Zkušební protokol č. 12133_05_2026_LK

Analýza svarových spojů svorníků

Zpracovatel:

ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Ústav strojírenské technologie

Technická 4
160 00, Praha 6
IČO: 68407700
doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Odběratel:

PROWELD STUD WELDING s.r.o.

Štěpaňákova 6
710 00, Ostrava
IČO: 08935904
Kontaktní osoba: Ing. David Pospíšil, IWE

Datum vyhotovení:	26.03.2026
Počet stran:	43
Počet příloh:	0
Zprávu vypracoval:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D., prof. Dr. Ing. Antonín Kříž

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, Technická 4, Praha 6, 166 07, Česká republika
T 224 352 628 E 12133@fs.cvut.cz W u12133.fs.cvut.cz

Předmět zkoušení – typ, druh a počet vzorků:

Byl předán zkušební vzorek obsahující 5 svarových spojů svorníků o průměru M12 z materiálu Wr.N. 1.4541, přivařených na desce z materiálu S355.

Obr. č. 1. – Dodaný zkušební vzorek se svarovými spoji

Popis realizovaných zkoušek:

Ze zkušebního kusu byly odebrány vzorky pro metalografickou analýzu. Byly provedeny zkoušky makro a mikrostruktury a na vytvořených výbrusech byla naměřena mikrotvrdost HV0,1 a zároveň provedeny elektronové analýzy.

Metalografická zkouška mikro a makrostruktury

Zkušební zařízení: příprava – rozbrušovací pila Labotom 3 (Struers),
lis CitoPress 1 (Struers),
metalografická bruska/leštička Phoenix Beta s automatickou hlavou Vector (Buehler)
Vyhodnocení – Metalografický mikroskop Axio Observer Dm1 (Zeiss)
Leptadlo: Nital 2%
Zkoušku provedl: doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D., IWE

Zkouška mikrotvrdosti

Zkušební zařízení: tvrdoměr ATM Qness 60 A + EVO se SW Qpix Control2
Zkouška mikrotvrdosti HV0,1 (doba zatěžování 10s) byla provedena v souladu s normou EN ISO 6507-1, na Příčném řezu svarovým spojem, v souladu s EN ISO 9015-2
Zkoušku provedl: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

SEM – Rastrovací elektronová mikroskopie

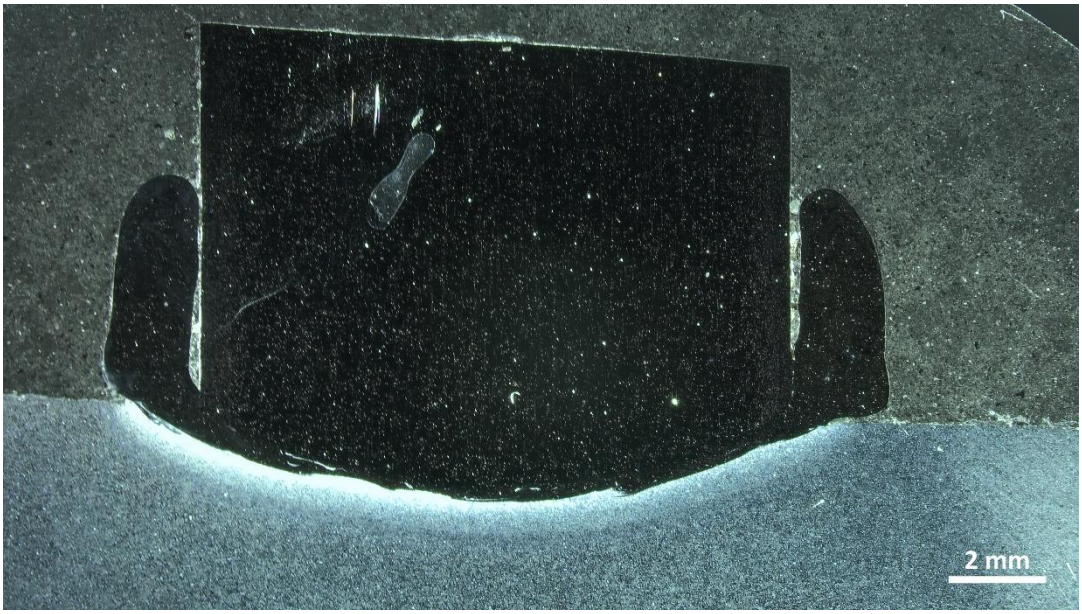
Zkušební zařízení: elektronový mikroskop VEGA 3 TESCAN
Zkoušku provedl: prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, Technická 4, Praha 6, 166 07, Česká republika
T 224 352 628 E 12133@fs.cvut.cz W u12133.fs.cvut.cz

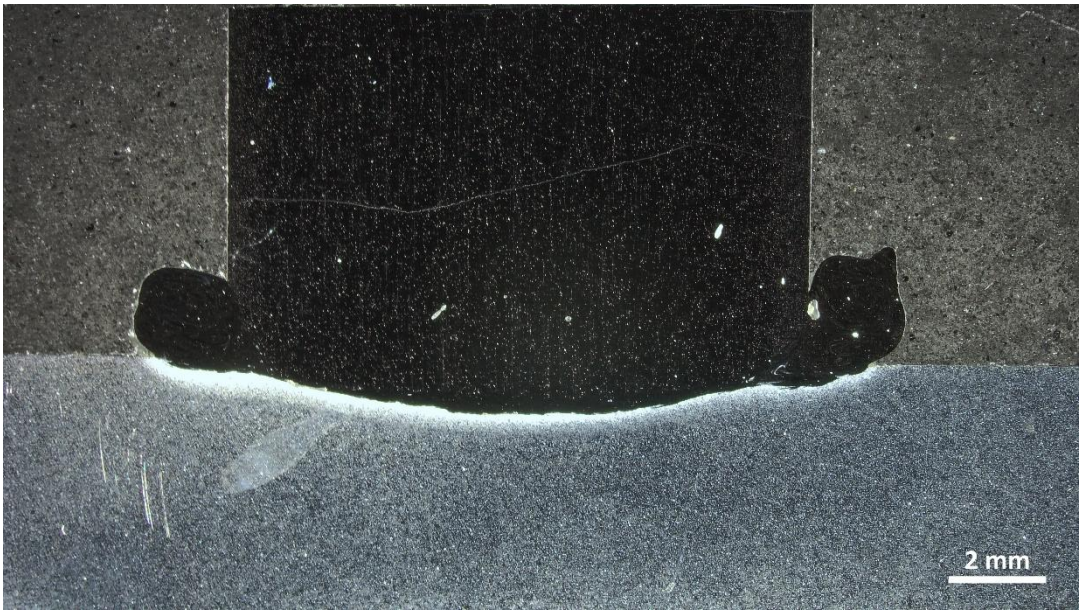
Výsledky zkoušky:

Zkouška Makrostruktury

Na obrázcích 2 až 6 jsou zobrazeny makrostruktury svarových spojů vzorků 1 až 5.

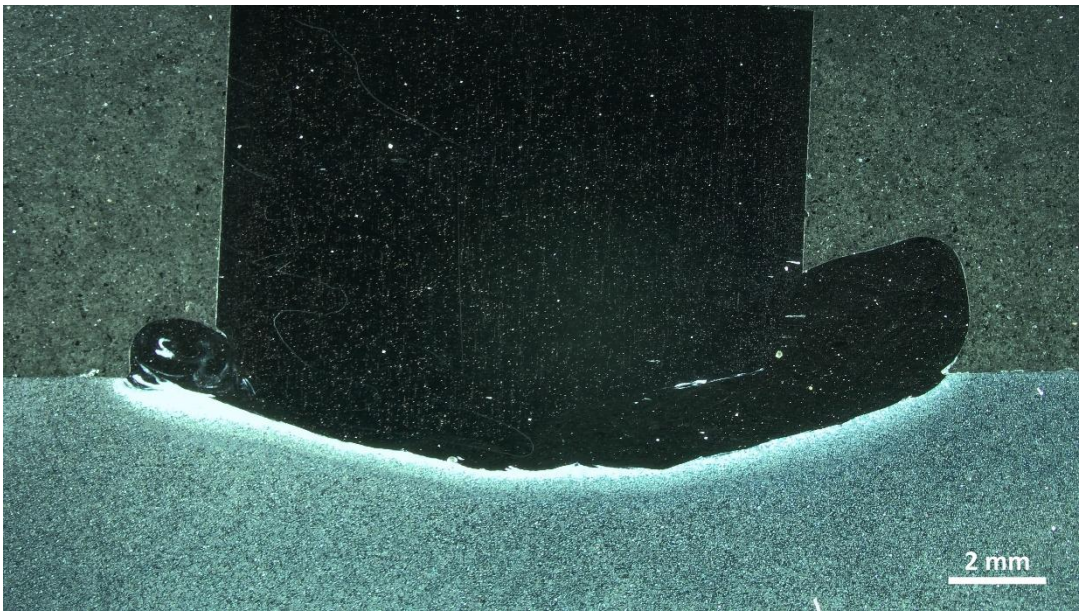


Obr. 2 – Makrostruktura svarového spoje č. 1

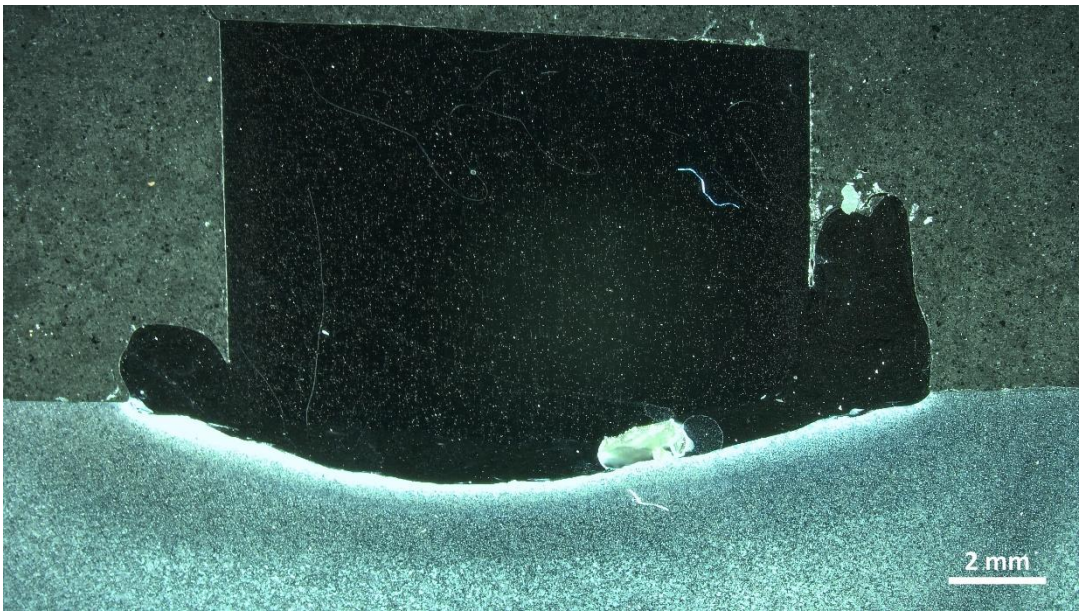


Obr. 3 – Makrostruktura svarového spoje č. 2

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, Technická 4, Praha 6, 166 07, Česká republika
T 224 352 628 E 12133@fs.cvut.cz W u12133.fs.cvut.cz

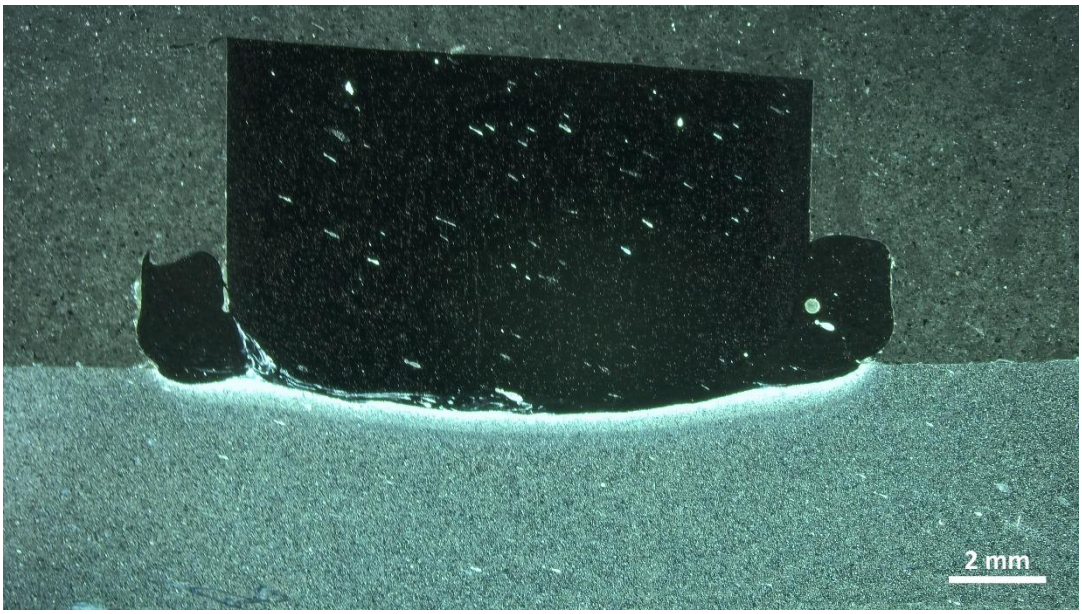


Obr. 4 – Makrostruktura svarového spoje č. 3



Obr. 5 – Makrostruktura svarového spoje č. 4

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, Technická 4, Praha 6, 166 07, Česká republika
T 224 352 628 E 12133@fs.cvut.cz W u12133.fs.cvut.cz

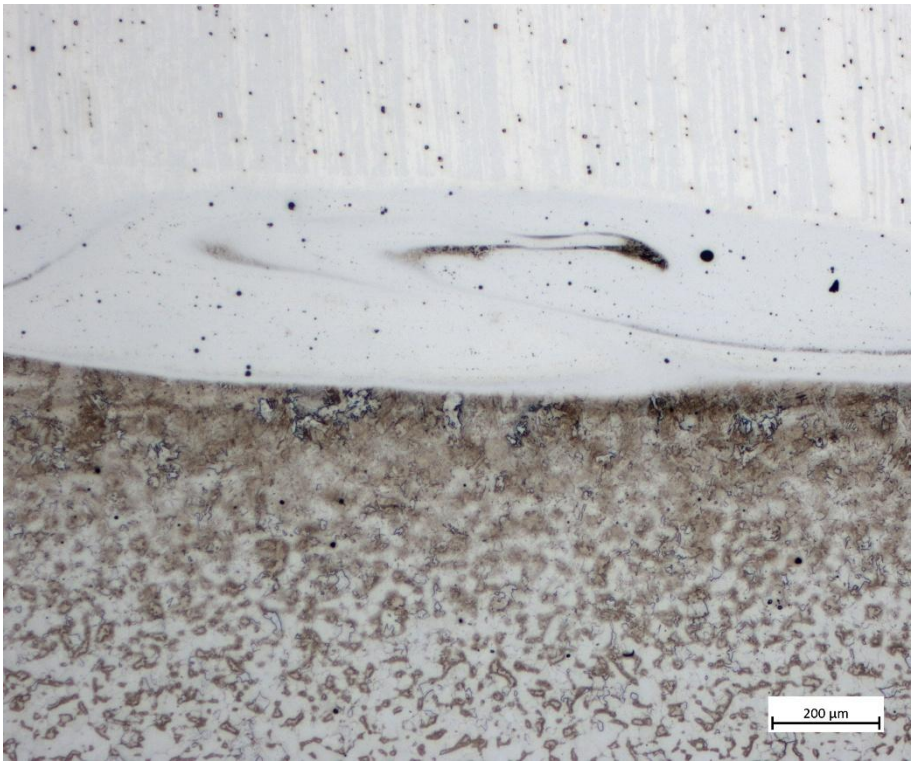


Obr. 6 – Makrostruktura svarového spoje č. 5

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, Technická 4, Praha 6, 166 07, Česká republika
T 224 352 628 E 12133@fs.cvut.cz W u12133.fs.cvut.cz

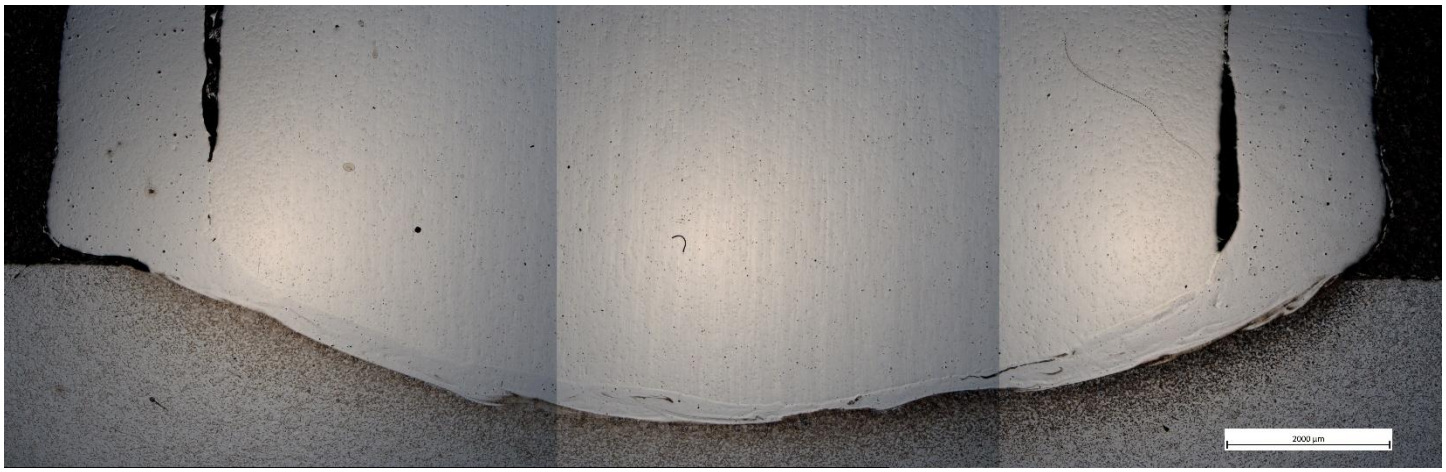
Zkouška Mikrostruktury

Na obrázcích 7 až 16 jsou zobrazeny mikrostruktury svarových spojů vzorků 1 až 5.



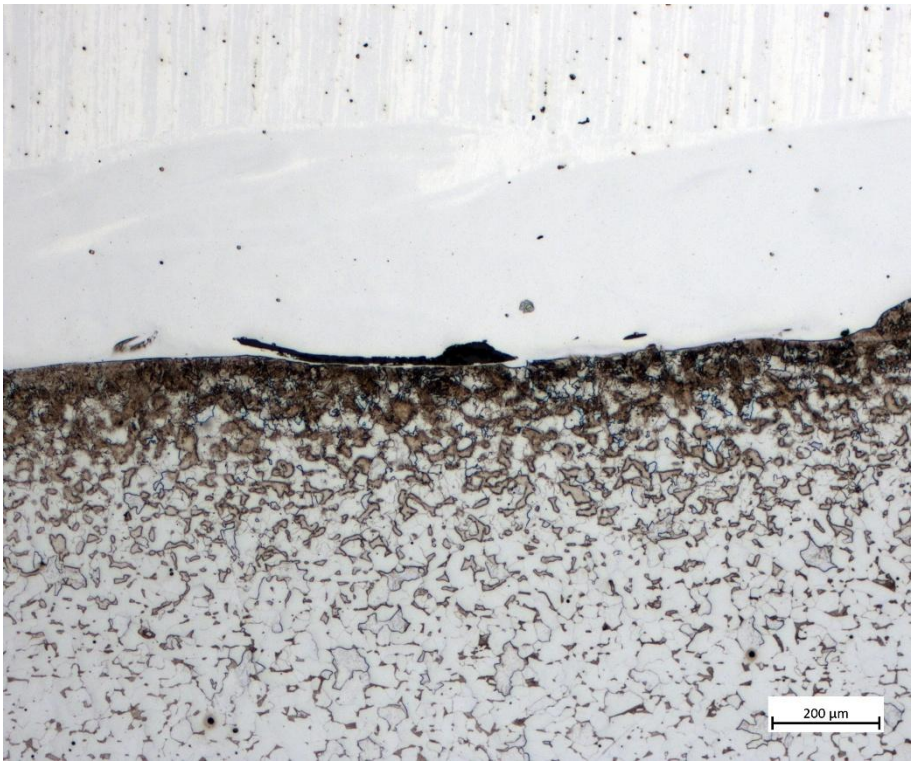
Obr. 7 – Detail mikrostruktury svarového spoje č. 1 – zvětšení 50x

(přechod mezi svorníkem – horní část obrázku a podkladovým plechem – spodní část obrázku)



Obr. 8 – Mikrostruktura celého svarového spoje č. 1 – zvětšení 25x

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, Technická 4, Praha 6, 166 07, Česká republika
T 224 352 628 E 12133@fs.cvut.cz W u12133.fs.cvut.cz

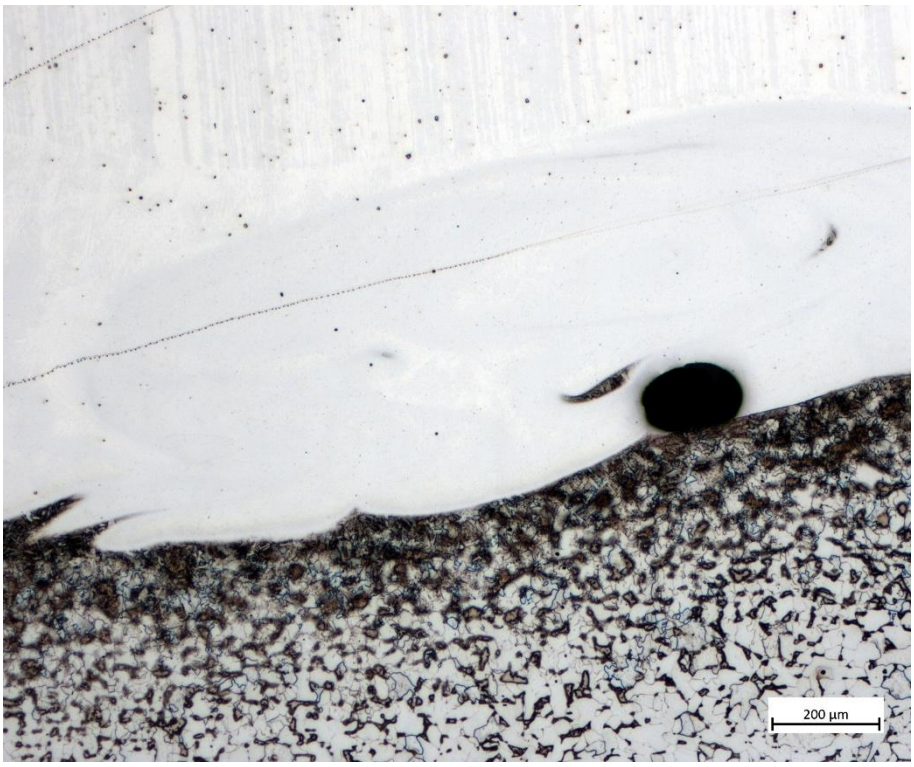


Obr. 9 – Detail mikrostruktury svarového spoje č. 2 – zvětšení 50x

(přechod mezi svorníkem – horní část obrázku a podkladovým plechem – spodní část obrázku)

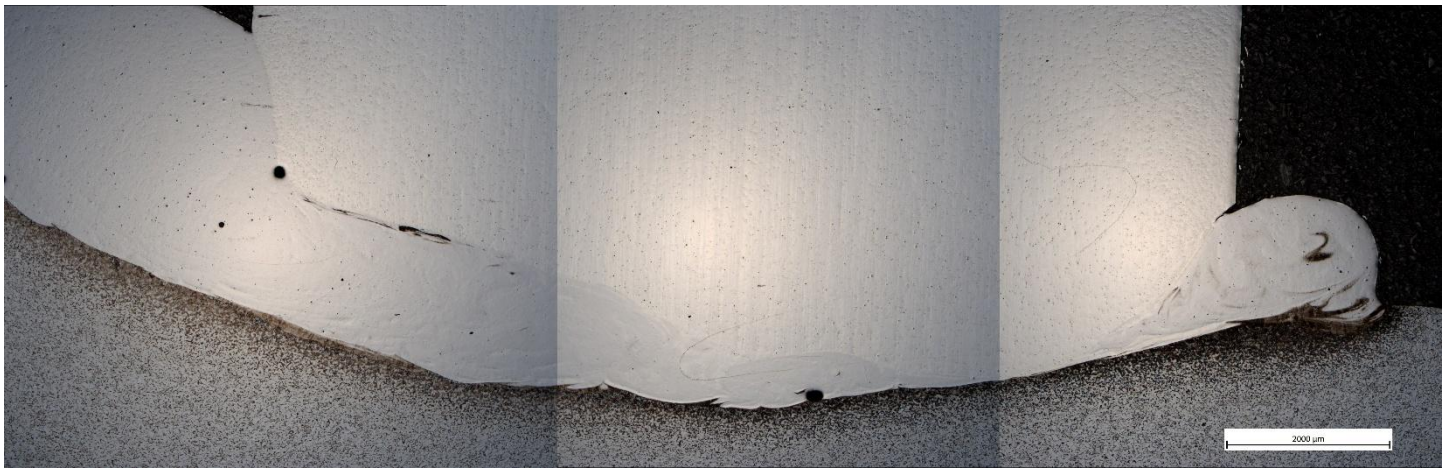
Obr. 10 – Mikrostruktura celého svarového spoje č. 2 – zvětšení 25x

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, Technická 4, Praha 6, 166 07, Česká republika
T 224 352 628 E 12133@fs.cvut.cz W u12133.fs.cvut.cz



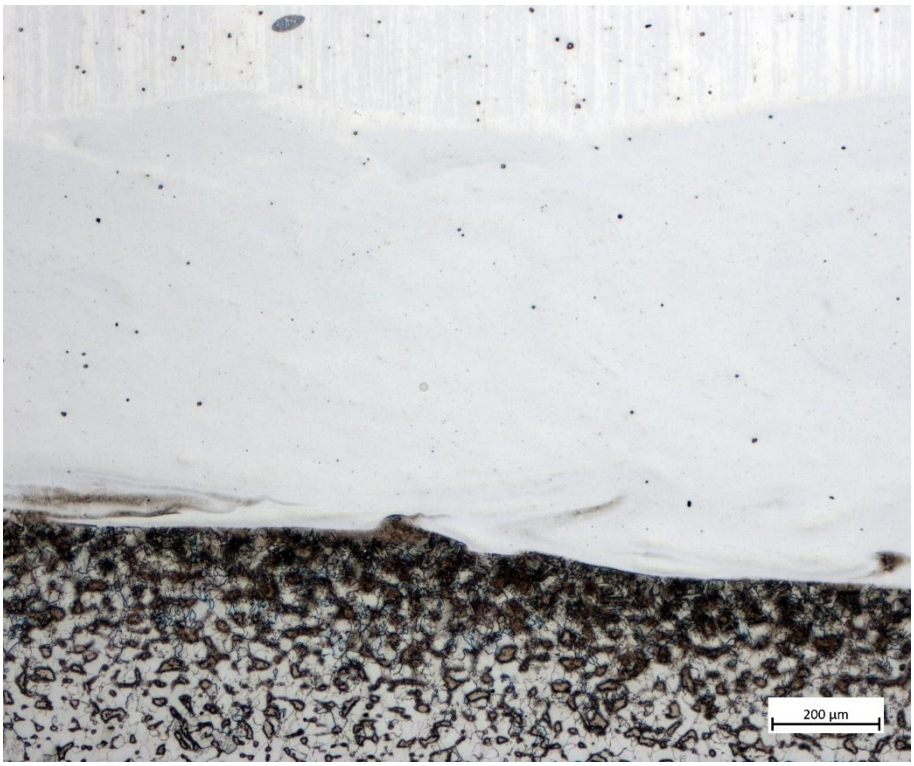
Obr. 11 – Detail mikrostruktury svarového spoje č. 3 – zvětšení 50x

(přechod mezi svorníkem – horní část obrázku a podkladovým plechem – spodní část obrázku)



Obr. 12 – Mikrostruktura celého svarového spoje č. 3 – zvětšení 25x

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, Technická 4, Praha 6, 166 07, Česká republika
T 224 352 628 E 12133@fs.cvut.cz W u12133.fs.cvut.cz



Obr. 13 – Detail mikrostruktury svarového spoje č. 4 – zvětšení 50x

(přechod mezi svorníkem – horní část obrázku a podkladovým plechem – spodní část obrázku)

Obr. 14 – Mikrostruktura celého svarového spoje č. 4 – zvětšení 25x

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, Technická 4, Praha 6, 166 07, Česká republika
T 224 352 628 E 12133@fs.cvut.cz W u12133.fs.cvut.cz

Obr. 15 – Detail mikrostruktury svarového spoje č. 5 – zvětšení 50x

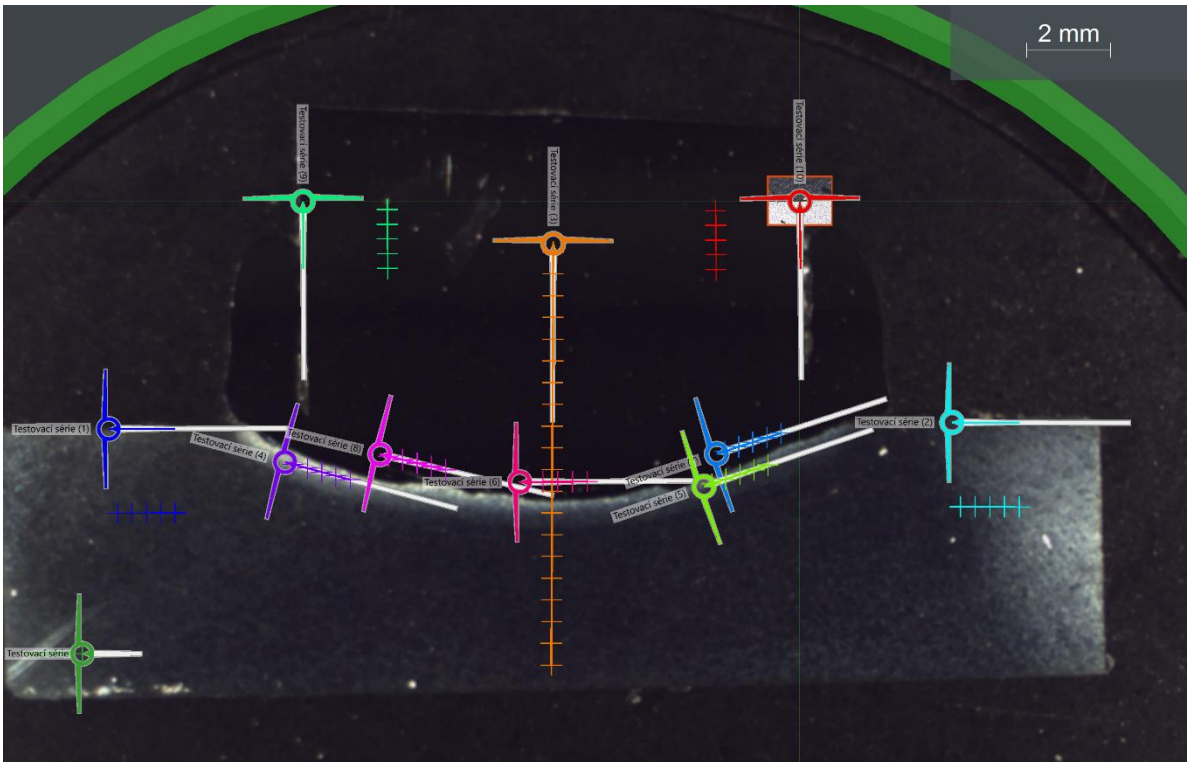
(přechod mezi svorníkem – horní část obrázku a podkladovým plechem – spodní část obrázku)

Obr. 16 – Mikrostruktura celého svarového spoje č. 5 – zvětšení 25x

Obr. 17 – Mikrostruktura koncové části svorníku (před navařením) – zvětšení 25x

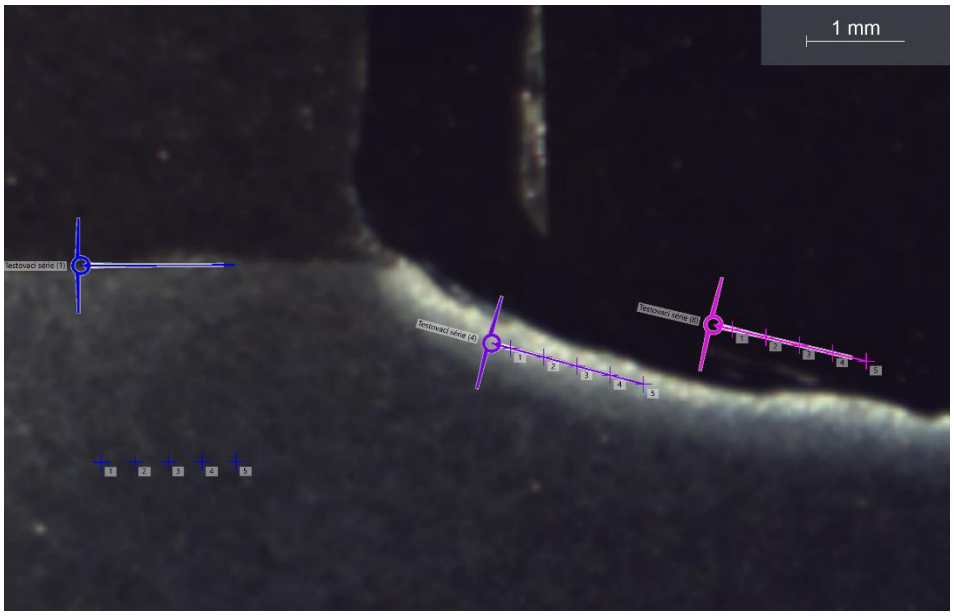
Zkouška mikrotvrdosti

Mikrotvrdost HV0,1 byla měřena v několika oblastech, tak jak norma doporučuje pro tupý T spoj. Měřené oblasti a počty vtisků v jednotlivých oblastech, jsou označeny na obrázku 18.

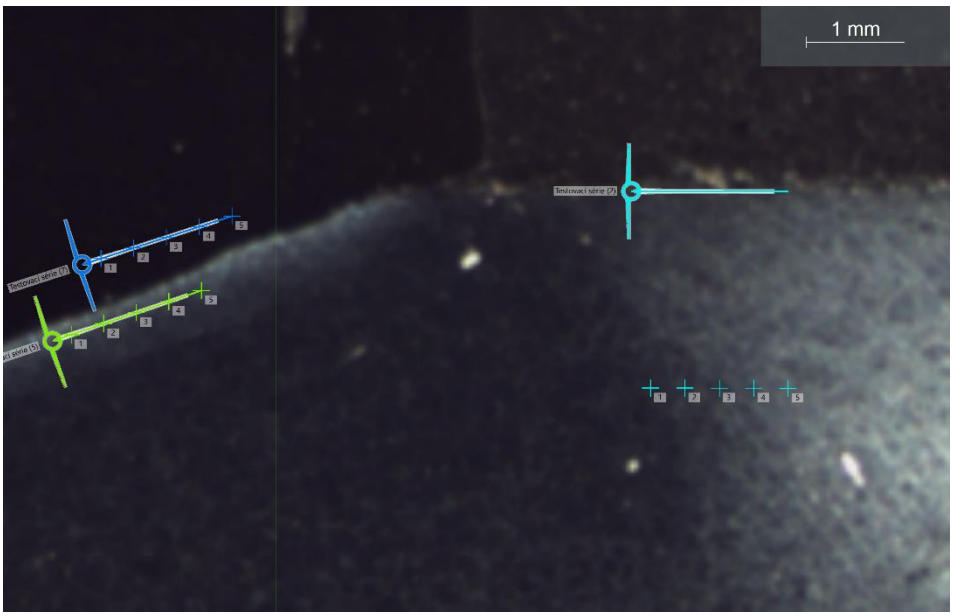


Obr. 18 – Celkové zobrazení měřených oblastí a umístění jednotlivých vpichů při zk. mikrotvrdosti (umístění TS = testovací série 1 až 10)

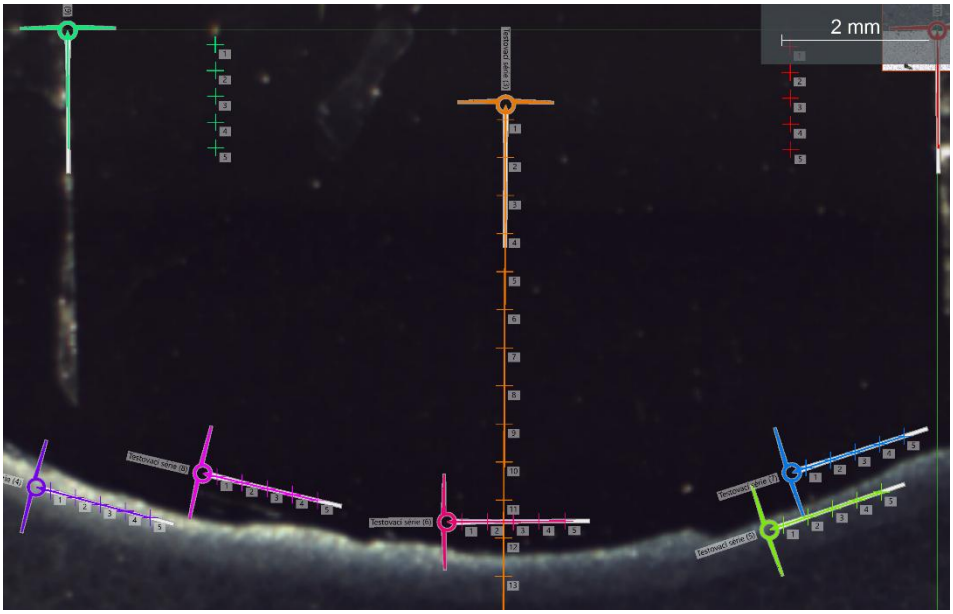
Na obrázcích 19 až 22 je vidět označení jednotlivých vpichů v měřených oblastech.



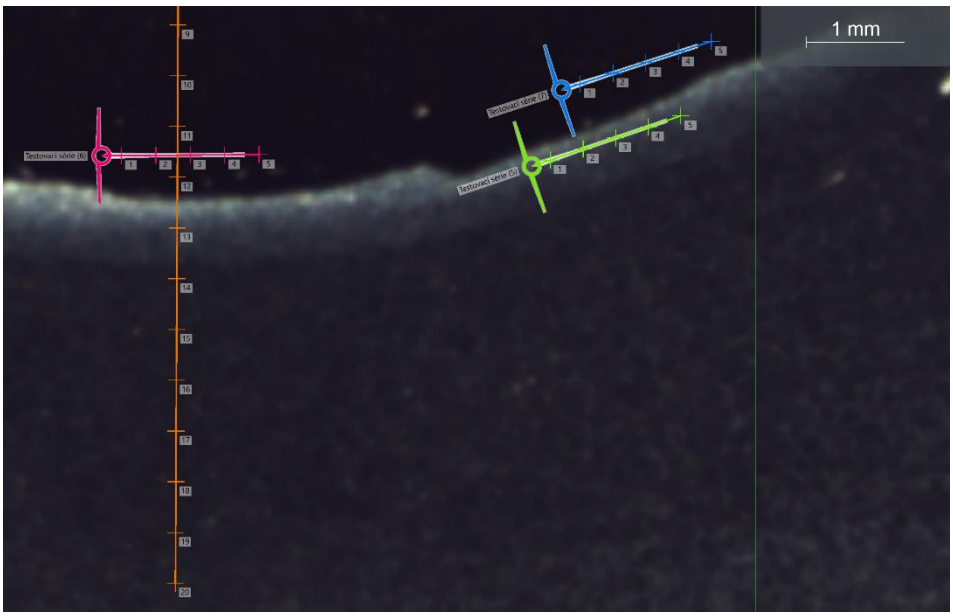
Obr. 19 – Zobrazení počtu a pořadí vpichů u testovací série TS1, TS4 a TS8



Obr. 20 – Zobrazení počtu a pořadí vpichů u testovací série TS2, TS5 a TS7



Obr. 21 – Zobrazení počtu a pořadí vpichů u testovací série TS3, TS6 a TS9, TS10



Obr. 22 – Zobrazení počtu a pořadí vpichů u testovací série TS3, TS6 (TS5, TS7)

Pozn.:
TS1 = základní materiál podkladového plechu (měřený na levé straně od svarového spoje) – 5 vpichů, vzdálenost mezi vpichy 0,35 mm
TS2 = základní materiál podkladového plechu (měřený na pravé straně od svarového spoje) – 5 vpichů, vzdálenost mezi vpichy 0,35 mm
TS3 = svisle měřený přechod přes všechna pásma svarového spoje (20 vpichů, vzdálenost mezi vpichy 0,5 mm)
TS4 = tepelně ovlivněná oblast (měřená na levé straně spoje) – 5 vpichů, vzdálenost mezi vpichy 0,35 mm
TS5 = tepelně ovlivněná oblast (měřená na pravé straně spoje) – 5 vpichů, vzdálenost mezi vpichy 0,35 mm
TS6 = svarový kov (měřený uprostřed spoje) – 5 vpichů, vzdálenost mezi vpichy 0,35 mm
TS7 = svarový kov (měřený vpravo od středu spoje) – 5 vpichů, vzdálenost mezi vpichy 0,35 mm
TS8 = svarový kov (měřený vlevo od středu spoje) – 5 vpichů, vzdálenost mezi vpichy 0,35 mm
TS9 = Základní materiál svorníku (měřený svisle vlevo od středu spoje) – 5 vpichů, vzdálenost mezi vpichy 0,35 mm
TS10 = Základní materiál svorníku (měřený svisle vpravo od středu spoje) – 5 vpichů, vzdálenost mezi vpichy 0,35 mm

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, Technická 4, Praha 6, 166 07, Česká republika
T 224 352 628 E 12133@fs.cvut.cz W u12133.fs.cvut.cz

Tab. 1 – Výsledky měření mikrotvrdosti HV0,1

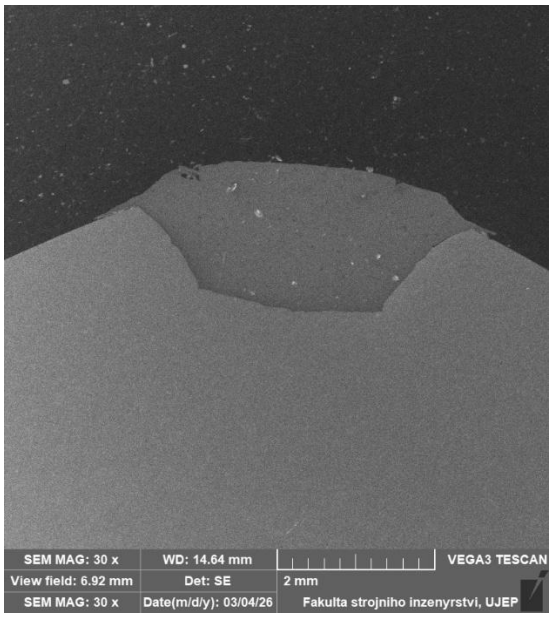
Číslo vzorku		TS1 (ZM)	TS2 (ZM)	TS4 (TOO)	TS5 (TOO)	TS6 (SK)	TS7 (SK)	TS8 (SK)	TS9 (ZM-Svorník)	TS10 (ZM-Svorník)
Vzorek 1	1	151	164	233	238	223	231	231	324	329
	2	148	158	237	392	233	224	233	318	316
	3	132	171	218	214	234	235	228	313	313
	4	145	169	250	216	241	222	234	320	314
	5	151	170	314	230	220	255	233	295	305
Průměr Vz1		144	166,4	250,5	258	230,2	233,4	231,8	311,5	315,4
Vzorek 2	1	141	131	240	255	239	441	378	284	306
	2	164	134	273	266	393	418	311	288	300
	3	155	139	286	243	360	390	240	297	310
	4	149	134	369	243	375	381	246	305	302
	5	152	122	212	203	342	403	425	300	307
Průměr Vz2		152,2	132	292	241,75	341,8	406,6	320	294,8	305
Vzorek 3	1	130	161	242	235	184	230	406	292	293
	2	141	135	214	201	378	215	398	290	287
	3	128	141	231	229	290	213	390	302	295
	4	138	146	218	223	197	218	418	300	310
	5	128	132	220	265	198	299	427	298	287
Průměr Vz3		133	143	225	219,67	249,4	235	407,8	296,4	294,4
Vzorek 4	1	132	166	339	217	457	426	450	312	311
	2	131	161	361	253	376	405	404	318	315
	3	132	170	335	296	212	415	441	310	322
	4	148	139	269	215	255	430	396	297	315
	5	153	154	251	233	429	442	396	314	318
Průměr Vz4		139,2	158	314,33	242,8	345,8	423,6	422,75	310,2	316,2
Vzorek 5	1	126	132	267	234	469	446	233	290	293
	2	128	134	188	223	415	440	225	293	306
	3	136	123	214	278	460	440	413	280	297
	4	130	128	229	227	380	431	220	308	298
	5	128	133	214	290	437	444	345	292	308
Průměr Vz5		129,6	130	220,75	246,33	432,2	440,2	300,75	292,6	300,4

Tab. 2 – Výsledky měření mikrotvrdosti HV0,1 (TS3)

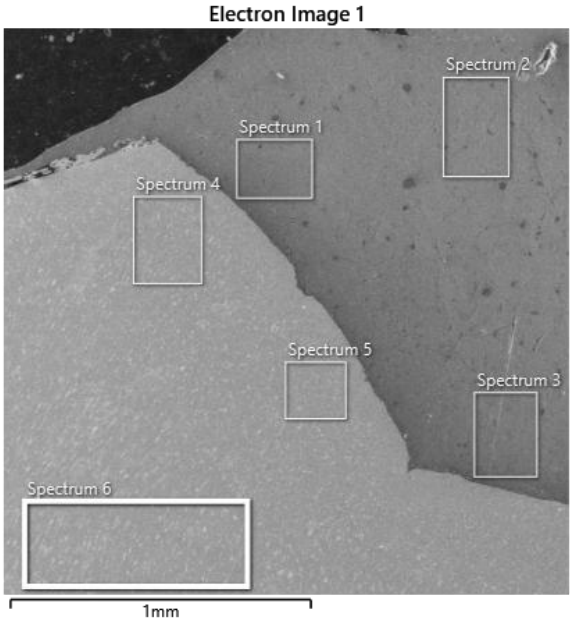
Č. vz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
VZ1	298	290	283	293	280	284	277	280	280	284	261	338	223	210	177	181	166	171	161	158
VZ2	302	265	273	293	279	294	290	295	283	282	322	236	153	157	161	151	148	129	139	142
VZ3	278	278	291	270	270	283	269	279	281	281	280	256	240	213	406	194	160	159	157	160
VZ4	293	268	271	271	282	282	288	283	294	290	291	259	246	316	234	176	177	165	168	152
VZ5	289	281	271	275	279	294	288	293	297	277	273	411	253	166	157	163	152	156	154	141

Analýzy na SEM (Scanning Electron Microscopy) – rastrovací elektronová mikroskopie

Pro elektronové analýzy byly použity vzorky vytvořené pro zkoušku mikrostruktury.

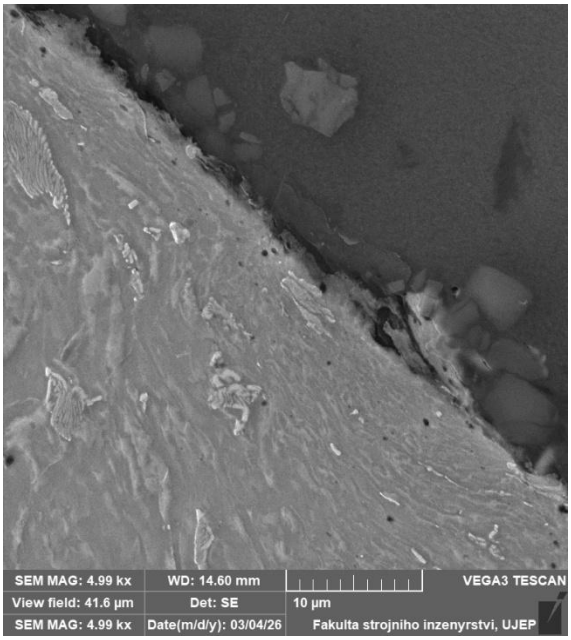


Obr. č. 23 – Hrot svorníku, na styčném místě byla provedena EDS analýza – jedná se o jiný svorník, nicméně deklaruje, že na hrotu svorníků bývá kulička z hliníkové slitiny

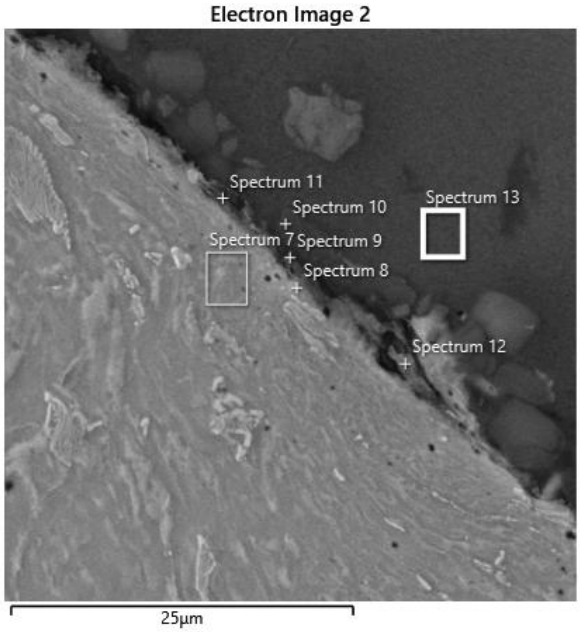


Obr. č. 24 – Oblasti, v nichž byla provedena EDS analýza:
spektrum 1 – 98,3 %Al; 1,7 %Si;
spektrum 2 – 97,3 %Al; 2,7 %Si;
spektrum 3 – 97,5 %Al; 2,5 %Si;
spektrum 4 – 99,5 %Fe; 0,5 %Mn;
spektrum 5 – 99,5 %Fe; 0,5 %Mn;
spektrum 6 – 99,6 %Fe; 0,4 %Mn.

Hrot „kuličky“ je slitina hliníku a křemíku, jak zachytí další EDS analýzy z jednotlivých svarů, díky tomuto hrotu se bude vyskytovat hliník (slitina Al-Si) i v místě svaru. „Tělo“ použitého svorníku je z nízkouhlíkové oceli. Následující sledované svorníky jsou vyrobeny z korozivzdorné austenitické oceli Wr.N. 1.4541. Jedná se o chemicky odlišné svorníky (vyšší koncentrace Cr a Ni). Další významná odlišnost je v tepelné vodivosti. Konstrukční ocel má tepelnou vodivost λ = 60; korozivzdorná ocel 10; hliník 220 [W/mK].
[Zdroj dat] GLÜCK, B.: Heizwasser Netze, VEB Verlag für Bauwesen Berlin. Berlin 1985.



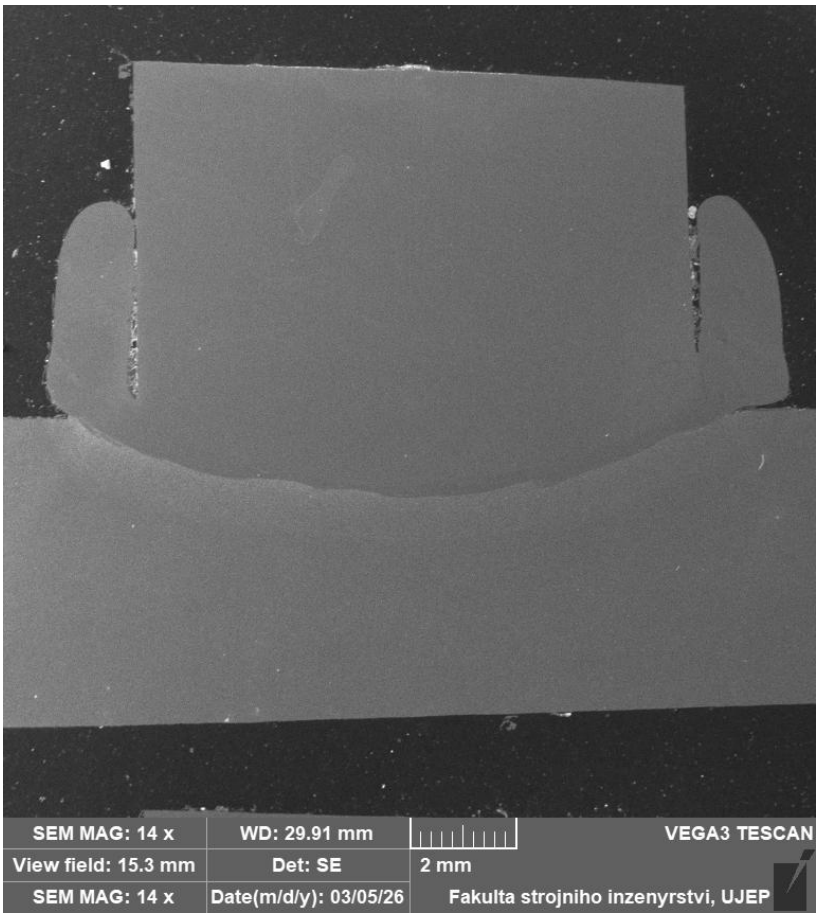
Obr. č. 25 – Detail z místa rozhraní mezi svorníkem ocel a svorníkem hrot – Al slitina.
Z detailní analýzy EDS vyplynulo, že Al slitina difundovala i do těla svorníku. Jak dokumentuje tento detail, struktura svorníku je na rozhraní mezi ocelí a hliníkovým hrotem velmi zdeformována.



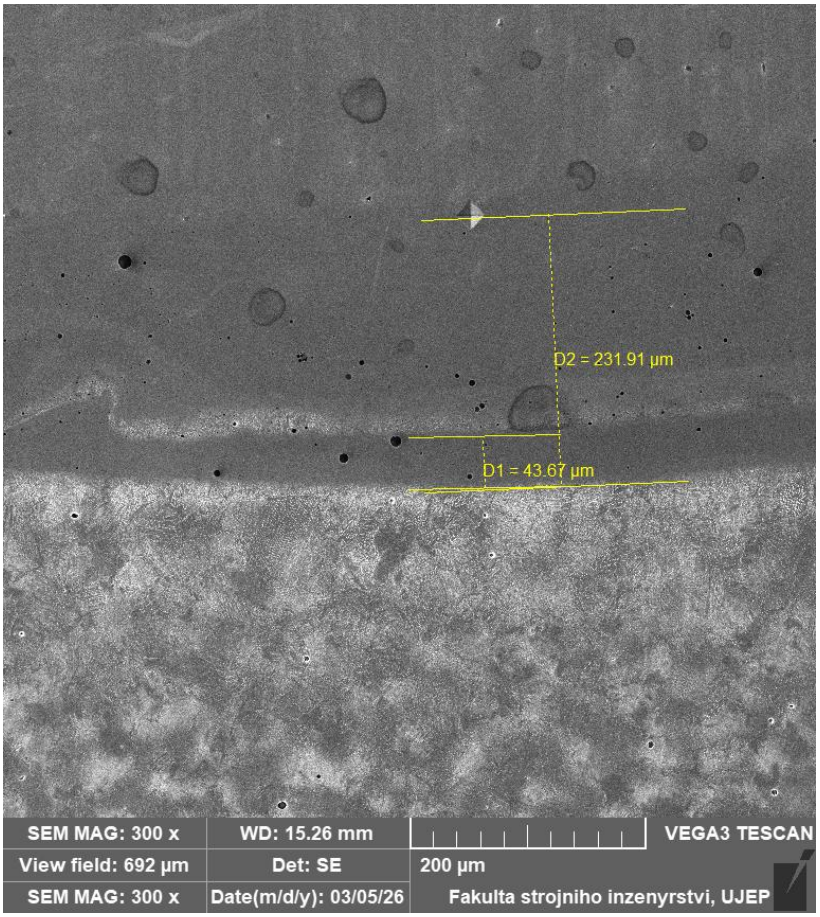
Obr. č. 26 – V jednotlivých oblastech byla provedena EDS analýza:
spektrum 7 – 97,7 %Fe; 1,9 %Al; 0,4 %Mn;

ve všech bodových EDS analýzách na rozhraní ocel – Al slitina byl zjištěn Al nebo Fe a dle množství obou prvků následně i Si nebo Mn.

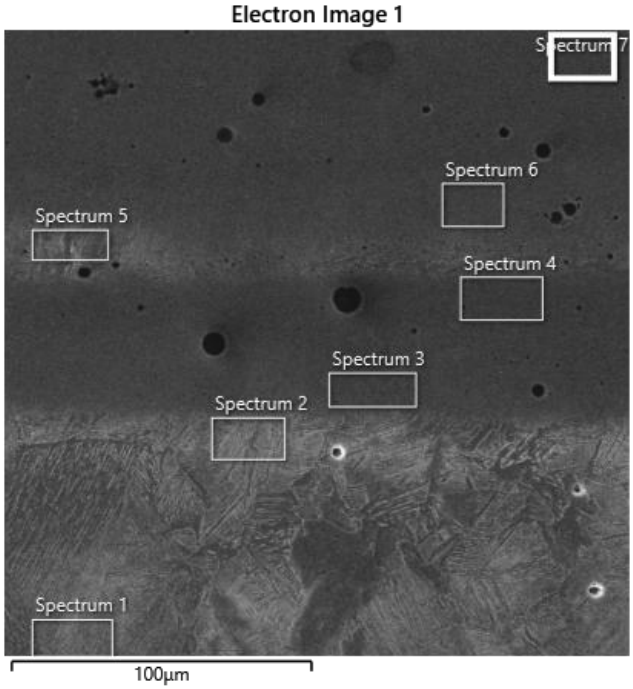
Svarový spoj – svorník č. 1



Obr. č. 27 – Spoj – svorník 1 – zrcadlově otočeno oproti snímku z metalografického mikroskopu



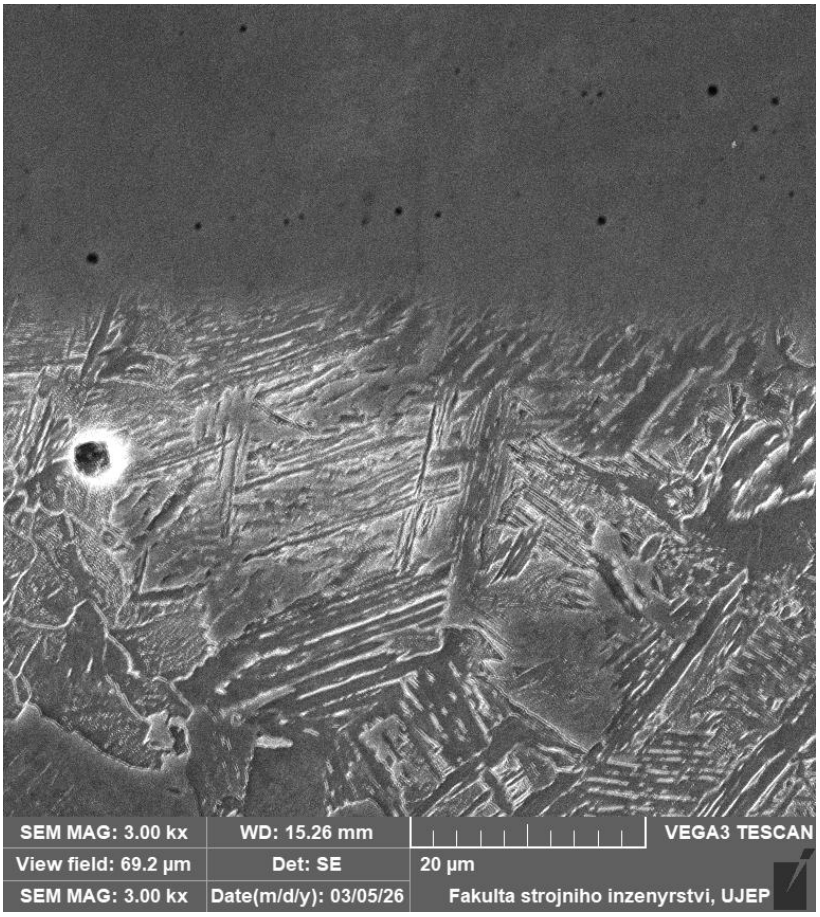
Obr. č. 28 – Střední část – zachycen vtisk HV 0,1 – je ve vzdálenosti 0,23 mm od rozhraní.



Obr. č. 29 – Byla provedena EDS analýza – střední část svaru a bylo zjištěno:
Spektrum 1 – 99,2 %Fe; 0,5 %Mn; 0,4 %Si;
Spektrum 2 – 98,8%Fe; 0,5%Mn; 0,4%Cr; 0,3%Si;

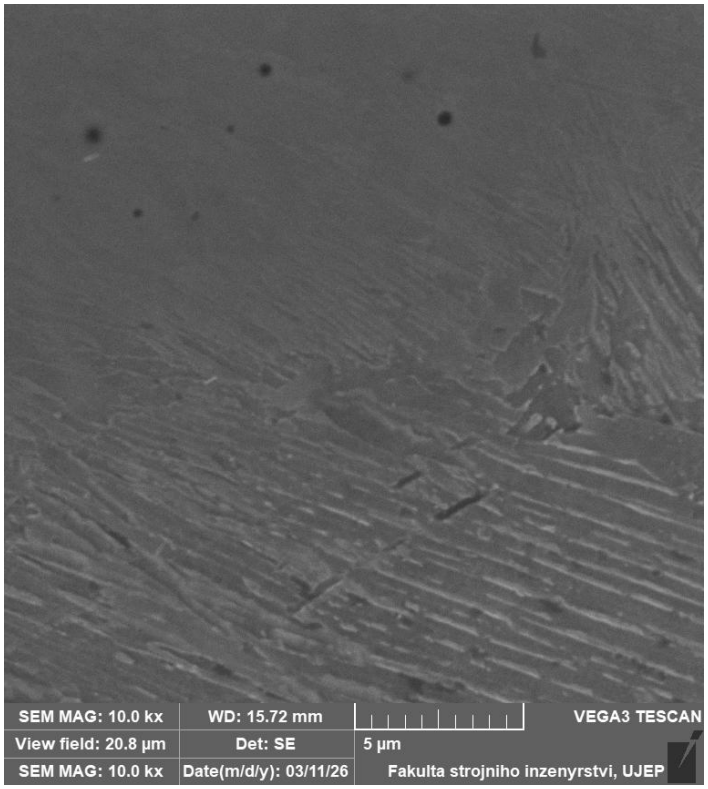
Spektrum 3 – 85,6%Fe; 0,9%Mn; 8,4%Cr; 0,7%Si; 4,4%Ni;
Spektrum 4 – 84,0%Fe; 0,9%Mn; 9,1%Cr; 0,8%Si; 5,2%Ni;
Spektrum 5 – 96,6%Fe; 0,5%Mn; 1,8%Cr; 0,4%Si; 0,7%Ni – opět obyčejná ocel S355;
Spektrum 6 – 83,4%Fe; 0,8%Mn; 9,5%Cr; 0,7%Si; 5,4%Ni;
Spektrum 7 – 79,1%Fe; 1,1%Mn; 12,3%Cr; 0,8%Si; 6,7%Ni.

Jak dokumentuje obsah jednotlivých prvků, pak na rozhraní svaru byly i v oblasti korozivzdorné oceli (svorníku) tzv. pásy obyčejné oceli (přivařovaná deska z oceli S355). Na straně svorníku bylo v oblasti rozhraní snížené množství chromu (niklu), pod 12 %Cr, tj. tato oblast je náchylná k možné korozi.
U svorníku 1 nebyly zjištěny na straně korozivzdorné oceli žádné výrazné karbidy po hranici austenitického zrna (základní struktura u svorníku, neboť se jedná o austenitickou ocel Wr.N. 1.4541).

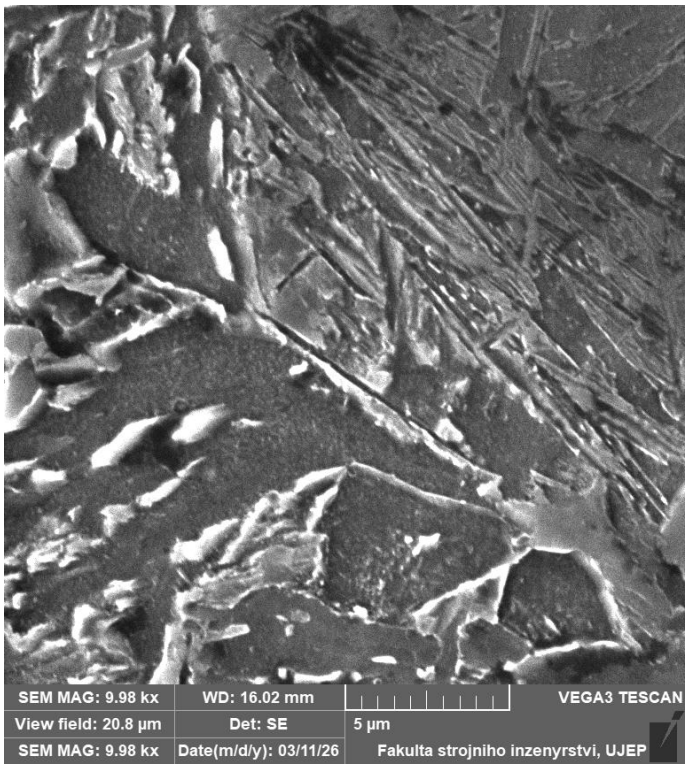


Obr. č. 30 – Střední část – detail přivařované desky S355 – rozhraní svaru – zákalná struktura dolní bainit. Martenzit se u tohoto vzorku vyskytoval pouze v ojedinělých případech.

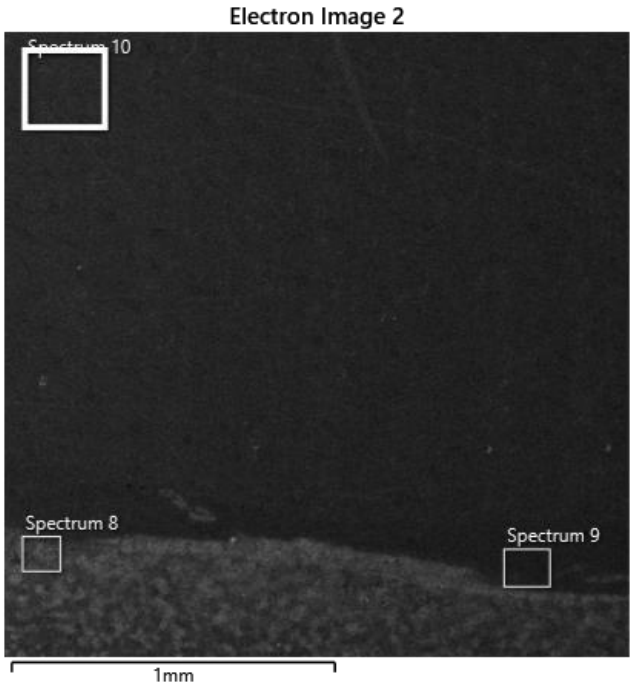
Jak zachytí následující snímek z okraje svorníku (pravá část), v této oblasti nebyl podkladový materiál S355 tak zahřát, aby vznikly podmínky pro zákalnou strukturu typu dolní bainit.



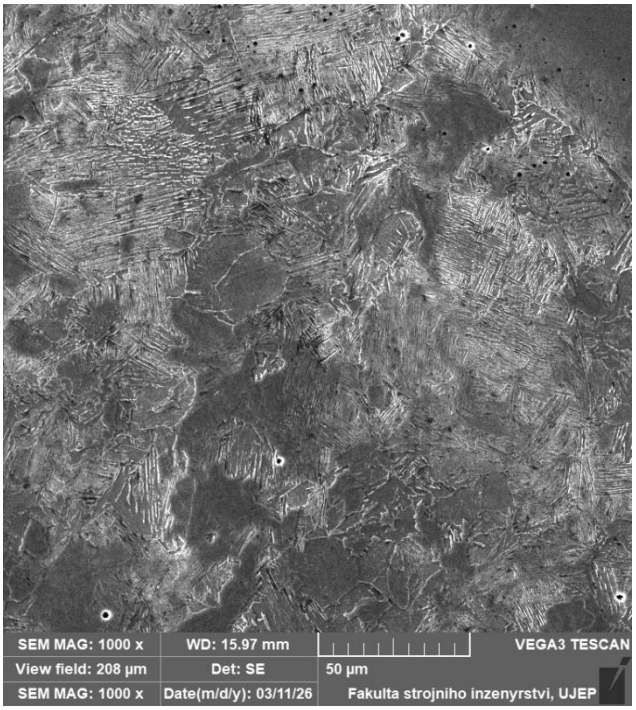
Obr. č. 31 – Pravá okrajová část – rozhraní na straně S355 – zde se vyskytuje horní bainit, který dál od rozhraní přechází do perlitické struktury.



Obr. č. 32 – Levá okrajová část – rozhraní na straně S355 – zde se vyskytuje oblast martenzitu (šířka martentitické oblasti je cca 10 µm) a dále se vyskytují karbidy po hranicích zrn.
jak vyplývá z obr. č. 31 a 32 je mezi oběma oblastmi (pravá – levá) poměrně zásadní rozdíl, tento rozdíl je i mezi středem svaru (v ose svorníku).

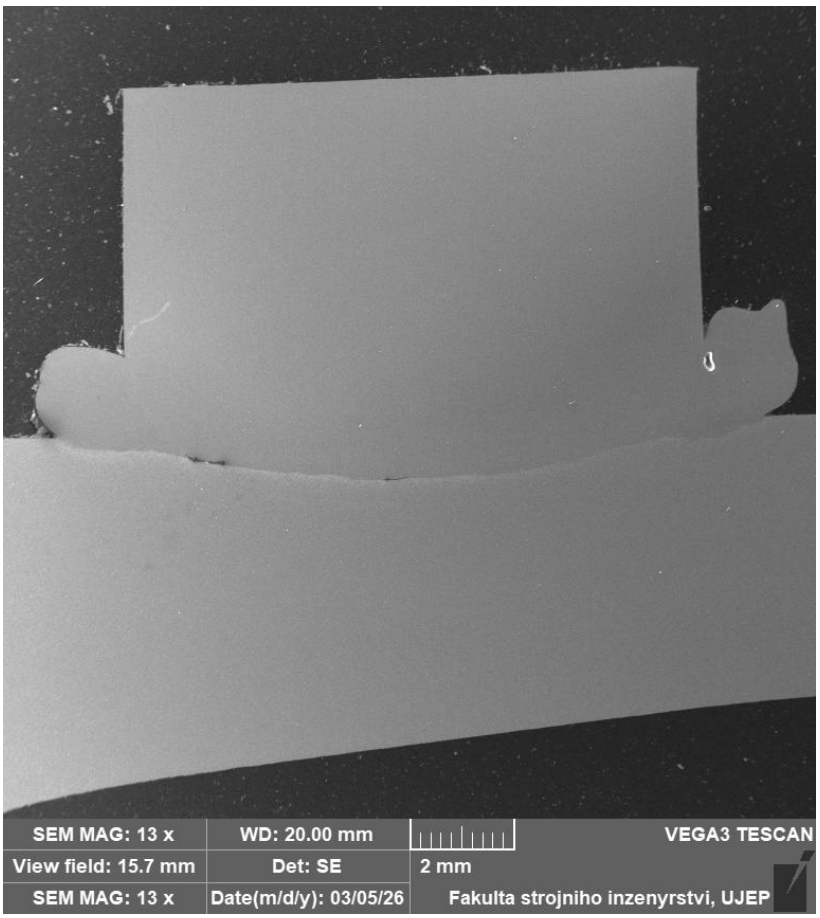


Obr. č. 33 – EDS analýza dokumentuje rozdíl mezi rozhraním a vzdálenější oblastí svorníku –bylo zjištěno:
Spektrum 8 – 98,7 %Fe; 0,5 %Mn; 0,5 %Si; 0,3 %Cr;
Spektrum 9 – 83,7%Fe; 1,1%Mn; 8,8%Cr; 0,9%Si; 4,9 %Ni; 0,6 %Al – zde se projevila přítomnost Al z hrotu svorníku;
Spektrum 10 – 69,9%Fe; 1,3%Mn; 18,2%Cr; 10,3%Ni; 0,3%Ti – ocel Wr.N. 1.4541 obsahuje Ti – stabilizace karbidů – TiC – zamezení vzniku karbidů $Cr_{23}C_6$.

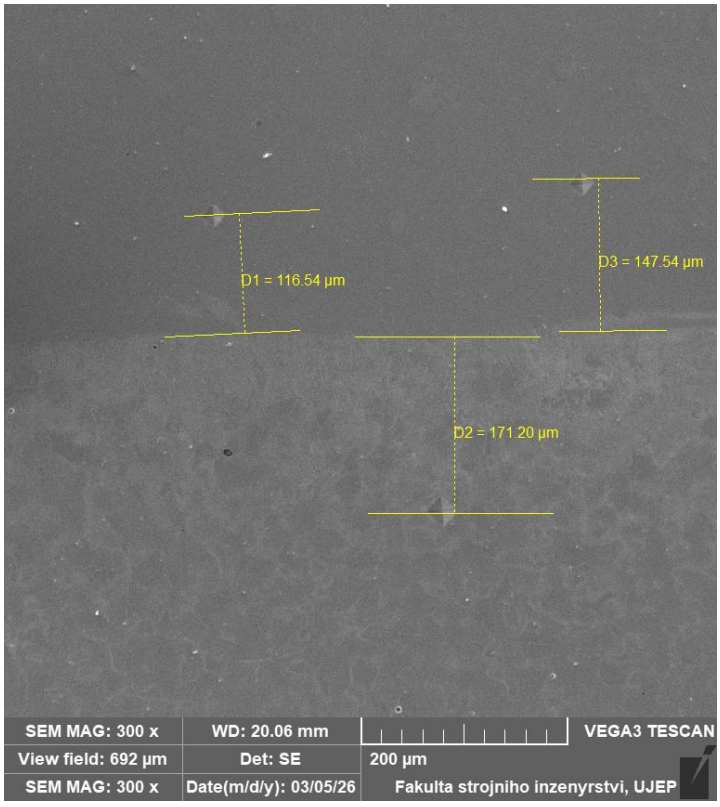


Obr. č. 34 – Levá okrajová část –oblast oceli S355 – vpravo nahoře je svorník Wr.N. 1.4541.

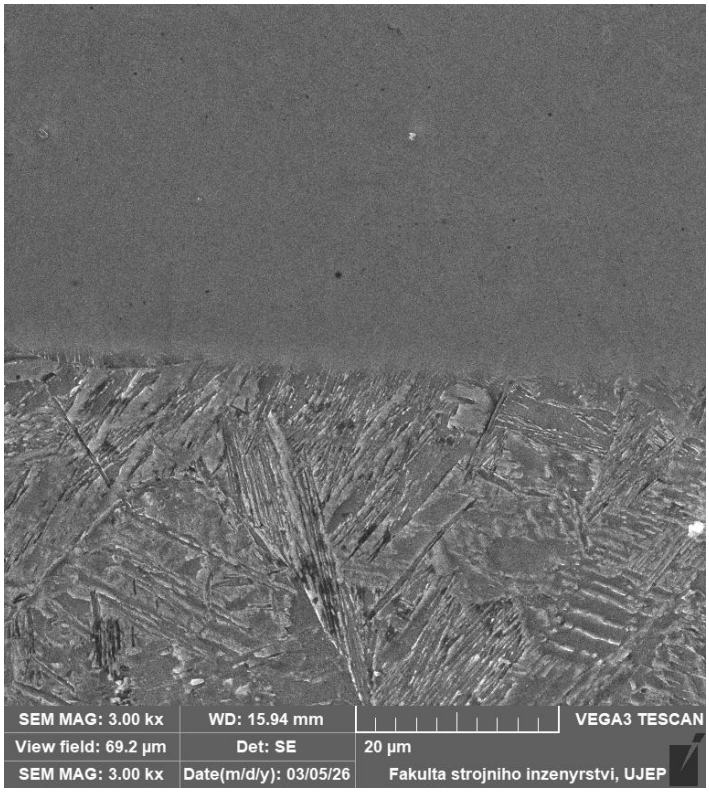
Svarový spoj – svorník č. 2



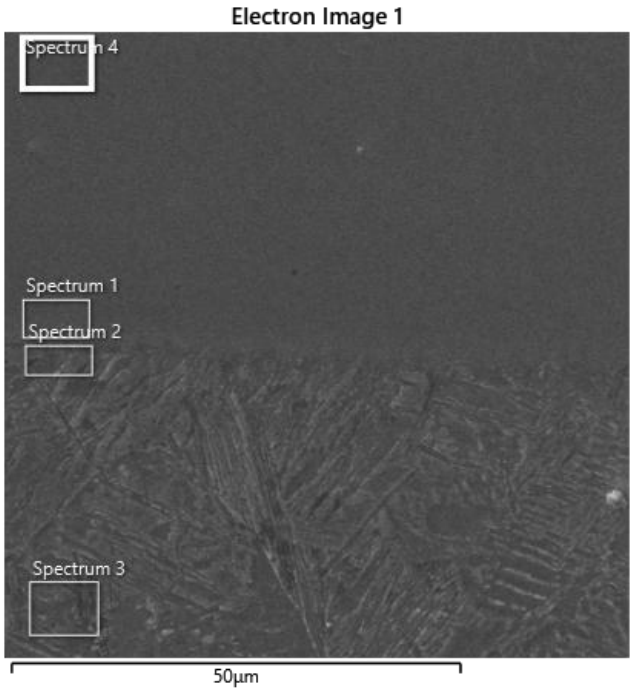
Obr. č. 35 – Spoj – svorník 2 – zrcadlově otočeno oproti snímku z metalografického mikroskopu



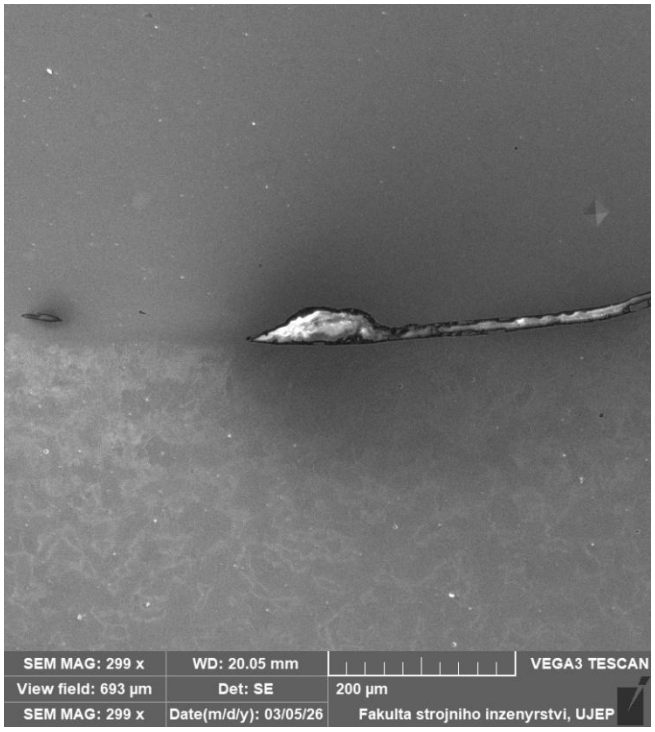
Obr. č. 36 – Vzdálenost jednotlivých vtisků HV0,1 ve střední části svaru (střední část – podélná osa svorníku).



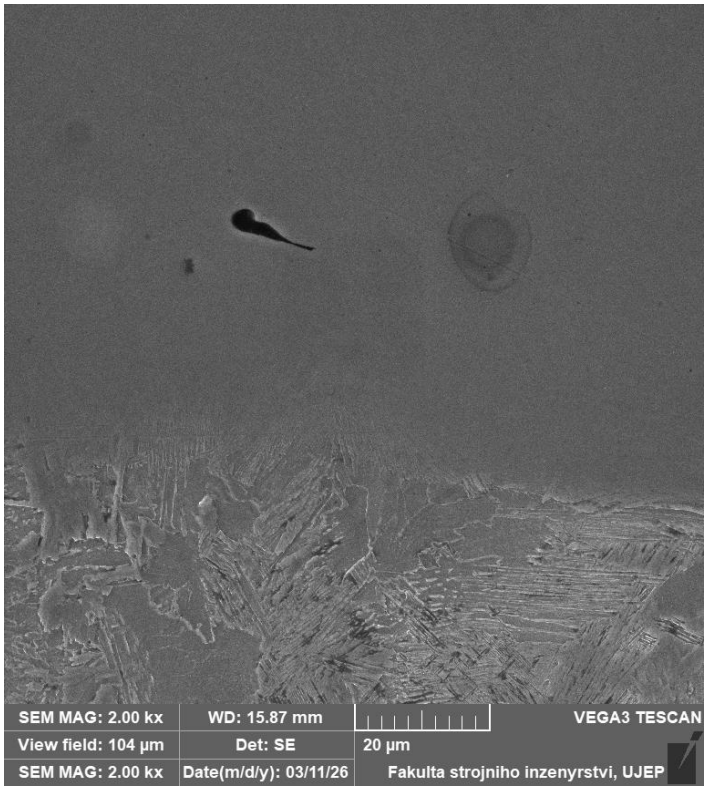
Obr. č. 37 – Ve střední části v oblasti rozhraní se vyskytuje dolní a horní bainit, tj. zákalná struktura. Po hranicích původních austenitických zrn (na straně oceli S355) jsou jasné „řetízky" karbidů. Jejich chemické složení odpovídá výsledkům EDS $(Fe, Mn)_3C$ a rovněž karbidům chromu (viz spektrum 2).



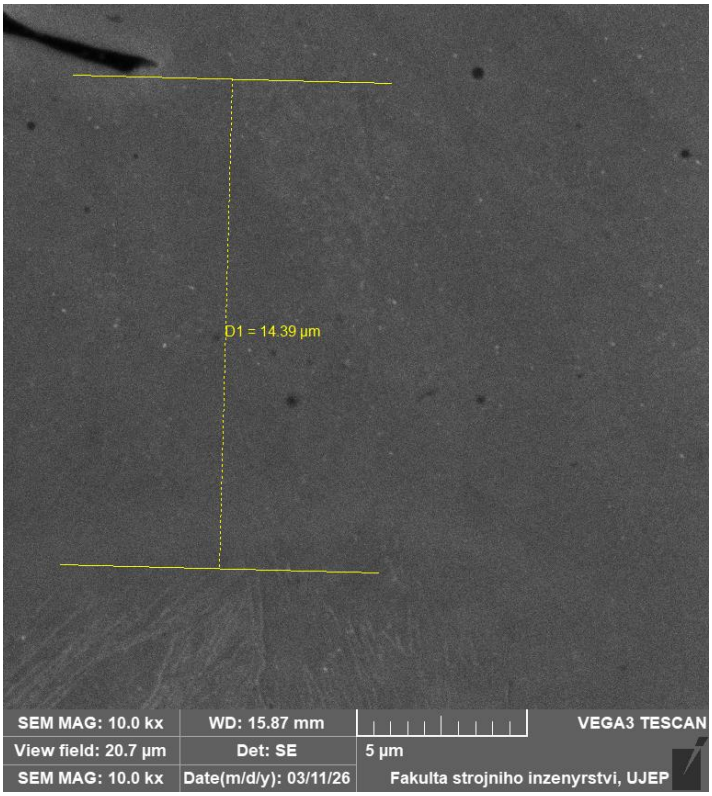
Obr. č. 38 – Ve střední části (obr. č. 16) byla provedena EDS analýza a bylo zjištěno:
Spektrum 1 – 83,2 %Fe; 9,5 %Cr; 4,9 %Ni; 0,9 %Mn; 0,7 %Al; 0,6 %Si – v oblasti rozhraní na straně oceli Wr.N. 1.4541 se vyskytuje rovněž Al-Si – pozůstatek z hrotu svorníku.
Spektrum 2 – 96,4 %Fe; 1,8 %Cr; 0,6 %Ni; 0,6 %mn; 0,5 %Si;
Spektrum 3 – 99,2 %Fe; 0,5 %Mn; 0,3 %Cr;
Spektrum 4 – 73 %Fe; 15,4 %Cr; 8,3 %Ni; 1,3 %Mn; 1,2 %Al; 0,8 %Si.



Obr. č. 39 – Defekt na rozhraní svarového spoje – defekt je nedaleko střední (osové části svaru).

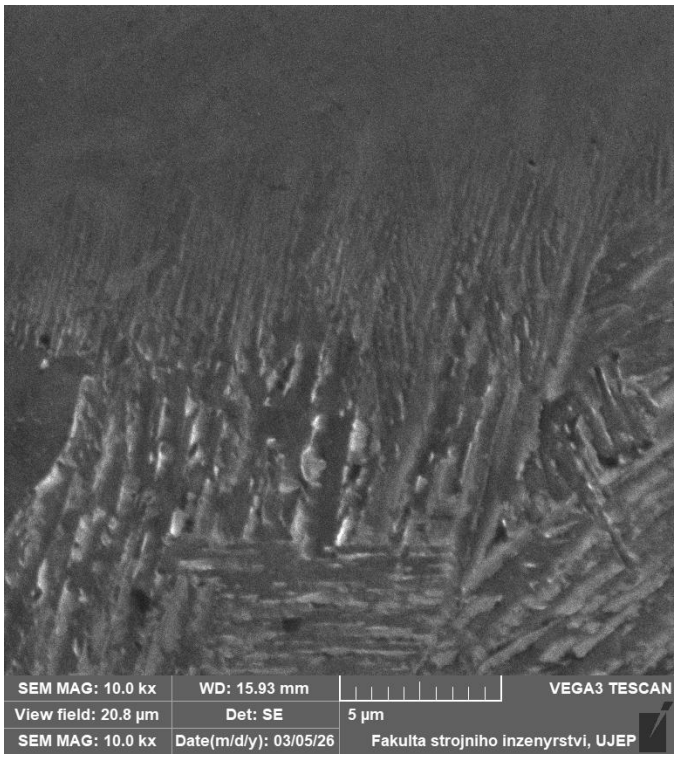


Obr. č. 40 – V důsledku vysokých metalurgických tlaků při chladnutí došlo k deformaci původního póru.

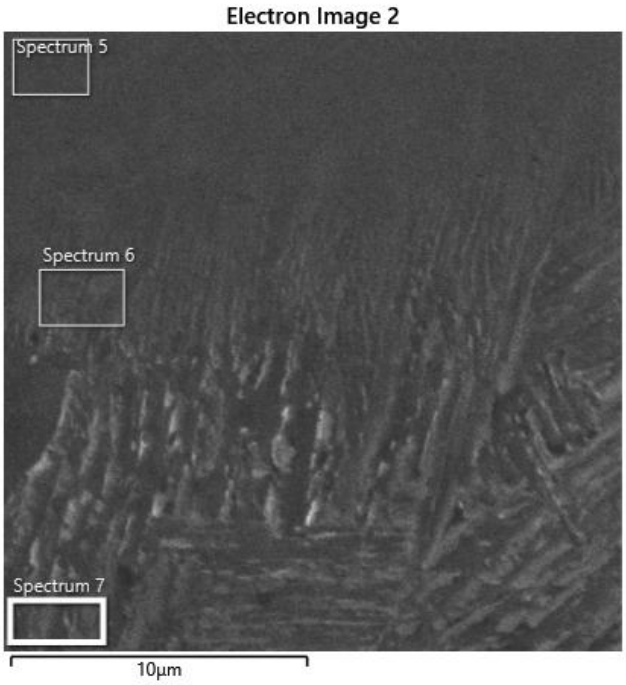


Obr. č. 41 – Defekt není přesně na rozhraní, ale je cca 14 µm od rozhraní.

V důsledku nižší tepelné vodivosti oceli Wr.N. 1.4541 se více natavuje ocel S355, proto se svarový kov více promíchává ocelí bez chromu a niklu, ale na druhou stranu s vetší koncentrací uhlíku (cca 0,23 %C).

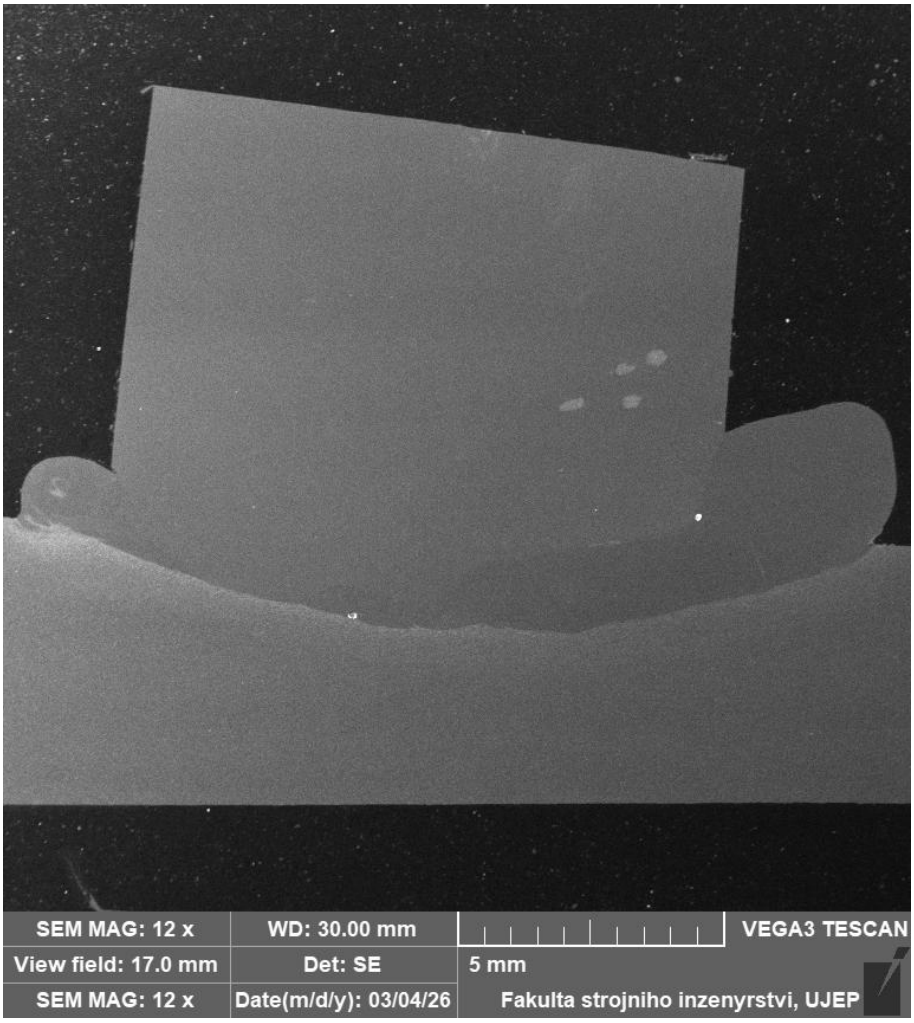


Obr. č. 42 – Rozhraní – strukturní stav na straně oceli S355 – okraj svaru svorníků – karbidy (Fe_3C, ale i $Cr_{23}C_6$) jsou usměrněny odvodem tepla – horní bainit.

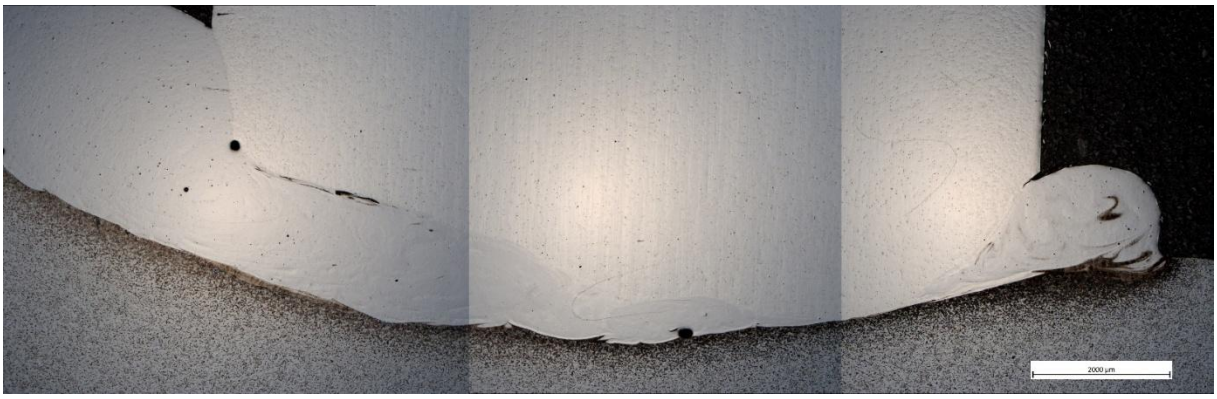


Obr. č. 43 – Ve vyznačených oblastech byla provedena EDS analýza:
Spektrum 5 – 83,4 %Fe; 9,4% Cr; 5,0 %Ni; 0,9 %Mn; 0,7 %Si; 0,6 %Al;
Spektrum 6 – 92,4 %Fe; 4,2 %Cr; 2,2 %Ni; 0,7 %Mn; 0,5 %Si;
Spektrum 7 – 98,0%Fe; 1,0 %Cr; 0,6 %Mn; 0,5 %Si.

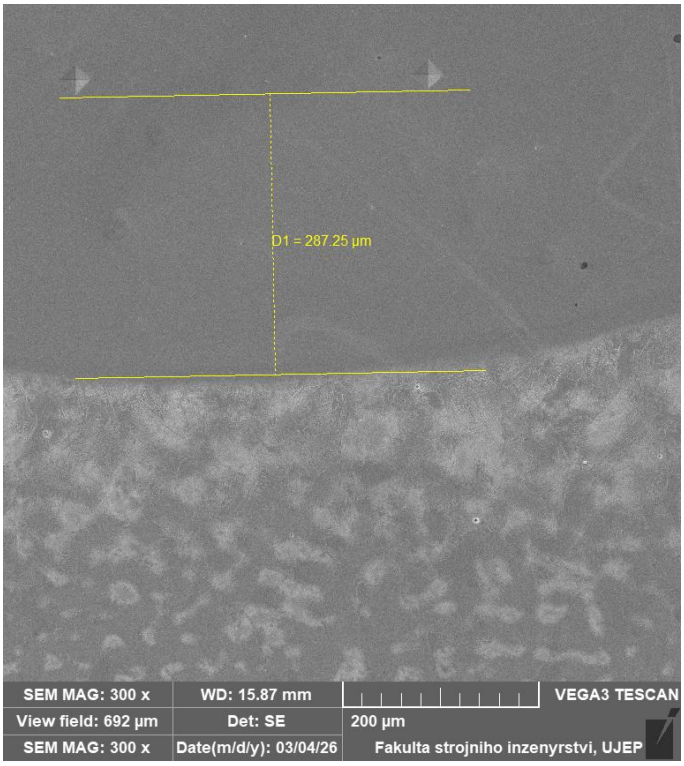
Svarový spoj – svorník č. 3



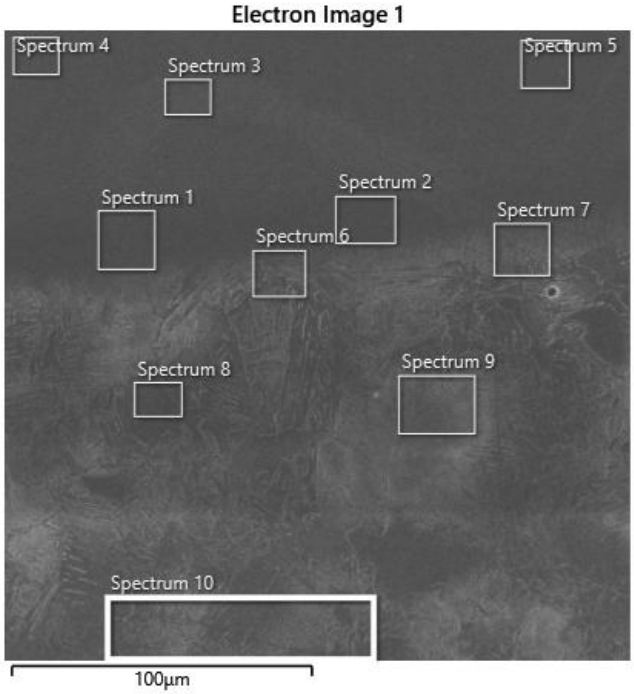
Obr. č. 44 – Spoj – svorník 3 – zrcadlově otočeno oproti snímku z metalografického mikroskopu. Tento svorník nebyl rovně přivařen, o čemž svědčí i rozdílná velikost výronkového materiálu. To se rovněž projevilo i do nerovnoměrného svarového kovu a tím i odlišného chemického složení v jednotlivých oblastech svorníku – lépe je to vidět na světelném mikroskopu. Viz obr. 44A (níže)



Obr. č. 44A (pomocný snímek) – Spoj – svorník 3

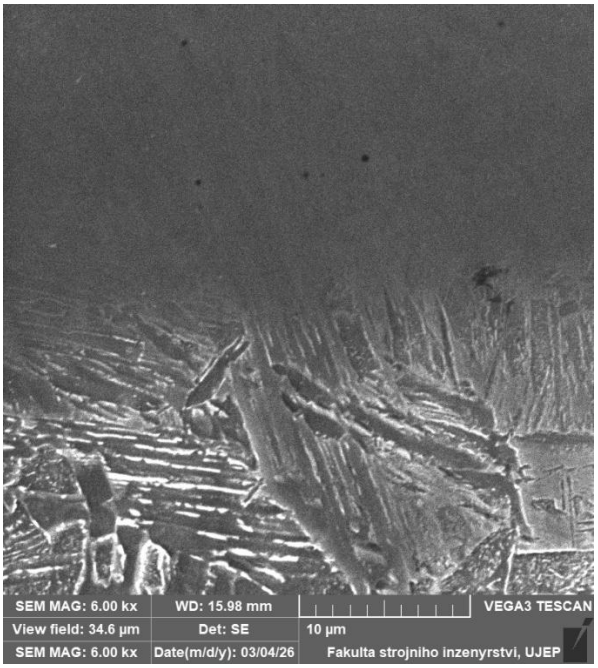


Obr. č. 45 – Vzdálenost vtisků od rozhraní ztavení – střední část vzorků

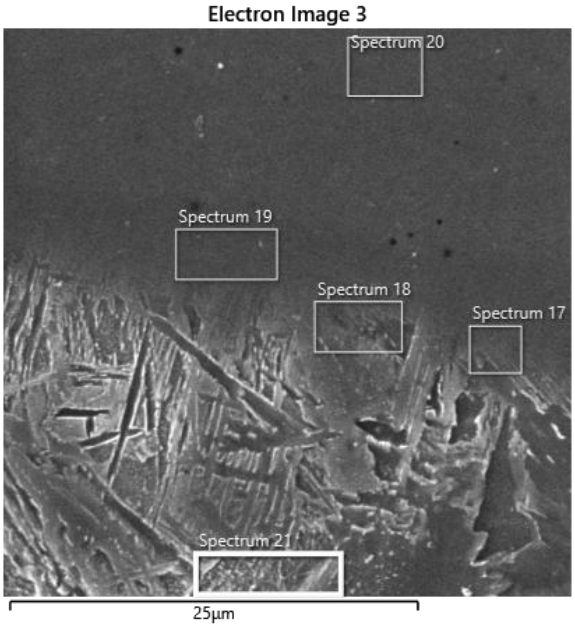


Obr. č. 46 – Záznamy jednotlivých spekter ve střední části svaru svorníku.
Ve spektru 1 na rozhraní bylo zjištěno: 11,5 %Cr; 6,2 %Ni; 1,0 %Mn; 0,8 %Si; 0,7 %Al – pochází z hrotu svorníku.
Spektrum 2 mělo podobně chemické složení,
spektrum 3 již obsahovalo více Cr a Ni – 16,7 %Cr; 9,1 %Ni; 1,2 %Mn; 1,0 %Si; 0,8 %Al; 0,2 %Ti – titan je použit pro stabilizaci karbidů a zabránění vzniku karbidů chromu.
Další spektra 4 a 5 měly stejné chemické složení jako spektrum 3.

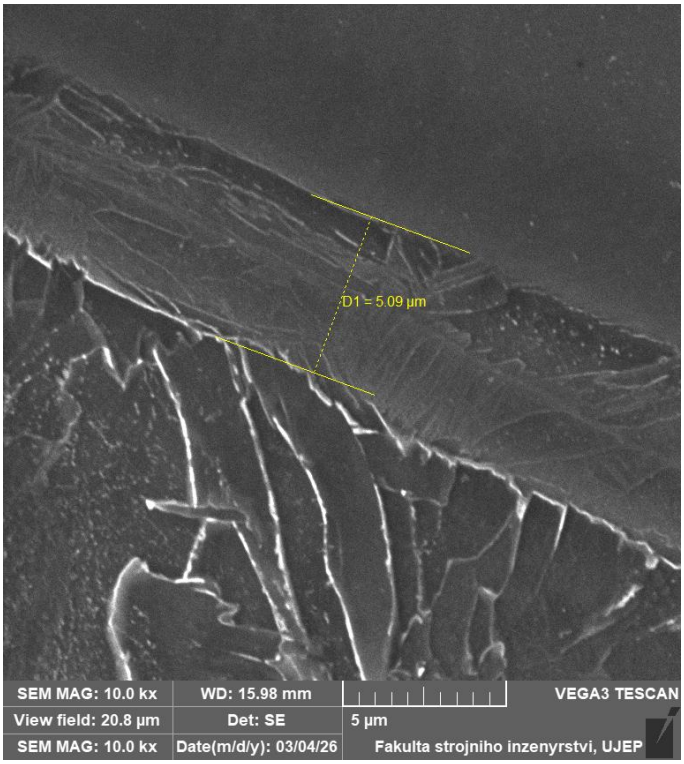
Spektrum 6, tj. již na straně oceli S355 mělo toto chemické složení: 1,4 %Cr; 0,6 %Ni; 0,5 %Mn; 0,3 %Si (stejný výsledek byl ve spektru 7);
spektrum 8; 9 a 10 již bylo zcela bez Cr a Ni a mělo okolo 0,5 %Mn a 0,4 %Si.



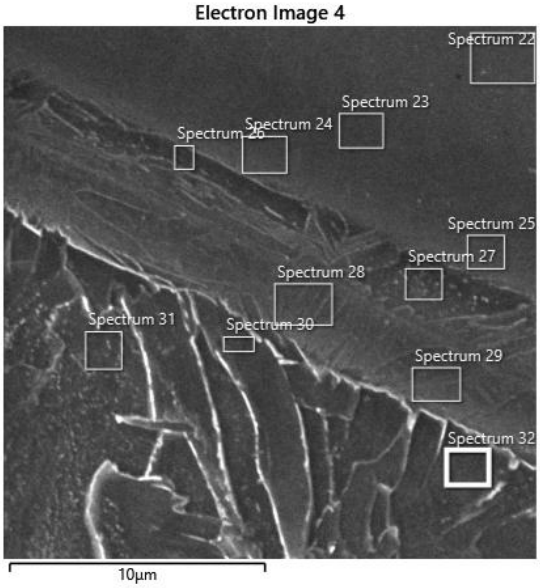
Obr. č. 47 – Detail rozhraní – v této oblasti se vyskytuje horní bainit – nejvýraznější struktura, v některých oblastech je zachycen dolní bainit přecházející v martenzit (úplně na rozhraní).



Obr. č. 48 – Záznamy jednotlivých spekter ve střední části svaru svorníku.
Ve spektru 17 na rozhraní směrem k S355 bylo zjištěno: 5,0 %Cr; 2,5 %Ni; 0,7 %Mn; 0,6 %Si (spektrum 18 rovněž prokazuje přítomnost Cr – okolo 3,3 %);
spektrum 19 - 10,8 %Cr; 5,8 %Ni; 1,0 %Mn; 0,7 %Si;
spektrum 20 obsahuje 15,6 %Cr; 8,5 %Ni; 1,1 %Mn; 0,8 %Si; 1,0 %Al.
Ještě ve spektru 21 je obsaženo 0,3 %Cr, což dokládá difúzi chromu do poměrně velké vzdálenosti.

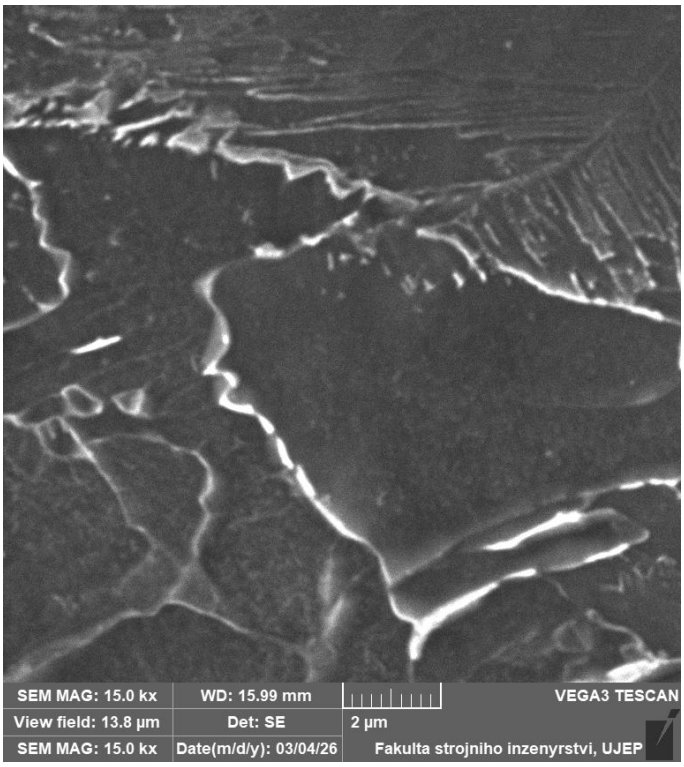


Obr. č. 49 – Levá část svaru (dle snímku SEM – obr. č. 44).
V této oblasti není velká oblast svarového kovu, tj. svorník zde nemá rozsáhlou TOO a jeho původní koncentrace (18 %Cr a 10 %Ni) jde až ke svaru s ocelí S355. V této oblasti jsou rozsáhlé karbidy po hranicích zrn a v této oblasti lze očekávat nebezpečí mezikrystalové koroze.

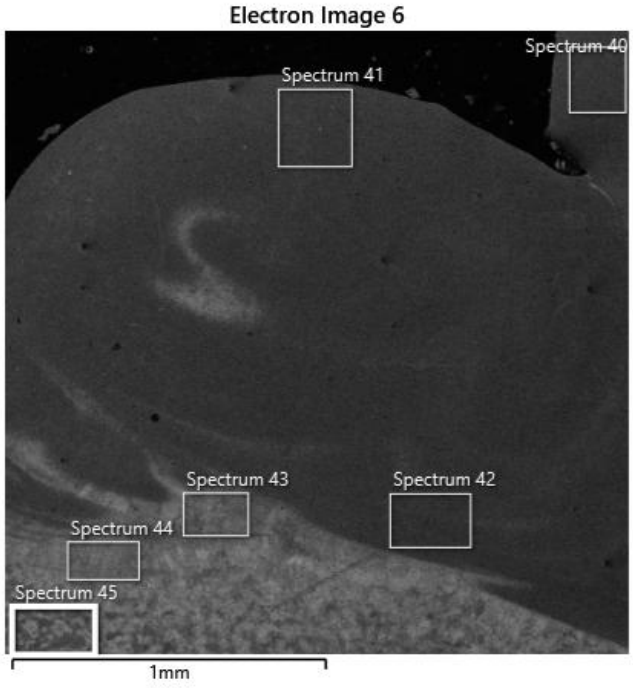


Obr. č. 50 – Záznamy jednotlivých spekter v levé části svaru svorníku.
Ve spektru 22 (svorník): 16,5 %Cr; 9,3 %Ni; 1,0 %Mn; 1,0 %Si; 0,7 %Al.
Ve spektrech 23; 24; 25 již klesala koncentrace chromu a niklu, nicméně tento pokles byl pozvolnější než ve střední části svorníku, nebo v části, kde byla velká oblast svarového kovu.
Na rozhraní – spektrum 26 – místo rozhraní mezi svorníkem a oblastí stavení – pás o šířce 5 µm obsahuje 4,7 %Cr a 2,1 %Ni. Celý tento pás má koncentraci v rozpětí 4 až 5 %Cr a tomu odpovídající Ni.

Rozhodující je koncentrace chromu na straně oceli S355 – spektrum 30 až 32 – zde byla koncentrace chromu okolo 1,2 %Cr.



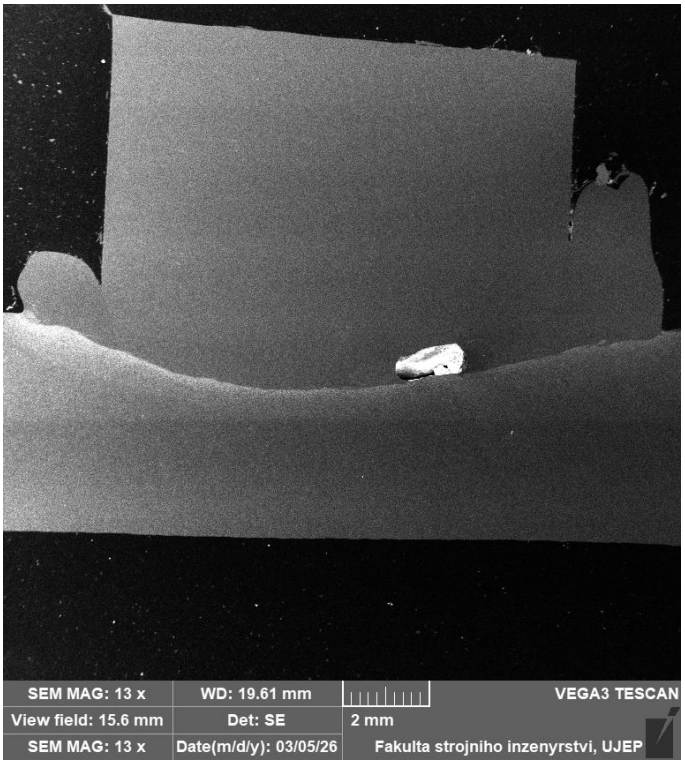
Obr. č. 51 – Detail karbidů po hranici původního austenitického zrna.
Tyto karbidy obsahují střední množství chromu, nejedná se však o klasické karbidy $Cr_{23}C_6$, ale o karbidy typu Fe_3C, který obsahuje rovněž chrom (okolo 1 %Cr).



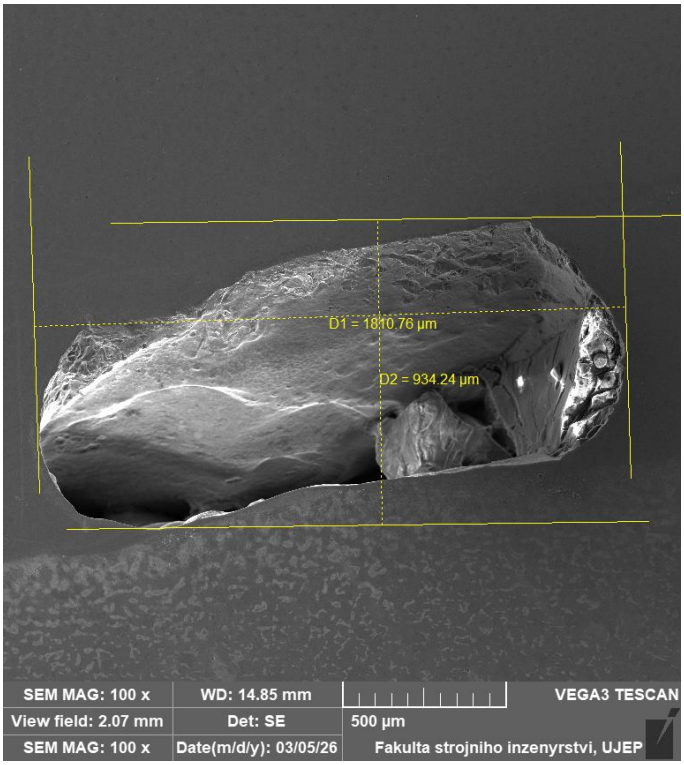
Obr. č. 52 – Levá část výronku zachycuje svarový kov - záznamy jednotlivých spekter dokumentují jeho chemické složení:

spektrum 40 (svorník): 18,5 %Cr; 10,2 %Ni; 1,5 %Mn; 0,7 %Si.
Spektrum 41: 10,5 %Cr; 5,1 %Ni; 0,9 %Mn; 1,3 %Si.
Spektrum 42: 7,0 %Cr; 3,3 %Ni; 0,9 %Mn; 0,9 %Si.
Spektrum 43 (již ocel S355 – povrch): 1,6 %Cr; 0,9 %Ni; 0,7 %Mn; 1,0 %Si.
Spektrum 44: 1,4 %Cr; 0,4 %Ni; 0,7 %Mn; 0,9 %Si.
Spektrum 45: 0,2 %Cr; 0,5 %Mn.

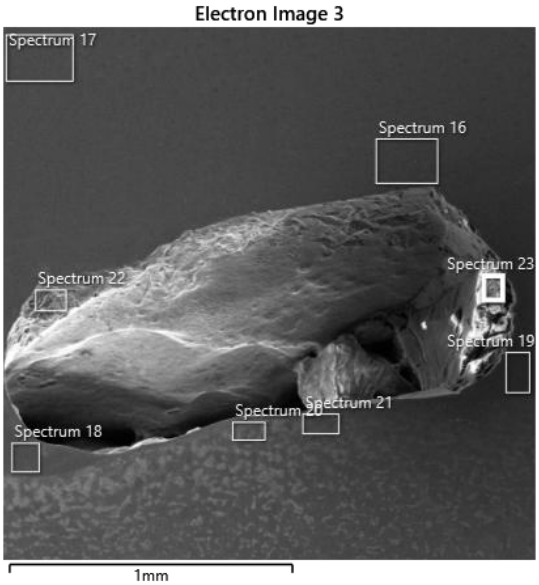
Svarový spoj – svorník č. 4



Obr. č. 53 – Spoj – svorník 4 – zrcadlově otočeno oproti snímku z metalografického mikroskopu.
Tento svorník má rovněž nepravidelný výronek, dále je rozlišitelný defekt – pór, který při bližším vyšetření má charakter vypadlého vměstku (obr. č. 54).



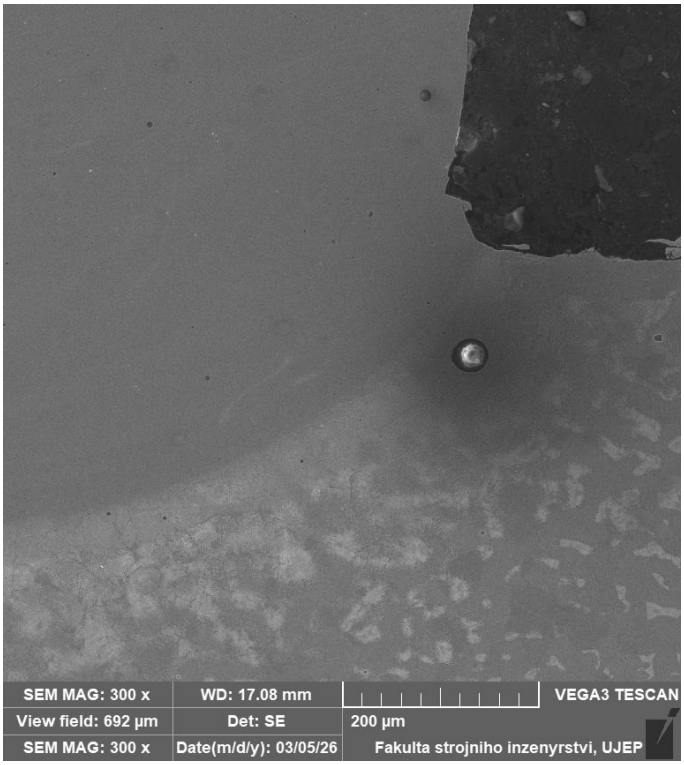
Obr. č. 54 – Detail defektu, který je na rozhraní svaru a oceli S355 – strana stavení



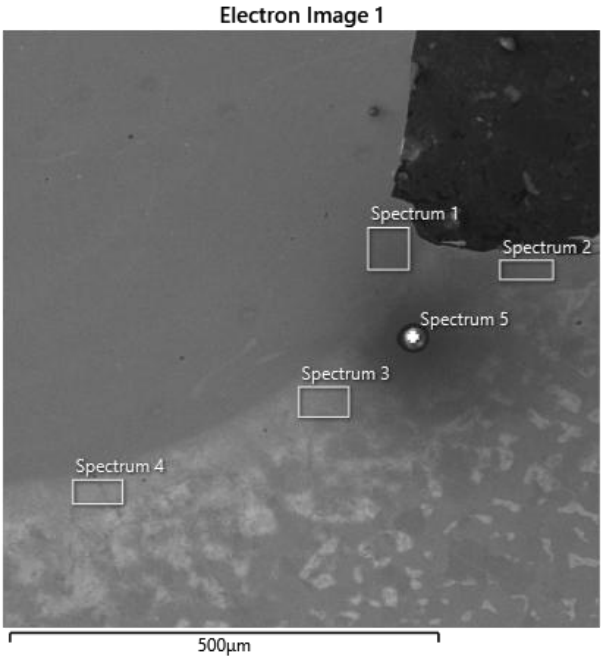
Obr. č. 55 – Záznamy jednotlivých spekter v místě defektu.
Ve spektru 16 a 17 (svorník) je klasické chemické složení odpovídající Wr.N. 1.4541.
Spektrum 18: 8,8 %Cr; 4,6 %Ni; 0,9 %Mn; 0,9 %Si.
Spektrum 19: 13,9 %Cr; 7,5 %Ni; 1,0 %Mn; 0,9 %Si; 0,6 %Al.
Spektrum 20; 21 – chemické složení odpovídající S355 s přítomností chromu do 0,5 %Cr.
Spektrum 22; 23 bylo přímo z místa defektu a obsahuje – spektrum 22: 12,3 %Cr; 3,6 %Ni (segregace chromu); 22,2 %Al; spektrum 23: 61,0 %Al; 10,7 %Si; 7,7 %Cr; 7,4 %Fe; 4,7 %Mn; 3,9 %Mg; 3,6 %Ti; 1,0 %Ca – oxidický vměstek na bázi hliníku (korund).

V místě defektu byly nafoceny další detaily a provedeny analýzy EDS a vše potvrdily, že se jedná o oxidický vměstek na bázi Al.

Další zajímavostí je obr. č. 56 dokumentující oxidický vměstek v místě, které nebylo považováno za svarový kov, tj. předpokládalo se, že tato oblast spadá do kategorie TOO.

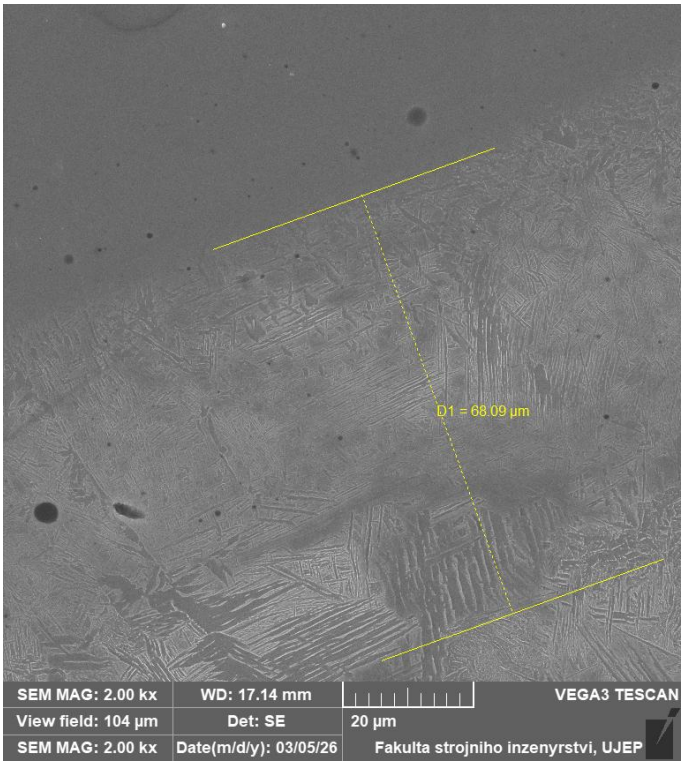


Obr. č. 56 – Detail defektu, jehož umístění v TOO je nezdůvodnitelné.

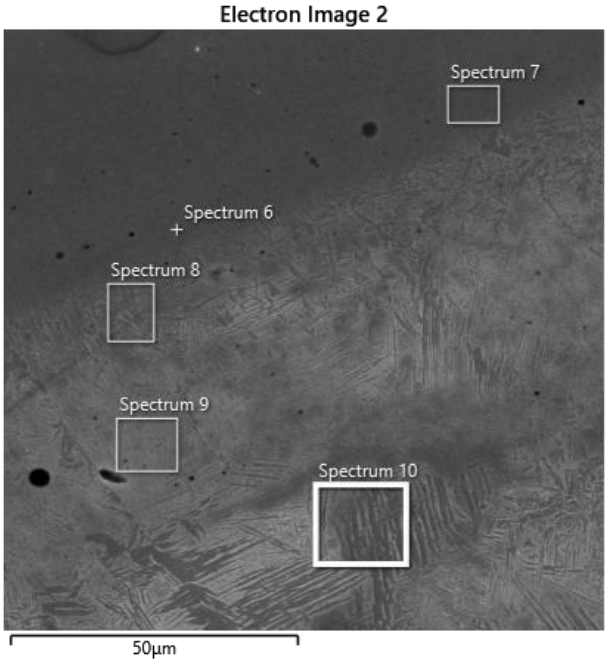


Obr. č. 57 – Záznamy jednotlivých spekter v místě defektu.
Spektrum 1: 11,2 %Cr; 6,4 %Ni; 1,2 %Si; 1,0 %Mn; 0,5 %Al.

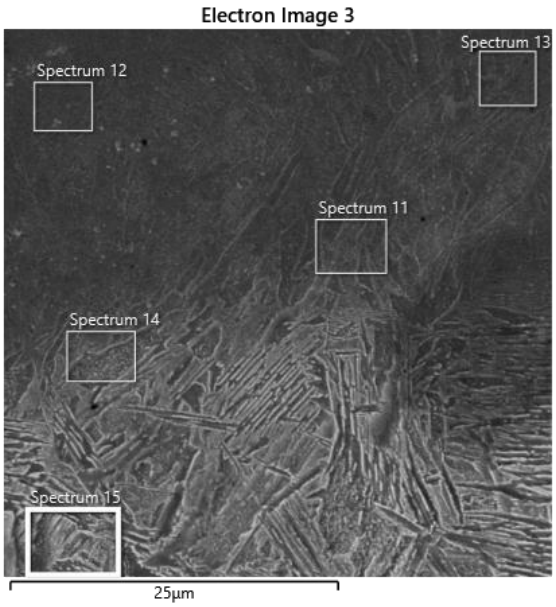
Spektrum 2 – 0,4 %Si; 0,4 %Mn, zbytek Fe – zde byl úmyslně měřen chrom a výsledkem byla nulová koncentrace.
Spektrum 3 – 1,4 %Cr; 0,9 %Mn; 0,7 %Si; 0,7 %Ni – to znamená jedná se o oblast oceli S355 – toto spektrum je ve stejné vzdálenosti od hranice stavení, jako sledovaný defekt.
Spektrum 4 – 1,5 %Cr; 0,9 %Si; 0,7 %Mn; 0,6 %Ni – oblast, která je blíže k hranici stavení, a přesto se jedná o TOO v místě S355.
Spektrum 5 (defekt): 50,6 %O; 23,9 %Al; 13,9 %Si; 4,0 %Fe; 2,6 %Mg; 2,0 %Mn; 1,6 %Cr; 0,5 %Ti; 0,5 %K; 0,3 %Ca.



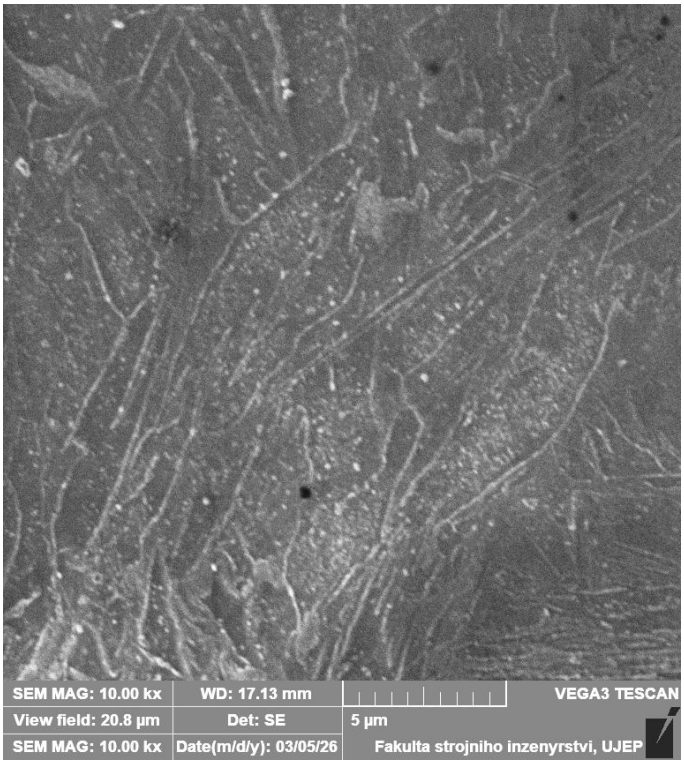
Obr. č. 58 – Na základě předchozího výsledku, je odhadnuta, že oblast cca 70 µm v oceli S355 byla rovněž roztavena, tj. nejedná se o TOO, ale o svarový kov.



Obr. č. 59 – V oblasti, kde došlo k natavení (dle sledovaného póru) byla provedena EDS analýza:
Spektrum 6 -7,1 %Cr; 3,3 %Ni; 0,8 %Si; 0,7 %Mn;
Spektrum 7 - 7,1 %Cr; 3,6 %Ni; 1,1 %Si; 0,9 %Mn;
Spektrum 8 – 1,9 %Cr; 0,7 %Mn; 0,7 %Si; 0,6 %Ni;
Spektrum 9 – 1,5 %Cr; 0,8 %Mn; 0,7 %Si; 0,56 %Ni;
Spektrum 10 – 0,6 %Mn; 0,3 %Si – tato oblast je již bez chromu.



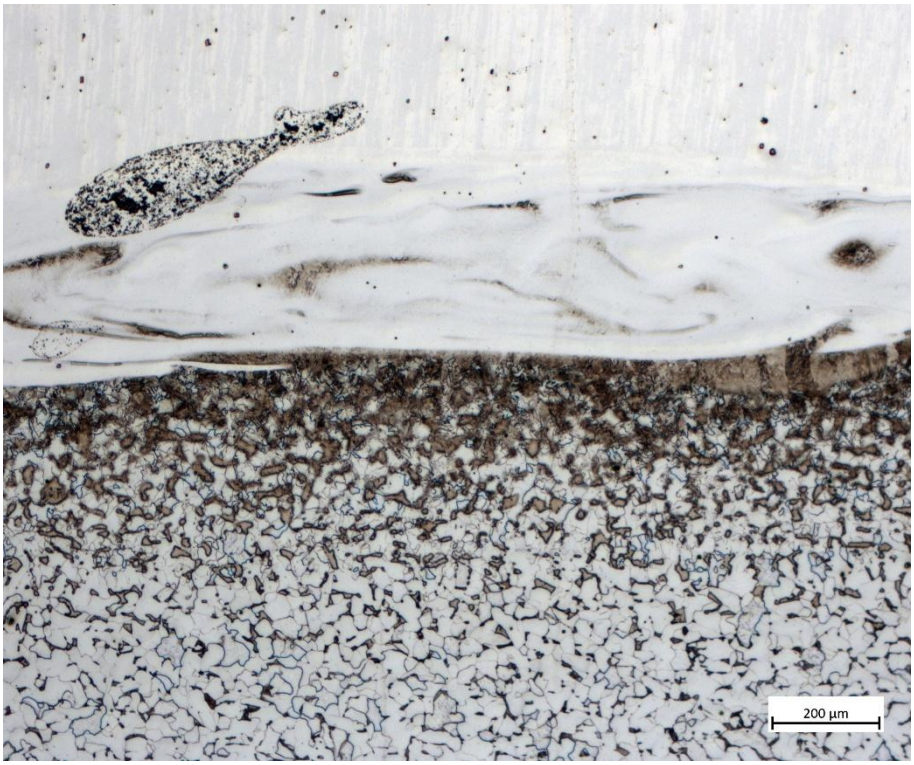
Obr. č. 60 – Jiná oblast než předchozí snímek, nicméně stále rozhraní stavení.
Spektrum 11 -3,9 %Cr; 2,2 %Ni; 0,8 %Mn;
Spektrum 12 – 5,2 %Cr; 2,7 %Ni; 0,6 %Si; 0,9 %Mn;
Spektrum 13 – 4,4 %Cr; 1,0 %Mn; 2,6 %Ni;
Spektrum 14 – 2,8 %Cr; 0,7 %Mn; 0,7 %Si; 1,3 %Ni;
Spektrum 15 – 0,6 %Mn; 0,6 %Cr.



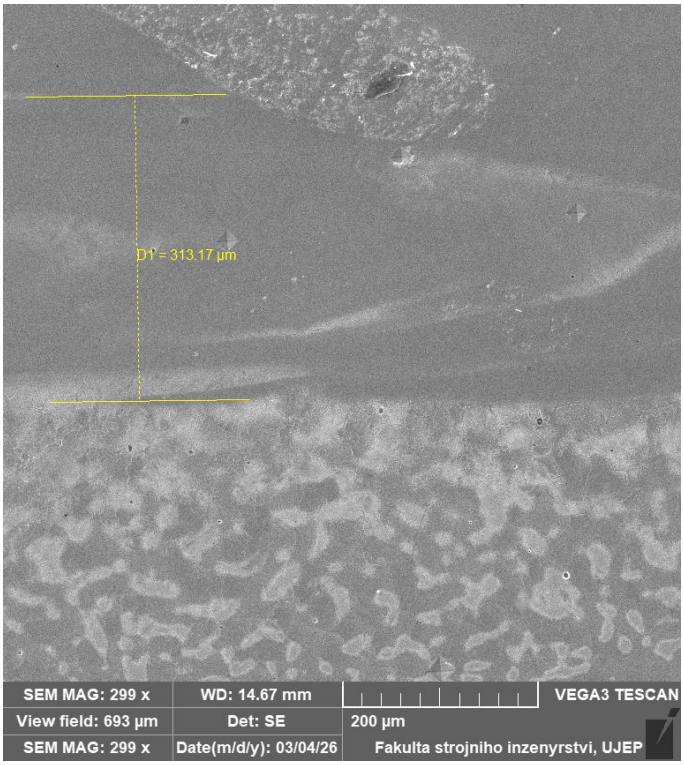
Obr. č. 61 – Pouze u spoje svorníku 4 byly zachyceny tyto drobné, ale souvislé karbidy po hranicích austenitických zrn v místě svorníku, tj. již na straně oceli Wr.N. 1.4541.
Bohužel jejich velikost nedovolí jejich samostatnou analýzu EDS, ale jako v předešlém případě se pravděpodobně bude jednat o karbidy na bázi cementitu. Nicméně jejich nebezpečí může být nejen mezikrystalová koroze, ale rovněž zkřehnutí jinak houževnatého austenitu.

Svarový spoj – svorník č. 5

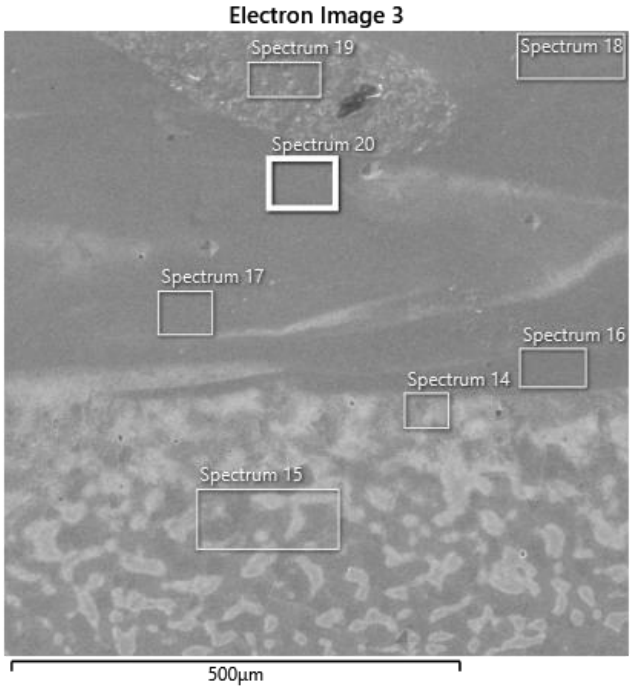
Obr. č. 62 – Spoj – svorník 5 – chybí celkový snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu



Obr. č. 63 – Snímek ze světelného mikroskopu – toto místo bylo zdokumentováno i pomocí skenovacího elektronového mikroskopu.



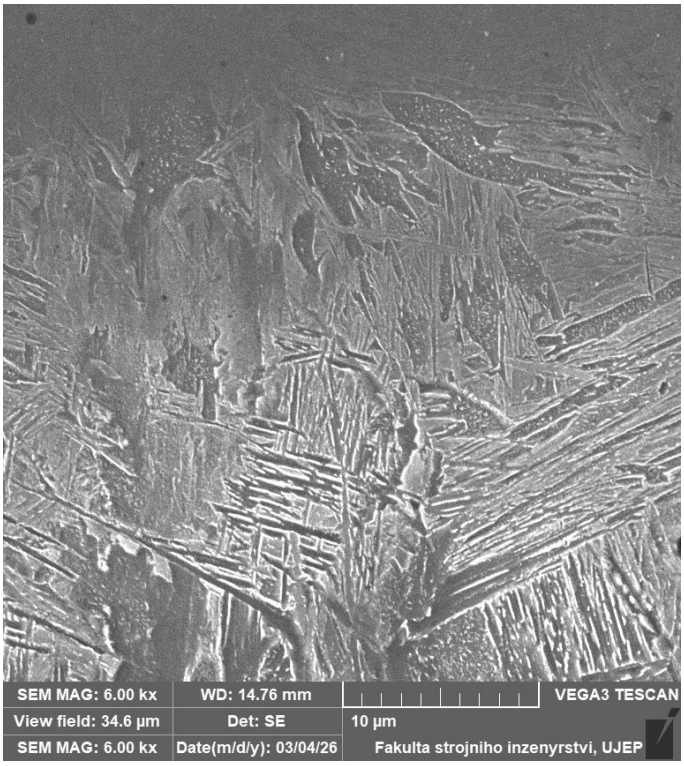
Obr. č. 64 – Snímek ze SEM – jsou zachyceny vtisky i způsob promísení taveniny ve svarovém kovu.



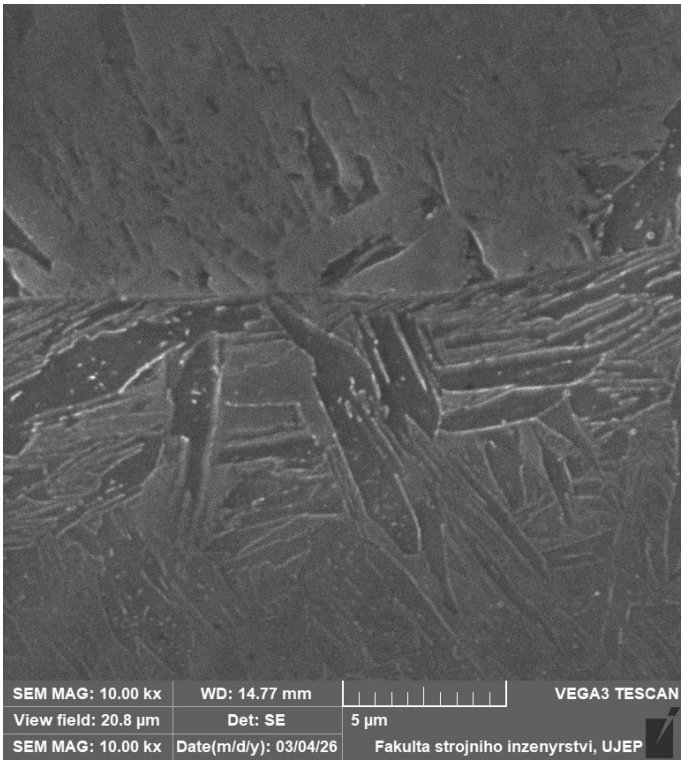
Obr. č. 65 – Střední oblast spoje svorníku, v této oblasti byla provedena EDS analýza. Tak jako v předchozích případech byla EDS analýza provedena na obou stranách hranice stavení a byla sledována změna koncentrace chromu v TOO a ve svarovém kovu a u oceli S355 sledovat difundující množství chromu.

Spektrum 14 - 0,5 %Cr; 0,5 %Si; 0,4 %Mn;
Spektrum 15 – 0,6 %Si; 0,5 %Mn;
Spektrum 16 – 10,4 %Cr; 0,9 %Mn; 0,6 %Si; 5,6 %Ni; 0,6 %Al.
Spektrum 17 – 6,8 %Cr; 0,9 %Mn; 0,7 %Si; 3,6 %Ni;
Spektrum 18 – 16,4 %Cr; 8,7 %Ni; 1,4 %Mn; 0,8 %Si;
Spektrum 19 – 11,2 %Cr; 6,0 %Ni; 1,2 %Mn;1,0 %Si; 0,9 %Al;
Spektrum 20 – 10,6 %Cr; 5,8 %Ni; 1,1 %Mn; 0,6 %Si; 0,7 %Al.

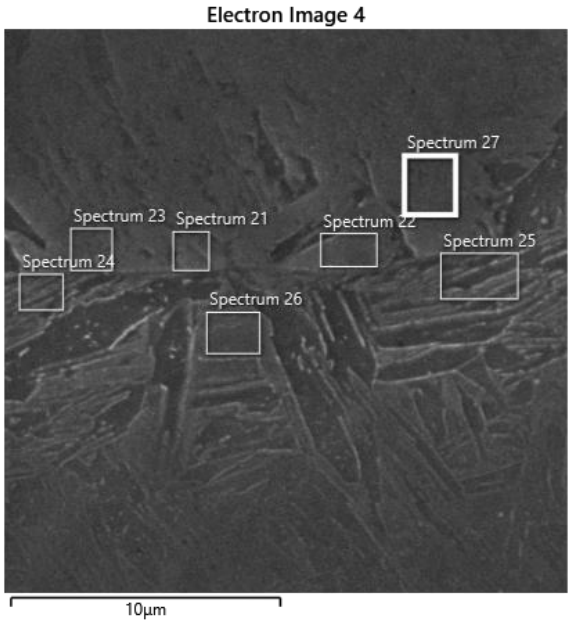
Jak dokumentuje chemické složení, tak ve svarovém kovu se vyskytuje hliník (slitina), který pravděpodobně pochází z hrotu svorníku.



Obr. č. 66 – Detail podkladové oceli S355 na hranici stavení – struktura je tvořena dolním bainitem, který přechází do horního bainitu. Na rozhraní nebyly zjištěny žádné výrazné karbidy.



Obr. č. 67 – Tento snímek dokumentuje oblast rozhraní mezi oblastí svorníku a spodní ocelí S355. Rozsah promísení zdokumentují výsledky EDS analýzy.



Obr. č. 68 – Výsledky EDS analýzy ve střední části svorníku.
Spektrum 21 – 3,0 %Cr; 1,5 %Ni; 0,5 %Si; 0,6 %Mn;
Spektrum 22 – 2,7 %Cr; 1,5 %Ni; 0,5 %Si; 0,6 %Mn (podobná oblast jako Spektrum 21) a rovněž podobné chemické složení, které prokázalo změnu chromu na straně svorníku – v této oblasti je svarový kov promísený konstrukční ocelí S355.
Stejné chemické složení bylo i ve spektru 23.
Spektrum 24 (od stavení směrem do S355) – 3,0 %Cr; 1,4 %Ni; 0,5 %Si; 0,7 %Mn.
Spektrum 25 – 3,0 %Cr; 1,1 %Ni; 0,5 %Si; 0,7 %Mn – v oblasti oceli S355 je poměrně velké množství chromu, tomu následně odpovídá struktura (zákalná struktura) a na to navazující hodnoty mikrotvrdosti.
Spektrum 26 – 2,8 %Cr; 1,6 %Ni; 0,6 %Si; 0,7 %Mn;
Spektrum 27 – 3,4 %Cr; 1,7 %Ni; 0,6 %Si; 0,8 %Mn.
Z uvedeného chemického složení vyplývá, že koncentrace chromu na straně oceli S355 je poměrně výrazné, a to ovlivnilo strukturní stav.

Závěr

Na výsledném stavu se nejvíce projevilo usazení svorníku z oceli Wr.N. 1.4541 na desku z oceli S355. V případě nerovného přivaření došlo k vytlačení svarového kovu na jednu stranu. V tomto případě byl sledován nejen nerovnoměrný nárůstek (výronek), ale rovněž i nerovnoměrná oblast svarového kovu a proměnné chemické složení svarového kovu. Na straně svorníku došlo k poklesu legujících prvků (Cr, Ni) na poloviční a v některých případech i na třetinové koncentrace.

Svorník 1 (svařovací parametry: 850 A; 390 ms) – tj. málo tepla, dlouhý čas.
Svorník je poměrně rovně zavařen, oba výronky jsou podobné (tzn. na obou stranách řezu). Svarový kov má dvě vrstvy, jedna je tvořena korozivzdornou ocelí se sníženou koncentrací chromu a niklu (okolo 8%Cr a 4 %Ni) a druhá vrstva je tvořena konstrukční ocelí S355 s přítomností chromu (okolo 2 %Cr). Pod oblastí stavení na rozhraní s ocelí S355 se vyskytuje dolní bainit. Karbidy jsou soustředěny do větších útvarů a jsou i na hranicích zrn oceli S355. Karbidy nejsou v oblasti rozhraní. Na struktuře se projevil poměrně dlouhý čas ohřevu – karbidy se shlukly na hranicích zrn (u oceli S355), jsou větší. Zákalná struktura (bainitická) je tak malá, že nebyla měřením mikrotvrdosti postižena. Z hlediska možného nebezpečí koroze není dobrý strukturní stav dvou vzájemně prolnutých vrstev, svarový kov se sníženou koncentrací Cr a Ni a nad touto oblastí vyskytující se pás z konstrukční oceli S355 se zvýšeným chromem. Nedošlo zde ke vzniku zákalné struktury, protože odvod tepla do austenitu je omezen jeho nízkou tepelnou vodivostí. Nejsou zachyceny žádné karbidy chromu, a to jak na straně svarového kovu, tak v TOO oceli Wr.N. 1.4541, tak i na desce z oceli S355.

Svorník 2 (1600A; 75 ms) – u tohoto svorníku bylo podstatně větší množství vneseného tepla, sice po krátkou dobu, ale došlo k rychlému natavení.
Svorník není zcela kolmý k desce z oceli S355, ale výronky mají podobný tvar. Ve svaru v oblasti stavení je zachycena oblast studeného spoje a rovněž jsou zachyceny póry, které jsou zdeformovány tlaky postupující krystalizace. Struktura ve svarovém kovu je rovnoměrná a opět je se sníženou koncentrací chromu a niklu. Nebyly pozorovány žádné karbidy na bázi chromu. Na straně konstrukční oceli S355 je větší oblast zákalné struktury (bainitu a místy i martenzitu), čemuž odpovídá i průběh mikrotvrdosti. Hledisko korozního nebezpečí je u tohoto spoje menší než u svorníku 1 (heterogenity ve svarovém kovu), ale z hlediska křehkého poškození má svorník 2 větší náchylnost, protože je souvislá a poměrně široká oblast zákalné struktury.

Svorník 3 (1600A; 150 ms) – zde bylo vneseno nejvíce tepla po největší dobu.
Svorník není rovnoměrně svařen, což dokládá i nerovnoměrnost výronků. Tato nerovnoměrnost se projevila na dosažených výsledcích. Byla sledována oblast, kde chyběl svarový kov o složení snížené koncentrace Cr a Ni. Ve svarovém kovu se vyskytuje hliník pocházející z hrotu svorníku. V místě, kde chybí svarový kov, jsou rozsáhlé karbidy po hranicích zrn a v této oblasti lze očekávat nebezpečí mezikrystalové koroze. Tento pás sice není široký (cca 5 µm), ale z hlediska svarového kovu je nepřípustný. Na rozhraní svarový kov TOO ze strany S355 je souvislá linie karbidů, které budou rovněž zhoršovat korozní vlastnosti a taky houževnatost spoje. Souvislé linie karbidů jsou u na hranicích zrn v TOO u oceli S355. Tento svar je ze sledovaných spojů nejkritičtější, a to jak z hlediska nerovnoměrnosti výronků, tak i z hlediska strukturního stavu.

Svorník 4 (1400A; 150 ms) – oproti svorníku 3 zde bylo snížené množství tepla, ale stejný čas.
Opět svorník není kolmo svařen k oceli S355, což se projevilo i na nerovnoměrnosti výronku. Ve svarové oblasti je výrazný defekt, který vznikl ve spojení s vypadlým velkým oxidickým vměstkem. Jeho přítomnost byla potvrzena EDS analýzou a rovněž morfologií. U tohoto spoje byl analyzován další globulární vměstek oxidické povahy, který však byl mimo jasně ohraničenou oblast svarového kovu. Jeho přítomnost dokumentuje, že dlouhou doba a poměrně velký tepelný příkon způsobil roztavení větší části oceli S355, která se nepromísila

s ocelí svorníku a následně ztuhla i s přítomným vměstkem. Jedná se o oblast velikosti cca 70 µm. Tato oblast má bainitickou a místy i martenzitickou strukturu se zvýšenou koncentrací chromu, nicméně jeho koncentrace odpovídá difúznímu procesu, nikoliv procesu promísení taveniny z odtaveného svorníku. Pouze u spoje svorníku 4 byly zachyceny tyto drobné, ale souvislé karbidy po hranicích austenitických zrn v místě svorníku, tj. již na straně oceli Wr.N. 1.4541. Bohužel jejich velikost nedovolí jejich samostatnou analýzu EDS, ale jako v předešlém případě se pravděpodobně bude jednat o karbidy na bázi cementitu. Nicméně jejich nebezpečí může být nejen mezikrystalová koroze, ale rovněž zkřehnutí jinak houževnatého austenitu.

Svorník 5 (1400A; 100 ms) – poměrně velký tepelný příkon s kratší dobou na promísení se projevila na charakteru svarového kovu.
Svorník je přivařen poměrně rovně, což se příznivě projevilo ve velikosti výronků. Promísení taveniny svarového kovu mělo tak jako u svorníku 1, oblasti, v nichž byl materiál S355 uprostřed svarového kovu tvořeného především svorníkem, tj. korozivzdornou ocelí se sníženou koncentrací Cr a Ni. na hranici stavení – struktura je tvořena dolním bainitem, který přechází do horního bainitu. Na rozhraní nebyly zjištěny žádné výrazné linie karbidů jako u svorníku 3. Heterogenita svarového kovu může představovat zvýšené korozní nebezpečí. Rovněž zákalná struktura není příznivá z hlediska pevnosti spoje, protože může iniciovat křehké poškození.

Ze sledovaných spojů svorníků je obtížné udělat jednotný závěr, protože vedle použitých parametrů se na sledovaných vlastnostech projevila i rozdílná kolmost jejich provedení. Z tohoto důvodu bylo analýzám věnováno větší množství pozornosti, aby z většího množství dat bylo možné udělat relevantní závěry. Ze sledovaných spojů byl z hlediska strukturního stavu nejlepší svorník 2, nicméně krátká doba se projevila na přítomnosti pórů a studených spojů, proto by bylo vhodné při použitém proudu 1600A použít čas 100 ms. Rozhodující je kolmost přivaření svorníku.