



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**ANALÝZA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ
BIMETALOVÝCH MATERIÁLŮ S CLADOVANOU
VRSTVOU INCONELU**

ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES OF BIMETALLIC MATERIALS WITH CLAD LAYER OF INCONEL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Milan Sýkora

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Milan Sýkora**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Analýza mechanických vlastností bimetalových materiálů s cladovanou vrstvou Inconelu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat analýzou mechanických vlastností bimetalových materiálů s cladovanou vrstvou Inconelu. Diplomová práce bude rozdělena na rešeršní a praktickou část. Součástí práce bude stručná charakteristika bimetalových materiálů, mechanických zkoušek a hodnocení integrity povrchu. Experimentální část bude zaměřena na přípravu testovacích vzorků s následnými zkouškami vybraných mechanických vlastností. Práce bude ukončena zpracováním naměřených dat, diskusí a celkovým zhodnocením dosažených výsledků.

Cíle diplomové práce:

- Teoretická část – bimetalové materiály a mechanické zkoušky.
- Hodnocení integrity povrchu z hlediska vlivu na mechanické vlastnosti.
- Experimentální část – příprava testovacích vzorků.
- Testy vybraných mechanických vlastností a analýza dosažených výsledků.
- Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené literatury:

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

Příručka obrábění-kniha pro praktiky. Přel. KUDELA, M. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.

HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Materiály pro řezné nástroje. Vyd. 1. Praha: MM publishing, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

KOCMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 2. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá analýzou mechanických vlastností bimetalového materiálu s cladovanou vrstvou Inconelu. V teoretické části práce se nachází rozbor zkoumaného bimetalového materiálu, popis mechanických zkoušek a metod hodnocení integrity povrchu, pomocí kterých docházelo ke zjišťování vlastností bimetalového materiálu. Experimentální část se zaměřuje na jednotlivé zkoušky mechanických vlastností materiálu. U každé zkoušky je uveden postup výroby zkušebních vzorků, popis zkušebního zařízení, provedení zkoušek, vyhodnocení získaných dat a na závěr zhodnocení dosažených výsledků.

Klíčová slova

ocel 16Mo3, Inconel 625, zkouška tahem, zkouška tvrdosti dle Vickerse, integrita povrchu, drsnost povrchu

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the analysis of mechanical properties of bimetallic materials with clad layer of Inconel. In the theoretical part of the work there is an analysis of the investigated bimetallic material. The following is a description of mechanical tests and methods for evaluating the integrity of the surface, which were used to determine the properties of bimetallic material. The experimental part focuses on individual tests of mechanical properties of the material. For each test, the procedure for the production of test specimens, a description of the test equipment, the performance of the tests, the evaluation of the data obtained and finally, the evaluation of the results obtained are given.

Key words

steel 16Mo3, Inconel 625, tensile test, Vickers hardness test, surface integrity, surface roughness

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SÝKORA, Milan. *Analýza mechanických vlastností bimetalových materiálů s cladovanou vrstvou Inconelu* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124595>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Sedlák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Analýza mechanických vlastností bimetalových materiálů s cladovanou vrstvou Inconelu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

24. 6. 2020

.....
Datum

.....
Bc. Milan Sýkora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Josefu Sedlákov, Ph.D. za odborné vedení, cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat pracovníkům katedry strojírenství Univerzity obrany v Brně za možnost realizace zkoušek mechanických vlastností a také za poskytnutí cenných rad a připomínek při vypracování diplomové práce.

V neposlední řadě moc děkuji své rodině, rodině své přítelkyně a své přítelkyni za trpělivost a oporu během celého vypracovávání diplomové práce.

OBSAH

ABSTRAKT.....	4
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE.....	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
ÚVOD	9
1 ROZBOR MATERIÁLŮ A MECHANICKÝCH ZKOUŠEK	10
1.1 Charakteristika materiálů.....	10
1.1.1 Charakteristika zkoumaného bimetalového materiálu	10
1.1.2 Materiál trubky – Ocel 16Mo3.....	10
1.1.3 Materiál trubky – Inconel 625 a další niklové superslitiny	12
1.2 Zkouška tahem.....	16
1.2.1 Popis tahové zkoušky, vzorků a měřicího zařízení	16
1.2.2 Průběh tahové zkoušky.....	19
1.2.3 Základní zjišťované parametry	22
1.3 Zkoušky tvrdosti	23
1.3.1 Zkouška tvrdosti dle Vickerse.....	23
1.3.2 Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse	26
1.4 Hodnocení integrity povrchu	27
1.4.1 Základní parametry integrity povrchu.....	28
1.4.2 Metody vyhodnocování integrity povrchu	28
1.4.3 Drsnost povrchu	28
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	32
2.1 Zkouška tahem.....	32
2.1.1 Výroba vzorků.....	32
2.1.2 Zkušební zařízení	35
2.1.3 Zkoušení vzorků a zpracování získaných dat.....	36
2.1.4 Zhodnocení dosažených výsledků.....	43
2.2 Hodnocení lomové plochy po zkoušce tahem	46
2.2.1 Zkušební zařízení	46
2.2.2 Hodnocení lomové plochy	47
2.3 Zkouška tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení	53
2.3.1 Výroba vzorků.....	53

2.3.2	Zkušební zařízení	55
2.3.3	Zkoušení vzorků a zpracování získaných dat.....	56
2.3.4	Zhodnocení dosažených výsledků.....	60
2.4	Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse.....	62
2.4.1	Výroba vzorků.....	62
2.4.2	Zkušební zařízení	62
2.4.3	Zkoušení vzorků a zpracování získaných dat.....	62
2.4.4	Zhodnocení dosažených výsledků.....	69
2.5	Měření drsnosti povrchu	70
2.5.1	Výroba vzorků.....	70
2.5.2	Měřicí zařízení.....	70
2.5.3	Měření a hodnocení drsnosti povrchu	71
2.5.4	Zhodnocení dosažených výsledků.....	74
ZÁVĚR.....		77
SEZNAM POUŽITÝCH ZROJŮ		79
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....		84
SEZNAM PŘÍLOH		88

ÚVOD

Diplomová práce řeší analýzu mechanických vlastností bimetalového materiálu s cladovanou vrstvou Inconelu. Data pro vyhodnocení jsou získána pomocí mechanických zkoušek materiálů a metod hodnocení integrity povrchu. Práce se skládá z teoretické a experimentální části, které jsou dále členěny na jednotlivé podkapitoly.

Teoretická část se zabývá rozbořem zkoumaného bimetalového materiálu a zkouškami použitými pro zjištění vybraných mechanických vlastností. Nejprve je zhotovena charakteristika zkoumaného bimetalového materiálu, která se člení na charakteristiku materiálu trubky jako celku a na charakteristiku jednotlivých materiálů, ze kterých se tato trubka skládá. Dále jsou řešeny zkoušky, pomocí kterých probíhalo zjišťování parametrů vybraných mechanických vlastností daného materiálu. Nejprve je řešena zkouška tahem dle normy ČSN EN ISO 6892-1, dále zkouška tvrdosti při nízkém zatížení, zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse (norma ČSN EN ISO 6507-1) a v závěru je řešena drsnost povrchu vzorků (ČSN EN ISO 4287 a ČSN EN ISO 4288). U všech řešených zkušebních metod jsou uvedeny základní informace o zkoušce, jejím průběhu a následném vyhodnocení.

Experimentální část je členěna do pěti hlavních celků. V prvním je řešena zkouška tahem, na kterou navazuje hodnocení lomové plochy po zkoušce tahem. Součástí třetího a čtvrtého celku je zkouška tvrdosti při nízkém zatížení a mikrotvrdosti dle Vickerse. V závěru experimentální části práce je řešena drsnost povrchu zkušebních vzorků. U všech uvedených zkoušek materiálu je uveden způsob výroby testovacích vzorků, popis zkušebního zařízení, dále průběh zkoušení vzorků, získání a zpracování dat, a nakonec zhodnocení dosažených výsledků.

1 ROZBOR MATERIÁLŮ A MECHANICKÝCH ZKOUŠEK

První kapitola této práce se zaměřuje na rozbor bimetalových materiálů, materiálů zkoušené trubky, použitých mechanických zkoušek kovových materiálů a v závěru kapitoly jsou rozebrány metody hodnocení integrity povrchu.

1.1 Charakteristika materiálů

V první části této kapitoly se nachází obecný popis bimetalového materiálu. Zbylé dvě části se zaměřují na materiály, ze kterých se skládá testovaná trubka, s přihlédnutím k jejich chemickému složení a mechanickým vlastnostem.

1.1.1 Charakteristika zkoumaného bimetalového materiálu

Zkoumaný bimetalový materiál se používá pro výrobu dílů, kompletních trubkových a hadovitých systémů pro tlakové části spalovacích kotlů. Vnitřním základním materiálem trubky je ocel 16Mo3, na kterou je cladovaná (navarovaná) 2 až 4 mm silná vrstva materiálu Inconel 625 (viz obr. 1). Pro navaření byla použita technologie svařování CMT (Cold Metal Transfer). Inconel 625 je vysoce odolná superslitina, kterou lze použít z důvodu zvýšení životnosti dílů, jež byly původně vyráběny pouze z ocelového materiálu na minimálně čtyřnásobnou dobu. Životnost je zvýšena díky chemickému složení (více v kap. 1.1.3.), které lépe odolává agresivnímu prostředí za vysokých teplot (500 až 1 000 °C) [1].



Obr. 1 Zkoumaná bimetalová trubka [1].

1.1.2 Materiál trubky – Ocel 16Mo3

Molybdenová žárupevná konstrukční ocel 16Mo3 (lze nalézt pod označením 1.5415 či 15 020) se vyznačuje zvýšenou odolností vůči vysokým teplotám, tečení a vysokoteplotní korozi. Tento materiál je dobře obrobitelný a také dobře tvárný za tepla i za studena. Výhodou tohoto materiálu je bezesporu velmi dobrá svařitelnost při použití obvyklých metod svařování, např. WIG (Wolfram Inert Gas), MIG (Metal Inert Gas) nebo MAG (Metal Active Gas). Tato ocel, díky vyššímu obsahu Cr a Mo, dosahuje vlastností, které mohou být používány zejména v teplotěnské, energetické, ropné, plynárenské či chemické průmyslu. V tab. 1 níže je uvedeno chemické složení oceli 16Mo3 dle evropské normy EN 10028 [2-5].

Tab. 1 Chemické složení oceli 16Mo3 [4].

Složení [hm %]	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N	Cu
16Mo3	0,12 až 0,20	0,35	0,40 až 0,90	0,025	0,01	0,03	0,25 až 0,35	0,30	0,012	0,30

V současnosti se použití tohoto materiálu zaměřuje zejména na výrobu průmyslových kotlů, parních vedení, výměníků tepla nebo tlakových nádob. V tab. 2 jsou zobrazeny mechanické vlastnosti oceli 16Mo3 za teploty 20 °C [1, 4].

Tab. 2 Mechanické vlastnosti oceli 16Mo3 [4].

Modul pružnosti v tahu	212 GPa
Mez kluzu	380 MPa
Mez pevnosti v tahu	440 MPa
Tvrdość	150 HB
Tažnost	30 %
Nárazová práce ISO-V	31 J
Teploty použití	-20 až 530 °C

Dle výše uvedeného, ocel 16Mo3 je jedním z materiálů, které jsou používány především pro práci za zvýšených a vysokých teplot. V těchto teplotách se materiál nachází v oblasti tečení (tzv. creep). Tečení je vlastnost materiálu, kterou lze definovat jako pomalou deformaci materiálu, která vzniká působením dlouhodobého napětí za zvýšených teplot. Vlastnost oceli, tzv. žárupevnost, je definována pomocí tohoto tečení materiálu. V tab. 3 níže jsou znázorněny meze pevností v tečení při několika různých teplotách a různých dobách zatěžování [1].

Tab. 3 Meze pevností v tečení při různých teplotách a různých dobách zatěžování [6].

Teplota [°C]	Mez pevnosti v tečení pro 10 ⁴ hod. [MPa]	Mez pevnosti v tečení pro 10 ⁵ hod. [MPa]	Mez pevnosti v tečení pro 2·10 ⁵ hod. [MPa]
450	298	239	217
470	247	178	159
500	171	101	84
510	147	91	69
530	102	53	45

Ocel 16Mo3 má z hlediska mikrostruktury feriticko – perlitickou strukturu, která je zobrazena na obr. 2 níže.



Obr. 2 Feriticko – perlitická struktura oceli 16Mo3 [1].

1.1.3 Materiál trubky – Inconel 625 a další niklové superslitiny

Materiál Inconel 625 (lze také nalézt pod označením 2.4856) se zařazuje do skupiny materiálů, která se nazývá niklové superslitiny. Superslitiny jsou popisovány jako kovové slitiny a obecně se rozdělují na niklové, kobaltové nebo železo-niklové, kde největší část patří právě slitinám na bázi niklu [8, 9].

Slitiny na bázi niklu

Tyto slitiny jsou určeny převážně pro použití v prostředích s vysokou teplotou nad 450 °C (900 až 1 000 °C), dále v kyselém či chemicky agresivním prostředí z důvodu jejich dobré odolnosti vůči oxidaci, korozi a výborné odolnosti vůči vysokoteplotnímu tečení. Takto agresivní prostředí se nachází např. ve spalovnách komunálního odpadu a průmyslových topiv. Slitiny na bázi niklu nacházejí uplatnění i v letectví, automobilovém průmyslu (motory), dále při těžbě ropy a zemního plynu nebo v jaderných elektrárnách. V tab. 4 jsou k dispozici chemická složení několika vybraných niklových superslitin [1, 7, 8].

Tab. 4 Složení vybraných niklových superslitin materiálů řady Inconel [9, 10].

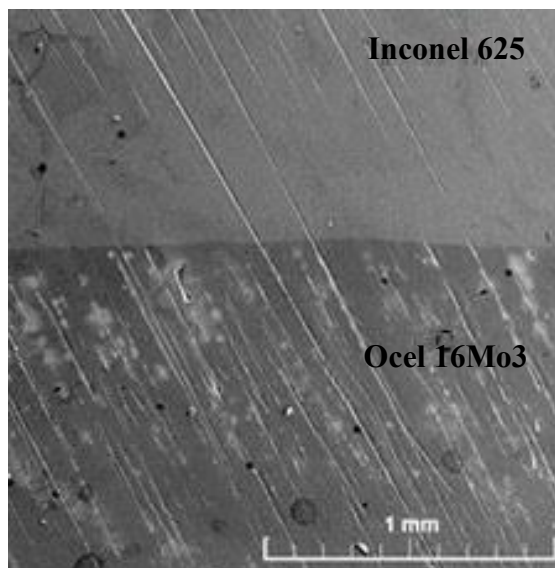
Složení [hm %]	Cr	Ni	Co	Mo	Cu	Nb	Ti	Al	Fe	C
Inconel 600	15,50	76,00	-	-	0,25	25,00	-	-	8,00	0,08
Inconel 601	23,00	60,50	-	-	-	-	-	1,35	14,10	0,05
Inconel 617	22,00	55,00	12,50	9,00	-	-	-	1,00	0,07	-
Inconel 625	21,50	61,00	-	9,00	-	3,60	0,20	0,20	2,50	0,05
Inconel 718	19,00	52,50	-	3,00	0,15	5,10	0,90	0,50	18,50	0,08
Inconel X-750	15,50	73,00	-	-	0,25	1,00	2,50	0,70	7,00	0,04

Tyto superslitiny mají austenitickou matici, stejně jako je tomu u austenitických ocelí. Struktura těchto materiálů je tvořena dvoufázovou rovnovážnou mikrostrukturou. První z nich je základní fáze γ (tuhý roztok niklu, který je substitučně zpevněný legujícími prvky, s FCC krystalovou mřížku) a druhou je intermetalická fáze γ' (tvořena precipitáty Ni_3Nb), která je fází vytvrzovací. V určitých případech, např. Inconel 706 nebo Inconel 718, se hlavní vytvrzovací fází stává γ'' , která má tetragonálně prostorově středěnou mřížku BCT. Antikorozi a antioxidační odolnost je zajištěna především legováním pomocí chromu a hliníku, které vytvářejí ochrannou vrstvu Cr_2O_3 a také Al_2O_3 v okamžiku, kdy dojde ke kontaktu s prostředím, ve kterém se nachází kyslík. Základní fáze zodpovědné za vytvrzování niklových superslitin jsou zobrazeny na obr. 3 [1, 9, 10].

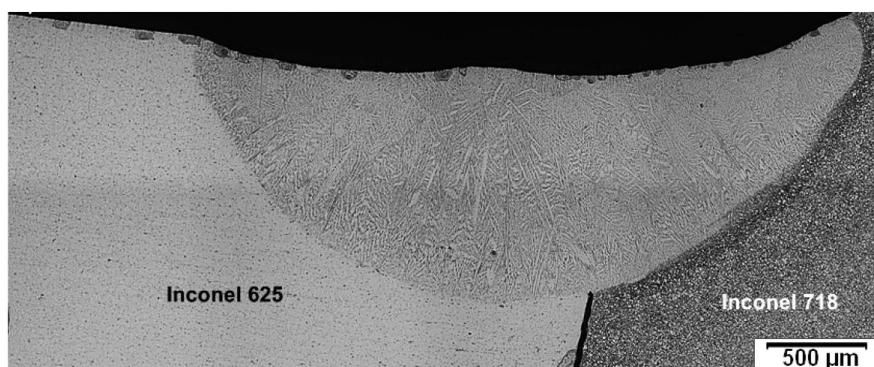
Fáze	Mřížka	Vzorec	Popis
γ	FCC (kubická plošně středěná)	-	Matrice, substituční tuhý roztok.
γ'	FCC	Ni_3Al , $\text{Ni}_3(\text{Ti}, \text{Al})$	Základní zpevňující fáze v niklových superslitinách, tvar se mění od kulového ke kubickému.
γ''	BCT (tetragonální prostorově středěná)	Ni_3Nb	Základní zpevňující fáze ve slitině Inconel 718, metastabilní fáze, precipituje jako koherentní diskovité částice.
MC	SCC (kubická prostá)	NbC , TiC , HfC	Složení je různé: tvoří nepravidelné globule M může být Ti, Ta, Nb, Hf, Th nebo Zr.
M_{23}C_6	FCC	Cr_{23}C_6 , Fe_{23}C_6 , W_{23}C_6 , Mo_{23}C_6	Může být ve tvaru globulí, desek aj., obvykle se vyskytuje na hranicích zrna.
M_6C	FCC	$\text{Fe}_3\text{Mo}_3\text{C}$, $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ - $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$, $\text{Fe}_3\text{Nb}_3\text{C}$, $\text{Nb}_3\text{Co}_3\text{C}$, $\text{Ta}_3\text{Co}_3\text{C}$	Náhodně distribuované karbidy.
M_7C_3	HCP (hexagonální)	Cr_7C_3	Vyskytují se pouze ve slitinách typu Nimonic 80 A po vystavení teplotám nad 1000 °C. Nejčastěji tvoří deskovité částice na hranicích zrn.
M_3B_2	SCT (tetragonální prostá)	Ta_3B_2 , V_3B_2 , Cr_3B_2 , Fe_3B_2 , Mo_2FeB_2 , Nb_3B_2	Vyskytují se v niklových slitinách s obsahem B nad 0,03 %. Vypadají obdobně jako karbidy, ale nereagují s karbidickými leptadly.
MN	SCC (kubická prostá)	TiN , ZrN , NbN	Nitridy se vyskytují ve slitinách obsahujících Ti, Nb a Zr. Jsou nerozpustné pod teplotou tavení. Mají kruhové nebo obdélníkové tvary.
μ	romboedrická	Co_7W_6 , Fe_7Cr_6 , Ni_7Mo_6 , Co_7Mo_6	Vyskytují se ve slitinách s vysokým obsahem Mo a W. Tvoří se za vysokých teplot jako hrubozrná Widmanstättenova struktura.

Obr. 3 Přehled vyskytujících se fází v superslitinách [11].

Na obr. 4 je vyobrazena makrostruktura oceli 16Mo3 a superslitiny Inconel 625 a na obr. 5 je znázorněna mikrostruktura po svaření Inconelu 625 a Inconelu 718.



Obr. 4 Makrostruktura oceli 16Mo3 a superslitiny Inconel 625 [1].



Obr. 5 Mikrostruktura vybraných svařených superslitin [12].

Inconel 625

Z hlediska vlastností ovlivňujících obrábění, lze niklové superslitiny rozdělit do několika skupin, a to A až E. Inconel 625 se považuje jako hlavní v rámci této práce a řadí se do skupiny D. Tato skupina se vyznačuje vytvrzováním pomocí stárnutí, kdy právě ve vystárnutém stavu je dosaženo vysoké pevnosti a tvrdosti. Obrábění, jako je např. vrtání nebo řezání závitů, se provádí v nevystárnutém stavu, pro zajištění nižší tvrdosti obráběného materiálu. Slitinu lze také tepelně zpracovávat, kde nejčastějším způsobem zpracování je žíhání s následným zakalením pro dosažení lepší obrobitelnosti při obrábění ve vystárnutém stavu. Slitina je také dobře svařitelná pomocí obvyklých metod svařování (WIG, MIG, MAG atd.). Mechanické vlastnosti materiálu Inconel 625 za teploty 20 °C jsou dostupné v tab. 5 [1, 9].

Tab. 5 Mechanické vlastnosti materiálu Inconel 625 [9, 13]

Modul pružnosti v tahu	207 GPa
Mez kluzu	415 MPa
Mez pevnosti v tahu	820 až 1 050 MPa
Pevnost při tečení	360 MPa
Tvrдость	240 HB
Tažnost při 20 °C	min. 30 %
Nárazová práce ISO-V	100 J
Teplota použití	až 1 000 °C

Mechanické vlastnosti materiálů jsou závislé na teplotě okolí, ve které se nachází v průběhu jejich funkce. V tab. 6 jsou uvedeny rozdíly meze pevnosti a meze kluzu při zvýšených pracovních teplotách.

Tab. 6 Základní mechanické vlastnosti superslitiny Inconel 625 za zvýšených teplot [14].

Pracovní teplota [°C]	204	316	427	538	649	760	871
Mez kluzu [MPa]	455	434	421	421	414	407	269
Mez pevnosti v tahu [MPa]	924	910	910	896	821	538	276

Pomocí tab. 7 je možné porovnat základní mechanické vlastnosti Inconelu 625, za zvýšených teplot použití (tab. 6) s dalšími vybranými superslitinami třídy Inconel, taktéž při různých teplotách použití.

Tab. 7 Základní mechanické vlastnosti vybraných superslitin za zvýšených teplot [1].

Materiál	Mez pevnosti v tahu [MPa]			Mez kluzu [MPa]		
	21 °C	540 °C	760 °C	21 °C	540 °C	760 °C
Inconel 600	660	560	260	285	220	180
Inconel 601	740	725	290	455	350	220
Inconel 617	740	580	440	295	200	180
Inconel 718	1 435	1 275	950	1 185	1 065	740
Inconel X-750	1 200	1 050	-	815	725	-

1.2 Zkouška tahem

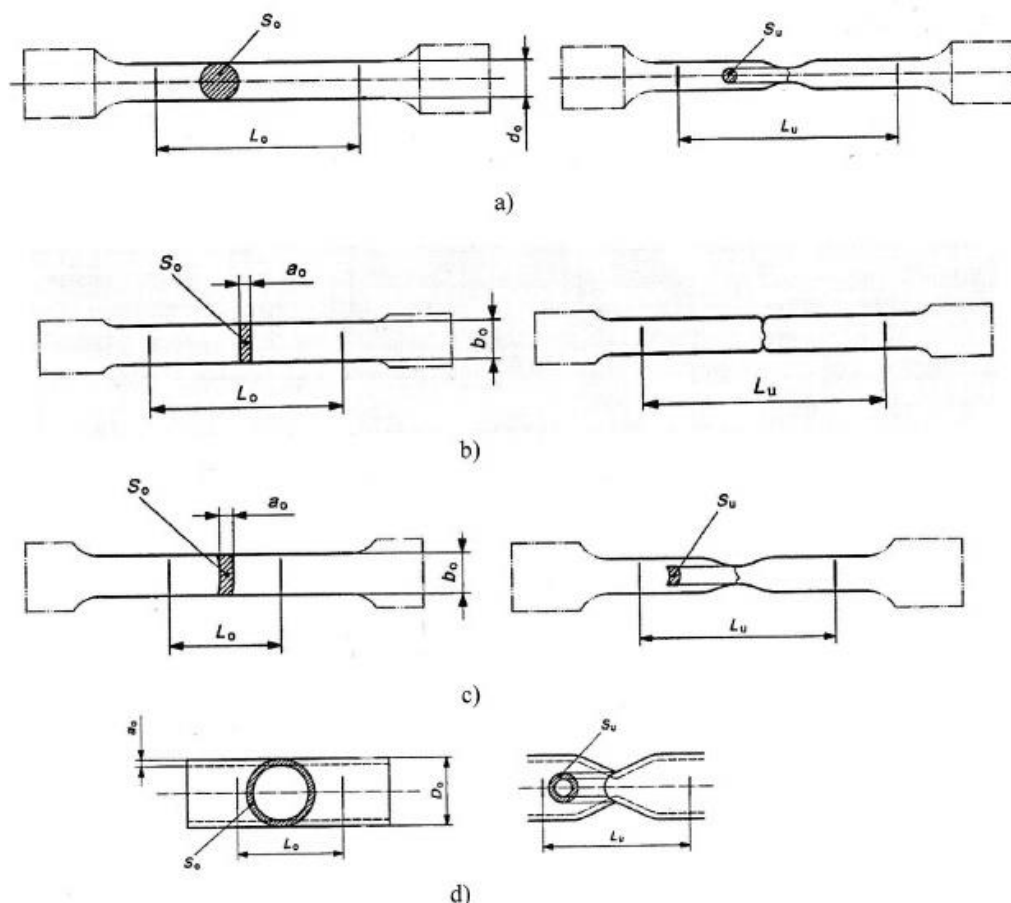
Tato kapitola je rozdělena do dvou částí. První část řeší obecný popis tahové zkoušky, dále tvar a velikost zkušebních vzorků a v závěru je popis měřicího zařízení. V druhé části je kladen důraz na průběh zkoušky a základní parametry získané pomocí tahové zkoušky.

1.2.1 Popis tahové zkoušky, vzorků a měřicího zařízení

Tahová zkouška, dle normy ČSN EN ISO 6892-1, patří mezi zkoušky destruktivní, lze ji zařadit mezi nejjednodušší, nejstarší a také nejpoužívanější zkoušky mechanických vlastností [15, 16].

Princip této zkoušky spočívá v přetržení zkušebního vzorku za použití jednoosého tahu, především při okolní teplotě 10 °C až 35 °C, s cílem získat základní napěťové a deformační charakteristiky testovaného vzorku jako jsou: mez pevnosti, mez kluzu, tažnost a kontrakce materiálu vzorku. Při použití zvláštních postupů pro vyhodnocení lze také zjistit modul pružnosti v tahu či mez úměrnosti. V ojedinělých případech lze zkoušku provádět i za snížených či zvýšených teplot. Z důvodu strukturní nebo chemické nehomogenity může nastat ovlivnění výsledků z této zkoušky, proto je nutné dbát na správné místo a způsob odběru vzorku. Vzorek je potřeba volit tak, aby vhodným způsobem charakterizoval materiál jako celek a zahrnoval vlastnosti oblastí, které jsou nejvíce důležité z konstrukčního nebo technologického hlediska. Také je nutné zajistit, aby při odebírání vzorku nedošlo k ovlivnění následně zkoušených vlastností. Pro dodržení těchto požadavků je často nezbytné použití většího počtu vzorků [15 – 18].

Tvary, rozměry a způsoby zpracování vzorku jsou pro většinu zkoušek předepsány normou. Ve většině případů se jedná o vzorky kruhového, čtvercového či obdélníkového průřezu. Na koncích vzorků jsou tzv. hlavy, které často mívají větší průřez, než je tomu tak u vnitřní měřené části, protože slouží k upínání do čelistí zkušebního stroje. Tento rozdíl zajistí, že k lomu zkoušeného vzorku dojde v měřené části tyče označované L_0 . Příklady průřezů a tvarů zkušebních vzorků jsou dostupné na obr. 6 níže, kde jsou na levé straně vyobrazeny vzorky před zkouškou (průřez a měřená délka značeny jako L_0 a S_0) a na pravé straně přetržené vzorky po zkoušce (průřez a měřená délka značeny jako L_u a S_u) [15, 16, 18].



Obr. 6 Zkušební vzorky různých průřezů pro tahovou zkoušku [15].

a) kruhový průřez, b) obdélníkový průřez, c) vzorek vyřezaný z trubky, d) průřez celé trubky

Výroba zkušebních vzorků se liší vzhledem k jejich průřezu. Vzorky kruhového průřezu se nejčastěji vyrábějí pomocí soustružení, případně broušení. Oproti tomu vzorky s nekruhovým průřezem se vyrábějí převážně frézováním. V případě vzorků s konstantním průřezem, jako jsou dráty, lité tyče (z litin či neželezných kovů) nebo profily, lze zkoušet bez předešlého obrábění [15, 18].

Pomocí počáteční měřené délky L_0 (dále jen L_0) lze rozdělit zkušební vzorky na poměrnou nebo nepoměrnou zkušební tyč. U **poměrné zkušební tyče** se L_0 vztahuje k původnímu průřezu zkoušené tyče S_0 (dále jen S_0) a lze ji vypočítat pomocí vztahu (1) [15, 18]:

$$L_0 = k \cdot \sqrt{S_0} \quad (1)$$

kde: L_0 [mm] – počáteční měřená délka,
 k [-] – součinitel proporcionality,
 S_0 [mm²] – počáteční průřez zkoušené tyče.

Součinitel proporcionality nabývá přednostně hodnoty 5,65. Je tomu tak při dodržení podmínky, kde je L_0 minimálně 20 mm. Vypočtenou L_0 je poté třeba zaokrouhlit na nejbližší hodnotu násobku 5 mm. Pokud dojde k porušení této podmínky, tedy L_0 bude kratší než 20 mm, je nutné použít součinitel proporcionality o hodnotě 11,3 nebo nepoměrnou zkušební tyč [16].

Hodnota 5,65 součinitele proporcionality byla odvozena pomocí dříve používaných rozměrů pro zkušební tyče kruhového průřezu. Původně byla L_0 stanovena jako pětinasobek počátečního průměru (2). Takováto zkušební tyč byla poté označena jako krátká zkušební tyč. Podobným způsobem byl odvozen i součinitel proporcionality 11,3, u kterého byla L_0 stanovena jako desetinásobek počátečního průměru. Odvození součinitelů proporcionality pro krátké a dlouhé zkušební tyče jsou dostupné ve vztazích (3) a (4) níže [15, 18]:

Průměr vypočtený z průřezu zkoušené tyče:

$$S_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \rightarrow d_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot S_0}{\pi}} \quad (2)$$

Krátká zkušební tyč:

$$5 \cdot d_0 = 5 \cdot \sqrt{\frac{4}{\pi}} \cdot \sqrt{S_0} = 5,65 \cdot \sqrt{S_0} \quad (3)$$

Dlouhá zkušební tyč:

$$10 \cdot d_0 = 10 \cdot \sqrt{\frac{4}{\pi}} \cdot \sqrt{S_0} = 11,3 \cdot \sqrt{S_0} \quad (4)$$

kde: d_0 [mm] – počáteční průměr zkoušené tyče,

S_0 [mm²] – průřez zkoušené tyče.

V případě **nepoměrných zkušebních tyčí** se délka L_0 nevztahuje k S_0 a tyto tyče se vyrábí přednostně v délkách $L_0 = 50, 80, 100$ nebo 200 mm a šířkách 12,5, 20, 25 nebo 40 mm.

Pro vzorky z pásů, plechů či plochých výrobků v tloušťkách od 0,1 do 3 mm jsou přednostně používány dva druhy zkušebních tyčí (viz tab. 8). V případě nutnosti je možné volit i jiné rozměry zkušebních tyčí [15, 18].

Tab. 8 Rozměry zkušebních tyčí z pásů, plechů, plochých výrobků od 0,1 do 3 mm [15].

Šířka tyče B_0	Počáteční měřená délka L_0
12,5 mm	50 mm
20 mm	80 mm

Pro dráty, tyče nebo profily o tloušťce či průměru do 4 mm se L_0 volí 100 případně 200 mm. Zkouší se většinou celý výrobek, zkušební tyč má tedy neobrobený povrch [15].

V případě pásů, plechů či plochých výrobků v tloušťce nad 3 mm a drátů, tyčí, profilů o tloušťce nebo průměru nad 4 mm se používá několik druhů zkušebních tyčí (viz tab. 9) [15].

Tab. 9 Rozměry zkušebních tyčí z pásů, plechů, plochých výrobků nad 3 mm a drátů, tyčí, profilů o tloušťce nebo průměru nad 4 mm [15].

Šířka tyče B_0	Počáteční měřená délka L_0
40 mm	200 mm
25 mm	200 mm
20 mm	80 mm

1.2.2 Průběh tahové zkoušky

V průběhu zkoušky, kdy tahová síla F působí na zkušební tyč, dochází k prodlování celé této tyče, a tím se prodlovuje i L_0 . Toto prodlování se označuje jako ΔL . Okamžitou délku L v průběhu zkoušky lze stanovit dle vztahu (5) [15, 18]:

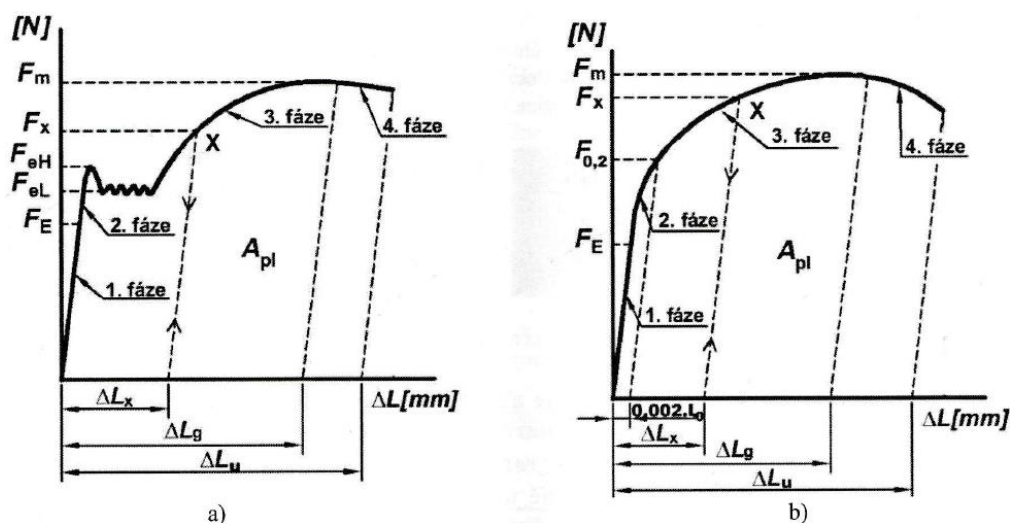
$$L = L_0 + \Delta L \quad (5)$$

kde: L_0 [mm] – počáteční měřená délka,

L [mm] – okamžitá měřená délka,

ΔL [mm] – prodlování zkoušené tyče.

Závislost prodlování ΔL na velikosti působící síly F lze vynést do grafické závislosti, tzv. pracovního diagramu tahové zkoušky. V příloženém obr. 7 jsou znázorněné dva tvary pracovních diagramů tahové zkoušky [15].



Obr. 7 Pracovní diagramy tahové zkoušky [15].

a) diagram s výraznou mezí kluzu

b) diagram s nevýraznou mezí kluzu

Na obr. 7a je znázorněn diagram s výraznou mezí kluzu, který je typický pro vyžíhanou neuklidněnou ocel. Na obr. 7b lze vidět diagram s nevýraznou mezí kluzu, který je v dnešní době mnohem častější než předchozí diagram na obr. 7a, protože je typický pro vyžíhanou uklidněnou ocel, která se vyrábí ve větším množství než ocel neuklidněná [15].

Z obr. 7 také vyplývá, že oba diagramy je možné rozdělit na čtyři odlišné úseky, z nichž každý odpovídá jedné z fází tahové zkoušky [15].

První fáze

Jedná se o oblast elastických deformací, kde se zkoušená tyč prodlužuje přímo úměrně k rostoucí působící síle. Tato deformace, která je pouze elastická, je v diagramu znázorněna jako přímka. To znamená, že po odstranění působící síly se zkoušená tyč zkrátí na svoji původní hodnotu. První fáze končí na tzv. mezi úměrnosti, která se značí R_e (v obr. 7 značena jako síla na mezi úměrnosti F_E). Při praktickém měření v laboratoři se ve většině případech neurčuje z důvodu obtížného nalezení bodu, kde se elastická deformace mění na plastickou (trvalou) [15, 19].

Druhá fáze

Tato fáze se nachází mezi již zmiňovanou mezí úměrnosti a tzv. mezí kluzu, označenou dle typu diagramu jako R_e nebo $R_{p0,2}$. Deformace v této fázi je pouze plastická a dochází zde k rozdílu mezi diagramem s výraznou mezí kluzu a diagramem s nevýraznou mezí kluzu.

Prodlužování zkoušené tyče již neroste lineárně s rostoucí zatěžující silou. Jak lze vidět na obr. 7a, při dosažení tzv. meze kluzu, značené jako R_e (v obr. 7a značená síla na mezi kluzu F_e), prodlužování pokračuje bez dalšího zvyšování zatěžující síly a dochází tak k prodlevě. Pokud je tato prodleva ve větším úseku, lze na obr. 7a rozeznat také sílu na horní mezi kluzu F_{eH} a sílu na dolní mezi kluzu F_{eL} . V tento okamžik zároveň končí druhá fáze.

Na obr. 7b lze vidět případ, kdy nelineární deformace plynule přechází z druhé fáze do třetí a to je tzv. nevýrazná mez kluzu. U tohoto typu diagramu je druhá fáze ukončená smluvní mezí kluzu, označenou jako $R_{p0,2}$ (v obr. 7b značená smluvní síla na mezi kluzu $F_{p0,2}$). Běžně se tato deformace uvádí jako 0,2 % z L_0 a je tedy rovna $0,002 \cdot L_0$ [15, 19].

Třetí fáze

V třetí fázi dochází k homogenní (rovnoměrné) plastické deformaci. Oblast této deformace začíná nad mezí kluzu a končí na mezi pevnosti označenou jako R_m (na obr. 7 značena jako síla na mezi pevnosti F_m). Tato fáze se vyznačuje rovnoměrnou trvalou deformací zkoušené tyče po celé měřené délce až do bodu, kdy zatěžující napětí dosáhne hodnoty meze pevnosti (R_m) a dojde k vytvoření zúžení, tzv. krčku. Poté již nedochází

k rovnoměrné deformaci (konec třetí fáze), ale deformuje se pouze oblast výskytu zúžení [15, 16].

Čtvrtá fáze

Fáze čtyři začíná na mezi pevnosti R_m a končí přetržením zkoušené tyče. V této poslední oblasti se již neprodlužuje zkoušená tyč po celé měřené délce, ale pouze v oblasti krčku až do bodu lomu. Po přetržení lze přiložit obě části opět k sobě a zjistit maximální velikost trvalého prodloužení zkoušené tyče ΔL_u dle vztahu (6) [15, 19]:

$$\Delta L_u = L_u - L_0 \quad (6)$$

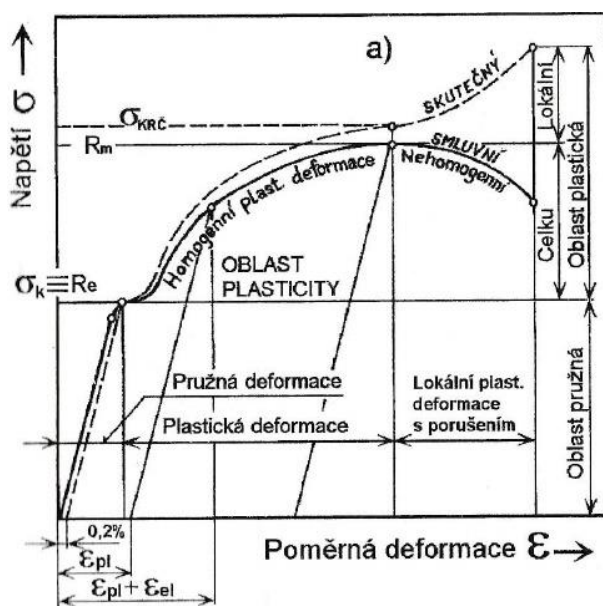
kde: L_0 [mm] – počáteční měřená délka,

L_u [mm] – konečná měřená délka po přetržení,

ΔL_u [mm] – celkové prodloužení zkoušené tyče.

Smluvní a skutečný tahový diagram

Na obr. 8 níže je znázorněn rozdíl mezi smluvním a skutečným tahovým diagramem. Tento rozdíl je znatelný převážně po překročení meze pevnosti, vytvoření tzv. krčku, kdy k další deformaci bude docházet pouze v oblasti vzniklého krčku. Tento rozdíl je způsoben odlišným přístupem výpočtu působícího napětí. Zatímco u smluvního tahového diagramu je působící napětí počítáno k počátečnímu průřezu zkoušené tyče, u skutečného tahového diagramu se toto napětí počítá k okamžitému průřezu zkoušené tyče [15, 16, 18].



Obr. 8 Porovnání smluvního a skutečného tahového diagramu [20].

1.2.3 Základní zjišťované parametry

Mezi základními zjišťovanými parametry tahové zkoušky se zpravidla uvádí mez kluzu v tahu, mez pevnosti v tahu, tažnost a kontrakce. Detailnější popis uvedených parametrů je součástí této podkapitoly.

Mez kluzu v tahu R_e , $R_{p0,2}$

Pokud dojde k překročení meze kluzu, bude nadále docházet pouze k plastické deformaci tyče. Zkoušená tyč se dále prodlužuje, aniž by se zvětšovala zatěžující síla. Jak bylo zmíněno výše, v odstavci *Druhá fáze*, je možné rozlišit materiály s výraznou mezí kluzu (R_e) a s nevýraznou mezí kluzu ($R_{p0,2}$). Mez kluzu lze vyjádřit pomocí poměru zatěžující síly na mezi kluzu ku původnímu průřezu zkoušené tyče (viz vztahy (7), (8) níže) [15, 19, 21, 22]:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (7)$$

kde: R_e [MPa] – výrazná mez kluzu,

F_e [N] – zatěžující síla na výrazné mezi kluzu,

S_0 [mm²] – počáteční průřez zkoušené tyče.

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \quad (8)$$

kde: $R_{p0,2}$ [MPa] – smluvní nevýrazná mez kluzu,

$F_{p0,2}$ [N] – zatěžující síla na nevýrazné mezi kluzu,

S_0 [mm²] – počáteční průřez zkoušené tyče.

Mez pevnosti v tahu R_m

Jedná se o smluvní hodnotu, kterou lze vyjádřit pomocí vztahu (9). Jedná se o podíl největší naměřené zatěžující síly v průběhu zkoušky a počátečního průřezu zkoušené tyče [19, 21]:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (9)$$

kde: R_m [MPa] – smluvní mez pevnosti,

F_m [N] – maximální zatěžující síla v průběhu zkoušky,

S_0 [mm²] – počáteční průřez zkoušené tyče.

Tažnost A

Pod pojmem tažnost se uvádí poměrné prodloužení zkoušené tyče, které je vyjádřeno v procentech původní měřené délky. Poměrné prodloužení lze vypočítat dle vztahu (10) [18, 19, 21]:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (10)$$

kde: A [%] – tažnost,

L_u [mm] – konečná měřená délka po přetržení,

L_0 [mm] – počáteční měřená délka.

Kontrakce Z

Kontrakce udává procentuální poměr rozdílu průřezu původního a konečného (po přetržení) k původnímu průřezu zkoušené tyče. Tento poměr znázorňuje vztah (11) [18, 19]:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \quad (11)$$

kde: Z [%] – kontrakce,

S_u [mm²] – konečný průřez zkoušené tyče,

S_0 [mm²] – počáteční průřez zkoušené tyče.

1.3 Zkoušky tvrdosti

Pojem tvrdost charakterizuje odolnost povrchu materiálu proti vzniku místního porušení vlivem působení cizího tělesa. Zkoušky tvrdosti se řadí do zkoušek destruktivních, které lze rozdělit na statické či dynamické a dále na odrazové či vnikací [23].

Jednotlivé zkoušky je možné rozdělit dle tvaru a velikosti vnikacího indentoru, velikosti zatěžující síly nebo způsobem vyhodnocování. Mezi základní a nejpoužívanější zkoušky tvrdosti patří zkoušky dle Brinella, Rockwella, Vickerse a zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse [23].

V rámci této práce byla vyhodnocena zkouška dle Vickerse při nízkém zatížení a zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse.

1.3.1 Zkouška tvrdosti dle Vickerse

Zkouška tvrdosti dle Vickerse se řadí mezi nejpresnější užívané zkoušky tvrdosti pro všechny typy materiálů. Tuto zkoušku lze nalézt v normě ČSN EN ISO 6507-1 z roku 2018 a tvrdost vyhodnocená touto zkouškou se značí HV (viz tab. 12).

Zkouška se nejčastěji provádí za okolní teploty 10 °C až 35 °C, případně v řízených podmínkách při teplotě 23 ± 5 °C. Pokud je zkouška prováděna při jiných než výše uvedených teplotách, je nutné tuto skutečnost uvést ve zkušebním protokolu. Jedná se o zkoušku, kdy se do materiálu vtlačuje indentor ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem 136°. Následně se po dokončení zkoušky měří délka úhlopříčky vtisku, který vznikne při působení zkušebního zatížení F [24 – 26].

Tab. 12 Příklad označení tvrdosti dle Vickerse [26].

640 HV 30/20	
640	Hodnota tvrdosti dle Vickerse
HV	Značka tvrdosti
30	Přibližná hodnota použitého ekvivalentního zkušebního zatížení v kgf (30 kgf = 294,2 N)
20	Doba zkušebního zatížení 20 s (v případě oceli se uvádí, pokud neleží v rozsahu 10 s až 15 s)

Zkouška tvrdosti dle Vickerse se obecně rozděluje podle tří různých rozsahů zkušebního zatížení pro např. kovové materiály nebo slinuté karbidy. Rozdělení těchto zatížení je znázorněno níže v tab. 13. Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse je podrobněji popsána v kap. 1.3.2 [26].

Tab. 13 Rozsahy zkušebního zařízení [26].

Rozsahy zkušebního zatížení, F [N]	Značka tvrdosti	Význam
$F \geq 49,03$	$\geq \text{HV } 5$	Zkouška tvrdosti dle Vickerse
$1,961 \leq F < 49,03$	$\text{HV } 0,2 \text{ až } < \text{HV } 5$	Zkouška tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení
$0,009\,807 \leq F < 1,961$	$\text{HV } 0,001 \text{ až } < \text{HV } 0,2$	Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse

Norma ČSN EN ISO 6507-1 je specifikována pouze pro délku měřené úhlopříčky mezi 0,02 mm a 1,4 mm. Pro vtisky menších rozměrů již nelze tuto normu použít, protože by docházelo k velkému ovlivnění naměřených výsledků nejistotami způsobenými nedokonalou geometrií hrotu nebo omezením optického měření.

Pravidelný čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem je vtlačován do materiálu takovou silou, aby byly zajištěny úhlopříčky vtisku o minimální délce 0,02 mm převážně po dobu

10 s až 15 s a jednalo se tak o platnou zkoušku dle normy. V tab. 14 jsou uvedeny některá typická zkušební zatížení [24, 26].

Tab. 14 Typická zkušební zatížení [26].

Zkouška tvrdosti		Zkouška tvrdosti při nízkém zatížení	
Značka tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	Značka tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961
HV 10	98,07	HV 0,5	4,903
HV 50	490,3	HV 1	9,807
HV 100	980,7	HV 3	29,42

Po odlehčení působícího zatížení následuje vyhodnocení pomocí optického mikroskopu, kde se zjišťují délky vytvořených úhlopříček a poté se určí střední hodnota délky úhlopříčky dle vztahu (12).

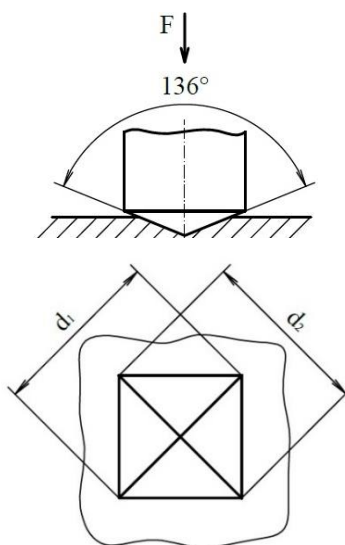
$$d_{stř} = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (12)$$

kde: $d_{stř}$ [mm] – střední délka úhlopříčky,

d_1 [mm] – délka první úhlopříčky,

d_2 [mm] – délka druhé úhlopříčky.

Pro správné určení délek jednotlivých úhlopříček je nutné, aby tento vtisk zabíral mezi 25 % a 75 % optického zorného pole mikroskopu. V závěru se pomocí příslušných tabulek určí výsledná hodnota tvrdosti dle Vickerse. Na obr. 12 je znázorněn princip zkoušky dle Vickerse [24 – 26].



Obr. 12 Princip zkoušky a geometrie vtisku dle Vickerse [26].

Zkoušku lze provádět pouze na vyleštěné, hladké a rovné ploše, která neobsahuje žádná maziva či okuje. Vyleštěný povrch je nutný z hlediska správného stanovení délky úhlopříček vtisku, přičemž samotné leštění nesmí ovlivnit povrchové vlastnosti zkoušeného materiálu jak nadměrným ohřevem, tak i případnou deformací za studena. Zkoušený materiál musí dosahovat tloušťky, která je alespoň jeden a půl násobek střední délky úhlopříčky vtisku. Na zadní straně zkoušeného materiálu se taktéž nesmí objevit žádné známky deformace. Pokud by se tak stalo, zkouška by byla klasifikována jako neplatná. Vzdálenosti středů jednotlivých vtisků od sebe musí být alespoň trojnásobkem průměrné délky úhlopříčky vtisku v případě zkoušení oceli, mědi nebo slitin mědi. Pokud se jedná o zkoušení lehkých kovů (olovo, cín a jejich slitiny), je nutné zajistit vzdálenost mezi středy jednotlivých vtisků o velikosti minimálně šestinásobku průměrné délky úhlopříčky vtisku. Pokud se provádí zkouška blízko okraje zkoušeného materiálu, je nutné opět dodržet určitou vzdálenost středu vtisku od okraje. Tato vzdálenost je určena jako alespoň dva a půl násobek průměrné délky úhlopříčky vtisku v případě zkoušení oceli, mědi nebo slitin mědi a trojnásobek průměrné délky úhlopříčky vtisku v případě lehkých kovů jako jsou např. olovo, cín případně jejich slitiny. Norma ČSN EN ISO 6507-1 také uvádí, že hloubka vtisku je přibližně rovna $1/7$ délky úhlopříčky vtisku, což lze napsat také jako $0,143 \cdot d$ [24 – 26].

1.3.2 Zkouška mikrotvrdomosti dle Vickerse

Zkouška mikrotvrdomosti dle Vickerse se od zkoušky makrotvrdomosti dle Vickerse liší v podstatě jen velikostí působícího zatížení a nutností vyšší přesnosti při vyhodnocování, jelikož vtisk nedosahuje takových rozměrů jako u zkoušek makrotvrdomosti. Zatímco při zkoušení makrotvrdomosti se určuje tvrdost materiálu jako krystalického celku, v případě mikrotvrdomosti je možné určit tvrdosti jednotlivých strukturních složek materiálu. Díky tomu je možné určit různé nestejnorodosti materiálu, např. v závislosti na chemickém složení, způsobu zpracování či submikroskopickém uspořádání. Jelikož je u této zkoušky používáno mnohem nižší zatížení než u zkoušky makrotvrdomosti, je nutné, aby byl zkoušený materiál připraven obdobným způsobem jako při mikroskopickém pozorování, tzn. je proveden výbrus, následně se tento povrch vyleští a v závěru je možné provést naleptání pro vyvolání jednotlivých struktur [25, 26].

Dle výše uvedeného v tab. 13 se zatěžující síly F pro tuto zkoušku pohybují mezi 0,009807 N a 1,961 N. Z důvodu malé hloubky vtisku, tedy krátké délky měřené úhlopříčky, je nutné tuto délku určovat s přesností na 0,001 mm. Některá běžně používaná zatížení pro zkoušky mikrotvrdomosti jsou dostupná v tab. 15 [25].

Tab. 15 Typická zkušební zatížení [26].

Zkouška mikrotvrdosti	
Značka tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zařízení F [N]
HV 0,001	0,009807
HV 0,005	0,04903
HV 0,01	0,09807
HV 0,05	0,4903
HV 0,1	0,9807

1.4 Hodnocení integrity povrchu

Pokud nastane v povrchové vrstvě součásti jakákoliv změna, je možné tuto změnu považovat jako změnu jakosti. Tuto změnu jakosti lze poté dát do vztahu s následující činností dokončené plochy a také pro samotné vyhodnocení integrity povrchu součásti. Integritou povrchu se rozumí funkční plocha, která vzniká za určitých podmínek a bere v potaz následky použitých technologických metod na výrobu funkční plochy [7, 27].

Integrita povrchu byla jako pojem definována v 70. letech 20. století. Bylo zjištěno, že je nezbytné dávat požadavky jakosti, spolehlivosti a životnosti součástí či zařízení do souvislosti s podmínkami technologických procesů pro jejich výrobu. V dnešní době prozatím neexistuje vhodná metoda, kterou by bylo možné zhodnotit integritu povrchu jakýmkoliv souhrnným způsobem. Řadu parametrů vzniklé plochy již lze běžně vyhodnocovat, ale pro některé je nutné vytvářet speciální postupy nebo měřicí zařízení. V dnešní době se považuje za nejspolehlivější zkoušku integrity povrchu vlastní provoz součásti [7, 27].

Jak je zmíněno výše, technologické procesy výroby mají značný vliv na jakost, spolehlivost nebo životnost součástí. Pro zjištění vlivu těchto procesů je možné vycházet z jednotlivých druhů a intenzit energií a vlivů, které proces doprovázejí. Mezi tyto energie lze zařadit energii mechanickou, tepelnou a chemickou. Zároveň je nutné brát zřetel i na vlivy, které působí na povrch součástí. Vlivy lze rozdělit na vnější a vnitřní, kde v případě vnějších to jsou vlivy mechanické (napětí působící za provozu), fyzikální (záření), chemické (koroze), případně jde o kombinaci více vlivů. Do vnitřních vlivů se řadí např. zbytkové napětí, materiálové a mechanické vlastnosti povrchu (tvrdost, povrchová úprava, zpevnění) nebo přítomnost vad v povrchu [27, 28].

1.4.1 Základní parametry integrity povrchu

Mezi základní zjišťované vlastnosti povrchu, a tedy i mezi základní faktory integrity povrchu lze zařadit běžné zkoušky materiálů. Základním faktorem integrity je geometrická přesnost, dále drsnost, případně profil vytvořeného povrchu. Důležité je také zjištění jakýchkoliv změn ve fyzikálních nebo chemických vlastnostech, změn ve struktuře, tvrdosti, a také již zmiňovaných zbytkových napětí na povrchu. Dále je nutné ověřovat změny vzniklé po případném chemicko-tepelném zpracování, jako např. vznik opalu, oduhličení nebo naopak nauhličení povrchu. V některých případech je nutné zkoumat i vzniklé vady a praskliny na povrchu [28].

1.4.2 Metody vyhodnocování integrity povrchu

Mezi základní zkoušky integrity povrchu se řadí např. určení drsnosti povrchu, vizuální (nedestruktivní) zkoušky, metalografické vyhodnocení, zkoušky mikrotvrdosti, zjištění zbytkových napětí nebo stanovení únavové pevnosti. V rámci této práce byla vyhodnocena zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse zmíněná v kap. 1.3.2 a drsnost povrchu vzorku [28].

1.4.3 Drsnost povrchu

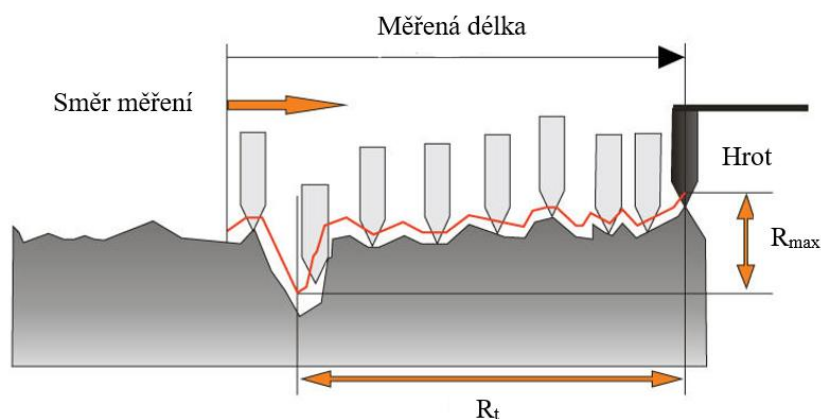
Drsnost povrchu lze definovat jako soubor nerovností povrchu o malých vzdálenostech mezi sebou a jejich vznik je způsoben použitými metodami výroby či jinými vlivy. Drsnost povrchu lze zařadit mezi metody hodnocení struktury povrchu a její měření či vyhodnocení se řídí normou [29].

Normy ČSN EN ISO 4287 a ČSN EN ISO 4288 řeší problematiku hodnocení struktury povrchu pomocí profilové metody. Jedná se o metodu, kdy se sledovaný povrch snímá dotykovým měřicím přístrojem, tzv. profilometrem. Nasnímáním povrchu se získá digitalizovaný profil v jednom „řezu“, který je vytvořen dráhou měřicího přístroje. Takto získaná data je poté možné zpracovávat a vyhodnocovat pomocí normalizovaných či nenormalizovaných délkových, výškových nebo tvarových parametrů. Vyhodnocení může probíhat přímo v měřicí části zařízení (profilometru) nebo pomocí specializovaného softwaru v počítači, který je připojen k měřicímu zařízení. V praxi se nejčastěji vyhodnocují tři základní parametry struktury povrchu, a to parametry vypočtené ze základního profilu (P – parametry), dále z profilu drsnosti (R – parametry) a z profilu vlnitosti (W – parametry) [29].

V rámci této práce byly vyhodnocovány pouze parametry struktury povrchu vypočtené z profilu drsnosti (R – parametry). Mezi R – parametry se řadí např. největší výška výstupku profilu – R_p , největší hloubka prohlubně – R_v , největší výška profilu – R_z , průměrná výška

prvků profilu – R_c , průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu – R_a , celková výška profilu – R_t a další.

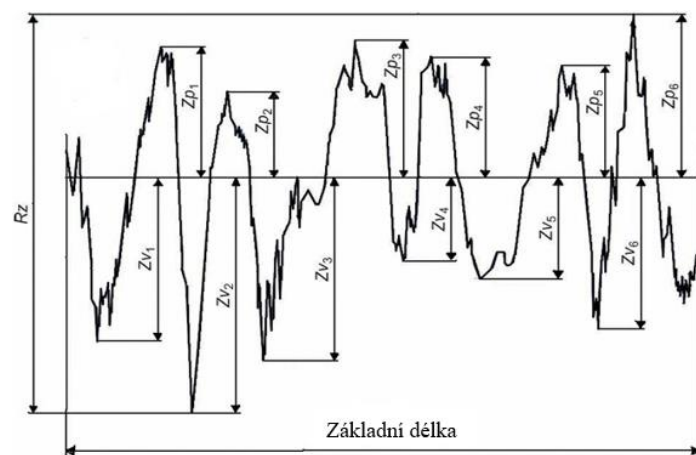
Z uvedených parametrů profilu povrchu byly v této práci zpracovány parametry R_a a R_z . Na obr. 13 je zobrazen princip měření drsnosti povrchu pomocí profilometru [30].



Obr. 13 Princip měření profilometrem [31].

Největší výška profilu – R_z

Jedná se o parametr, který se zjistí provedením součtu hodnoty nejvyššího výstupku profilu (výšky Z_p) a hodnoty nejnižší prohlubně profilu (hloubky Z_v) na předem určené základní délce (viz obr. 14) [30].



Obr. 14 Největší výška profilu – princip vyhodnocení [32]

V normě ISO 4287-1 z roku 1984 se pod parametrem označeným R_z nacházel jiný způsob vyhodnocení, a to vyhodnocení výšky nerovnosti z deseti bodů. V dnešní době velké množství uživatelů stále používá tento způsob vyhodnocení i přes to, že se v roce 1997 stal neplatným a nahradil ho způsob zmíněný výše. Z tohoto důvodu je třeba při užívání existující (starší) technické dokumentace věnovat pozornost tomu, podle které normy byla dokumentace

zhotovena. Rozdíly získaných výsledků pomocí dvou různých metod nejsou vždy zanedbatelné [30].

Tab. 16 Základní délky pro vyhodnocení drsnosti R_z [33].

Největší výška profilu – R_z [μm]	Základní délka – l_r [mm]	Vyhodnocovaná délka – l_n [mm]
$0,025 < R_z \leq 0,1$	0,08	0,4
$0,1 < R_z \leq 0,5$	0,25	1,25
$0,5 < R_z \leq 10$	0,8	4
$10 < R_z \leq 50$	2,5	12,5
$50 < R_z \leq 200$	8	40

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu – R_a

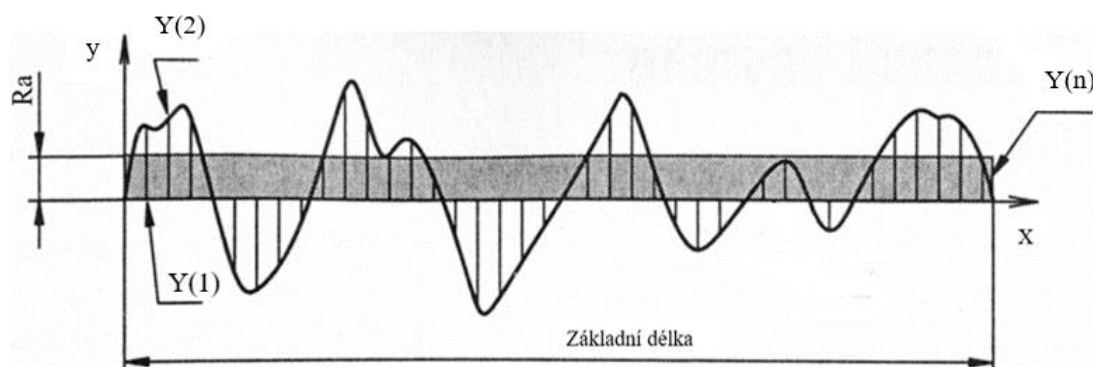
Průměrnou aritmetickou úchylkou se uvažuje aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Y(n)$ nacházejících se v oblasti základní délky (viz obr. 15). Vyhodnocení je provedeno dle vztahu (13) [30]:

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Y(n)| \, dn \quad (13)$$

kde: l [mm] – základní délka,

R_a [mm] – průměrná aritmetická úchylka povrchu,

$Y(n)$ [mm] – hodnota n – té pořadnice.



Obr. 15 Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu – princip vyhodnocení [34].

Parametr R_a patří mezi nejpoužívanější parametry pro hodnocení struktury povrchu. V tab. 17 jsou uvedeny základní délky pro vyhodnocení drsnosti dle parametru R_a .

Tab. 17 Základní délky pro vyhodnocení drsnosti Ra [33].

Průměrná aritmetická úchylka profilu – Ra [μm]	Základní délka – lr [mm]	Vyhodnocovaná délka – ln [mm]
$0,006 < Ra \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < Ra \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < Ra \leq 2$	0,8	4
$2 < Ra \leq 10$	2,5	12,5
$10 < Ra \leq 80$	8	40

Organizace CIRP provedla rozsáhlý mezinárodní průzkum, ve kterém bylo osloveno 284 průmyslových společností z celkem 18 zemí. Z průzkumu vyplývá, že 95 % tázaných společností používá pro hodnocení struktury standartních ISO parametrů. Mezi nejpoužívanější parametry hodnocení struktury patří právě zmiňované Ra (užívá přibližně 92 % společností), Rz (přibližně 49 %), Rt (přibližně 40 %) a dokonce 56 % společností nadále používá starý parametr Rz (určovaný z deseti bodů). Asi 13 % dotázaných podniků využívá pro hodnocení struktury pouze parametr Ra [35].

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část diplomové práce se zabývá provedením jednotlivých zkoušek mechanických vlastností a jejich vyhodnocením. U každé zkoušky je nejdříve řešena výroba zkušebních vzorků, následuje popis použitého zkušebního zařízení a samotný průběh zkoušení vzorků, společně se zpracováním získaných dat. V závěru je provedeno zhodnocení dosažených výsledků.

2.1 Zkouška tahem

Pro zkoušku tahem bylo vyrobeno pět vzorků, které byly odebrány z jednotlivých oblastí trubky. Jednalo se o vzorky z oblasti návaru Inconelu 625, dále z přechodové oblasti mezi materiály a z oblasti základního materiálu trubky 16Mo3. Dále byly vyrobeny dva vzorky, které obsahovaly všechny zmíněné oblasti trubky.

2.1.1 Výroba vzorků

Výroba vzorků pro zkoušku tahem byla provedena pomocí vysokorychlostní elektroerozivní drátové řezačky od firmy FANUC. Použitou drátovou řezačku lze nalézt pod označením FANUC ROBOCUT α -0iD (viz obr. 16). Jedná se o stroj, který se využívá především při výrobě nástrojů, forem, ale také v lékařské technice a automatizované výrobě. V tab. 18 jsou uvedeny základní parametry drátové řezačky. Vytváří kvalitní a vysoce přesné řezy pomocí vysokovýkonného generátoru (*i* PULZ) a standardního mosazného drátu. Stroj je vybaven CNC řídicím systémem FANUC 310is-WA, který umožňuje automatickou kompenzaci opáleného drátu či automatické pozicování a měření (výrobce udává opakovatelnou přesnost až 0,0007 mm) [36].



Obr. 16 FANUC ROBOCUT α -0iD [37].

Tab. 18 Základní parametry drátové řezačky FANUC ROBOCUT α -0iD [36].

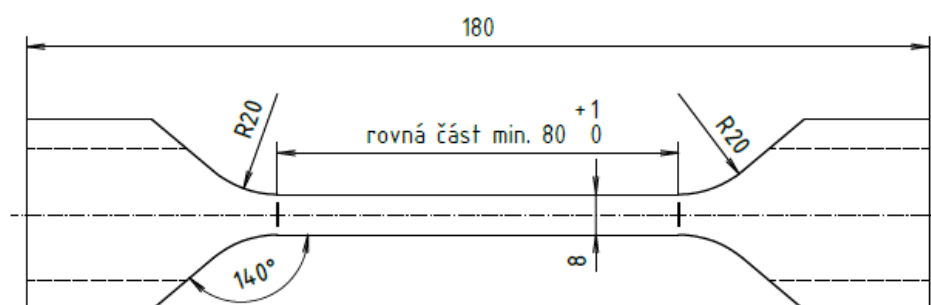
FANUC α – 0iD	
Metoda řezání	Pod hladinou/Koaxiální výplach
Maximální velikost obrobku	700 x 600 x 250 mm
Maximální hmotnost obrobku	500 kg
Pojezdy os X/Y/Z	370 x 270 x 255 mm
Průměr řezacího drátu	0,1 až 0,3 mm
Maximální velikost cívky drátu	K200 (16 kg)
Velikost rychloposuvu	0,9 m·min ⁻¹
Rychlost odvinu drátu	0 až 15 m·min ⁻¹
Napnutí drátu	200 až 2 500 g
Hmotnost stroje	2 050 kg
Rozměry stroje	2 500 x 2 400 x 2 200 mm
Příkon	13 kVA
Objem nádrže	550 l
Tlak vzduchu	min. 5 bar
Množství vzduchu	120 l·min ⁻¹

Vzorky byly vyráběny pomocí řezacího drátu PENTA CUT – G (viz tab. 19) a rychlost posuvu byla zvolena jako 0,60 mm·min⁻¹.

Tab. 19 Parametry použitého řezacího drátu PENTA CUT – G [38].

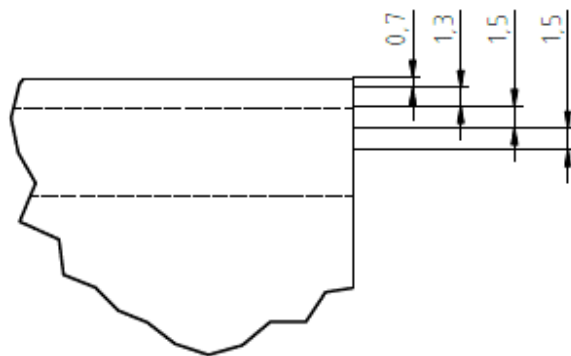
Označení drátu	PENTA CUT – G
Průměr drátu	0,25 mm
Velikost cívky	K160 (8 kg)
Pevnost drátu	1 000 N·mm ⁻²

Vzorky byly odebrány z trubky v příčném řezu tak, aby v každém z nich byla obsažena určitá vrstva materiálu, ze kterého se trubka skládá. Tyto vrstvy lze rozdělit do tří oblastí, a to oblasti návaru Inconelu 625, přechodové oblasti mezi materiály a oblasti základního materiálu trubky 16Mo3. Na obr. 17 jsou uvedeny rozměry, ve kterých se vzorky vyráběly. Základní délka L_0 zde byla zvolena 80 mm.



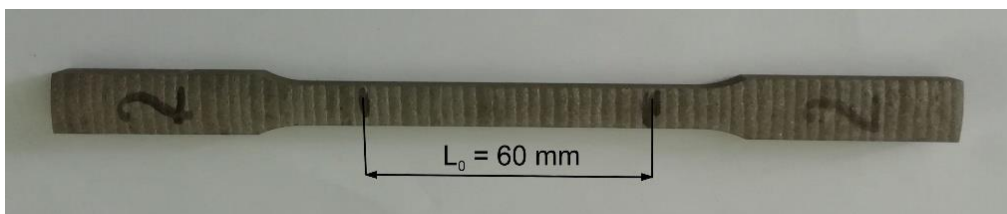
Obr. 17 Rozměry vzorků pro zkoušku tahem – jednotlivé vrstvy materiálu.

Tloušťka vzorků (na obr. 6 značena jako a_0) byla pro oblasti základního materiálu trubky 16Mo3 i oblasti přechodu mezi materiály dána 1,5 mm a pro oblast návaru Inconelu 625 1,3 mm (viz obr. 18). Z obr. 18 je patrné, že bylo nutné nejprve odstranit povrchovou vrstvu navařeného materiálu o tloušťce 0,7 mm, aby se docílilo správného tvaru a rozměru vzorku v místě zúžení (část o délce L_0), kde dochází při zkoušce k lomu a nedocházelo tak k ovlivnění výsledků.

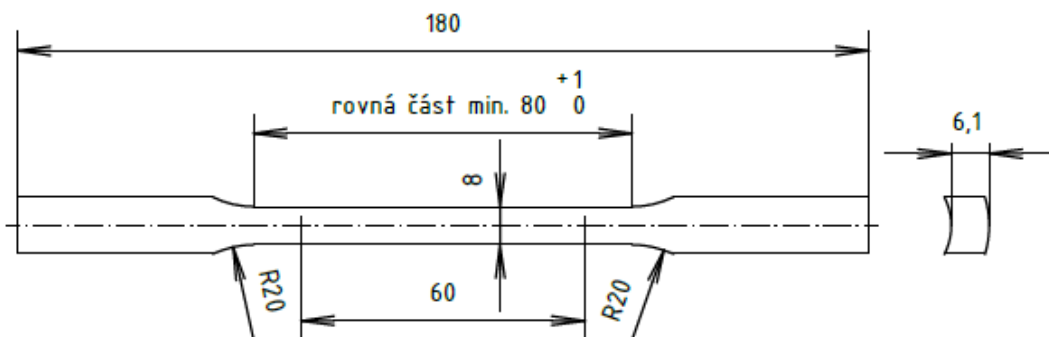


Obr. 18 Tloušťky vzorků v jednotlivých vrstvách trubky.

Dalším krokem bylo provedení zkoušky tahem na vzorcích vyrobených z původní trubky tak, aby obsahovaly všechny zkoumané oblasti, tedy návar, přechodovou oblast a základní materiál trubky (viz obr. 19). Tloušťka těchto vzorků byla dána tloušťkou stěny původní trubky. Vyrobeny byly dva vzorky o rozměrech, které jsou uvedené na obr. 20. Základní délka L_0 zde byla zvolena 60 mm.



Obr. 19 Vzorek vyrobený z celé tloušťky stěny trubky.



Obr. 20 Rozměry vzorků pro zkoušku tahem – tloušťka stěny trubky.

2.1.2 Zkušební zařízení

Zkouška tahem byla provedena pomocí zařízení Zwick Z 100 (viz obr. 21) vyráběné společností ZwickRoell Group. Jedná se o zařízení, pomocí kterého lze provádět různé typy zkoušek, např. zkoušky tahem, tlakem, ohybem, dále zkoušky nízkocyklové únavy (LCF) nebo relaxační a retardační testy pro kovy, keramiku, kompozity a další materiály. Základní parametry tohoto zařízení jsou v tab. 20 [39].



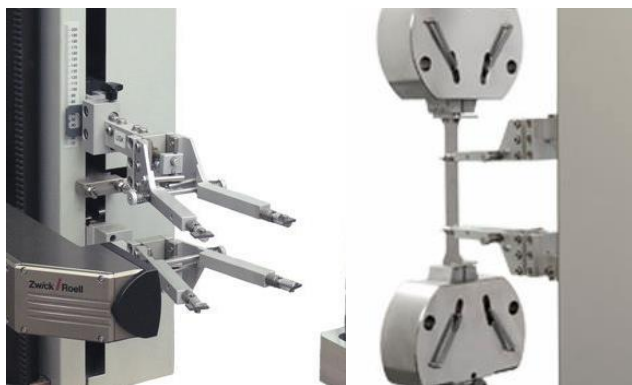
Obr. 21 Zařízení Zwick Z 100.

Tab. 20 Základní parametry stroje Zwick Z 100 [39].

Parametr	Jednotka	Zwick Z 100
Maximální testovací síla	kN	100
Testovací rychlost	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	0,0005 až 600
Polohovací prvek	-	centrální kuličkový šroub
Polohovací přesnost	μm	± 2
Rozměry stroje – výška	mm	2 188 (zkrácená 1 888)
Rozměry stroje – šířka	mm	1006
Rozměry stroje – hloubka	mm	620
Rozměr zkušebního prostoru – výška	mm	1 068 (zkrácená 768)
Rozměr zkušebního prostoru – šířka	mm	610
Provozní teplota	$^{\circ}\text{C}$	+10 až +35
Teplota zkušebního vzorku	$^{\circ}\text{C}$	až +1 200
Hmotnost	kg	1 200

Prodloužení vzorku bylo měřeno pomocí extenzometru makroXtens od společnosti ZwickRoell Group. Jedná se o všestranný extenzometr s vysokou přesností, který je vhodný pro zkoušky tahem, tlakem, ohybem a cyklickým zatěžováním u kovů, plastů, kompozitů, případně tvrdých pěn. Lze jej také použít ve vytápěných zkušebních komorách.

Extenzometr pracuje s přesností $\pm 1 \mu\text{m}$ při měření vzdálenosti mezi dvěma body v rozpětí $20 \mu\text{m}$ až $200 \mu\text{m}$. Tato přesnost splňuje požadavky kladené normou ISO 527-1 z roku 2011. Dle typu zkoušky lze libovolně měnit ramena senzorů pro zkoušku tahem, tlakem, ohybem atd. Ramena senzorů lze taktéž měnit dle tvaru zkoušeného vzorku (obdélníkový, kruhový průřez). Rovněž lze nastavit tlak, kterým působí měřicí rameno v místě kontaktu se vzorkem. Umístění ramen extenzometru makroXtens na zkušebním vzorku je na obr. 22.



Obr. 22 Extenzometr makroXtens [40].

2.1.3 Zkoušení vzorků a zpracování získaných dat

Nejprve byl zkoušen vzorek odebraný z oblasti návaru Inconelu 625, poté tři vzorky z přechodové oblasti mezi materiály, dále vzorek z oblasti základního materiálu trubky 16Mo3 a na závěr dva vzorky, které obsahovaly celou tloušťku stěny trubky. Na obr. 23 je zobrazen již upnutý vzorek v čelistech zařízení Zwick Z 100.



Obr. 23 Upnutý vzorek v zařízení Zwick Z 100.

Návar Inconelu 625

Nejprve proběhlo zkoušení vzorku odebraného z oblasti návaru Inconelu 625 (viz obr. 24).

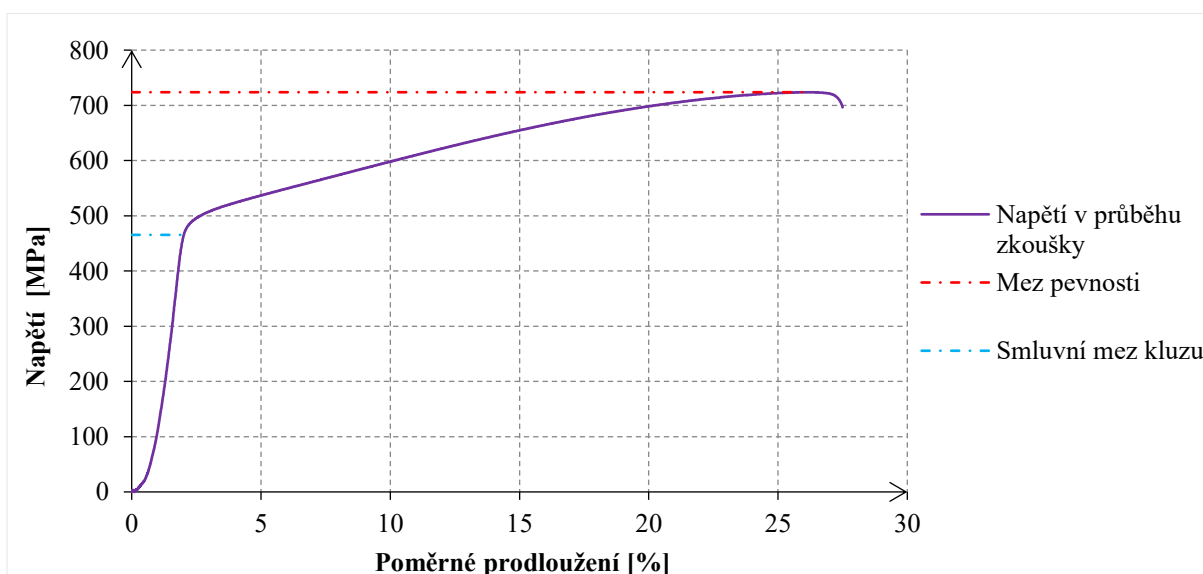


Obr. 24 Vzorek odebraný z oblasti návaru Inconelu 625.

Naměřené hodnoty byly zaneseny do tabulky a následně došlo k sestavení grafické závislosti průběhu napětí na poměrném prodloužení (viz obr. 25). Dále byly zjištěny základní parametry uvedené v kap. 1.2.3 (mez pevnosti v tahu, mez kluzu v tahu, maximální zatěžující síla, tažnost a kontrakce). Hodnoty těchto parametrů byly získány pomocí programu testXpert II, který parametry automaticky vyhodnotil. Jedinou výjimku tvořila hodnota kontrakce, kterou bylo nutné dopočítat manuálně dle vztahu (11). Získané parametry jsou uvedeny v tab. 21.

Tab. 21 Zjištěné parametry ze vzorku z oblasti návaru Inconelu 625.

Parametr	Jednotka	Inconel 625
Mez pevnosti R_m	[MPa]	723,78
Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$	[MPa]	465,45
Maximální působící síla F_m	[kN]	7,19
Tažnost A	[%]	26,13
Kontrakce Z	[%]	39,92



Obr. 25 Závislost působícího napětí na poměrném prodloužení vzorku z oblasti návaru.

Přechodová oblast mezi materiály

Jako další následovaly vzorky odebrané z přechodové oblasti mezi materiály (viz obr. 26). V tomto případě došlo k odebrání a zkoušení tří vzorků.

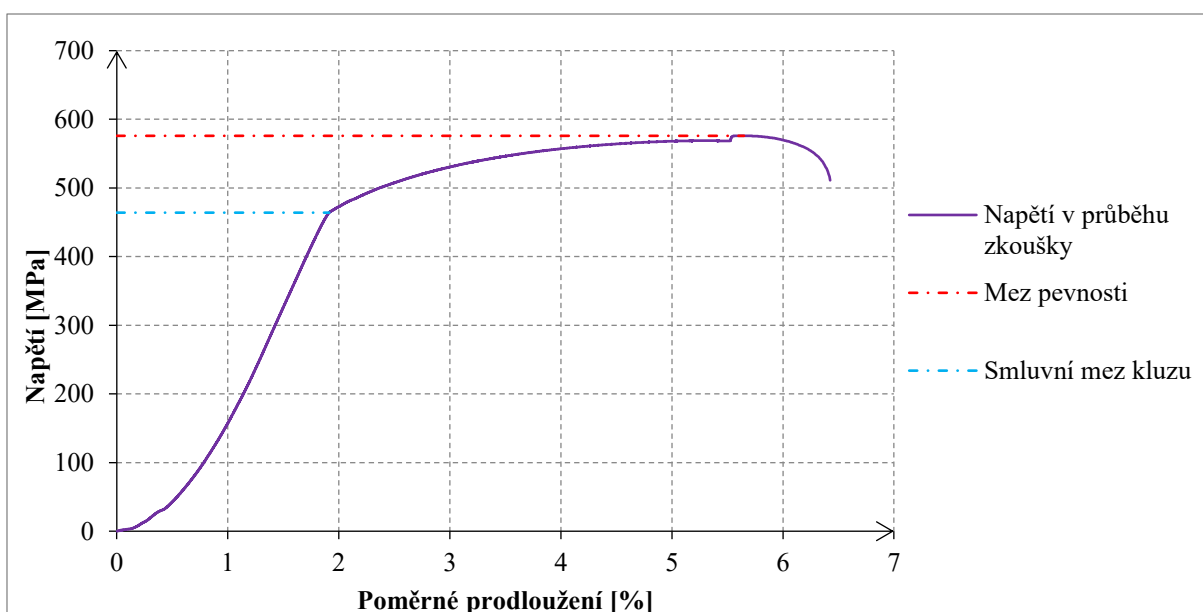


Obr. 26 Vzorky odebrané z přechodové oblasti mezi materiály.

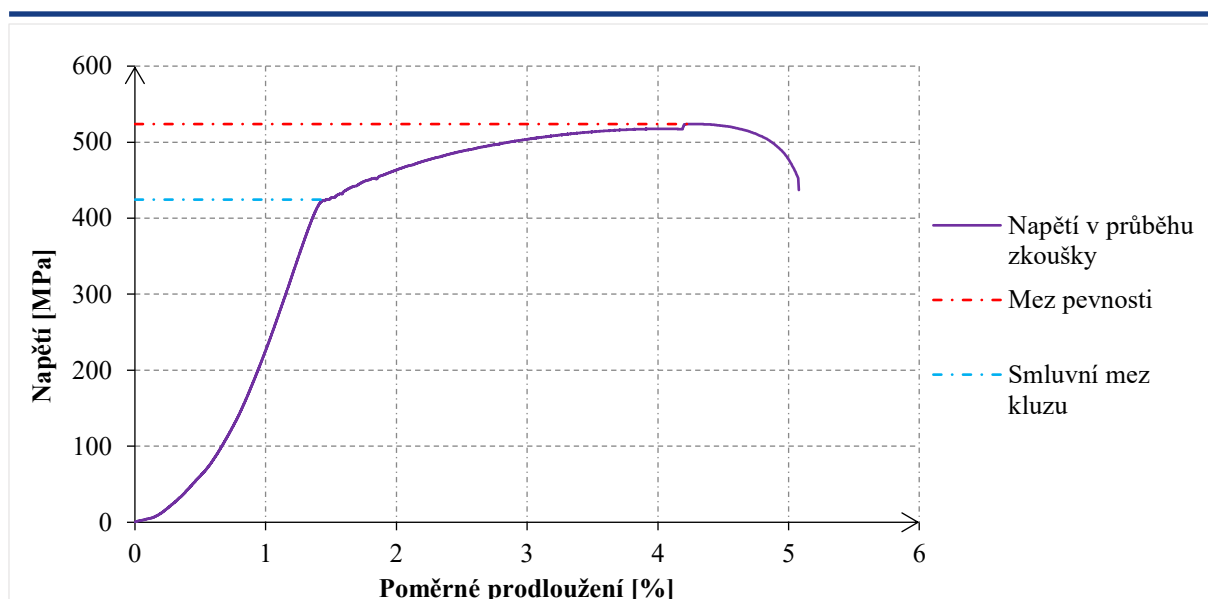
Stejně jako v předchozím případě byly získané hodnoty zapsány do tabulky. Ze získaných hodnot byly poté určeny základní parametry zkoušky tahem (viz tab. 22) a došlo k vyhotovení grafických závislostí působícího napětí na poměrném prodloužení (viz obr. 27, obr. 28 a obr. 29).

Tab. 22 Zjištěné parametry ze vzorků z přechodové oblasti mezi materiály.

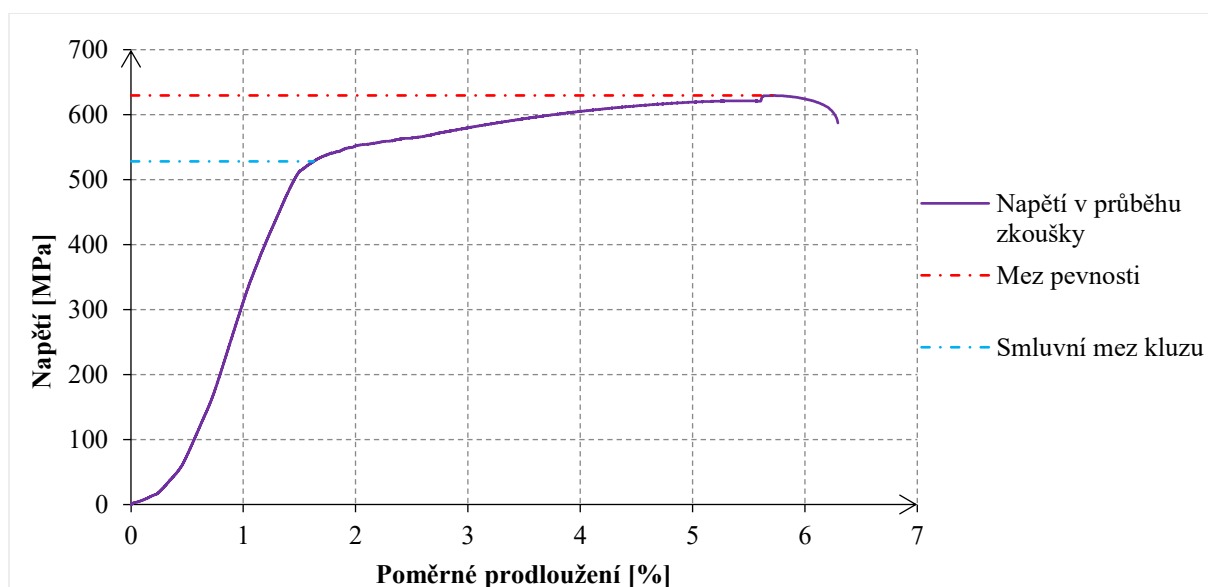
Parametr	Jednotka	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3
Mez pevnosti R_m	[MPa]	517,11	523,93	629,37
Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$	[MPa]	464,20	424,50	528,00
Maximální působící síla F_m	[kN]	5,73	5,21	4,75
Tažnost A	[%]	5,53	4,29	5,73
Kontrakce Z	[%]	40,47	44,21	34,25



Obr. 27 Závislost působícího napětí na poměrném prodloužení 1. vzorku přechodové oblasti.



Obr. 28 Závislost působícího napětí na poměrném prodloužení 2. vzorku přechodové oblasti.



Obr. 29 Závislost působícího napětí na poměrném prodloužení 3. vzorku přechodové oblasti.

Z hodnot v tab. 22 je patrné, že jednotlivé vzorky odebrané z přechodové oblasti dosahují různých mechanických vlastností. Tento rozdíl mohl být způsoben tím, že vzorky byly odebrány z místa, kde se nacházel svar, a tedy oblast promísení základního a přídavného materiálu. I přes to, že byly vzorky odebrány ze stejné pozice, dle obr. 18 (umístění vzorku ve stěně trubky), není možné říci, že jsou všechny vzorky naprosto identické z hlediska chemického složení ani stupněm promísení základního a přídavného materiálu. Právě tyto odlišnosti mohly zapříčinit odlišné chování vzorků v průběhu zkoušky tahem, a tím i rozdílné hodnoty mechanických vlastností. Pro zjištění přesného důvodu by bylo třeba udělat minimálně chemický rozbor vzorků a metalografický rozbor (nejsou v rámci práce řešeny).

Základní materiál oceli 16Mo3

Další zkouška tahem probíhala na vzorku z oblasti základního materiálu trubky 16Mo3. Z této oblasti byl odebrán pouze jeden vzorek (viz obr. 30).

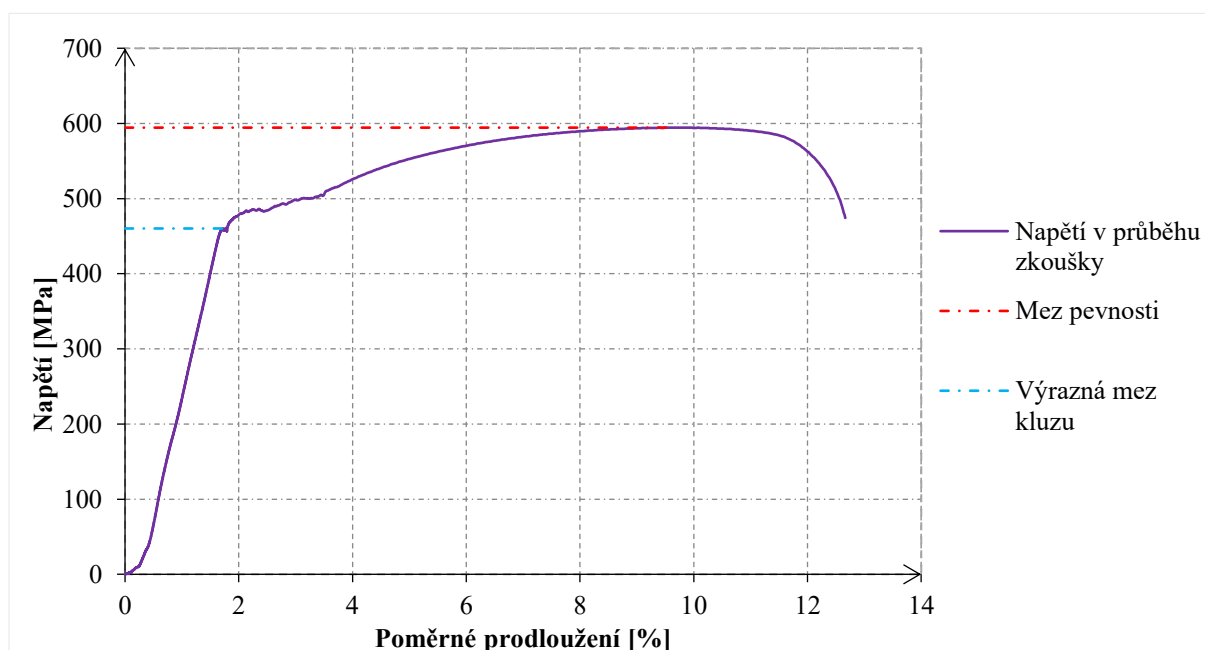


Obr. 30 Vzorek odebraný z oblasti základního materiálu trubky 16Mo3.

Stejně jako v předchozích případech byly i zde ze získaných dat zjištěny základní parametry zkoušky (viz tab. 23) a následně byla vytvořena grafická závislost působícího napětí na poměrném prodloužení (viz obr. 31). Z obr. 31 je patrné, že vzorek odebraný z oblasti základního materiálu trubky 16Mo3 vykazuje jako jediný ze zkoušených vzorků výraznou mez kluzu v tahu.

Tab. 23 Zjištěné parametry ze vzorku z oblasti základního materiálu trubky 16Mo3.

Parametr	Jednotka	16Mo3
Mez pevnosti R_m	[MPa]	594,56
Výrazná mez kluzu R_{eH}	[MPa]	460,22
Maximální působící síla F_m	[kN]	5,91
Tažnost A	[%]	10,60
Kontrakce Z	[%]	30,20



Obr. 31 Závislost působícího napětí na poměrném prodloužení vzorku z oblasti oceli 16Mo3.

Vzorky obsahující celou tloušťku stěny trubky

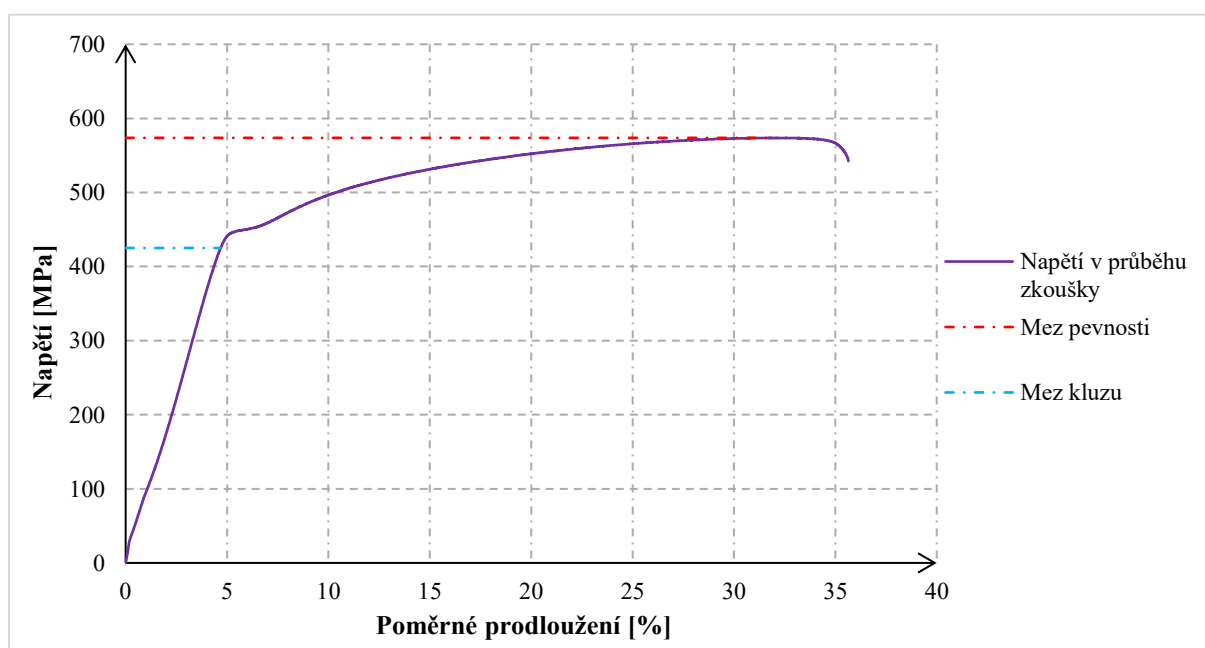
Na obr. 32 je jeden ze vzorků, který obsahoval všechny dříve zkoumané vrstvy stěny trubky. Stejně jako u předchozích zkoušek tahem i zde byly vytvořeny grafické závislosti působícího napětí na poměrném prodloužení (viz obr. 33 a obr. 34). V tab. 25 jsou zjištěné základní parametry zkoušky tahem. Vyhodnocena byla smluvní mez kluzu, jelikož z předchozích zkoušek ostatních vzorků bylo zřejmé, že téměř všechny vykazovaly při zkoušce nevýraznou mez kluzu. Jedinou výjimku tvořil vzorek ze základního materiálu trubky 16Mo3, který vykazoval výraznou mez kluzu.



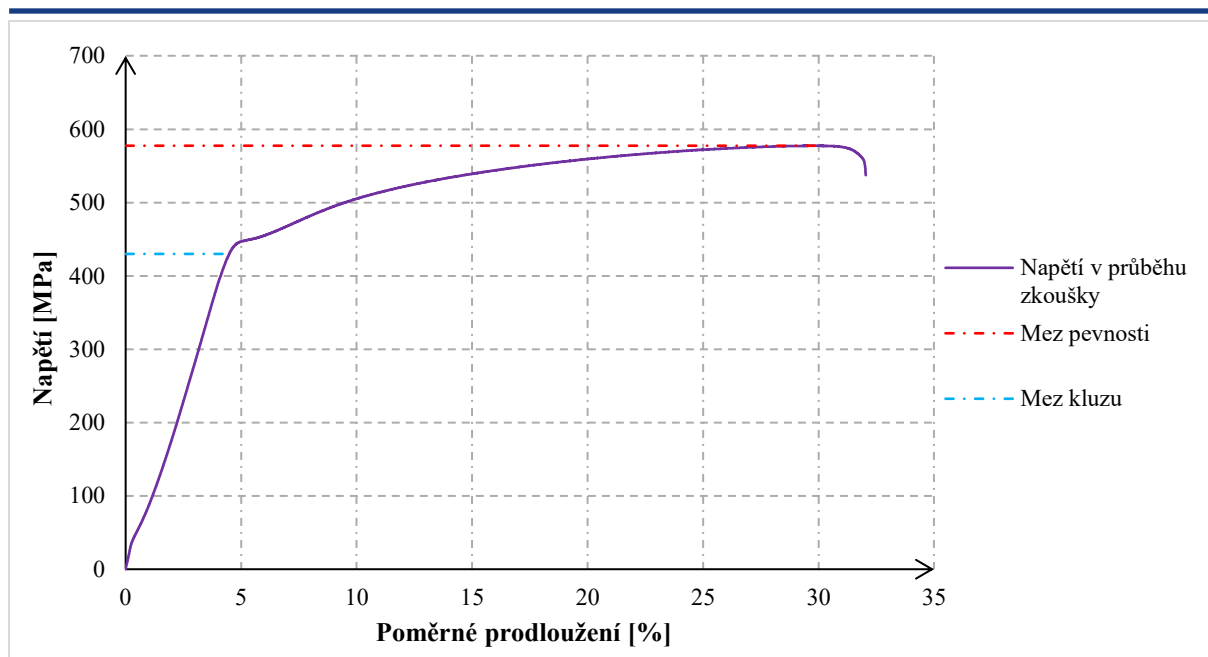
Obr. 32 Vzorek z celé tloušťky stěny trubky.

Tab. 25 Zjištěné parametry ze vzorků z celé tloušťky stěny trubky.

Parametr	Jednotka	Vzorek 1	Vzorek 2
Mez pevnosti R_m	[MPa]	573,70	577,55
Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$	[MPa]	425,02	430,10
Maximální působící síla F_m	[kN]	28,00	28,18
Tažnost A	[%]	35,00	31,67
Kontrakce Z	[%]	23,53	24,89

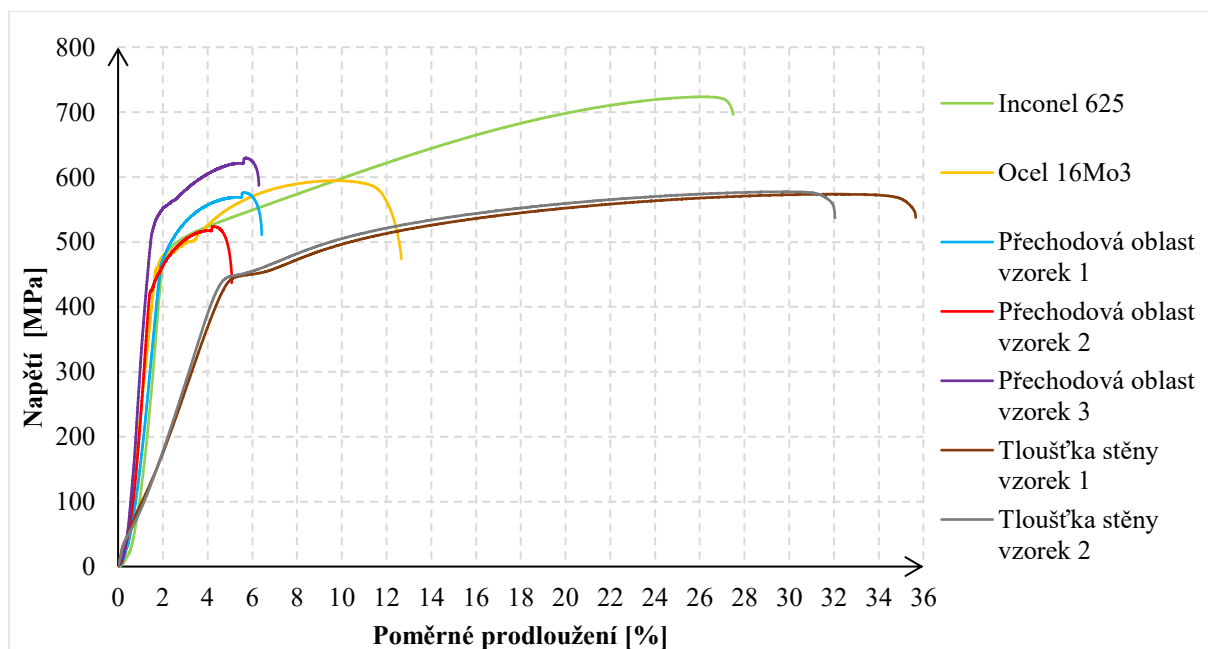


Obr. 33 Grafická závislost působícího napětí na poměrném prodloužení 1. vzorku.

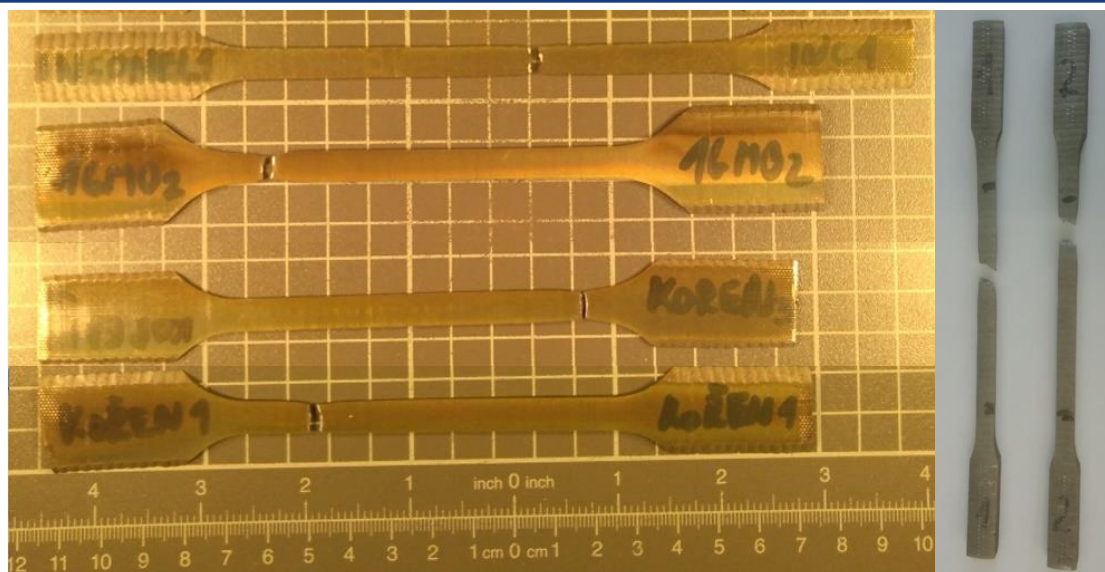


Obr. 34 Grafická závislost působícího napětí na poměrném prodloužení 2. vzorku.

Na závěr bylo provedeno porovnání výsledků (grafických závislostí) jednotlivých tahových zkoušek všech vzorků (viz obr. 35). Na obr. 36 je vyobrazení některých vzorků po zkoušce tahem.



Obr. 35 Porovnání výsledků tahových zkoušek všech vzorků.



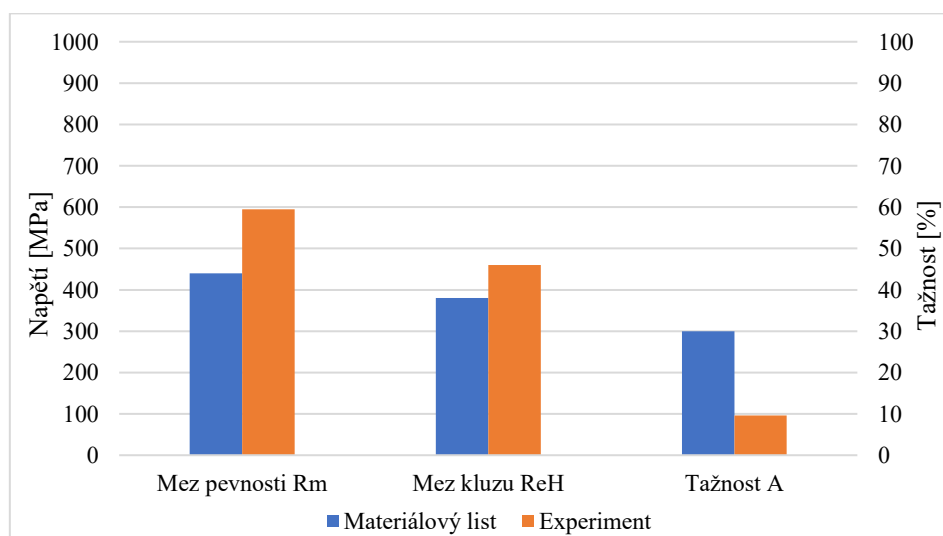
Obr. 36 Některé vzorky po zkoušce tahem.

2.1.4 Zhodnocení dosažených výsledků

V této podkapitole je provedeno zhodnocení výsledků získaných zkouškou tahem pro všechny vzorky uvedené v kap. 2.1.3.

Základní materiál trubky 16Mo3

Ze získaných výsledků je patrné, že zjištěné hodnoty meze kluzu a meze pevnosti testovaného vzorku z oblasti základního materiálu trubky 16Mo3 dosahují vyšších hodnot, než je tomu v materiálovém listu (kap. 1.1.2). Oproti tomu zjištěná hodnota tažnosti je přibližně třetinová v porovnání s hodnotou uvedenou v materiálovém listu. Porovnání mechanických vlastností testovaného vzorku a mechanických vlastností uvedených v materiálovém listu je na obr. 37.



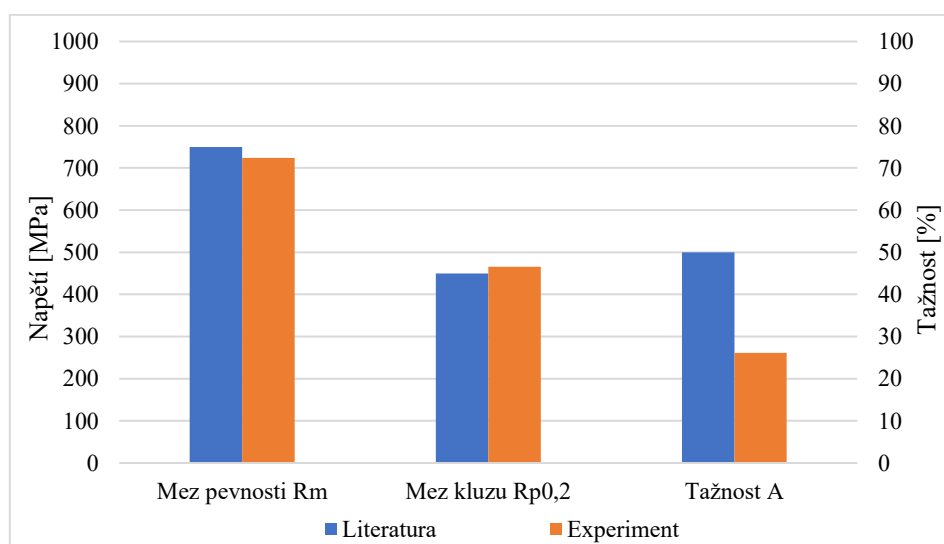
Obr. 37 Porovnání mechanických vlastností oceli 16Mo3 z experimentu a materiálového listu.

Rozdíl mezi hodnotami získanými tahovou zkouškou a hodnotami danými materiálovým listem může být způsoben např. různým tepelným zpracováním materiálu před provedením zkoušky tahem. Materiálový list oceli 16Mo3 uvádí, že všechny v něm uvedené mechanické vlastnosti jsou dány pro materiál, který se nachází ve stavu po normalizačním žíhání. Jelikož byl na původní normalizačně žíhanou trubku nanesen návar a vzorek byl odebrán blízko hranice natavení (způsobeno tvarem trubky), nelze již uvažovat materiál jako normalizačně žíhaný [6].

Návar Inconelu 625

V případě vzorku z oblasti návaru Inconelu 625 nebyly zjištěné hodnoty porovnávány s hodnotami uvedenými v materiálovém listu, jelikož by toto porovnání nemělo vypovídající hodnotu (porovnání materiálu ve formě návaru a materiálu ve formě drátu, tyče či plochého výrobku v základním žíhaném stavu nelze). Pro porovnání byly použity hodnoty taktéž navařeného materiálu Inconelu 625, které byly převzaty z odborného článku (*ECA of Pipeline With Girth Weld Strength Mis-Matching Subjected to Large Strain*), který řešil podobnou problematiku. Na obr. 38 je porovnání mechanických vlastností Inconelu 625 testovaného vzorku s hodnotami uvedenými v článku [41].

Při porovnání hodnot získaných pomocí zkoušky tahem s hodnotami uvedenými v odborném článku lze říci, že hodnoty meze pevnosti a meze kluzu jsou téměř totožné. Jediný rozdíl se nachází u porovnání hodnot tažnosti. Tento rozdíl mohl být způsoben např. rozdílným zvolením základní délky L_0 zkušebního vzorku uvedeného v článku.

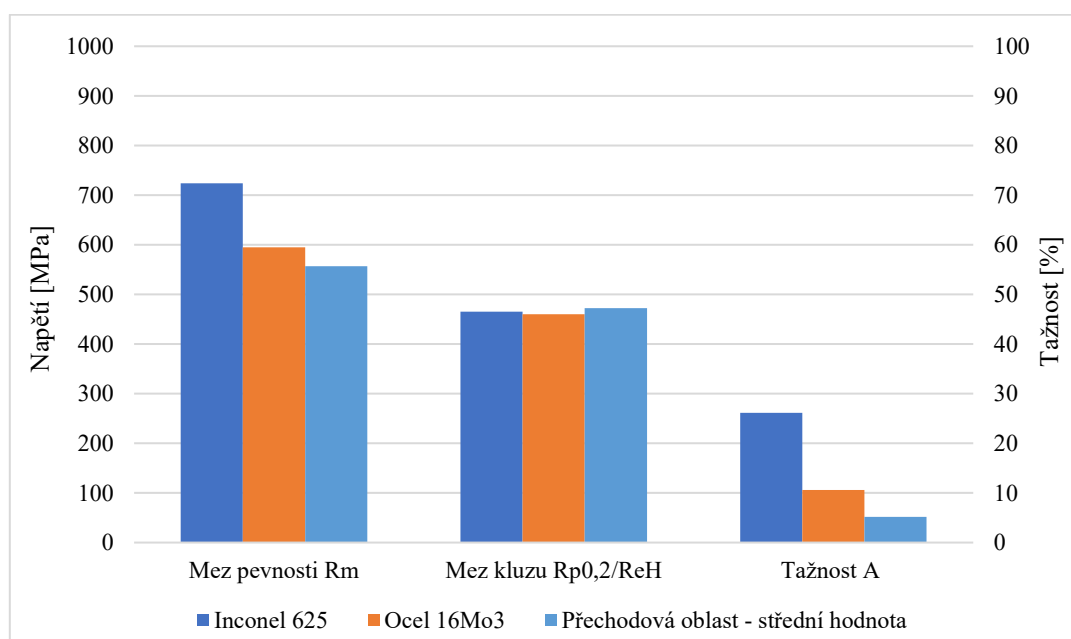


Obr. 38 Porovnání mechanických vlastností Inconelu z experimentu a z literatury [41].

Lze také porovnat mechanické vlastnosti, jednotlivých zkoumaných oblastí (viz obr. 38). Z tohoto porovnání je patrné, že výsledky korespondují s údaji uvedenými v literatuře

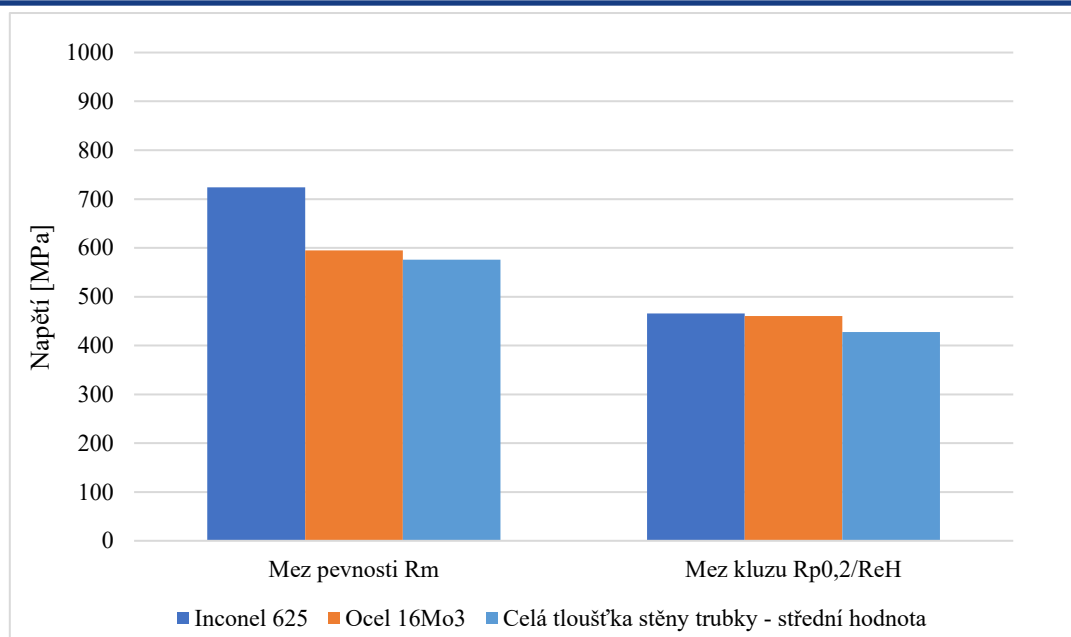
(kap. 1.1.2 a kap. 1.1.3), tedy mez pevnosti Inconelu 625 je vyšší než u oceli 16Mo3, mez kluzu je téměř totožná u obou materiálů a tažnost Inconelu 625 je taktéž vyšší než u oceli 16Mo3. Pro grafickou závislost na obr. 39 byly použity průměrné hodnoty ze tří vzorků z přechodové oblasti mezi materiály.

Hodnota tažnosti a meze pevnosti v přechodové oblasti je nejnižší z uvedených oblastí. Může to být způsobeno např. svařem, který se v těchto vzorcích nacházel. Teorie svařování uvádí, že v blízkém okolí svaru (tepelně ovlivněné oblasti) dochází ke zhoršování mechanických vlastností. Snižuje se hodnota tažnosti i meze pevnosti materiálu, zatímco hodnota tvrdosti a síla potřebná pro vytvoření plastické deformace narůstá. Tento jev se často vyskytuje i v praxi, kdy nedojde k poškození (prasknutí) v místě svaru, ale v oblasti okolo svaru, tedy v tepelně ovlivněné oblasti.



Obr. 39 Porovnání mechanických vlastností jednotlivých oblastí trubky.

Jako poslední je znázorněno porovnání mechanických vlastností základních materiálů (viz obr. 40), ze kterých se trubka skládá, tedy oceli 16Mo3 a Inconelu 625 (zjištěné hodnoty) se střední hodnotou vzorků s návarem (zahrnují celou tloušťku stěny trubky, ve které se nachází oba základní materiály společně s přechodovou oblastí). V rámci tohoto porovnání byly řešeny pouze hodnoty meze kluzu a meze pevnosti. Hodnoty tažnosti byly vynechány, protože by docházelo k porovnávání dvou homogenních materiálů s kompozitním materiálem a bez dalšího zkoumání (např. přesné uvedení tlouštěk jednotlivých vrstev, kompletní materiálový rozbor vzorku) by hodnoty neměly vypovídající hodnotu.



Obr. 40 Porovnání mechanických vlastností oceli 16Mo3, návaru Inconelu 625 a zkušební vzorku s návarem.

Z porovnání je patrné, že průměrné hodnoty vzorků z celé tloušťky stěny trubky nedosahují takových hodnot jako ostatní homogenní vzorky (Ocel 16Mo3, Inconel 625). Pokles hodnot by mohl být způsoben např. odlišným šířením trhliny v průběhu zkoušky u vzorků obsahujících celou tloušťku stěny trubky nebo také tím, že odebírané homogenní vzorky obsahovaly pouze části daných oblastí (návar Inconelu 625 a základní materiál trubky 16Mo3) a oblasti jako celky tudíž mohly vykazovat jiné mechanické vlastnosti.

2.2 Hodnocení lomové plochy po zkoušce tahem

Po provedené zkoušce tahem bylo přistoupeno u některých vzorků k hodnocení lomové plochy. Pro hodnocení lomové plochy byly použity čtyři vzorky a hodnocení bylo provedeno pomocí elektronového mikroskopu (kap. 2.2.1).

2.2.1 Zkušební zařízení

Pro hodnocení lomové plochy byl použit rastrovací elektronový mikroskop REM Tescan VEGA 5135 (viz obr. 41). Jedná se o standardní rastrovací elektronový mikroskop, který pracuje se zvětšením až 50 000. Pokud je mikroskop vybaven X-Ray mikroanalyzátorem Noran Six/300 (VLSTD), lze s ním provádět také analýzu chemického složení z velmi malého objemu $3 \mu\text{m}^3$ [42].



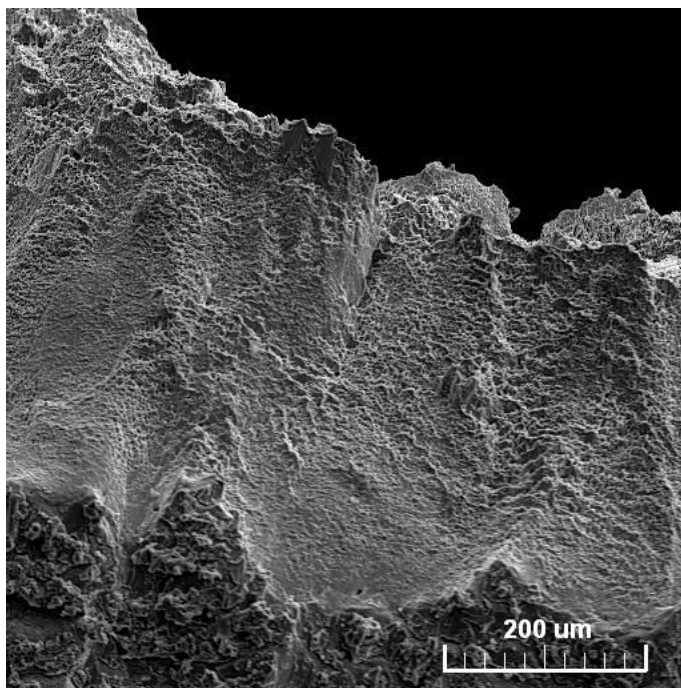
Obr. 41 Elektronový mikroskop REM Tescan VEGA 5135.

2.2.2 Hodnocení lomové plochy

Jak bylo zmíněno v úvodu kap. 2.2, pro hodnocení lomové plochy byly použity čtyři zkušební vzorky. Jednalo se o vzorky odebrané z jednotlivých vrstev původní trubky. První vzorek byl z oblasti návaru Inconelu 625, druhý z oblasti základního materiálu trubky 16Mo3, třetí a čtvrtý z přechodové oblasti mezi materiály.

Návar Inconelu 625

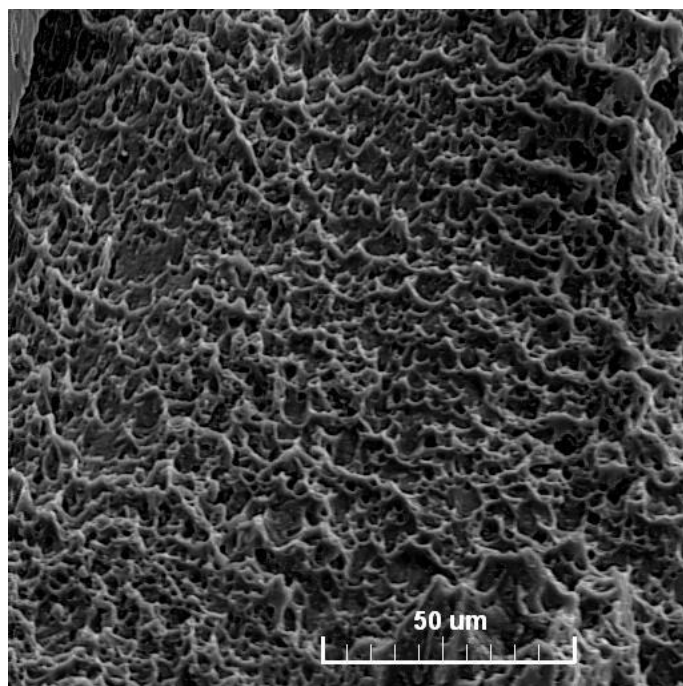
Nejprve byl proveden tzv. přehledový snímek za relativního zvětšení 200x (viz obr. 42). Již při takto malém zvětšení je možné vidět oblasti tvárného porušení materiálu. Při porovnání tvárného a štěpného porušení lze říci, že tvárné porušení vyžaduje oproti štěpnému výrazně větší energii.



Obr. 42 Přehledový snímek návaru Inconelu 625 (200x).

V oblastech porušení došlo k nukleaci (vzniku), růstu a poté koalescenci (spojení) mikroductin (poruch). Ke vzniku mikroductin obvykle dochází na částicích sekundární fáze, která se nachází v základní matici a může se jednat např. o vměstky, karbidy nebo precipitáty. Tyto částice bývají ve většině případů méně houževnaté než základní matrice. Pokud tedy dojde k výraznějšímu toku materiálu (např. při zkoušce tahem), začnou vznikat mikroductiny a postupně se zahájí i jejich růst.

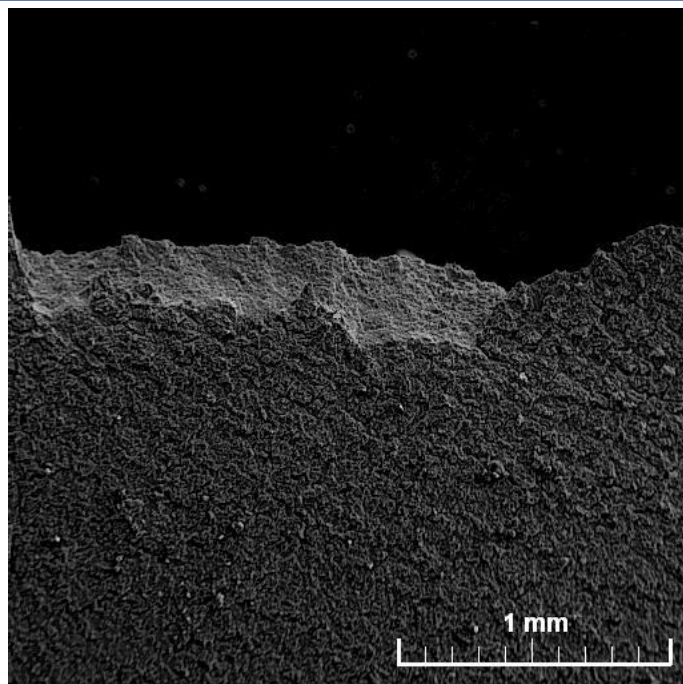
Na obr. 43 jsou patrné tvárné můstky matrice, které se nachází mezi jednotlivými dutinami. Tyto můstky se postupně zužují, dochází k jejich zaškrcování a v závěru dojde k jejich 100% kontrakci (smrštění). Jednotlivé vzniklé dutiny se propojují a společně vytvářejí konečný transkrystalický tvárný lom, který lze pozorovat makroskopicky. Velikost mezer mezi zaškrcenými můstky se pohybuje v jednotkách μm (v tomto případě 2 μm až 8 μm). Na obr. 43 je vyobrazen detail vzniklého transkrystalického tvárního lomu zkušebního vzorku při relativním zvětšení 1 000x.



Obr. 43 Detail transkrystalického tvárního lomu zkušebního vzorku – návar Inconel (1 000x).

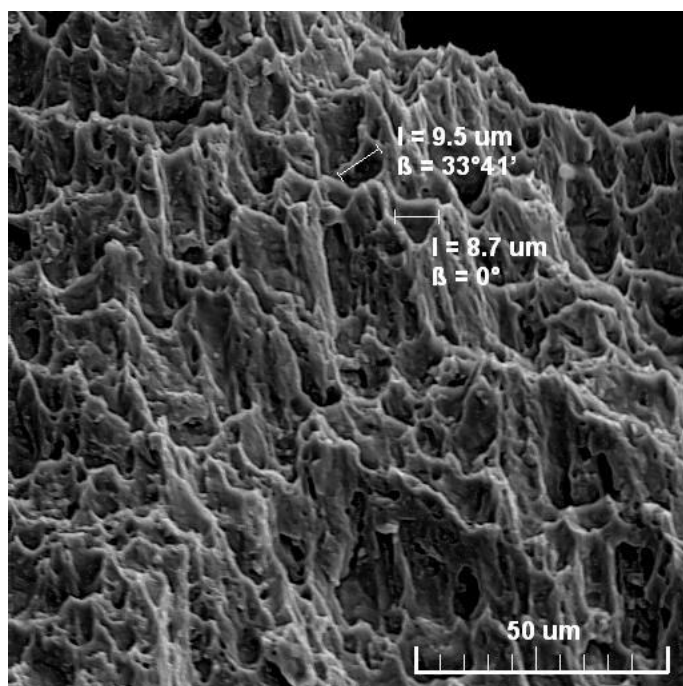
Základní materiál trubky 16Mo3

Stejně jako u předchozího uvedeného vzorku i zde byl nejprve proveden přehledový snímek, tentokrát s relativním zvětšením 50x (viz obr. 44). Z tohoto snímku je patrné, že se jedná o tvárný transkrystalický lom stejně jako u vzorku z návaru Inconelu 625.



Obr. 44 Přehledový snímek základního materiálu trubky 16Mo3 (50x).

Na obr. 45 je stejně jako v předchozím případě vyobrazen detail transkrystalického tvárného lomu zkušební vzorku při relativním zvětšení 1 000x. V rámci obr. 45 jsou znázorněny také velikosti některých vybraných dutin.



Obr. 45 Detail transkrystalického tvárného lomu zkušební vzorku – ocel 16Mo3 (1 000x).

Ze snímku na obr. 45 lze usoudit, že mechanismus vzniku lomu byl totožný se vzorkem z oblasti návaru Inconelu. Podstatný rozdíl se nachází pouze ve velikosti deformace lomu

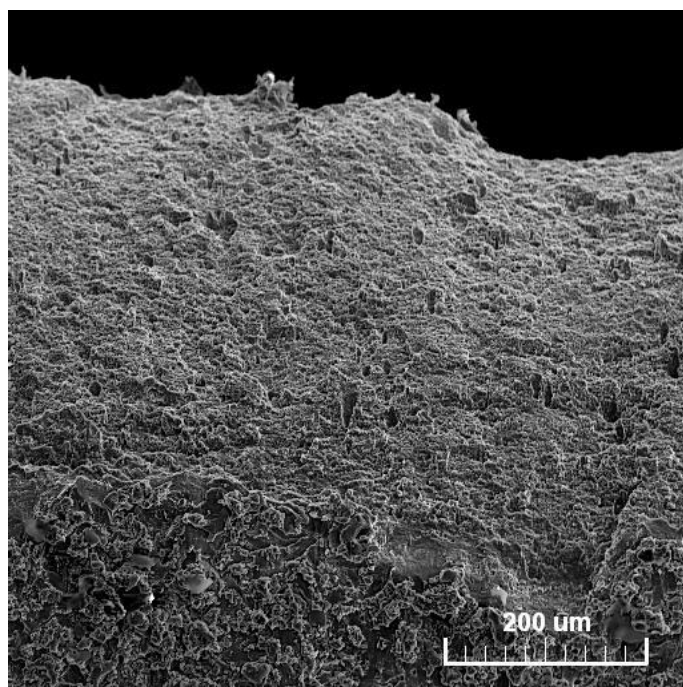
můstků mezi jednotlivými dutinami. Tento lom je mnohem výrazněji zdeformovaný ve směru působení napětí (které bylo v průběhu zkoušky tahem dominantní), než v případě lomu návaru Inconelu.

Přechodová oblast mezi materiály

Z přechodové oblasti mezi materiály byly hodnoceny dva vzorky (v kap. 2.1.3 označeny jako vzorek 2 a vzorek 3).

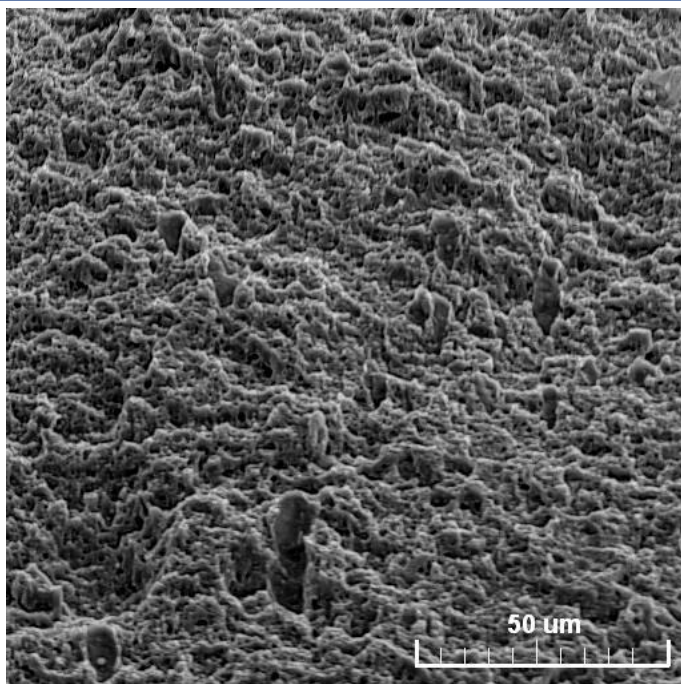
Vzorek 2

U vzorku 2 byl opět vyhotoven přehledový snímek s relativním zvětšením 200x (viz obr. 46). Z tohoto snímku lze usoudit, že lom má opět charakteristiky tvárného lomu, avšak oproti předchozím vzorkům z oblasti návaru Inconelu 625 a základního materiálu trubky 16Mo3 nedošlo při zkoušce tahem k tak výrazné plastické deformaci.



Obr. 46 Přehledový snímek 2. vzorku přechodové oblasti mezi materiály (200x).

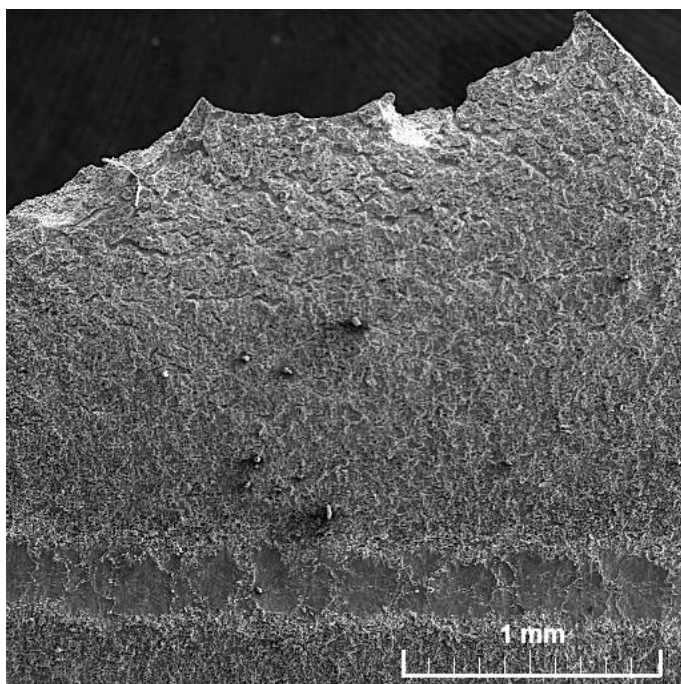
Na obr. 47 je detail lomu 2. vzorku přechodové oblasti mezi materiály při relativním zvětšení 1 000x. Zaškrcení můstků zde není tak výrazné a zároveň i velikosti vzniklých dutin (přibližně do 5 μm) nedosahují takových rozměrů, jako tomu bylo v předešlých případech.



Obr. 47 Detail lomu 2. vzorku z přechodové oblasti mezi materiály (1 000x).

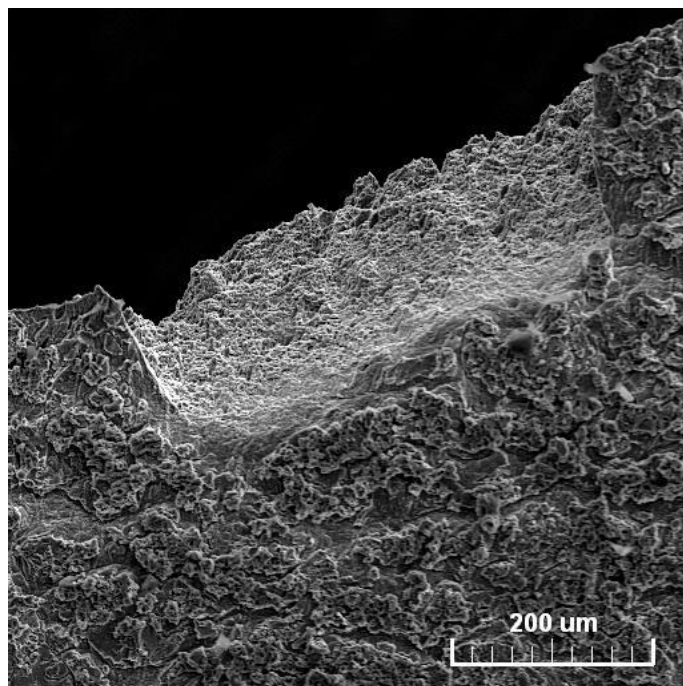
Vzorek 3

Posledním hodnoceným vzorkem byl vzorek označený jako vzorek 3 z přechodové oblasti mezi materiály. Stejně jako u předchozích vzorků byl i zde nejprve vyhotoven přehledový snímek s relativním zvětšením 50x. I při takto malém zvětšení je patrné výrazné vyštípnutí povrchové vrstvy materiálu (viz obr. 48).

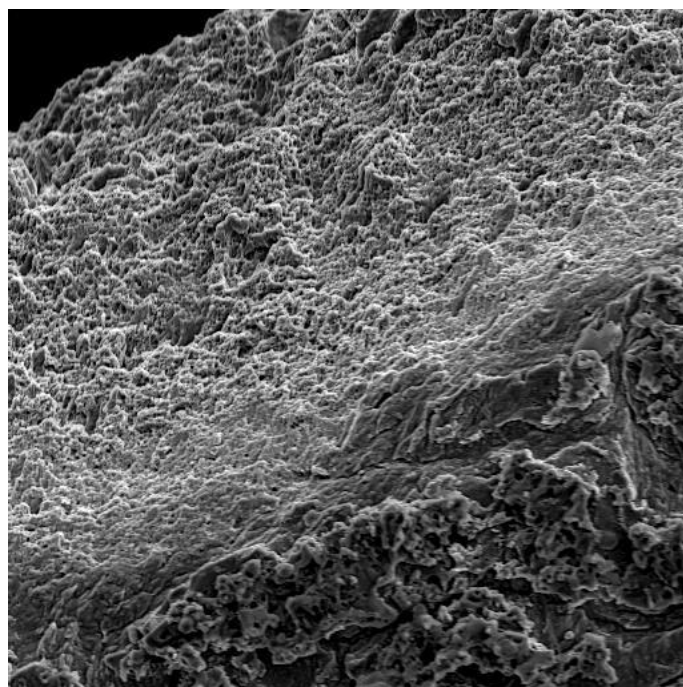


Obr. 48 Přehledový snímek 3. vzorku přechodové oblasti mezi materiály (50x).

Pro přehlednost byl zhotoven ještě jeden přehledový snímek při relativním zvětšení 200x (viz obr. 49), který doplňuje snímek pořízený při relativním zvětšení 500x (viz obr. 50). Na obou snímcích lze opět pozorovat tvárný lom. Je zde také patrná změna struktury tvárného lomu, kdy dochází k postupnému zjemňování struktury od vzdálenějšího k bližšímu okraji lomu.

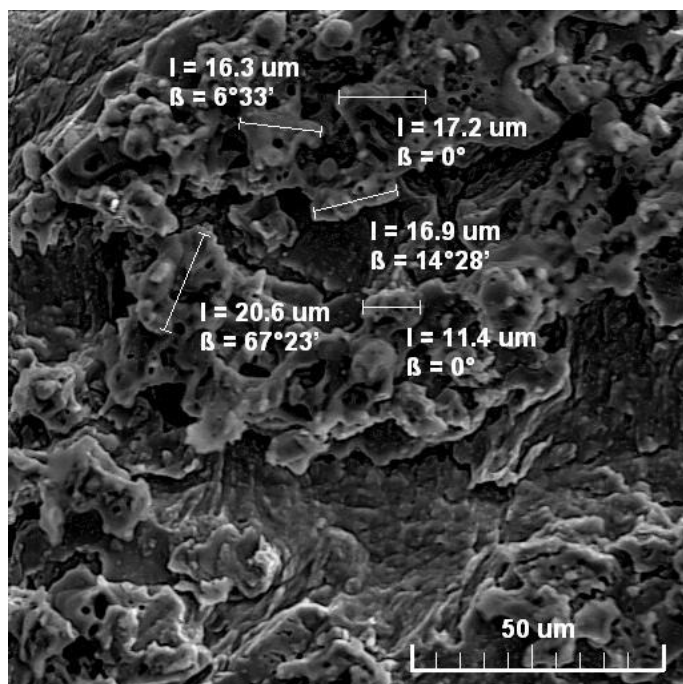


Obr. 49 Přehledový snímek 3. vzorku přechodové oblasti mezi materiály (200x).



Obr. 50 Detail lomu 3. vzorku přechodové oblasti mezi materiály (500x)

Taková změna struktury byla zřejmě způsobena šířením trhliny ve zkušebním vzorku. Trhlina se nejspíše šířila od vzdálenějšího okraje směrem k bližšímu. Jakmile došlo vlivem šíření trhliny k narušení významné části materiálu vzorku, nastalo okamžité oddělení zbylého materiálu a vznikla tak jemná struktura lomu i částečné odloupení povrchové vrstvy materiálu vzorku (viz obr. 50). Na obr. 50 lze vidět jemnější strukturu tvárného lomu, kde se nachází přechod z oblasti lomu na odloupenou povrchovou vrstvu materiálu. Tento povrch pod odloupenou povrchovou vrstvou materiálu je blíže zdokumentován na obr. 51. Na obr. 51 jsou znázorněny také velikosti některých vybraných částic. Měřené částice vznikly působením tepla pravděpodobně v průběhu navařování.



Obr. 51 Detail povrchu materiálu pod odloupenou povrchovou vrstvou (1 000x).

2.3 Zkouška tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení

Zkouška tvrdosti při nízkém zatížení byla provedena na dvou vzorcích, kde na prvním došlo k měření orientačních vtisků a tzv. vektoru tvrdosti. Na druhém vzorku byla měřena po celé ploše vzorku tzv. mapa tvrdosti.

2.3.1 Výroba vzorků

Výroba vzorků pro vyhodnocení tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení byla provedena pomocí několika strojních zařízení. Nejprve došlo k dělení materiálu pomocí kotouče od firmy STRUERS na metalografické pile LECO VIPER – 300M2 (viz obr. 52).



Obr. 52 Metalografická pila LECO VIPER – 300M2.

Dále byly jednotlivé vzorky lisovány za tepla do lisovací hmoty STRUERS ISOFAST na metalografickém lisu LECO PR-4X (viz obr. 53). Lisování probíhalo při tlaku lisu 2 600 kPa a teplotě 180 °C po dobu čtyř minut.



Obr. 53 Metalografický lis LECO PR-4X [43].

Po zalisování došlo k popisu jednotlivých vzorků a jejich povrch byl mechanicky broušen na poloautomatické brusce/leštičce LECO PX500 (viz obr. 54). Jako brusivo byly použity magnetické brusné kotouče LECO Cameo Platinum 0 až Platinum 4. Následovalo leštění pomocí brusného plátna LECO Brown Technotron a diamantové pasty LECO PREMIUM GRADE s velikostí diamantových částic 3 μm a 1 μm . Po vyleštění došlo k očištění vzorků v laboratorní ultrazvukové čističce POLSONIC SONIC – 2 (viz obr. 55).



Obr. 54 Bruska/leštička LECO PX500 [44].



Obr. 55 Čistička SONIC-2 [45].

2.3.2 Zkušební zařízení

Získání hodnot tvrdosti dle Vickerse bylo provedeno pomocí zařízení AMH55 od společnosti LECO (viz obr. 56). Jedná se o automatizované zařízení pro měření jak tvrdosti při nízkém zatížení, tak i mikrotvrdosti. Nejčastěji se využívá pro analýzu povrchu práškových kovů, vyhodnocení tvrdosti u svařenců, zjišťování tloušťky povrchových vrstev, např. po cementaci, nitridaci, kalení, boridaci nebo také pro zjištění oduhlíčení součástí. Toto zařízení pracuje v plně automatickém režimu, kdy automaticky dojde ke kalibraci pixelů, korekci stínování, zarovnání, zaostření na měřený povrch a následnému měření tvrdosti. Pomocí dotykového displeje lze nastavit také analýzu barevného mapování měřené plochy. Zároveň je také možné uživatelsky přizpůsobovat hlášení zjištěných dat (generování tabulek). Pohyby v jednotlivých směrech jsou uskutečňovány pomocí motorů, které jsou součástí všech os zařízení (X, Y, Z) [46, 47].



Obr. 56 Tvrdoměr AMH55 [47].

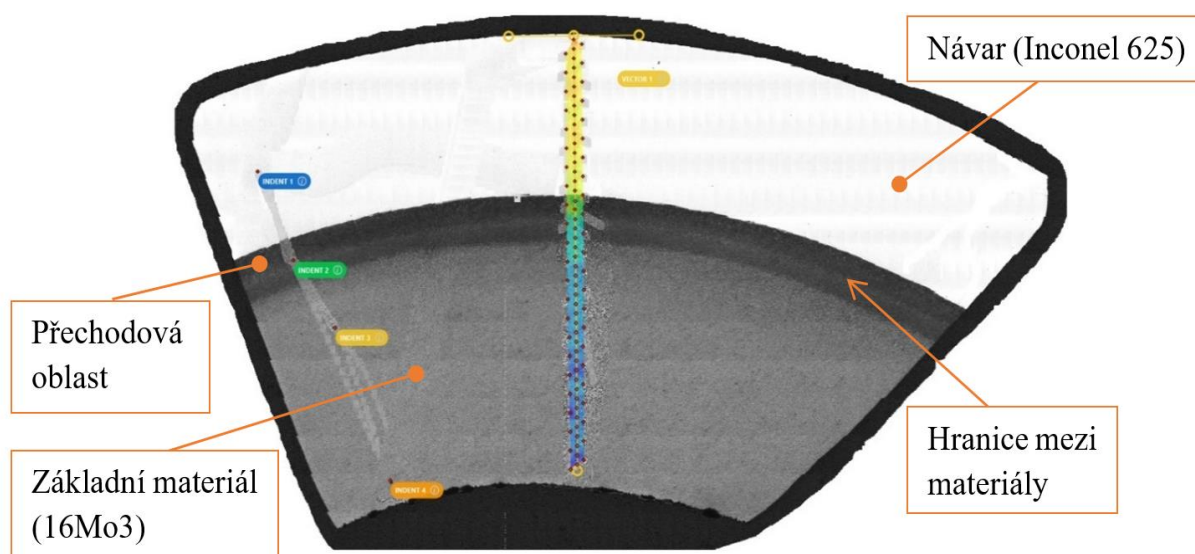
2.3.3 Zkoušení vzorků a zpracování získaných dat

Měření probíhalo v příčném řezu trubky, a to několika způsoby. Nejprve byly provedeny čtyři vtisky, které byly umístěny tak, aby se nacházely v nejdůležitějších oblastech z hlediska zkoušeného vzorku. Mezi tyto oblasti patřil návar Inconelu 625, dále přechodová oblast mezi navařeným a základním materiálem a na závěr základní materiál trubky 16Mo3 (viz obr. 57). Pro vtisky bylo použito zatížení 0,5 kgf a doba prodlevy při zatížení 13 s. Získané hodnoty jsou uvedeny v tab. 26 níže.

Tab. 26 Naměřené hodnoty samostatných vtisků.

Vtisk	Pozice vtisku	Naměřená hodnota HV 0,5
1	Návar	241
2	Přechodová oblast	200
3	Základní materiál	167
4	Základní materiál	165

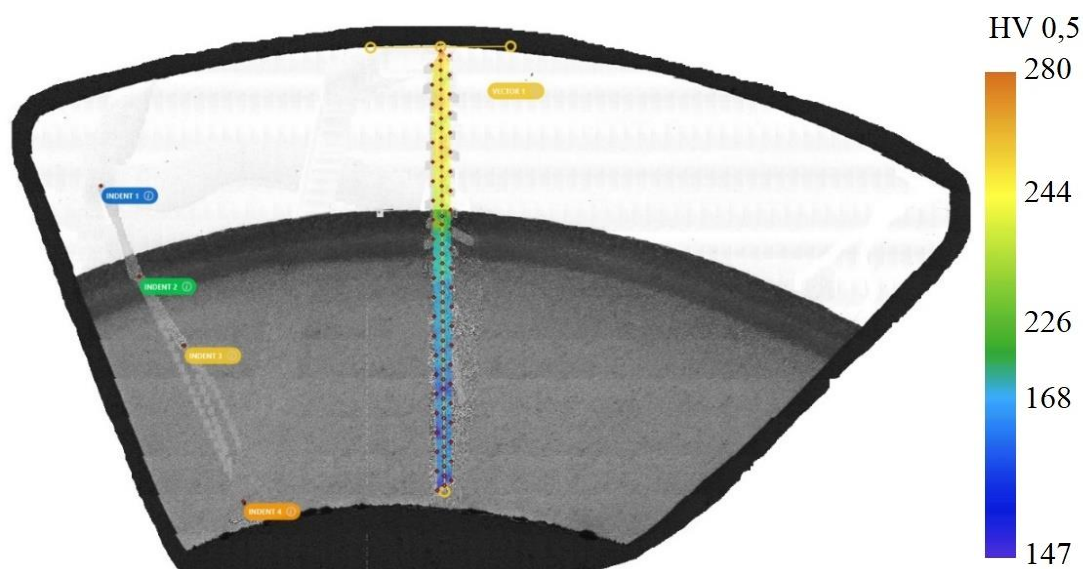
Na obr. 57 je také možné rozlišit jednotlivé materiály a přechodovou oblast mezi materiály.



Obr. 57 Samostatné vtisky, vektor tvrdosti vzorku.

Dalším způsobem měření tvrdosti bylo zhotovení vektoru tvrdosti (viz obr. 57), při němž se kolmo k povrchu vytvářely vtisky ve směru od velkého průměru vzorku (vnější průměr trubky) k malému průměru vzorku (vnitřní průměr trubky). Byly použity stejné podmínky zatížení jako u osamocených vtisků, a to zatížení 0,5 kgf s dobou prodlevy při zatížení 13 s. Vzdálenost prvního vtisku od okraje byla 120 μm a vzdálenosti jednotlivých vtisků od sebe byly určeny dle normy ČSN EN ISO 6507-1 jako trojnásobek průměrné délky úhlopříčky. Bylo

provedeno celkem 92 vtisků a docílilo se tak získání hodnot tvrdosti po celé tloušťce původní trubky. Získané hodnoty byly zaneseny do tab. (Příloha 1) společně s informací o vzdálenosti jednotlivých vtisků od okraje velkého průměru vzorku. V příloze 1 je tabulka s několika vybranými naměřenými hodnotami. Byla také vytvořena barevná škála, která přiřazuje každé barvě určitou hodnotu tvrdosti (viz obr. 58).



Obr. 58 Přiřazení barevné škály k hodnotám tvrdosti pro vektor.

Pomocí naměřených hodnot byla vyhodnocena průměrná tvrdost oblastí vzorku popsanych výše a došlo i k určení směrodatné odchylky. Vyhodnocení bylo provedeno dle vztahů 12 a 13 [48]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (12)$$

kde: $\bar{x}$ [-] – průměrná hodnota tvrdosti v oblasti,
 x_i [-] – naměřená hodnota tvrdosti jednotlivých vtisků,
 n [-] – počet vtisků v oblasti.

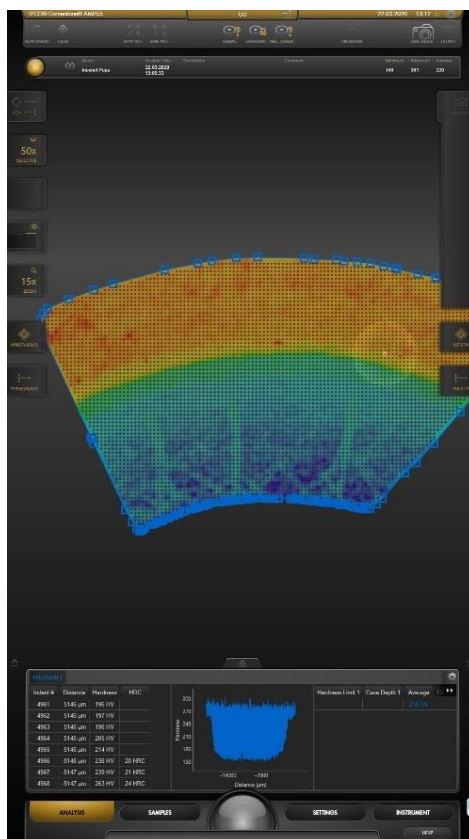
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (13)$$

kde: σ [-] – směrodatná odchylka,
 $\bar{x}$ [-] – průměrná hodnota tvrdosti v oblasti,
 x_i [-] – naměřená hodnota tvrdosti jednotlivých vtisků,
 n [-] – počet vtisků v oblasti.

V oblasti návaru Inconelu 625 se nacházelo 34 vtisků, průměrná hodnota tvrdosti byla stanovena jako 244 HV 0,5 a směrodatná odchylka činila 9,09 HV 0,5. Průměrná hodnota

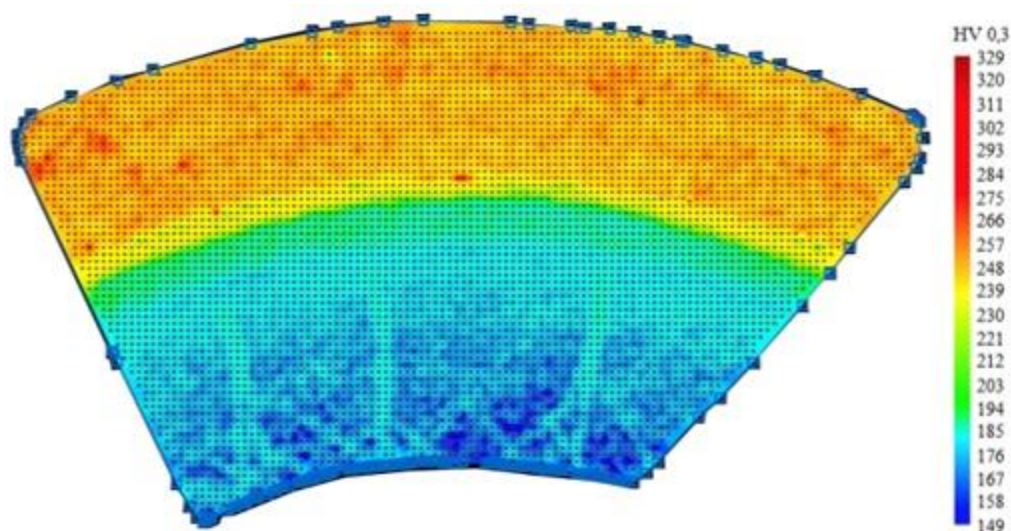
tvrdosti v přechodové oblasti byla určena pomocí 11 vtisků jako 199 HV 0,5 se směrodatnou odchylkou 16,73 HV 0,5. Na závěr došlo ke stanovení průměrné hodnoty tvrdosti v základním materiálu trubky 16Mo3. V oblasti základního materiálu se nacházelo 47 vtisků a jejich průměrná hodnota činila 164 HV 0,5. Směrodatná odchylka této oblasti dosahovala 8,75 HV 0,5.

V rámci měření tvrdosti při nízkém zatížení byla měřena i mapa tvrdosti přes celou plochu zkušebního vzorku. Pro vyhodnocení této mapy bylo použito zatížení 0,3 kgf a vzdálenosti mezi vtisky byly zvoleny jako 150 μm . Vzdálenosti vtisků od okraje vzorku byly 120 μm (dva a půl násobek průměrné délky úhlopříčky dle normy) a časová prodleva při zatížení činila pouze 10 s, a to z důvodu snížení velké časové náročnosti celého měření. Na obr. 59 je k nahlédnutí prostředí programu LECO Cornerstone, který byl použit pro měření tvrdosti, společně s měřenou mapou tvrdosti.



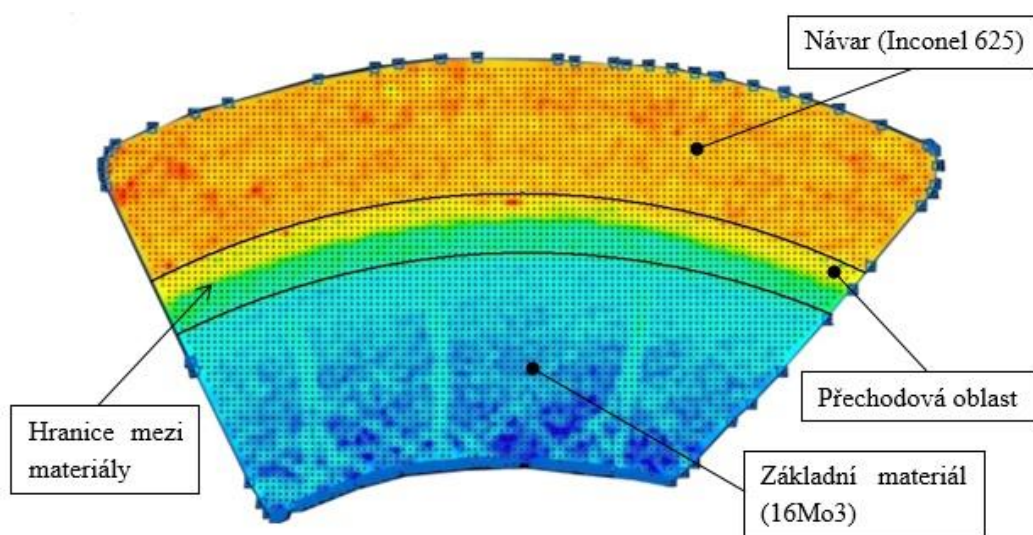
Obr. 59 Prostředí programu LECO Cornerstone.

V rámci měření bylo vyhotoveno celkem 6 148 vtisků. Opět byla vytvořena barevná škála, která přiřazuje každé barvě určitou hodnotu tvrdosti (viz obr. 60).



Obr. 60 Mapa tvrdosti a přiřazená barevná škála.

Na obr. 61 lze, stejně jako u vektoru tvrdosti, rozlišit jednotlivé materiály, přechodovou oblast a hranici mezi materiály. Byla také určena průměrná hodnota tvrdosti a směrodatná odchylka jednotlivých oblastí dle vztahů 2.1 a 2.2. V oblasti návaru Inconelu 625 se nacházelo 2 631 vtisků a průměrná hodnota tvrdosti zde činila 268 HV 0,3 se směrodatnou odchylkou 8,69 HV 0,3. Přechodová oblast obsahovala 972 vtisků, průměrná tvrdost zde byla určena jako 211 HV 0,3 se směrodatnou odchylkou 17,24 HV 0,3. Jako poslední byla vyhodnocena oblast základního materiálu 16Mo3, ve které se vyskytovalo 2 545 vtisků s průměrnou hodnotou tvrdosti 172 HV 0,3 a směrodatnou odchylkou 7,80 HV 0,3.

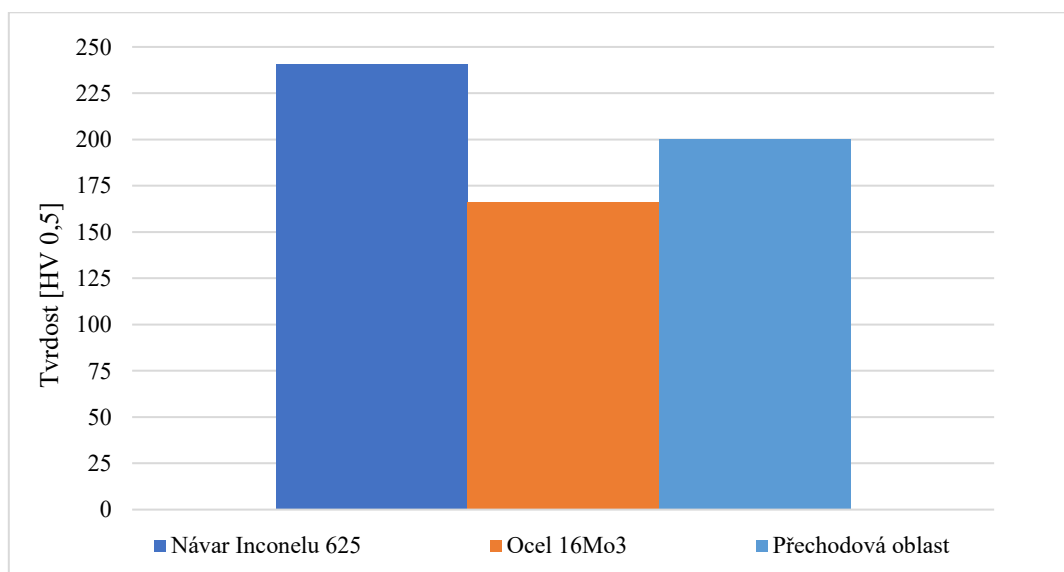


Obr. 61 Popis oblastí zkoušeného vzorku.

2.3.4 Zhodnocení dosažených výsledků

V podkapitole 2.3.4 je řešeno zhodnocení a porovnání výsledků, získaných zkouškami tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení (viz kap. 2.3.3). Při tvorbě grafických závislostí pro porovnání dosažených výsledků byly použity průměrné hodnoty ze všech provedených vtisků v daných oblastech dle vztahu (2.1).

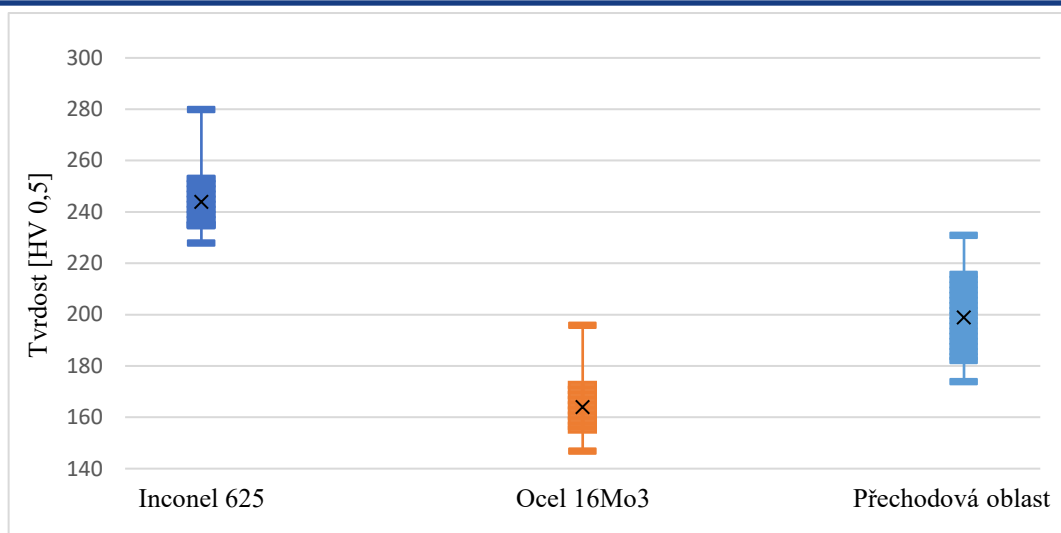
Nejprve došlo k porovnání získaných hodnot tvrdosti u samostatných vtisků (viz tab. 26). Tato grafická závislost (obr. 62) není zcela tvořena průměrnými hodnotami z měřených oblastí, jako je tomu u ostatních grafických závislostí, jelikož v oblastech návaru Inconelu 625 a v přechodové oblasti mezi materiály bylo provedeno zkoušení pouze po jednom vtisku.



Obr. 62 Porovnání hodnot samostatných vtisků.

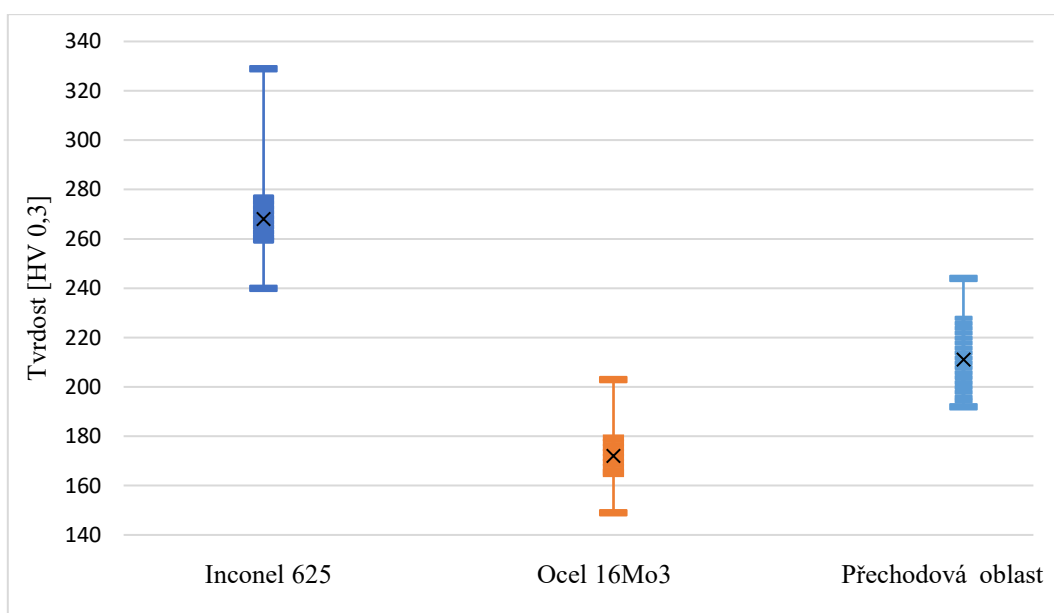
Již z této první grafické závislosti je zřejmé, že získané výsledky jsou v souladu s tím, co je uvedeno v teoretické části práce (kap. 1.1.2 a kap. 1.1.3). Tedy, že tvrdost Inconelu 625 je vyšší než tvrdost oceli 16Mo3. Z obr. 62 je taktéž patrné, že tvrdost v přechodové oblasti mezi materiály lze považovat za kombinaci obou uvedených materiálů, jelikož se její tvrdost nachází mezi hodnotami tvrdostí Inconelu 625 a oceli 16Mo3.

Jako další bylo provedeno porovnání získaných hodnot pomocí vektoru tvrdosti (viz obr. 63). Při tomto porovnání jsou v grafické závislosti uvedeny maximální a minimální naměřené hodnoty jednotlivých zkoušených oblastí. Dále jsou znázorněny průměrné hodnoty tvrdosti v jednotlivých oblastech (značeno $\times$), a také jejich směrodatná odchylka.



Obr. 63 Porovnání hodnot pro vektor tvrdosti.

Na závěr bylo také vyhotoveno porovnání získaných hodnot pomocí mapy tvrdosti (viz obr. 64). Grafická závislost pro mapu tvrdosti (obr. 64) byla vytvořena naprosto stejným způsobem jako předchozí grafická závislost pro vektor tvrdosti (obr. 63).



Obr. 64 Porovnání hodnot pro mapu tvrdosti.

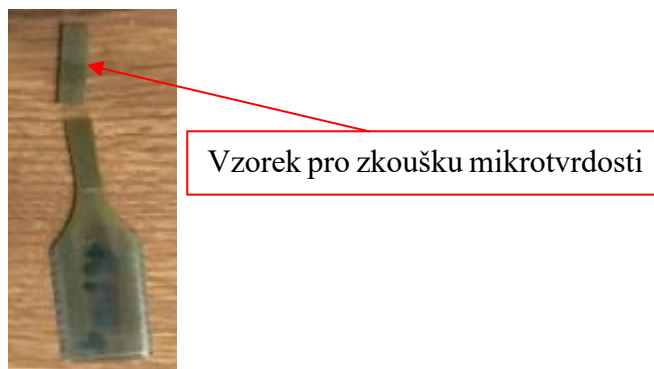
Při zhodnocení uvedených grafických závislostí (obr. 63 a obr. 64) je patrné, že získané hodnoty jsou taktéž v souladu s tím, co uvádí literatura (kap. 1.1.2 a kap. 1.1.3). Tvrdost oblasti návaru Inconelu 625 dosahuje vyšších hodnot, než v oblasti základního materiálu trubky 16Mo3 (přibližně o 35 %), a to u všech uvedených způsobů měření. Tento výsledek je téměř shodný s tím, co uvádí odborná literatura (tvrdost Inconelu 625 je přibližně o 37 % vyšší, než u oceli 16Mo3) [6, 9].

2.4 Zkouška mikrotvrlosti dle Vickerse

Měření mikrotvrlosti bylo provedeno na čtyřech vzorcích, které byly přetrženy při zkoušce tahem. První vzorek obsahoval materiál návaru Inconelu 625, druhý oceli 16Mo3 a třetí se čtvrtým přechodovou oblast mezi materiály.

2.4.1 Výroba vzorků

V případě zkoušky mikrotvrlosti dle Vickerse nebylo nutné odebírat nové vzorky pro testování přímo z původní trubky. Odběr vzorků (pro zkoušku mikrotvrlosti) byl proveden z již přetržených vzorků při zkoušce tahem (viz obr. 65).



Obr. 65 Odebraná část pro zkoušku mikrotvrlosti ze vzorku z tahové zkoušky.

2.4.2 Zkušební zařízení

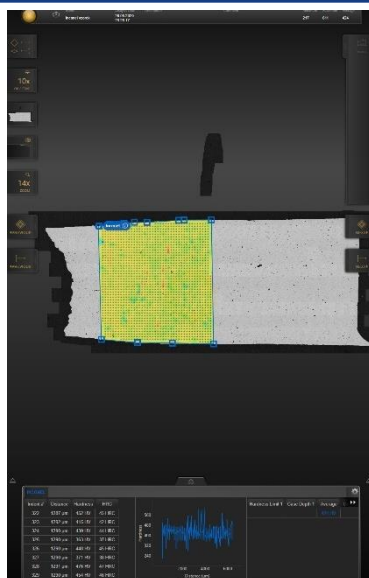
Jelikož se stále jedná o zkoušku tvrdosti/mikrotvrlosti dle Vickerse, bylo možné pro testování použití stejného měřicího zařízení jako v případě měření tvrdosti při nízkém zatížení (viz kap. 2.3). Jednalo se opět o zařízení AMH55 od společnosti LECO (viz kap. 2.3.2).

2.4.3 Zkoušení vzorků a zpracování získaných dat

Pro zkoušení byla použita stejná metodika umísťování vtisků jako při tvorbě mapy tvrdosti u zkoušky tvrdosti při nízkém zatížení (viz kap. 2.3.3). Z důvodu malé tloušťky zkušebních vzorků bylo použito zkušební zatížení 0,1 kgf s dobou prodlevy při zatížení 10 s. Pro všechny vzorky byla stanovena vzdálenost vtisků od okraje 120 μm a vzdálenost mezi jednotlivými vtisky 150 μm .

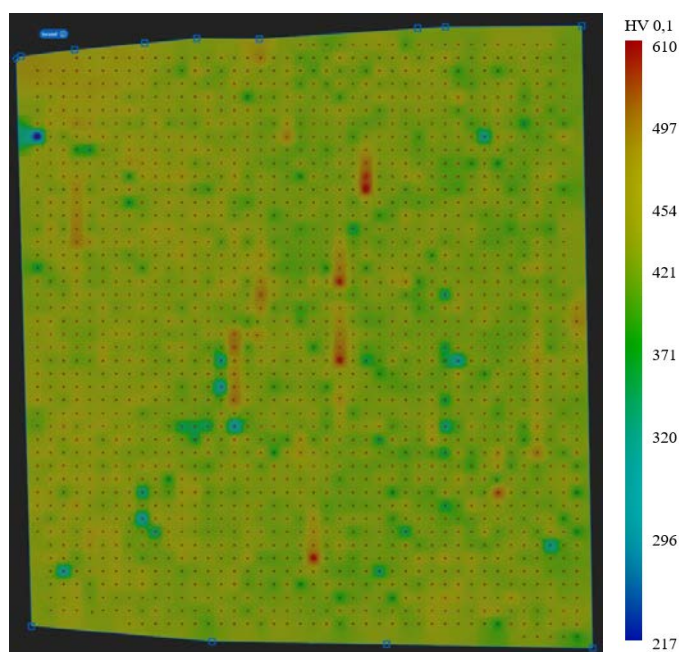
Návar Inconelu 625

Nejprve byl zkoušen vzorek z materiálu návaru Inconelu 625. Na obr. 66 je umístění mapy mikrotvrlosti na zkušebním vzorku a vytvořená mapa mikrotvrlosti v prostředí programu LECO Cornerstone.



Obr. 66 Mapa tvrdosti vzorku návaru Inconelu 625 – Cornerstone.

V rámci měření bylo provedeno celkem 1 843 vtisků. Na obr. 67 je detail mapy mikrotvrlosti pro tento vzorek společně s vytvořenou barevnou škálou, která přiřazuje každé hodnotě tvrdosti určitou barvu.



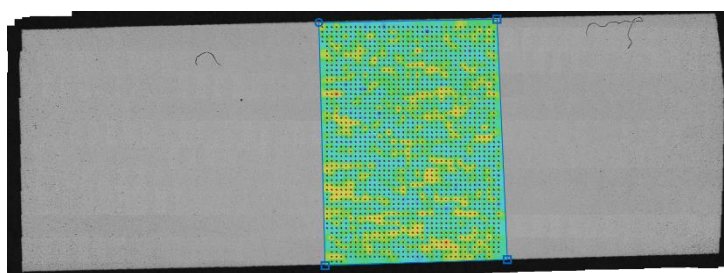
Obr. 67 Mapa mikrotvrlosti návaru Inconelu 625 a přiřazená barevná škála.

Stejně jako v případě vyhodnocení tvrdosti při nízkém zatížení, byla i zde určena pomocí vztahů (2.1) a (2.2) průměrná hodnota mikrotvrlosti zkoumané oblasti a směrodatná odchylka. Průměrná hodnota mikrotvrlosti vzorku z materiálu Inconelu 625 činila 424 HV 0,1 se směrodatnou odchylkou 28 HV 0,1. Díky barevnému vyobrazení lze vidět oblasti, ve kterých naměřená hodnota mikrotvrlosti dosahuje mnohem vyšších (cca 600 HV 0,1) nebo naopak

nižších (cca 300 HV 0,1) hodnot, než je tomu ve zbytku mapy mikrotvrdosti. Tyto výkyvy hodnot mohly způsobit např. vměstky či různé nečistoty v materiálu, které se do oblasti návaru dostaly v průběhu svařovacího procesu. Avšak pro přesné určení důvodu výskytu těchto výkyvů hodnot by bylo nutné provedení metalografického rozboru vzorku, který nebyl v rámci tohoto vzorku uskutečněn.

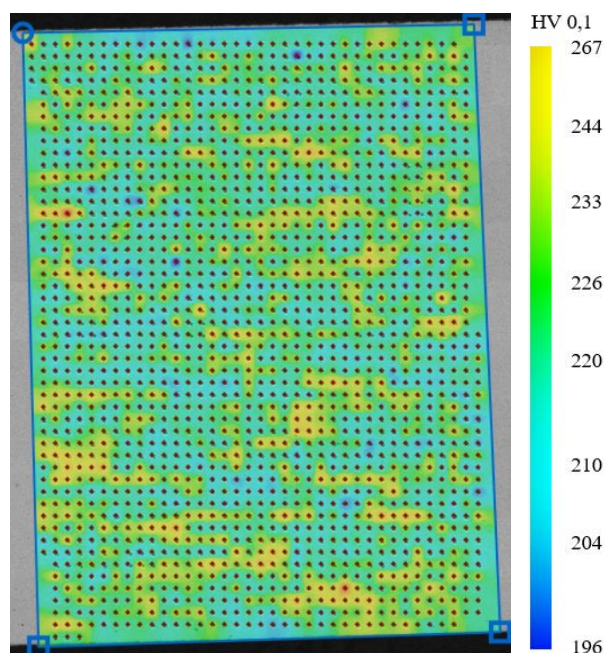
Základní materiál trubky 16Mo3

Jako další bylo provedeno zkoušení vzorku z materiálu oceli 16Mo3. Na obr. 68 je vytvořená mapa mikrotvrdosti a zobrazení jejího umístění na zkušební vzorku z materiálu oceli 16Mo3.



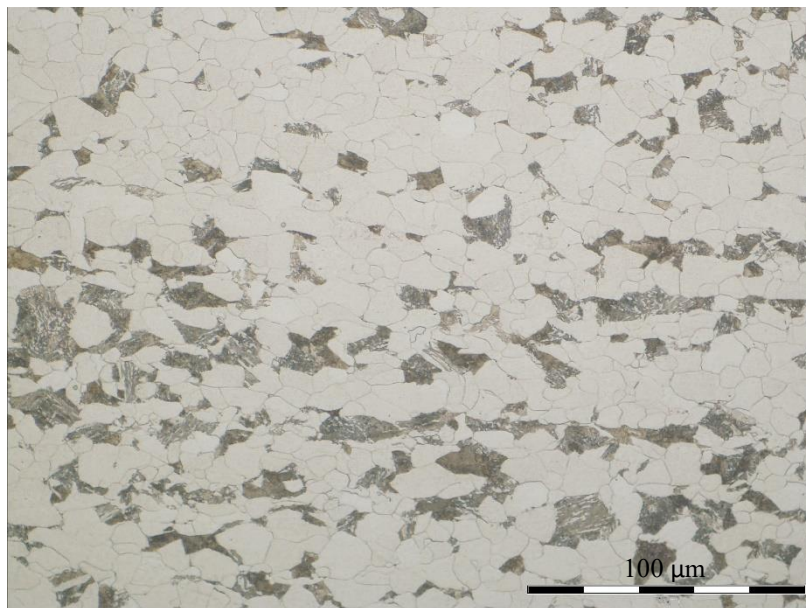
Obr. 68 Umístění mapy mikrotvrdosti vzorku oceli 16Mo3.

Na obr. 69 je detail mapy mikrotvrdosti, ke kterému byla přiřazena barevná škála. V rámci měření tohoto vzorku bylo vytvořeno celkem 1 787 vtisků (viz obr. 69) a i v tomto případě byla pomocí vztahů (2.1) a (2.2) určena střední hodnota mikrotvrdosti a směrodatná odchylka.



Obr. 69 Mapa mikrotvrdosti oceli 16Mo3 a přiřazená barevná škála.

Průměrná hodnota mikrotvrlosti v oblasti materiálu oceli 16Mo3 dosahovala 228 HV 0,1 se směrodatnou odchylkou 11 HV 0,1. Na tomto vzorku byl dále proveden i metalografický rozbor.

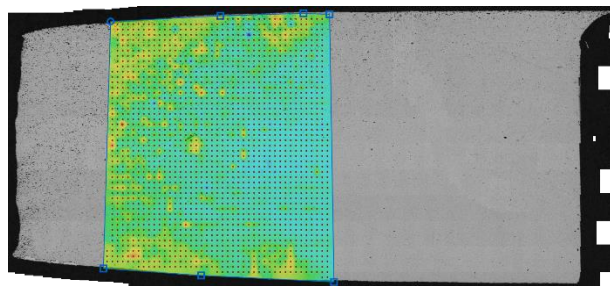


Obr. 70 Feriticko – perlitická struktura vzorku oceli 16Mo3.

Na obr. 70 je patrná feriticko – perlitická struktura vzorku s patrnou anizotropií, která vznikla při zkoušce tahem.

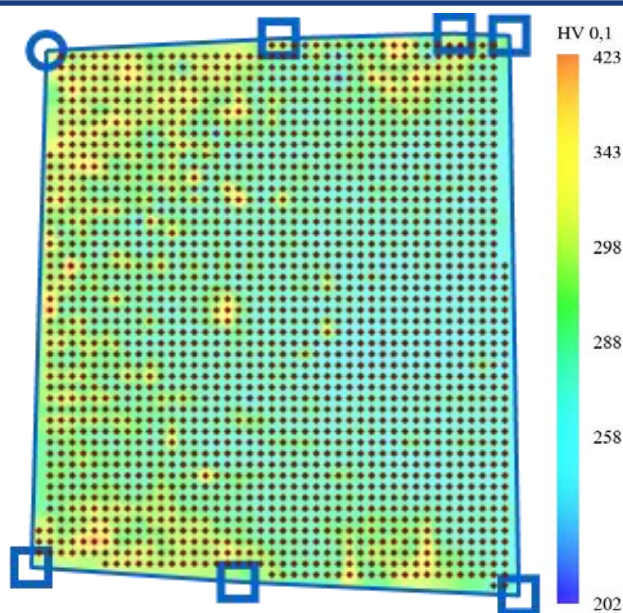
Přechodová oblast mezi materiály

Jako poslední byly zkoušeny dva vzorky z přechodové oblasti mezi materiály. Na obr. 71 lze pozorovat, stejně jako v případě vzorku z oceli 16Mo3, umístění mapy mikrotvrlosti na prvním zkušebním vzorku z přechodové oblasti.



Obr. 71 Umístění mapy mikrotvrlosti 1. vzorku z přechodové oblasti.

Na vzorku bylo provedeno celkem 1 989 vtisků a na obr. 72 je opět znázorněn detail mapy mikrotvrlosti s přiřazenou barevnou škálou.

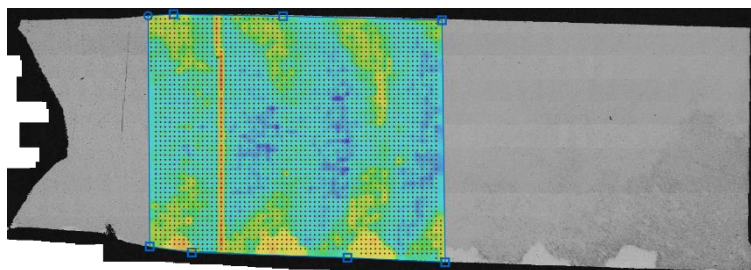


Obr. 72 Mapa mikrotvrlosti 1. vzorku z přechodové oblasti a přiřazená barevná škála.

V případě přechodové oblasti nelze uvést průměrnou hodnotu mikrotvrlosti, jelikož se jedná o oblast, kde došlo k promísení materiálu oceli 16Mo3 a navařovaného materiálu.

Z obr. 72 je patrné, že střed vzorku je tvořen materiálem oceli 16Mo3, ale dosahuje vyšších hodnot mikrotvrlosti než vzorek ze základního materiálu (cca 250 HV 0,1). Tento rozdíl je nejspíše způsoben tepelným ovlivněním struktury materiálu při výrobě vzorků pro zkoušku tahem. Hodnota mikrotvrlosti směrem k okraji roste, protože se zde již nachází promísený materiál oceli 16Mo3 a Inconelu 625. Okraje vzorku vykazují hodnoty mikrotvrlosti okolo 400 HV 0,1.

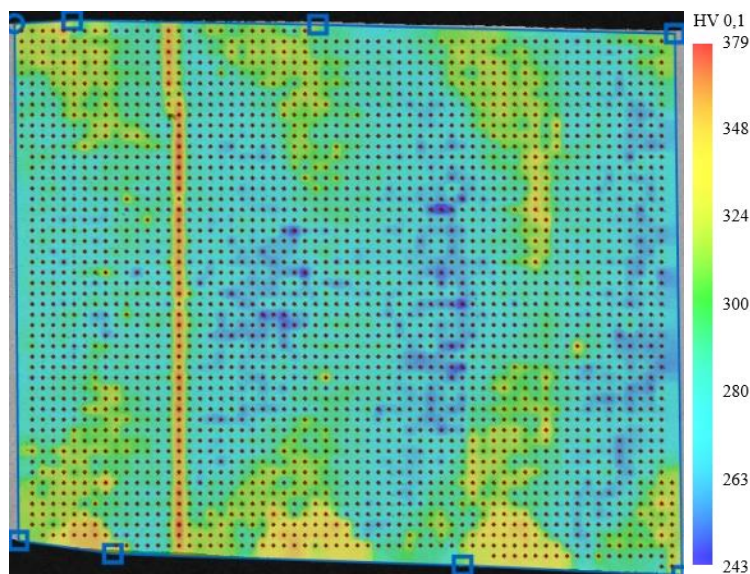
Jako poslední byl zkoušen druhý vzorek z přechodové oblasti mezi materiály. Tento vzorek obsahoval 3 046 vtisků. Na obr. 73 je stejně jako v předchozích případech znázorněno umístění mapy mikrotvrlosti na zkušebním vzorku.



Obr. 73 Umístění mapy mikrotvrlosti 2. vzorku z přechodové oblasti.

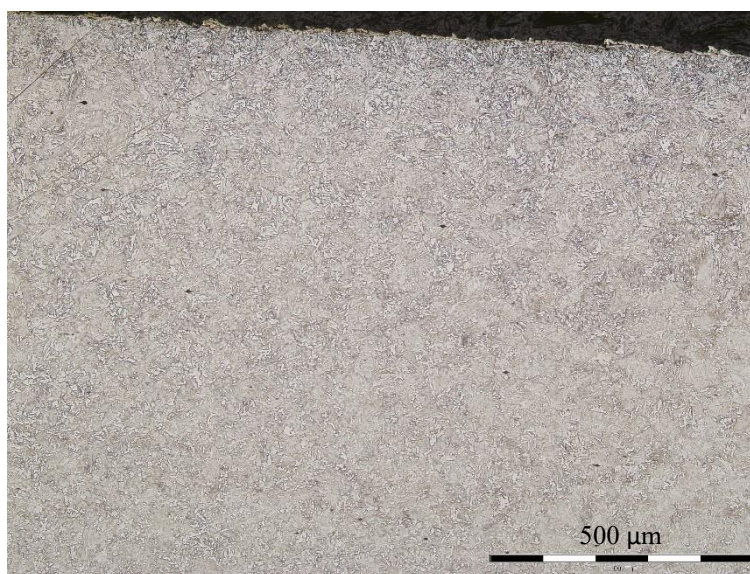
I v tomto případě je provedeno znázornění detailu mapy mikrotvrlosti s přiřazenou barevnou škálou (viz obr. 74). Jako v přechodovém případě vzorku z přechodové oblasti i ze stejného důvodu, není ani zde možné uvést průměrnou hodnotu mikrotvrlosti.

Na obr. 74 je zřejmé, že zkouška odhalila tři odlišné materiálové zóny. Uprostřed vzorku je patrná tmavě modrá oblast výskytu materiálu oceli 16Mo3 s hodnotami mikrotvrdosti okolo 250 HV 0,1. Stejně jako v případě předchozího vzorku se jedná o tepelně ovlivněnou strukturu. Na spodním okraji obr. 74 jsou viditelné menší žluté oblasti s mikrotvrdostí okolo 340 HV 0,1. V těchto oblastech se nachází pouze čistý materiál návaru Inconelu 625. Ve zbývajících oblastech světle modré až žluté barvy (cca 275 HV0,1 až 320 HV 0,1) došlo k promísení materiálu oceli 16Mo3 a Inconelu 625.



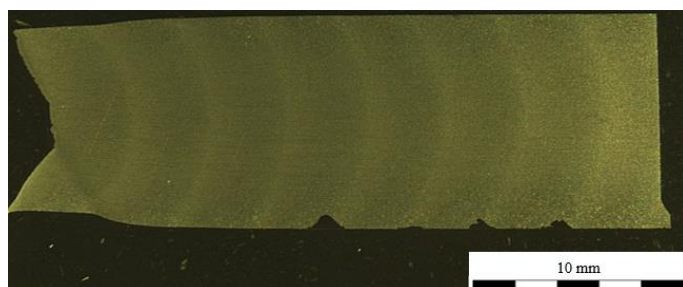
Obr. 74 Mapa mikrotvrdosti 2. vzorku z přechodové oblasti a přiřazená barevná škála.

Při pohledu na obr. 74 je v levé části patrná svislá „čára“, ve které jsou naměřeny mnohem vyšší hodnoty mikrotvrdosti než ve zbytku mapy. Právě z tohoto důvodu byl i na tomto vzorku proveden metalografický rozbor.



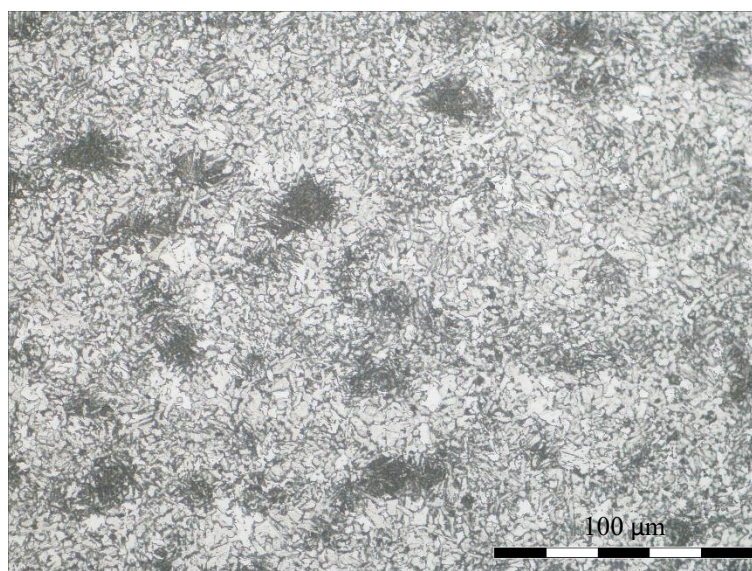
Obr. 75 Snímek oblasti výskytu „čáry“ s vyšší mikrotvrdostí.

Na obr. 75 je při relativním zvětšení 100x zobrazena oblast, ve které by se měla nacházet výše zmíněná „čára“. Bohužel z uvedeného metalografického snímku není zřejmé, co mohlo způsobit navýšení mikrotvrdosti. Jelikož se v mikrostruktuře nenachází žádné anomálie, které by navýšení mikrotvrdosti mohly způsobit, zůstává tato „čára“ i nadále neobjasněna. Na obr. 74 lze taktéž vidět postupnou změnu mikrotvrdosti směrem od středu vzorku k jeho okraji, a to ve formě zaoblených pruhů, které jsou více zřetelné na obr. 76.

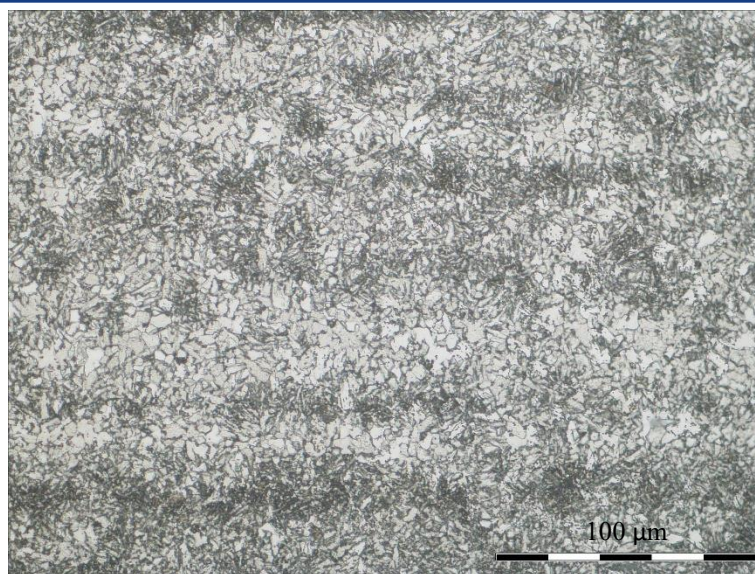


Obr. 76 Pruhy na zkušebním vzorku.

Zobrazené pruhy na obr. 76 vznikly nejspíše v průběhu navařování Inconelu 625 na trubku z oceli 16Mo3, kde každý pruh odpovídá jednomu průchodu svařovacího drátu. Náznak těchto pruhů lze najít i na prvním vzorku z přechodové oblasti na obr. 71 v pravé části mapy mikrotvrdosti. Na makrosnímku tohoto vzorku lze vidět světlé a tmavé pruhy, společně s oblastmi čistého Inconelu v jeho spodním okraji. Byly provedeny metalografické snímky zmíněného světlého i tmavého pruhu, a to při relativním zvětšení 500x (viz obr. 77 a obr. 78).



Obr. 77 Mikrostruktura světlého pruhu – 500x.

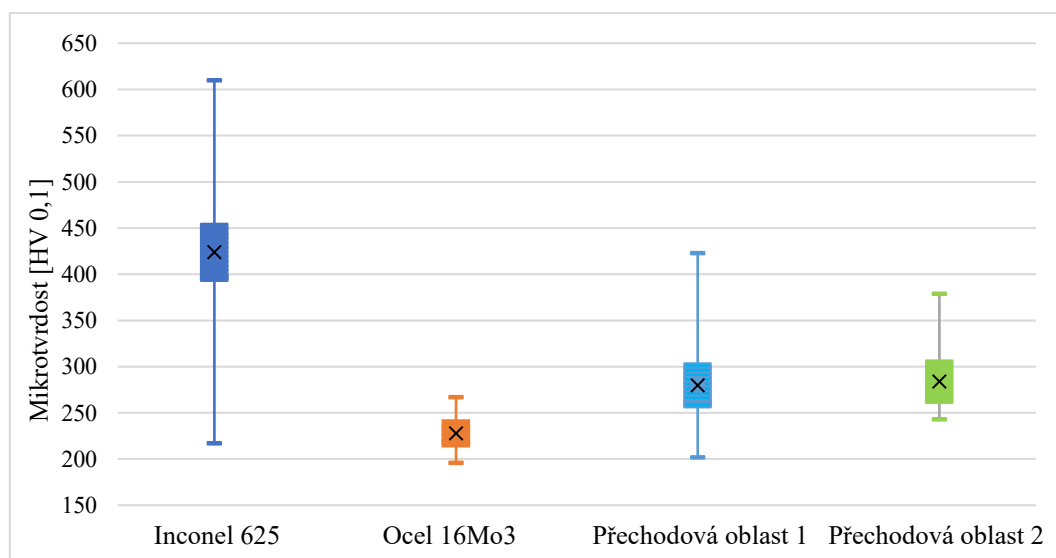


Obr. 78 Mikrostruktura tmavého pruhu – 500x.

Makrosnímek na obr. 76 potvrdil výsledky z měření mikrotvrdosti. Stejně tak i obr. 77 a obr. 78, na kterých je patrná struktura jemného martenzitu. Jemný martenzit ve struktuře potvrzuje výše zmíněnou teorii, že při výrobě vzorků pro zkoušku tahem došlo k tepelnému ovlivnění struktury.

2.4.4 Zhodnocení dosažených výsledků

V rámci této podkapitoly bylo provedeno porovnání dosažených výsledků všech zkoušených vzorků (viz kap. 2.4.3). Grafická závislost na obr. 79 byla sestrojena podobným způsobem jako grafické závislosti v kap. 2.3.4 (obr. 63 a obr. 64). Pro jednotlivé zkoušené vzorky byly vyneseny jejich maximální a minimální hodnoty mikrotvrdosti. Dále, z důvodu vizualizace, průměrné hodnoty mikrotvrdosti (značeno ×) a nakonec směrodatné odchylky.



Obr. 77 Porovnání průměrných hodnot map mikrotvrdosti pro jednotlivé vzorky.

Z grafické závislosti na obr. 77 je zřejmé, že mikrotvrdot vzorku z oblasti návaru Inconelu 625 je nejvyšší, zatímco mikrotvrdot vzorku oceli 16Mo3 je nejnižší. Vzorky z přechodové oblasti se svými hodnotami mikrotvrdoti řadí mezi hodnoty vzorků Inconelu 625 a oceli 16Mo3. Nepatrné rozdíly v naměřených hodnotách vzorků z přechodové oblasti jsou nejspíše způsobeny různým umístěním vzorků v původní navařené trubce. První vzorek se nacházel blíže ke středu původní trubky, což vysvětluje, proč se na vzorku nenachází žádná oblast čistého Inconelu 625, ale pouze oblast promísení materiálu Inconelu 625 s ocelí 16Mo3.

2.5 Měření drsnosti povrchu

Měření drsnosti (textury) povrchu bylo provedeno na stejných vzorcích jako předchozí zkouška tahem. Jednalo se opět o dva vzorky z přechodové oblasti mezi materiály, jeden vzorek z oblasti návaru Inconelu 625 a jeden vzorek z oblasti materiálu oceli 16Mo3.

2.5.1 Výroba vzorků

Pro měření drsnosti povrchu nebyla nutná výroba vzorků z původní trubky. Stejně jako v případě měření mikrotvrdoti byly pro měření použity přetržené vzorky při zkoušce tahem.

2.5.2 Měřicí zařízení

Měření drsnosti probíhalo na zařízení Talysurf CCI Lite od společnosti Taylor Hobson (viz obr. 78). Jedná se o korelační koherenční interferometr se softwarem Talymap Platinum. V tab. 27 jsou uvedeny měřicí parametry tohoto zařízení.



Obr. 78 Korelační koherenční interferometr Talysurf CCI Lite [49].

Tab. 27 Parametry měření drsnosti povrchu [50].

Typ snímače	-	optický
Rozsah	mm	2,2
Rozlišení	nm	0,1
Doba měření	s	5 – 40

2.5.3 Měření a hodnocení drsnosti povrchu

Měření a vyhodnocení naměřených dat probíhalo následovně. Nejprve byla získána měřená data hodnocené plochy a vyrovnání plochy dle zvolené oblasti. Následovalo odstranění tvarových úchylek pomocí polynomu pátého řádu a zahrnutí odpovídajícího spektra naměřených dat do analýzy, kdy software odstraní z hodnocených dat náhodné a dominantní vrcholy/prohlubně a tím zpřesní naměřené hodnoty parametrů (hodnota omezení 0,5 %). Dále byla provedena vizualizace 3D povrchu, zobrazení parametrů pro 3D povrch a extrahování profilu drsnosti na měřené délce 4,5 mm. Poté došlo k přiblížení profilu na vyhodnocovanou délku 4 mm – základní délka 0,8 mm, filtraci pomocí Gaussova filtru (cut-off 0,8 mm) pro získání profilu drsnosti a vlnitosti. Na závěr byly zobrazeny parametry profilu drsnosti.

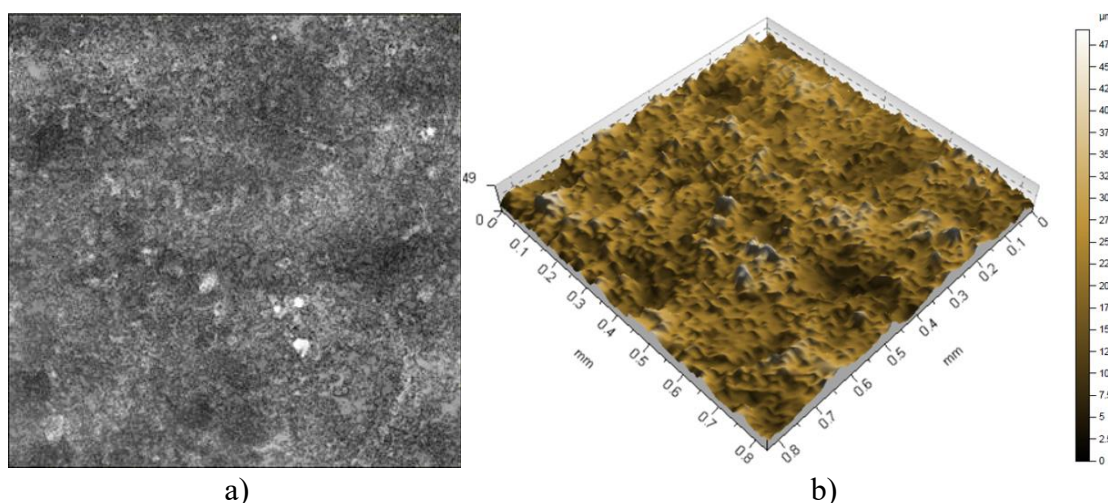
V rámci práce byly vyhodnoceny parametry S_a – aritmetický průměr posuzovaného povrchu, S_z – největší výška povrchu, R_a – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu a R_z – největší výška profilu. V rámci této práce nebyla vyhodnocena vlnitost povrchu. Měření probíhalo dle podmínek uvedených v tab. 28.

Tab. 28 Podmínky měření drsnosti povrchu.

Měřená plocha	mm	0,8 x 0,8
Počet měřených profilů	-	1 024
Základní délka	mm	0,8
Filtrace	mm	Gauss – 0,8

Návar Inconelu 625

Nejprve byla měřena drsnost povrchu na vzorku z oblasti návaru Inconelu 625. Na obr. 79a je měřený povrch a na obr. 79b je zobrazena 3D vizualizace měřeného povrchu.



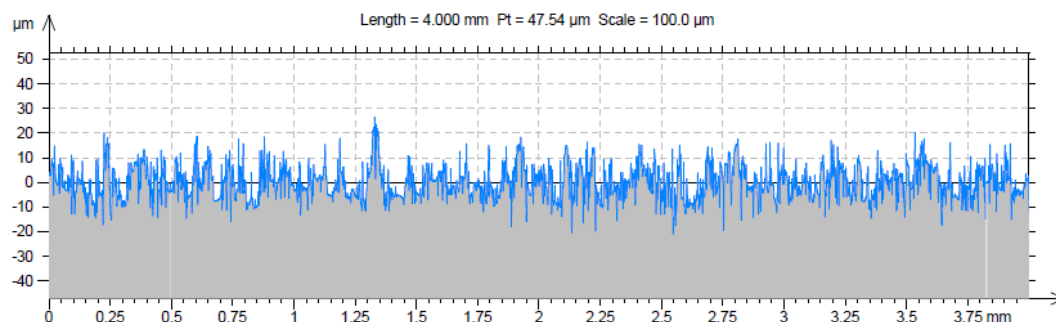
Obr. 79 Měřený povrch – Inconel 625.

a) snímek měřeného povrchu

b) 3D vizualizace měřeného povrchu

Z hodnot pro sestavení 3D vizualizace (obr. 80) byly určeny hodnoty parametrů Sa a Sz. Hodnota Sa byla vyhodnocena jako $6,58 \mu\text{m}$ a hodnota Sz $48,98 \mu\text{m}$.

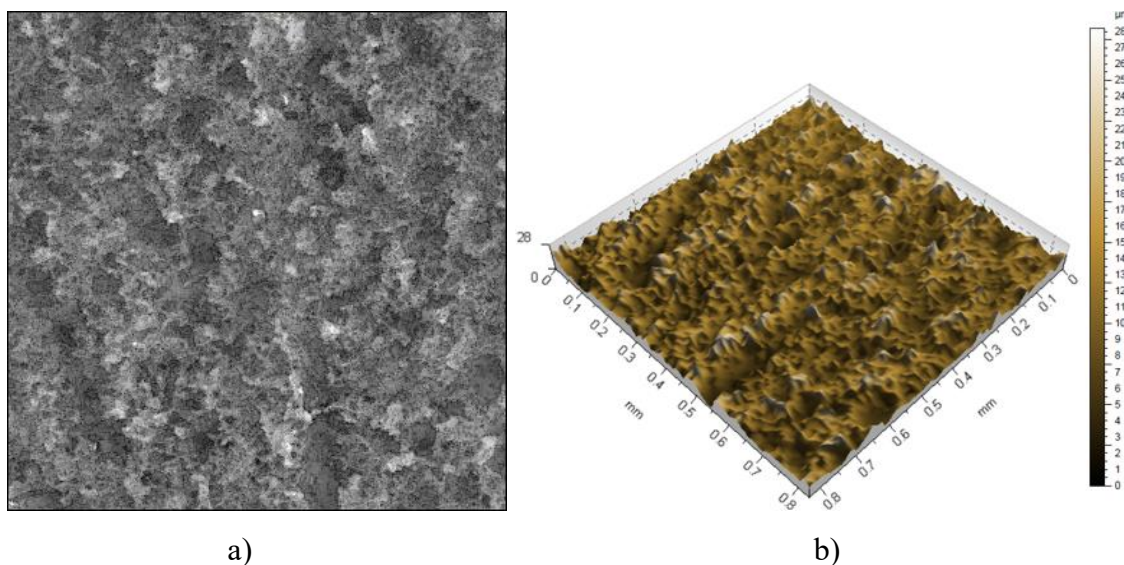
Dále je na obr. 80 vyobrazen profil drsnosti povrchu vzorku, pomocí kterého došlo k určení zbylých 2D parametrů Ra a Rz. V případě vzorku z Inconelu 625 byla určena hodnota Ra jako $4,97 \mu\text{m}$ a hodnota Rz $36,96 \mu\text{m}$.



Obr. 80 Profil drsnosti povrchu – Inconel 625.

Základní materiál trubky 16Mo3

Dalším měřeným vzorkem byl vzorek z oblasti základního materiálu oceli 16Mo3. Stejně jako v případě předchozího vzorku je na obr. 81a znázorněn měřený povrch a na obr. 81b 3D vizualizace měřeného povrchu.



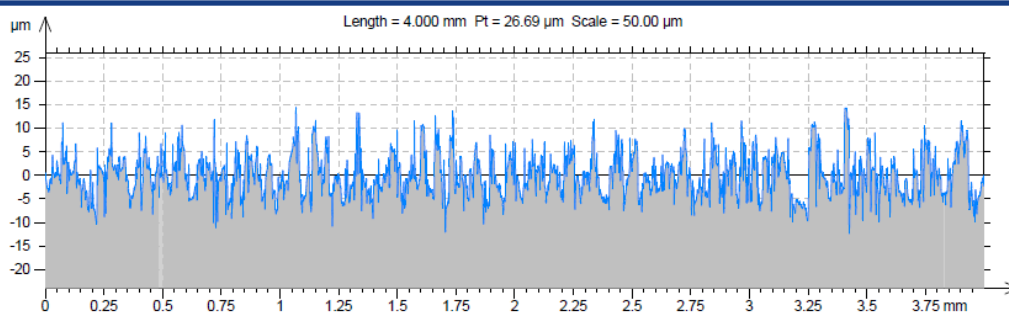
Obr. 81 Měřený povrch – ocel 16Mo3.

a) snímek měřeného povrchu

b) 3D vizualizace měřeného povrchu

Pomocí naměřených hodnot pro sestavení 3D vizualizace byly opět určeny parametry Sa a Sz. Parametr Sa dosahoval hodnoty $3,95 \mu\text{m}$ a parametr Sz $27,95 \mu\text{m}$.

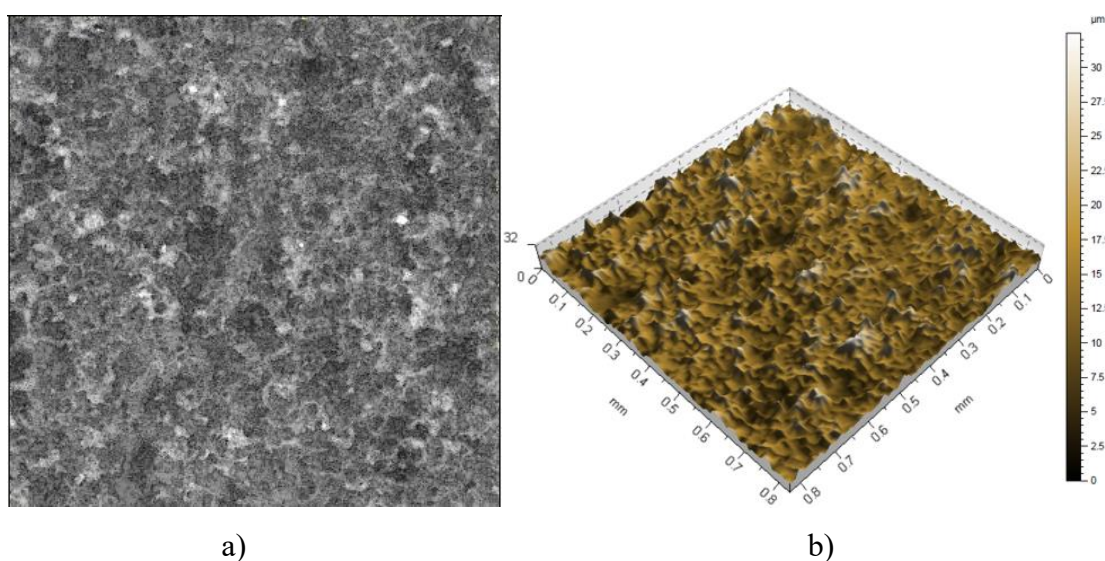
Na obr. 82 je profil drsnosti povrchu vzorku, ze kterého došlo opět k určení parametrů Ra a Rz. Hodnota parametru Ra byla určena jako $3,43 \mu\text{m}$ a parametru Rz $23,42 \mu\text{m}$.



Obr. 82 Profil drsnosti povrchu – Ocel 16Mo3.

Přechodová oblast mezi materiály

Jako další v pořadí byl měřen první vzorek z přechodové oblasti mezi materiály. Obr. 83a opět vyobrazuje měřený povrch a na obr. 83b je 3D vizualizace měřeného povrchu.



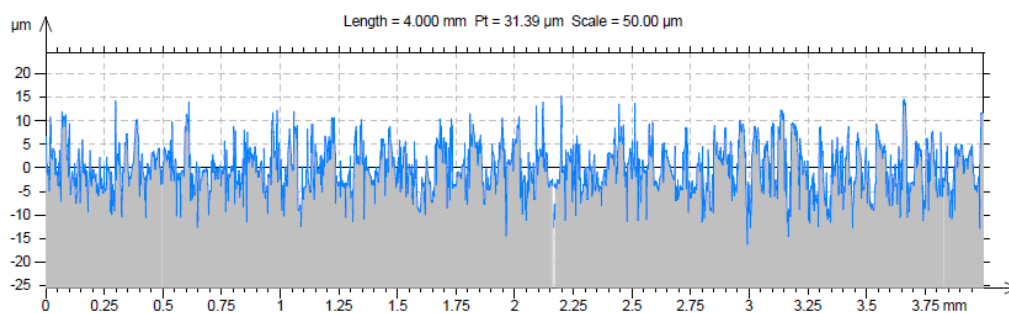
Obr. 83 Měřený povrch – 1. vzorek přechodové oblasti.

a) snímek měřeného povrchu

b) 3D vizualizace měřeného povrchu

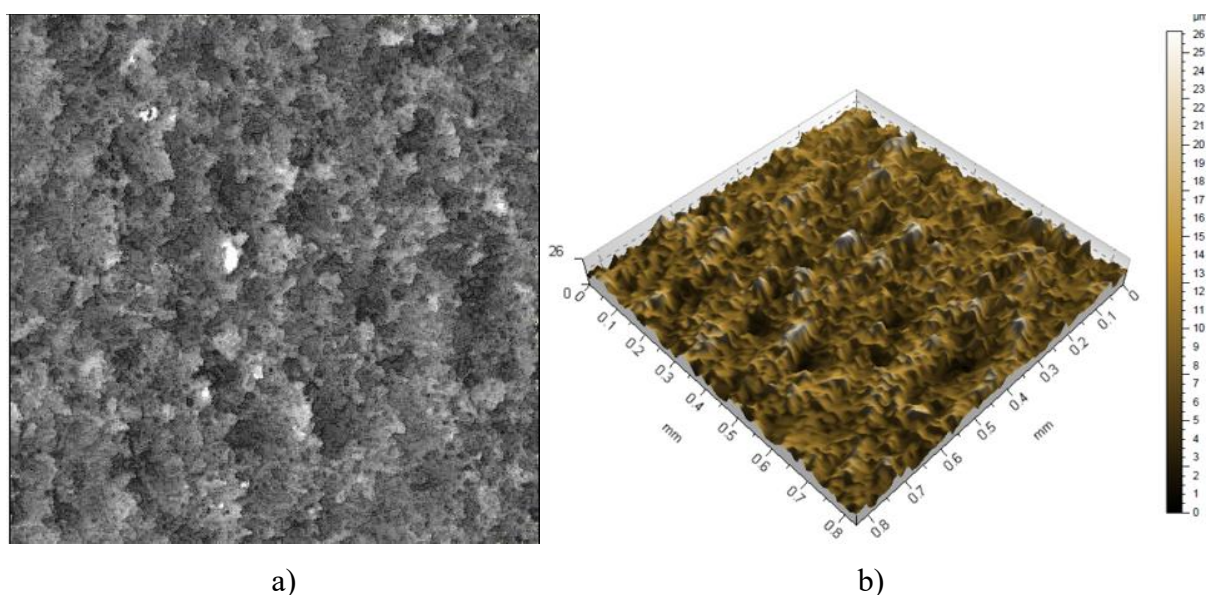
Opět byly analyzovány parametry S_a a S_z . Parametr S_a dosahoval hodnoty $4,55 \mu\text{m}$ a parametr S_z $32,4 \mu\text{m}$.

Profil drsnosti povrchu vzorku pro určení parametrů R_a a R_z je na obr. 84. V případě tohoto vzorku činila hodnota R_a $3,75 \mu\text{m}$ a hodnota R_z $27,48 \mu\text{m}$.



Obr. 84 Profil drsnosti povrchu – 1. vzorek přechodové oblasti.

Na závěr bylo provedeno měření drsnosti povrchu na druhém vzorku z přechodové oblasti mezi materiály. Obr. 85a stejně jako v předchozích případech vyobrazuje měřený povrch a obr. 85b 3D vizualizaci měřeného povrchu.



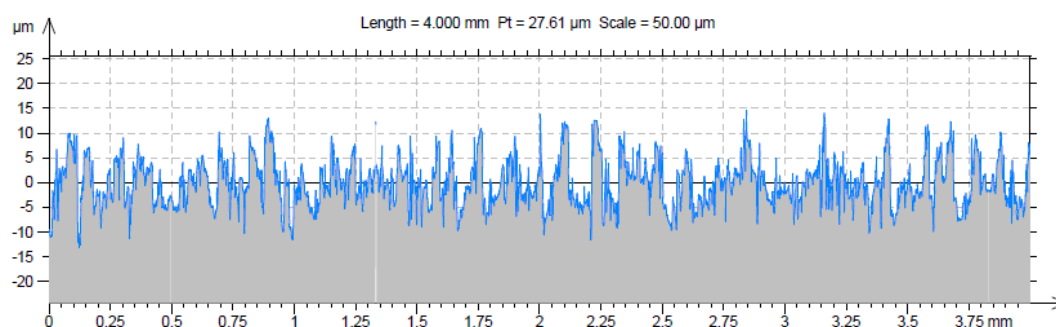
Obr. 85 Měřený povrch – 2. vzorek přechodové oblasti.

a) snímek měřeného povrchu

b) 3D vizualizace měřeného povrchu

I v tomto případě byly zjištěny hodnoty parametrů S_a a S_z . Hodnota parametru S_a byla stanovena jako $3,90 \mu\text{m}$ a hodnota S_z $25,78 \mu\text{m}$.

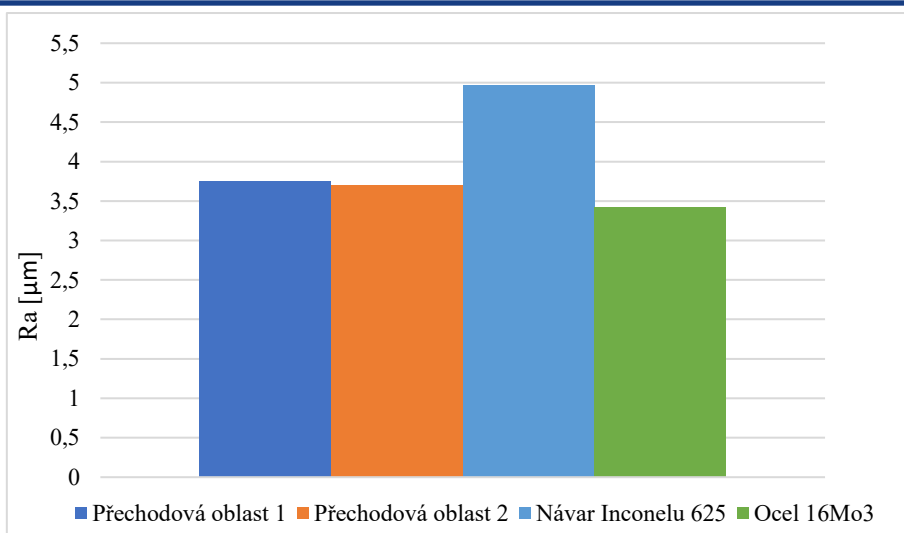
Stejně jako v předchozích případech byly určeny hodnoty parametrů R_a a R_z pomocí hodnot profilu drsnosti povrchu vzorku (viz obr. 86). R_a v tomto případě dosahovala hodnoty $3,69 \mu\text{m}$ a R_z hodnoty $23,69 \mu\text{m}$.



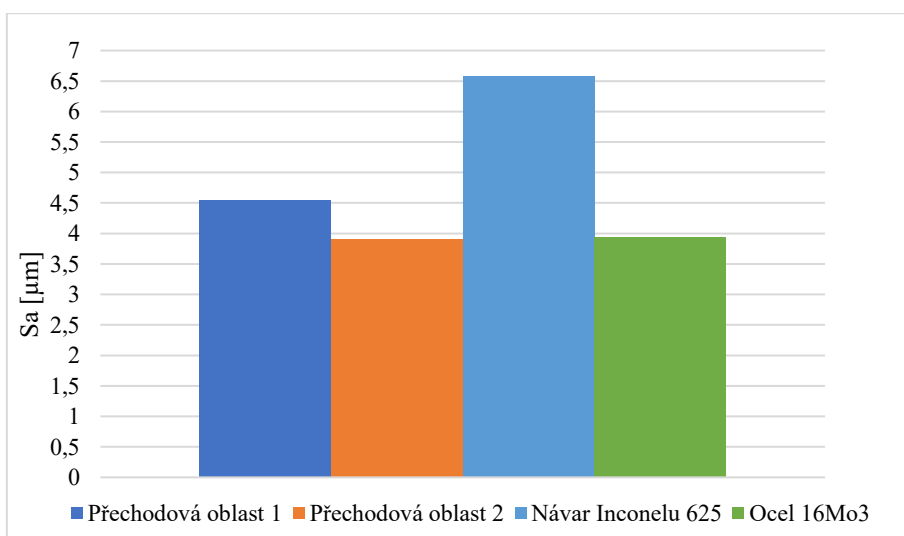
Obr. 84 Profil drsnosti povrchu – 2. vzorek přechodové oblasti.

2.5.4 Zhodnocení dosažených výsledků

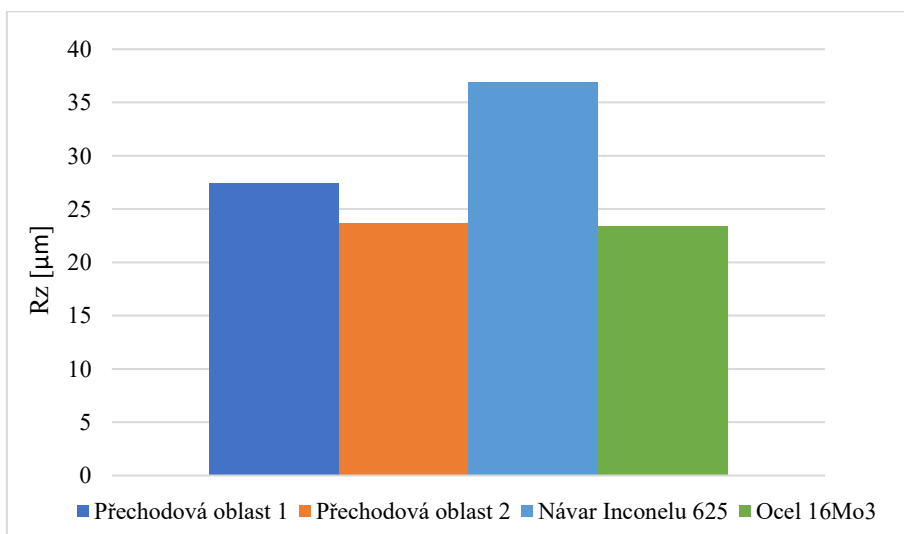
V rámci této podkapitoly bylo provedeno porovnání získaných hodnot zjišťovaných 2D parametrů profilu drsnosti (R_a a R_z) a 3D parametrů plochy (S_a a S_z) mezi jednotlivými vzorky.



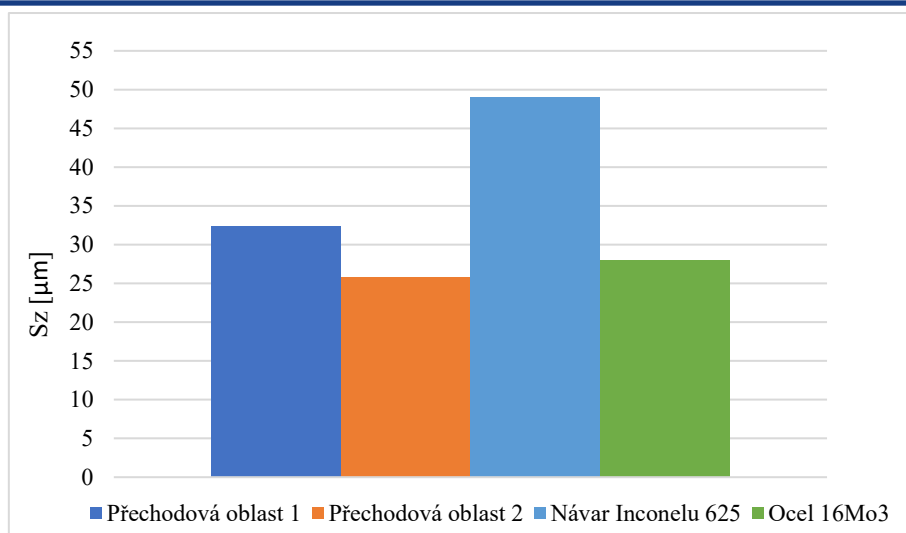
Obr. 85 Porovnání hodnot Ra všech vzorků.



Obr. 86 Porovnání hodnot Sa všech vzorků.



Obr. 87 Porovnání hodnot Rz všech vzorků.



Obr. 88 Porovnání hodnot Sz všech vzorků.

Z obr. 85, obr. 86, obr. 87 a obr. 88 je zřejmé, že drsnost povrchu vzorku z oblasti návaru Inconelu 625 dosahuje nejvyšší hodnoty, a to u všech vyhodnocovaných parametrů. Vzorek z oblasti oceli 16Mo3 má pro parametry Ra a Rz nejnižší hodnoty, zatímco pro Sa a Sz dosahuje vyšších hodnot než druhý vzorek z přechodové oblasti. Drsnost povrchu u vzorků z přechodové oblasti je při vyhodnocení parametru Ra téměř totožná, ale pro parametry Sa, Sz a Rz se jejich hodnota drsnosti výrazně liší. Tento rozdíl by mohl být způsoben příčinou zmíněnou v kap. 2.4.4, kde byl mírný rozdíl v mikrotvrdosti způsoben nejspíše odlišnou pozicí odebíraného vzorku v původní trubce.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byla analýza mechanických vlastností bimetalových materiálů s cladovanou vrstvou Inconelu. V rámci teoretické části práce, bylo nezbytné nejprve charakterizovat zkoumaný bimetalový materiál. Důraz byl kladen na bimetalový materiál jako na celek (navářená trubka) a také na původní materiály, ze kterých se bimetalový materiál skládá (Inconel 625, ocel 16Mo3).

Po charakterizování zkoumaného materiálu bylo nutné rozhodnout, které zkoušky mechanických vlastností budou v rámci práce řešeny. Bylo zvoleno několik základních zkoušek pro zjištění mechanických vlastností. Vybranými zkouškami se staly např. zkouška tahem a zkouška tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení. Pro doplnění výsledků bylo také rozhodnuto o použití metod hodnocení integrity povrchu např. zkoušky mikrotvrdosti dle Vickerse a hodnocení drsnosti povrchu. U všech výše jmenovaných zkoušek mechanických vlastností a metod hodnocení povrchu je rovněž uveden popis dané zkoušky, průběh zkoušení a základní vyhodnocované parametry.

Experimentální část diplomové práce se zaměřuje na konkrétní zkoušky popisované v předešlé teoretické části. Jako první z vybraných zkoušek byla řešena zkouška tahem, u které bylo nejprve nutno určit postup výroby a následně i rozměry zkoušených vzorků. Dále určit zařízení pro provedení dané zkoušky a uvést popis určeného zařízení. Poté bylo nutné získat a zpracovat naměřená data, a nakonec zhodnotit dosažené výsledky. V rámci doplnění a podpoření získaných výsledků zkoušky tahem bylo následně provedeno hodnocení lomové plochy u vybraných přetržených vzorků. Výsledky zkoušky tahem potvrdily, co uvádí odborná literatura, a to že mechanické vlastnosti Inconelu 625 jsou vyšší než u oceli 16Mo3. Mezi dalšími výsledky této zkoušky bylo zjištění, že vzorky z přechodové oblasti mezi materiály nespádají svými mechanickými vlastnostmi mezi hodnoty obou uvedených materiálů, jedná se totiž o tepelně ovlivněnou oblast s horšími mechanickými vlastnostmi. Vzorky z celé tloušťky stěny trubky svými vlastnostmi nedosahovaly ani v jednom případě alespoň hodnot jednoho z původních materiálů.

Jako další v pořadí byla provedena zkouška tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení. Stejně jako v případě zkoušky tahem, i u této zkoušky bylo nutné provést výrobu vzorků pro zkoušku a také určit a uvést popis zkušebního zařízení. Po určení zařízení došlo ke stanovení velikosti zkušebního zatížení, doby prodlevy při zatížení, ale rovněž vzdálenosti vtisků od okraje a vzdálenosti vtisků mezi sebou. Poté bylo provedeno měření pro získání dat a jejich následné zpracování. Závěr této části byl věnován zhodnocení dosažených výsledků. Výsledky

zkoušky tvrdosti při nízkém zatížení taktéž potvrdily, co uvádí odborná literatura. Tvrdost Inconelu 625 je vyšší než tvrdost oceli 16Mo3. V tomto případě se hodnota tvrdosti v přechodové oblasti nacházela téměř uprostřed mezi materiály Inconelu 625 a oceli 16Mo3.

Další části experimentální práce se zabývaly metodami hodnocení integrity povrchu. Jako první byla řešena zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse. Princip zkoušení mikrotvrdosti byl totožný se zkouškou tvrdosti při nízkém zatížení. Jediné rozdíly byly ve způsobu získání zkoušených vzorků, nižší velikosti zkušebního zatížení a v době prodlevy při zatížení. V průběhu vyhodnocení bylo přistoupeno k provedení metalografického rozboru u některých vzorků, z důvodu objasnění zjištěných anomálií v průběhu měření. Po sjednocení výsledků získaných zkouškou mikrotvrdosti a snímků z metalografického rozboru bylo provedeno zhodnocení dosažených výsledků této části. Část zabývající se mikrotvrdostí potvrdila již zmíněné výsledky tvrdosti při nízkém zatížení, kde dosahoval nejvyšší hodnoty mikrotvrdosti materiál návaru Inconelu 625. Mikrotvrdost materiálu oceli 16Mo3 byla nejnižší a mikrotvrdost v přechodové oblasti dosahovala hodnot mezi těmito materiály. Taktéž bylo potvrzeno, že vzorek z oblasti oceli 16Mo3 vykazoval tepelně ovlivněnou strukturu.

Poslední řešenou oblastí experimentální části diplomové práce se stalo měření drsnosti povrchu. Stejně jako u ostatních provedených zkoušek, bylo i zde nutné vyrobit vzorky pro měření, vybrat zkušební zařízení a uvést jeho popis. Dále bylo nutné zvolit parametry měření a určit jaké parametry budou v rámci práce vyhodnoceny. Za vyhodnocované parametry byly zvoleny parametry Ra, Rz, Sa a Sz. Poté došlo k realizaci měření a zpracování získaných dat. V závěru bylo provedeno zhodnocení dosažených výsledků části zabývající se měřením drsnosti povrchu. Měření drsnosti povrchu vzorků ukázalo, že drsnost materiálu návaru Inconelu 625 je nejvyšší u všech metod vyhodnocení, ale u ostatních vzorků dochází ke změně pořadí pro jednotlivé způsoby vyhodnocení. Všechny cíle práce byly splněny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. SLANÝ, Martin, Josef SEDLÁK, Jan ZOUHAR, Oskar ZEMČÍK, Josef CHLADIL, Aleš JAROŠ, Karel KOUŘIL, Matúš VARHANÍK, Jozef MAJERÍK a Igor BARÉNYI. *Material and Dimensional Analysis of Bimetallic Pipe Bend with Defined Bending Radii*. In *TRANSFER 2019*. 2019. Trenčín: Trenčianska univerzita Alexandra Dubčeka v Trenčíně, 2019. s. 181-199. ISBN: 978-80-8075-889-9.
2. 16Mo3 Chrome Moly Steel. *AZoM.com* [online]. Masteel UK, © 2000-2019, 29.5.2010 [cit. 2019-10-27]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5244>.
3. Nová ocel z Ostravy se uplatní zejména v energetice. *TechMagazín* [online]. Praha: TECH MEDIA PUBLISHING s r.o., © 2010-2019, 13.5.2015 [cit. 2019-10-27]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/2138>.
4. Material No.: 1.5415. *M.Woite Sonderwerkstoffe Edeltähle* [online]. Erkrath: M. Woite, 2012 [cit. 2019-10-27]. Dostupné z: <http://www.woite-edelstahl.com/15415en.html#>.
5. Značky ocelí. *Metalmax, s.r.o* [online]. Frýdek-Místek: Metalmax, s.r.o, 2005 [cit. 2019-10-27]. Dostupné z: <http://www.metalmax.cz/znacky.php>
6. FÜRBAACHER, Ivan, Josef STEIDL a Karel MACEK. *Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty: Molybdenová žárupevná konstrukční ocel 16Mo3*. Praha: Verlag Dashöfer, 2006. ISBN 80-86229-02-5.
7. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
8. INCONEL® Alloy 625. In: *Special Metals* [online]. [cit. 2019-10-28]. Dostupné z: https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-625.pdf?fbclid=IwAR2bGkR0Nn6sswjyPX4EfntEykkl7zL7Cn8cQ-ci_iCI0wtph5yYnizHw
9. FÜRBAACHER, Ivan, Josef STEIDL a Karel MACEK. *Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty: Žáruvzdorná niklová slitina NiCr22Mo9Nb*. Praha: Verlag Dashöfer, 2006. ISBN 80-86229-02-5.

-
10. PETŘVALDSKÝ, Tomáš. *Zužování slitiny Inconel 600 metodou rotačního kování*. Ostrava, 2018. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská. Vedoucí práce Ing. Martin Kraus, Ph.D.
 11. FUKÁTKOVÁ, Pavla. *Struktura a vlastnosti litých niklových superslitin*. Brno, 2008. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Simona Pospíšilová.
 12. STRZELCZAK, Katarzyna a Agata DUDEK. *The Structure and Coefficient of Friction of Welded Nickel Alloys Inconel 625 and Inconel 718*. In *Tribologia* [online]. Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Mechaników Polskich, 2018, (5), 109-115 [cit. 2020-02-11]. ISSN 0208-7774. Dostupné z: <https://1url.cz/CzEkk>
 13. Material No.: 2.4856. *M.Woite Sonderwerkstoffe Edeltähle* [online]. Erkrath: M. Woite, 2012 [cit. 2020-02-11]. Dostupné z: <http://woite-edelstahl.com/24856en.html>
 14. Slitina Alloy 625. *NeoNickel* [online]. Blackburn [cit. 2020-02-11]. Dostupné z: <https://www.neonickel.com/cs/alloys/slitiny-niklu/alloy-625/>
 15. MACHEK, Václav. *Kovové materiály 2: Vlastnosti a zkoušení kovových materiálů*. Praha: ČVUT, 2014. ISBN 978-80-01-05527-4.
 16. DORAZIL, Eduard. *Nauka o materiálu III*. Druhé, nezměněné. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1979.
 17. *Zkoušky základních mechanických vlastností kovů*. Ostrava: Dům techniky ČSVTS, 1988.
 18. ČSN EN ISO 6892-1 (420310) *A Kovové materiály-Zkoušení tahem. Část 1, Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
 19. VOLÁK, Josef. *Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise*. Plzeň, 2015. Dizertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Václav Mentl, Jan Džugan.
 20. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
-

-
21. 3.2 Základy pevnosti materiálu. *GSI SLV SVV Praha: Experti ve světě spojování materiálů* [online]. Praha: ImperialMedia, 2014 [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: https://svv.cz/files/prednaska_3_2nov.pdf
 22. Hodnoty mezi pevnosti, kluzu, únavy a dovolených napětí pro ocel. *E-konstruktor: Portál pro strojní konstruktéry* [online]. Praha: E-konstruktor, 2013, 30.7.2013 [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: <https://e-konstruktor.cz/prakticka-informace/hodnoty-mezi-pevnosti-kluzu-unavy-a-dovolenych-napeti-pro-ocel>
 23. Zkoušky tvrdosti. *Oddělení povrchového inženýrství* [online]. [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf
 24. MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu: Kovy a kovové materiály I. část*. Praha: ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02424-5.
 25. PÍŠEK, František, Aleš VETIŠKA a Jiří ŠKAREK. *Nauka o materiálu II.: I. svazek*. Praha: Československá akademie věd, 1959.
 26. ČSN EN ISO 6507-1 (420374) *A Kovové materiály-Zkouška tvrdosti podle Vickerse. Část 1, Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
 27. BUMBÁLEK, Bohumil. Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci. *Kvalita a Geometrické specifikace produktů: Internetový časopis v oboru měření délek, geometrických veličin a struktury povrchu* [online]. Brno: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky FSI VUT v Brně [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf
 28. KŘÍŽ, Antonín. Integrita povrchu obrobku. *Oddělení povrchového inženýrství* [online]. Plzeň [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/profesor_1.pdf
 29. SKOPAL, Miroslav, Miroslav TYKAL a Miroslav POSPÍŠIL, ed. *Drsnost jako součást struktury povrchu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2002. ISBN 80-214-2063-4.
 30. ČSN EN ISO 4287 (014450) *A Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
 31. Drsnoměr MarSurf PS10 Elcometer 7062. *Gamin* [online]. Brno: Omega Design, 2020 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.gamin.cz/elcometer-7062/>
-

-
32. Měření drsnosti: Profily povrchu a parametry profilu povrchu. *M&B Calibr, spol. s.r.o.* [online]. Brno: Contimex spol. s r.o. [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.mbcaltbr.cz/mereni-drsnosti.html>
 33. ČSN EN ISO 4288 (014449) *A Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
 34. Tolerování na technických výkresech. *StudentCar* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1571>
 35. NOVÁK, Zdeněk. Zvyšování kvality hodnocení struktury povrchu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2004 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zvysovani-kvality-hodnoceni-struktury-povrchu.html>
 36. VYSOKORYCHLOSTNÍ ELEKTROEROZIVNÍ DRÁTOVÉ ŘEZAČKY. DOCPLAYER [online]. DocPlayer.cz, 2020 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/4725454-Vysokorychlostni-elektroerozivni-dratove-rezacky.html>
 37. FANUC ALPHA 0iD – 2008 Wire cutting EDM machine. In: *REMI: MACHINES - TOOLS* [online]. Rolle: REMIswiss [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://remiswiss.com/product/fanuc-alpha-0id-2008-wire-cutting-edm-machine-2/>
 38. Řezací dráty. *PENTA TRADING: VÁŠ SVĚT ELEKTROEROZE* [online]. PROGRA, 2016 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.penta-edm.cz/rezaci-draty/>
 39. Zwick Materials Testing: Product Information. *ZwickRoell* [online]. ZwickRoell GmbH & Co. [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: https://www.zwickroell.com/-/media/files/sharepoint/vertriebsdoku_pi/08_437_single_screw_testing_machine_pi_en.pdf
 40. HIGH-RESOLUTION EXTENSOMETER: MAKROXTENS. In: *DirectIndustry* [online]. AGARIK SAS, 2020 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.directindustry.com/prod/zwickroell-gmbh-co-kg/product-15660-505663.html>
 41. YANG, Zhengmao, Jens TRONSKAR a Shashi KUMAR. ECA of Pipeline With Girth Weld Strength Mis-Matching Subjected to Large Strain. *ResearchGate* [online]. 2009, 1-9 [cit. 2020-05-15]. DOI: 10.1115/OMAE2009-79376. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/267651064_ECA_of_Pipeline_With_Girth_Weld_Strength_Mis-Matching_Subjected_to_Large_Strain
-

-
42. Katedra strojírenství: Laboratoře katedry strojírenství. *UNIVERZITA OBRANY V BRNĚ* [online]. Brno: Univerzita obrany v Brně, 2019 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: https://www.unob.cz/fvt/struktura/k216/Stranky/lab_2012.aspx
 43. LECO Corporation PR-4X Mounting System. *Cesaroni Design: product design consultants* [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.cesaroni.com/products/pr-4x-mounting-system>
 44. PX400/PX500 Grinder/Polisher Series: Advanced Grinder/Polisher. *LECO: EMPOWERING RESULTS* [online]. Michigan, 2019 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.leco.com/product/px400-px500-grinder-polisher-series>
 45. Ultrasonic cleaner Sonic-2. *Polsonic: Manufacturer of ultrasonic cleaners* [online]. Varšava: POLSONIC Palczyński Sp. J., 2020 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <http://www.polsonic.com/ultrasonic-cleaner-sonic-2.html>
 46. AMH55: Hardness Testing Systems. *LECO: EMPOWERING RESULTS* [online]. Michigan, 2019 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: https://eu.leco.com/images/Products/met/amh/AMH55_209-246.pdf
 47. AMH55: Automated Hardness Testing System. *LECO: EMPOWERING RESULTS* [online]. Michigan, 2019 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://eu.leco.com/product/amh55-hardness-testing-systems>
 48. Náhodné chyby přímých měření. *Katedra fyziky PřF UJEP* [online]. Ústí nad Labem: Přírodovědecká fakulta UJEP v Ústí nad Labem [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: http://physics.ujep.cz/~ehejnova/UTM/prezentace/prezentace_31_1/UTM_2_chyby_prima_mer_31_1.pdf
 49. JANKOVÝCH, Róbert a Bohumil BUMBÁLEK. Výškové parametry textury povrchu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2014 [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <http://firmy.mmspektrum.com/clanek/vyskove-parametry-textury-povrchu.html>
 50. *Talysurf CCI - Lite Non-contact 3D Profiler: Automated small footprint optical measurement system*. 2008.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Popis
tzv.	takzvaný
tab.	tabulka
např.	například
obr.	obrázek
min.	minimálně
hod.	hodina
kap.	kapitola
atd.	a tak dále
WIG	Wolfram Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
LCF	low cycle fatigue
HB	Hardness Brinell
HV	Hardness Vickers
ISO	International Organization for Standardization
FCC	plošně středěná krystalová mřížka (face centered cubic)
BCT	tetragonální prostorově středěná mřížka (body centered tetragon)
CMT	Cold Metal Transfer
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma

Symbol	Popis
A	tažnost
B_0	počáteční šířka tyče
F	síla
F_e	síla na mezi úměrnosti
F_{eH}	síla na horní mezi kluzu
F_{eL}	síla na dolní mezi kluzu
F_m	síla na mezi pevnosti
$F_{p0,2}$	smluvní síla na mezi kluzu
GPa	gigapascal
J	joul
L	okamžitá měřená délka tyče
L_0	počáteční měřená délka
L_u	konečná měřená délka
MPa	megapascal
N	newton
$N \cdot mm^{-2}$	newton na milimetr čtvereční
Ra	průměrná aritmetická úchylka profilu
Rc	průměrná výška profilu
R_e	mez úměrnosti
R_m	mez pevnosti
R_p	největší výška výstupku profilu
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu
R_t	celková výška profilu

R_v	největší hloubka prohlubně
R_z	největší výška profilu
S_0	počáteční průřez tyče
S_u	konečný průřez tyče
$Y(n)$	hodnota n – té pořadnice
Z	kontrakce
Z_p	hodnota největšího výstupku
Z_v	hodnota nejnižší prohlubně
a_0	tloušťka vzorku
d_0	počáteční průměr tyče
d_1	délka první úhlopříčky
d_2	délka druhé úhlopříčky
$d_{stř}$	střední délka úhlopříčky
g	gram
hm	hmotnostní
kg	kilogram
kgf	kilogram force
kN	kilonewton
kPa	kilopascal
kVA	kilovoltampér
l	litr
$l \cdot min^{-1}$	litr za minutu
ln	vyhodnocovaná délka
lr	základní délka

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	metr za minutu
mm	milimetr
$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	milimetr za minutu
s	sekunda
%	procento
γ	tuhý roztok niklu
γ'	intermetalická fáze
γ''	vytvrzující fáze
°	stupěň
°C	stupeň Celsia
μm	mikrometr
μm^3	mikrometr krychlový
ΔL	prodloužení zkušební tyče
π	Ludolfovo číslo

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Část tabulky naměřených hodnot tvrdosti při nízkém zatížení dle Vickerse – vektor.

PŘÍLOHY

Příloha 1: Část tabulky naměřených hodnot tvrdosti při nízkém zatížení dle Vickerse – vektor.

Vtisk #	Vzdálenost	Tvrdost	Zatížení
30	2 977 μm	241 HV	500 gf
31	3 077 μm	235 HV	500 gf
32	3 177 μm	231 HV	500 gf
33	3 277 μm	231 HV	500 gf
34	3 373 μm	236 HV	500 gf
35	3 500 μm	199 HV	500 gf
36	3 572 μm	231 HV	500 gf
37	3 673 μm	226 HV	500 gf
38	3 773 μm	204 HV	500 gf
39	3 879 μm	198 HV	500 gf
40	3 974 μm	201 HV	500 gf
41	4 077 μm	188 HV	500 gf
42	4 179 μm	174 HV	500 gf
43	4 277 μm	189 HV	500 gf
44	4 378 μm	188 HV	500 gf
45	4 477 μm	192 HV	500 gf
46	4 580 μm	180 HV	500 gf
47	4 672 μm	196 HV	500 gf
48	4 778 μm	179 HV	500 gf
49	4 877 μm	161 HV	500 gf
50	4 979 μm	168 HV	500 gf
51	5 078 μm	169 HV	500 gf
52	5 178 μm	171 HV	500 gf
53	5 278 μm	166 HV	500 gf
54	5 377 μm	171 HV	500 gf
55	5 478 μm	171 HV	500 gf
56	5 577 μm	166 HV	500 gf
57	5 677 μm	172 HV	500 gf
58	5 777 μm	169 HV	500 gf
59	5 877 μm	164 HV	500 gf
60	5 978 μm	160 HV	500 gf
61	6 076 μm	176 HV	500 gf
62	6 173 μm	162 HV	500 gf
63	6 276 μm	158 HV	500 gf
64	6 376 μm	165 HV	500 gf
65	6 475 μm	174 HV	500 gf
66	6 577 μm	159 HV	500 gf
67	6 676 μm	161 HV	500 gf
68	6 777 μm	154 HV	500 gf
69	6 878 μm	164 HV	500 gf
70	6 977 μm	155 HV	500 gf