priemerné hodnoty z meraní boli sledované ako výsledná premenná. Vo väčšine prípadov bola dosiahnutá väčšia pevnosť zvaru, než základného materiálu. Limit bol tvorený medzou pevnosti medi, ktorá sa trhala v teplom ovplyvnenej oblasti, kde došlo k zhrubnutiu zrna. Využitý zostavený experiment bol použitý na meranie aj druhej sledovanej premennej a to maximálnej teploty v procese zvárania. Táto teplota bola získaná simulačne a bola to teplota braná v polovici času zvárania. V prípade uvažovanej vzorky dosiahla 2319 °C, čo bola teplota dostačujúca na kompletne prevarenie materiálu a roztavenie všetkých chemických prvkov v procese zvárania, ale zároveň dostatočne nízka na to, aby prekročila vytavociu teplotu len jedného

prvku v procese zvarovania – mangánu. Mangán je využívaný ako legujúci prvok v oceliach, aby zvýšil pevnosť a tvrdosť. Nakoľko ťahová skúška a meranie mikrotvrdosti preukázali, že zvar je najmäkší a najslabší v teplom ovplyvnenej oblasti medi, tak vytavenie časti mangánu nemalo signifikantný efekt na celkový výsledok.

Ďalšie experimenty, ktoré je možné na základe výsledkov tejto práce odporučiť by, sa mali zamerať na vplyv rôzne nastaveného výkonu a rýchlosti pri zachovaní rovnakého tepelného príkonu na sledované premenné. Prínosom dizertačnej práce pre výskum je možnosť použiť vytvorený simulačný model laserového lúča. Tento model je možné ďalej rozvíjať aplikovaním na rozdielne chemické zloženia materiálov, prípadne kombinácie hrúbok a pozorovať ich správanie v ideálnych podmienkach. Prínosom je aj 100% opakovateľnosť výsledkov a možnosť nastavovania len jedného parametru bez ovplyvnenia ostatných a ich sledovania vplyvu na proces. Taktiež sa otvárajú možnosti simulačnej predikcie zvaracieho procesu, kde je možné ušetriť finančné prostriedky predpovedaním napätí v procese, ktoré môžu viesť k vzniku trhlín vo vnútri zvaru.

8 ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

Akella, Mr.S., Harinadh, Mr.V., Krishna, Mr.Y. & Buddu, Mr.R.K. (2014) A Welding Simulation of Dissimilar Materials SS304 and Copper. *Procedia Materials Science*. 5. Dostupné online: <https://doi:10.1016/j.mspro.2014.07.490>.

Anu, M. (1997). Introduction to modeling and simulation. 1997 Winter Simulation Conference, 7–19. Dostupné online: <https://doi.org/10.1145/268437.268440>

Chen, H. C., Bi, G., Nai, M. L. S., & Wei, J. (2015). Enhanced welding efficiency in laser welding of highly reflective pure copper. *Journal of Materials Processing Technology*, 216. Dostupné online: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.09.020>

Chen, S., Huang J., (2013) Microstructural Characteristics of a Stainless Steel/Copper Dissimilar Joint Made by Laser Welding. *Metallurgical and Materials Transactions A*. Dostupné online: <https://doi.org/10.1007/s11661-013-1693-z>

Harish Vadde. (2015). Analysis and simulation of keyhole formation in micro laser welding. Northern Illinois University.

Kunjabihari Katiar. (2012). Dynamic simulation of temperature field in Nd:YAG laser welding using finite element analysis. National Institute of Technology.

laserfocusworld. (2021, May 4). Improving the production of battery cells.

Dostupné online: <https://www.laserfocusworld.com/industrial-laser-solutions/article/14221924/improving-the-production-of-battery-cells>

Li, J., Cai, Y., Yan, F., Wang, C., Zhu, Z., & Hu, C. (2020a). Porosity and liquation cracking of dissimilar Nd:YAG laser welding of SUS304 stainless steel to T2 copper. *Optics and Laser Technology*, 122. Dostupné online: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105881>

Manca, O., Morrone, B., & Naso, V. (1995). Quasi-steady-state three-dimensional temperature distribution induced by a moving circular gaussian heat source in a finite depth solid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38(7). Dostupné online: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(94\)00231-J](https://doi.org/10.1016/0017-9310(94)00231-J)

Miller Ivan. (2010). DOE - Návrh a analýza experimentu s pomocí MINITAB (1. vydanie). InterQuality. ISBN - 9788090277052

Moharana, B. R., Sahu, S. K., Maiti, A., Sahoo, S. K., & Moharana, T. K. (2020). An experimental study on joining of AISI 304 SS to Cu by Nd-YAG laser welding process. *Materials Today: Proceedings*, 33. Dostupné online: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.953>

Sahul, M., Hodúlová, E., Tomčíková, E., Sahul, M., Pašák, M., & Ludrovcová, B. (2020a). Effect of disk laser beam offset on the microstructure and mechanical properties of copper—aisi 304 stainless steel dissimilar metals joints. *Metals*, 10(10), 1–22. Dostupné online: <https://doi.org/10.3390/met10101294>

ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI**AFC - Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách**

- AFC01** **HNILICA, Martin** - HODÚLOVÁ, Erika - SAHUL, Miroslav - KOVAČÓCY, Pavel - ŠIMEKOVÁ, Beáta- KOVAŘÍKOVÁ, Ingrid [Sukubová, Indrig].
Numerical simulation of laser beam welding of stainless steel and copper butt joint. In *Vehicle and Automotive Engineering 4 : 4th International Conference on Vehicle and Automotive Engineering, VAE 2022, 8-9 September 2022, Miskolc, Hungary*. 1. vyd. Cham : Springer, 2023, S. 933-945. ISSN 2195-4356. ISBN 978-3-031-152-10-8. V databáze: DOI: 10.1007/978-3-031-15211-5_78.

AFD - Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- AFD01** **HNILICA, Martin** - HODÚLOVÁ, Erika - SAHUL, Miroslav - KOVAČÓCY, Pavel - ŠIMEKOVÁ, Beáta - KOVAŘÍKOVÁ, Ingrid [Sukubová, Indrig].
Numerická simulácia zvarovania tupého spoja nehrdzavejúcej ocele a medi laserovým lúčom. In *Technológia zvarovania 2022 - Technológia rozvoja priemyslu Európskej únie*. 1. vyd. Trnava : AlumniPress, 2022, S. 1-15. ISBN 978-80-8096-294-4.
- AFD02** **HNILICA, Martin** - KOVAČÓCY, Pavel - ŠIMEKOVÁ, Beáta - BÁRTA, Jozef - KOVAŘÍKOVÁ, Ingrid [Sukubová, Indrig]. **Weldability of stainless steel and copper by concentrated sources of energy.** In *Welding Technology 2023: Industrial development technology of European Union : 1st International scientific conference, 8th november 2023, Trnava*. 1. vyd. Trnava : AlumniPress, 2023, S. 40-50. ISBN 978-80-8096-298-2.
- AFD03** ŠIMEKOVÁ, Beáta - KOVAŘÍKOVÁ, Ingrid [Sukubová, Indrig] - KOVAČÓCY, Pavel - **HNILICA, Martin** - ŠIMEK, Michal. **Research of joining of stainless steel and copper by laser beam.** In *Welding Technology 2023: Industrial development technology of European Union : 1st International scientific conference, 8th november 2023, Trnava*. 1. vyd. Trnava : AlumniPress, 2023, S. 70-77. ISBN 978-80-8096-298-2.

ADF - Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch

- ADF01 **HNILICA, Martin** - HODÚLOVÁ, Erika. Návrh simulácie zvarovania tupého spoja vyhotoveného z nehrdzavejúcej ocele a medi laserovým lúčom. In *Zvárač - profesionál*.
Roč. 17, č. 4 (2020), s. 8-13. ISSN 1336-5045.

Štatistika: kategória publikačnej činnosti

ADF	Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch	1
AFC	Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách	1
AFD	Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách	3
Súčet		5