



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# ROZMĚROVÁ, TVAROVÁ A MATERIÁLOVÁ ANALÝZA BIMETALOVÝCH DÍLCŮ S DEFINOVANÝM POLOMĚREM OHYBU

DIMENSIONAL, SHAPE AND MATERIAL ANALYSIS OF BIMETAL PARTS WITH DEFINED BENDING RADIUS

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radim Ivánek

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2020

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Radim Ivánek</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.</b>
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:

## **Rozměrová, tvarová a materiálová analýza bimetalových dílců s definovaným poloměrem ohybu**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Práce se bude zabývat rozměrovou, tvarovou a materiálovou analýzou bimetalových dílců s definovaným poloměrem ohybu. Diplomová práce bude rozdělena na rešeršní a praktickou část. Součástí práce bude stručná charakteristika použitých metod, definice kritických míst na uvažovaném dílci a specifikace možných vad. Experimentální část bude zaměřena na rozměrovou, tvarovou a materiálovou analýzu. Práce bude ukončena zpracováním naměřených dat, diskusí a celkovým zhodnocením dosažených výsledků.

### **Cíle diplomové práce:**

- Teoretická část – charakteristika použitých metod.
- Definice kritických míst na uvažovaném dílci a specifikace možných vad.
- Experimentální část – rozměrová, tvarová a materiálová analýza.
- 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.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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

---

## ABSTRAKT

Cílem této práce je zhodnocení dosažených výsledků z analýzy trubkových oblouků 180° pro kritický ohyb 1D a superkritický ohyb 0,7D. Teoretická část je zaměřena na charakteristiku materiálu bimetalové trubky a následně jsou popsány metody využití u analýz. Součástí práce je kapitola, která definuje kritická místa na uvažovaném dílci a specifikuje možnost vzniku vad při samotném ohybu. V praktické části je uvedena rozměrová a tvarová analýza za použití optických mikroskopů a 3D skeneru GOM ATOS. U materiálové analýzy se zjišťovala makro i mikrostruktura materiálu trubky, chemické složení a tvrdost při nízkém zatížení. V poslední části práce jsou zhodnoceny dosažené výsledky z analýz.

### Klíčová slova

Trubkový oblouk, ocel 16Mo3, Inconel 625, 3D skenování, mikroskopie, zkouška tvrdosti dle Vickerse, spektrometrie.

## ABSTRACT

The thesis aim is an evaluation of achieved results coming from the analysis of pipe bend 180° for the critical bending / bend 1D and supercritical bending / bend 0,7D. The theoretical part is focused on material property of a bimetallic pipe and on methods applied to work out the analysis. The definition of critical points at a considered segment and possible defects arisen while bending is embodied in the thesis. The practical part of the thesis is based on presenting dimensional and proportional analysis based on using optical microscopes and 3D scanner GOM ATOS. The material analysis was aimed at macrostructure as well as microstructure of the bimetallic pipe material, at chemical composition and at the hardness when low-loaded. The analysis achieved results are assessed at the end of the thesis.

### Keywords

Pipe bend, 16Mo3 Steel, Inconel 625, 3D scanning, microscopy, Vickers hardness test, spectrometry.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

IVÁNEK, Radim. *Rozměrová, tvarová a materiálová analýza bimetalových dílců s definovaným poloměrem ohybu* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124596>. 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 **Rozměrová, tvarová a materiálová analýza bimetalových dílců s definovaným poloměrem ohybu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....  
25. 6. 2020

Datum

.....  
Bc. Radim Ivánek

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu práce doc. Ing. Josefu Sedlákovi, Ph.D. za poskytnutí cenných rad a připomínek při vypracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Martinu Slanému, Ph.D., Ing. Janu Zouharovi, Ph.D. za pomoc při experimentální části.

Rovněž děkuji pracovníkům Univerzity obrany v Brně za spolupráci při měření a analýze bimetalových trubkových vzorků.

Na závěr bych chtěl poděkovat své rodině, přítelkyni a blízkým za podporu, kterou mi po celou dobu studia poskytovali.

---

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ .....	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD .....	9
1 CHARAKTERISTIKA BIMETALOVÉHO MATERIÁLU .....	10
1.1 Charakteristika oceli 16Mo3 .....	10
1.1.1 Chemické složení.....	10
1.1.2 Mikrostruktura oceli .....	11
1.1.3 Mechanické vlastnosti dané oceli.....	11
1.2 Charakteristika Inconelu 625 .....	12
1.2.1 Charakteristika niklových superslitin .....	12
1.2.2 Chemické složení.....	12
1.2.3 Mikrostruktura niklových superslitin.....	13
1.2.4 Mechanické vlastnosti .....	14
2 CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH METOD .....	15
2.1 Digitalizace a skenery .....	15
2.1.1 Metody digitalizace.....	15
2.1.2 Rozdělení 3D skenerů.....	16
2.1.3 Optické skenery .....	17
2.1.4 Systém ATOS .....	18
2.2 Zkoušky tvrdosti .....	19
2.2.1 Zkouška dle Vickerse .....	19
2.3 Optická emisní spektrometrie .....	21
2.4 Rentgenová spektrometrie .....	22
2.4.1 Rentgenová fluorescenční spektrometrie.....	23
2.5 Mikroskopie .....	24
2.5.1 Elektronová mikroskopie.....	24
2.5.2 Optická mikroskopie.....	25
3 DEFINICE KRITICKÝCH MÍST A SPECIFIKACE MOŽNÝCH VAD .....	26
3.1 Definování minimální tloušťky stěny $t_{min}$ .....	27
3.2 Zvlnění na vnitřní straně trubkového ohybu.....	28
3.3 Ovalita (zploštění) trubky.....	29
3.4 Odpružení trubky.....	30
4 ROZMĚROVÁ A TVAROVÁ ANALÝZA.....	32
4.1 Měření tloušťky stěn trubkového oblouku.....	32

---

---

4.1.1 Měření v podélném řezu pomocí mikroskopu Olympus DSX 100 .....	33
4.1.2 Měření v příčném řezu pomocí mikroskopu Olympus DSX 100 .....	37
4.1.3 Měření v příčném směru pomocí mikroskopu ZEISS Neophot 32 .....	37
4.2 Analýza rozměrů a kruhovitosti pomocí 3D skeneru ATOS .....	39
4.2.1 Průběh odchylek snímaných vzorků vůči CAD modelu .....	40
4.2.2 Měření odchylek kruhovitosti .....	42
4.3 Vzniklé vady trubkového oblouku při ohybu .....	45
5 MATERIÁLOVÁ ANALÝZA .....	47
5.1 Makroanalýza povrchu .....	47
5.2 Vyhodnocení mikrostruktury a tvrdosti materiálu .....	48
5.2.1 Měření tvrdosti materiálu při nízkém zatížení .....	49
5.2.2 Vyhodnocení mikrostruktury pomocí mikroskopu Olympus GX51 .....	51
5.2.3 Vyhodnocení mikrostruktury pomocí mikroskopu ZEISS Neophot 32 .....	53
5.3 Analýza chemického složení trubkového oblouku .....	55
5.4 Mikroanalýza chemického složení z povrchu bimetalové trubky .....	57
5.4.1 Analýza materiálu Inconel 625 z povrchu bimetalové trubky .....	57
5.4.2 Analýza rozhraní materiálů Inconel 625 a oceli 16Mo3 .....	59
6 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ .....	62
7 DISKUSE .....	64
ZÁVĚR .....	65
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	66
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	70
SEZNAM PŘÍLOH .....	72



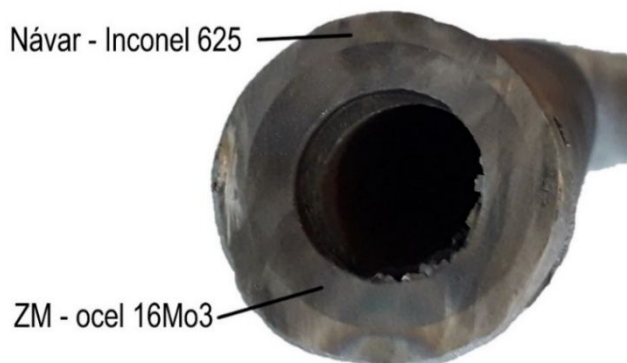
## ÚVOD

Diplomová práce je vypracována v rámci školního projektu ve společnosti, která je významným výrobcem tlakových částí kotlů. Jde především o membránové stěny, deskové přehříváky a ekonomizéry. Toto téma bylo vybráno z důvodu bližšího poznání dané problematiky za účelem zvýšení životnosti a účinnosti zařízení v různých společnostech s ohledem na ekonomickou stránku. Trubkový oblouk je využíván v tzv. hadovitém systému u deskových přehříváků a ekonomizérů, což je přímá rovná trubka ohýbána do požadovaného tvaru. Celý hadovitý systém je tvořen z rovných trubek, na které jsou navařeny trubkové oblouky s prodlouženými konci. Materiál dané trubky musí být vysoce odolný vůči působení vysokým provozním teplotám, aby odolával chemicky agresivnímu prostředí. Z důvodu cenové dostupnosti se běžně používá pouze jeden materiál, v tomto případě ocel 16Mo3, která dosahuje životnosti přibližně 6 měsíců. Po degradaci materiálu je nutné zařízení odstavit, demontovat a osadit novým trubkovým systémem. Tím dochází k velkým finančním ztrátám a také ke vzniku dalších technických operací z důvodu revize. Vhodnou alternativou se jeví varianta, kdy je základním materiálem trubka z oceli 16Mo3, dle evropské normy EN 10028-2, která zajišťuje dobré mechanické vlastnosti. Na tuto trubku je navařena vrstva Inconelu 625 zajišťující delší životnost dílu v chemicky agresivním prostředí [1].

Slitiny niklu v dnešní době patří k nejvíce zastoupeným materiálům v několika odvětvích zejména pro jejich fyzikální vlastnosti. Jelikož se na bimetalové trubkové oblouky kladou vysoké požadavky, především na jejich fyzikální vlastnosti, je výroba takového dílu velmi komplikovaná. S tím souvisí mnoho problémů, jako je vznik možných vad a trhlin při výrobě takového oblouku. Při ohybu dochází k deformaci a je potřeba sledovat minimální tloušťku vnější stěny, odchylku kruhovitosti, zvlnění na vnitřní straně a nalezení povrchových vad. Analýza se zabývá shodností geometrie vymodelovaného dílu v CAD systému s reálným trubkovým obloukem a také zachování tvaru po ohybu trubky [1].

## 1 CHARAKTERISTIKA BIMETALOVÉHO MATERIÁLU

Bimetalová trubka je tvořena základním (16Mo3) a navařeným materiálem (Inconel 625), který prodlouží minimálně dvojnásobně životnost celé soustavy na rozdíl od trubek vyrobených z jednoho druhu materiálu. Na obr. 1.1 je vidět návar Inconelu 625, který je nanášen ve formě drátu [1].



Obr. 1.1 Bimetalová ocelová trubka s návarem Inconelu 625.

### 1.1 Charakteristika oceli 16Mo3

Tato ocel tvoří vnitřní část bimetalové trubky především z důvodů cenové dostupnosti. Dle evropské normy lze ocel dohledat pod číselným označením 1.5415 nebo dle staršího označení jako ČSN 15 020. Jedná se o nízkolegovanou ocel odolávající teplotám při vysokých hodnotách. Taktéž vzdoruje vysokoteplotní korozi a tečení (creep). Tečením se rozumí pomalá plastická deformace, která je vyvolána dlouhodobým teplotním zatížením. Na základě tohoto parametru je definována žárupevnost materiálu. Pozitivní vlastností tohoto materiálu je jeho velmi dobrá svařitelnost za použití obvyklých metod svařování, např. WIG, MAG. Využití tohoto materiálu lze nalézt v ropném, teplárenském, energetickém a chemickém průmyslu při výrobě kotlů, výměníků, parních vedení nebo tlakových nádob, a to díky vyššímu obsahu molybdenu a chromu. Podrobné chemické složení této oceli znázorňuje tab. 1.1 [2, 3, 4, 5].

#### 1.1.1 Chemické složení

Tab.1.1 Chemické složení oceli 16Mo3 [6].

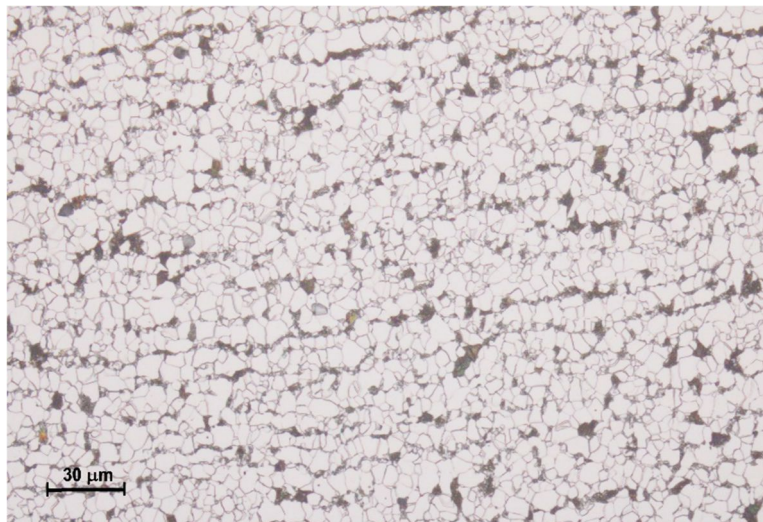
Složení [hm %]	C	Si	Mn	P	S
16Mo3	0,12 až 0,2	0,35	0,4 až 0,9	0,025	0,01

Složení [hm %]	Cr	Mo	Ni	N	Cu
16Mo3	0,03	0,25 až 0,35	0,3	0,012	0,3

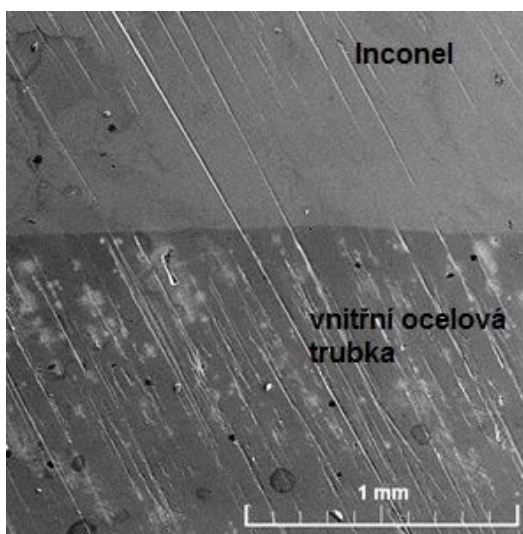
Tato ocel je vyráběna v kyslíkovém konvertoru, příp. obloukové peci, která musí být v uklidněném stavu. Obsah uhlíku je snížen na takovou úroveň, aby nedocházelo k uhlíkové reakci při odlévání a následnému tuhnutí. Ocel je možné normalizačně žíhat na teplotu 890 až 950 °C [7].

### 1.1.2 Mikrostruktura oceli

Ocel, ve které se obsah uhlíku pohybuje od 0,12 do 0,2 %, je nazývána jako ocelí podeutektoidní s mřížkou BCC. Na obr. 1.2 je znázorněna feriticko-perlitická mikrostruktura oceli 16Mo3. Velké množství feritu, který je znázorněn světle šedou barvou, doplňuje lamelární perlit znázorněný tmavou barvou. Perlit je tvořen směsí feritu a cementitu. Makrostrukturu oceli 16Mo3 a Inconelu 625 v příčném řezu lze vidět na obr. 1.3 [7].



Obr. 1.2 Feriticko-perlitická struktura oceli 16Mo3.



Obr. 1.3 Makrostruktura oceli 16Mo3 a Inconelu 625.

### 1.1.3 Mechanické vlastnosti dané oceli

Ocel patří do skupiny žárupevných a z tohoto důvodu se využívá pro práci při vysokých teplotách, kde se uplatňuje její odolnost proti creepu. Mechanické vlastnosti jsou znázorněny v tab. 1.2. V tab. 1.3 jsou uvedeny hodnoty meze pevnosti v tečení po době  $10^5$  hod při různých teplotách. Rozlišují se celkem tři stádia tečení materiálu za předpokladu konstantní teploty a napětí. Primární stádium charakterizuje počáteční nárůst deformace při spuštění zařízení do provozu. Druhé stádium je ustálené tečení. Dochází k lineárnímu nárůstu deformace s postupujícím časem. Toto stádium je pro technologické hledisko nejdůležitější. Posledním terciálním stádiem je vysoké poškození vnitřní struktury kovu s následným lomem materiálu vlivem velkého nárůstu deformace [8].

Tab. 1.2 Mechanické vlastnosti oceli 16Mo3 [4].

<b>Modul pružnosti v tahu</b>	212 GPa
<b>Mez kluzu</b>	380 MPa
<b>Mez pevnosti</b>	440 MPa
<b>Tvrdość</b>	150 HB
<b>Tažnost</b>	30 %
<b>Nárazová práce ISO-V</b>	31 kJ
<b>Teploty používání</b>	-20 až 530 °C

Tab. 1.3 Mez pevnosti v tečení [4].

<b>Teplota [°C]</b>	<b>Mez pevnosti v tečení [MPa]</b>
<b>450</b>	293
<b>470</b>	178
<b>500</b>	101
<b>510</b>	91
<b>530</b>	53

## 1.2 Charakteristika Inconelu 625

Tento materiál patří do skupiny niklových superslitin, které se označují jako kovové. Největší skupinou superslitin představují slitiny na bázi niklu. Existují i slitiny kobaltové a železo-niklové. Inconel 625 lze také nalézt pod označením W-Nr.2.4856. Jedná se o registrovanou značku společnosti Special Metals Corporation. Využití mají především v prostředích s vysokou teplotou (nad 540 °C), kde si zachovávají své mechanické vlastnosti [7, 9].

### 1.2.1 Charakteristika niklových superslitin

Tvrdé slitiny na bázi niklu mají dnes ve strojírenském světě velmi významnou roli. U klasických žáruvzdorných a žárupevných materiálů je jejich tepelná vodivost v řádech 500 až 600 °C. Oproti tomu niklové superslitiny, které mají využití ve velmi náročných podmínkách, mají svou tepelnou vodivost od 900 do 1100 °C. Využívají se v prostředí kyselém a chemicky agresivním při spalování komunálního odpadu a průmyslových topiv. Dále se používají při těžbě ropy a zemního plynu, v loděnicích či letectví nebo v jaderných elektrárnách. Jsou odolné vůči oxidaci, vysokoteplotnímu tečení, korozi a únavové životnosti za vysokých teplot. Tyto materiály patří do skupiny těžkoobrobitelných materiálů [7, 10].

### 1.2.2 Chemické složení

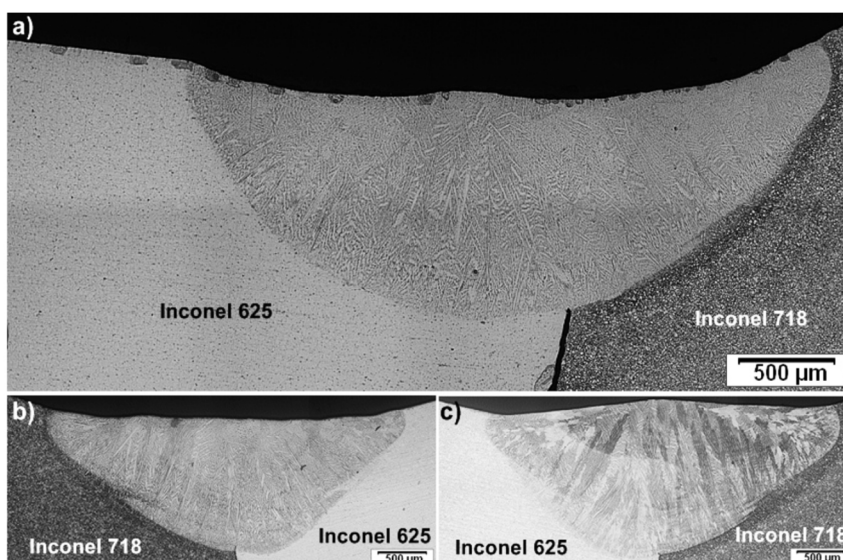
Chemické složení vybraných niklových superslitin je znázorněno v tab. 1.3, kde největší množství představují prvky Ni a Cr. Legováním Cr a Al získávají superslitiny požadované antikorozi a antioxidační vlastnosti. Ty pak vytvářejí ochrannou vrstvu v prostředí s kyslíkem, např. Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Prvky Ti a Al jsou základem pro vytvoření vytvrzující fáze γ'. V superslitinách se může vyskytovat i malé množství dalších prvků. Mezi prospěšné prvky, které přispívají ke zpevnění hranic zrn, patří C, Zr a B. Naopak mezi škodlivé prvky se řadí např. O, H, N, He, jako zbytkové plyny, a také Pb, Sb, Cu, Ag, jako nečistoty [11, 12].

Tab.1.3 Chemické složení vybraných niklových superslitin [11].

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

### 1.2.3 Mikrostruktura niklových superslitin

Při zpracování superslitin dochází k rychlému nárůstu jejich tvrdosti, jelikož mají austenitickou matici stejně jako austenitické korozivzdorné oceli. Mikrostruktura Inconelu 625 a 718 je znázorněna na obr. 1.4. Z hlediska struktury mají niklové slitiny rovnovážnou dvoufázovou mikrostrukturu obsahující základní fázi  $\gamma$  s mřížkou FCC. Jedná se o tuhý roztok substitučně zpevněný legujícími prvky jako jsou Co, Fe, W, Cr a Mo. Druhá intermetalická fáze  $\gamma'$  je tvořena  $Ni_3Ti$  nebo  $Ni_3Al$  krystalizující v kubické plošně středěné mřížce (FCC). Tato hlavní vytvrzující fáze probíhá u velké části niklových superslitin, ve kterých obsah Nb není tak vysoký. V případě vyššího obsahu Nb (Inconel 718) se stává hlavní vytvrzující fází s tetragonálně prostorově středěnou mřížkou BCT fáze  $\gamma''$  tvořená  $Ni_3Nb$ . V závislosti na tepelném zpracování a chemickém složení materiálu dochází k vylučování primárních karbidů (MC) vytvořených z taveniny během krystalizace a sekundárních karbidů ( $M_{23}C$ ,  $M_6C$ ,  $M_7C_3$ ), které vznikají při provozu nebo tepelném zpracování. Při dlouhodobém procesu za teplot vyšších než 675 °C se fáze  $\gamma''$  transformuje na fázi  $\gamma'$  nebo na nežádoucí fázi  $\sigma$ , která se chová jako nerovnovážná a krystalizuje v tetragonální prostorově středěné mřížce (BCT). Vylučování nežádoucích fází způsobuje zkřehnutí materiálu a zhoršení vlastností, a proto je důležité volit optimální chemické složení superslitin [8, 11, 12].



Obr. 1.4 Mikrostruktura Inconelu 625 s porovnáním s Inconelem 718 [13].

### 1.2.4 Mechanické vlastnosti

Niklové superslitiny se dělí do skupin A až E z hlediska vlastností, které ovlivňují obrábění. Inconel 625 patří do skupiny D-2. Tím se rozumí materiály vytvrditelné procesem stárnutí, při kterém se dodrží vysoká tvrdost a pevnost. Při potřebě nízké tvrdosti materiálu, jako jsou operace vrtání a řezání závitů, se materiál obrábí ve stavu nevystárnutém. Nejnižší tvrdost a snadnou obrobitelnost dosahuje materiál při chemicko-tepelném zpracování jako je rozpouštěcí žíhání s následným zakalením nebo ochlazením proudem vzduchu. Tento proces je nutný při hrubovacím procesu ve stavu vystárnutém. V tab. 1.4 jsou uvedeny základní mechanické vlastnosti Inconelu 625 a v tab. 1.5 jsou pro porovnání znázorněny mechanické vlastnosti jiných druhů niklových superslitin za různých teplot [7, 8].

Tab. 1.4 Základní mechanické vlastnosti Inconelu 625 [9].

<b>Měrná hmotnost</b>	8,44 g.cm <sup>-3</sup>
<b>Tažnost při 20 °C</b>	50 %
<b>Modul pružnosti v tahu při 20 °C</b>	207 GPa
<b>Tvrdost před tvářením za studena</b>	200 HV
<b>Pevnost při tečení</b>	360 MPa

Tab. 1.5 Mechanické vlastnosti Inconelu 625 za vybraných teplot [11].

Materiál	Pevnost v tahu [MPa]			Mez kluzu [MPa]		
	21 °C	540 °C	760 °C	21 °C	540 °C	760 °C
<b>Inconel 600</b>	660	560	260	285	220	180
<b>Inconel 601</b>	740	725	290	455	350	220
<b>Inconel 617</b>	740	580	440	295	200	180
<b>Inconel 625</b>	965	910	550	490	415	415
<b>Inconel 718</b>	1435	1275	950	1185	1065	740
<b>Inconel X-750</b>	1200	1050	-	815	725	-

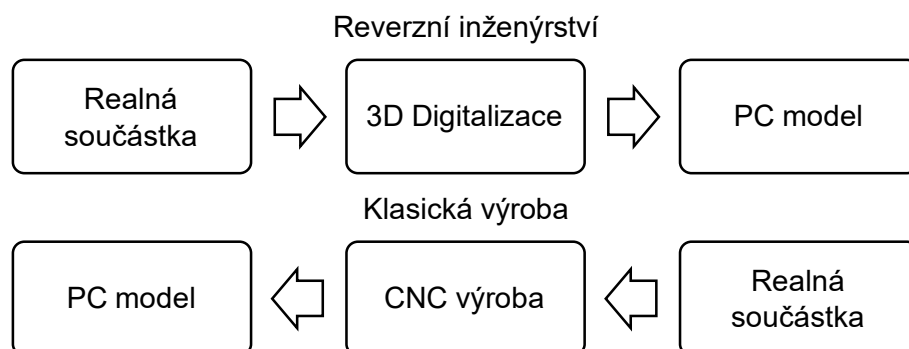
## 2 CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH METOD

V této kapitole jsou uvedeny použité metody, které byly využity k jednotlivým analýzám na bimetalovém dílci. Část rozměrové a tvarové analýzy byla provedena získáním digitalizovaných dat pomocí 3D skeneru a část byla provedena pomocí optických mikroskopů.

V materiálové analýze se vyhodnocovala tvrdost materiálu při nízkém zatížení pomocí statické zkoušky dle Vickerse. Chemické složení z objemu materiálu bylo získáno metodami optické emisní spektrometrie a rengenofluorescenční spektrometrie. Mikroanalýza chemického složení z povrchu byla získána pomocí metody EDS.

### 2.1 Digitalizace a skenery

Reverzní inženýrství se využívá nejen ve strojírenském průmyslu, ale hraje významnou roli také v lékařství, a to ve výrobě implantátů. Tento obor má rovněž využití v automobilovém průmyslu při navrhování nového automobilu, při kontrole rozměrů a tvarů jak jednoduchých, tak i komplikovaných s využitím CAD systémů. Znázornění sledů činností reverzního inženýrství znázorňuje obr. 2.1. Pro převod dat z reálné fyzické součásti do digitální podoby se používají skenery. Proces se nazývá digitalizace s použitím daného softwarového nástroje. Jedním z důvodů použití tohoto způsobu je vyrobení přesné kopie fyzického objektu a možnost poté nahradit velice jednoduše poškozený díl a zároveň posoudit jeho deformace. Skenování se rovněž využívá pro získávání dokumentace [8, 14].



Obr. 2.1 Proces reverzního inženýrství [8].

Digitalizace probíhá ve dvou krocích. Prvním krokem je kvantování, u kterého dojde ke zpracování snímaného obrazu ve světelných pruzích. V druhé fázi probíhá vzorkování. Chyby, které jsou vytvořeny z převodu spojité funkce na diskrétní, lze minimalizovat právě těmito dvěma kroky. Metody reverzního inženýrství jsou ovlivňovány vlastnostmi, jakými jsou barva, velikost a materiál prvku, jeho vnější povrch a zda se jedná o dvourozměrnou či třírozměrnou součást. Dále je kladen požadavek na kvalitu digitalizovaných dat, jako je množství dat a rozměrová přesnost. Posledním faktorem je způsob použití digitalizace. Toho se využívá pro kontrolu v sériové výrobě nebo jen pro příležitostná kontrolní měření [8].

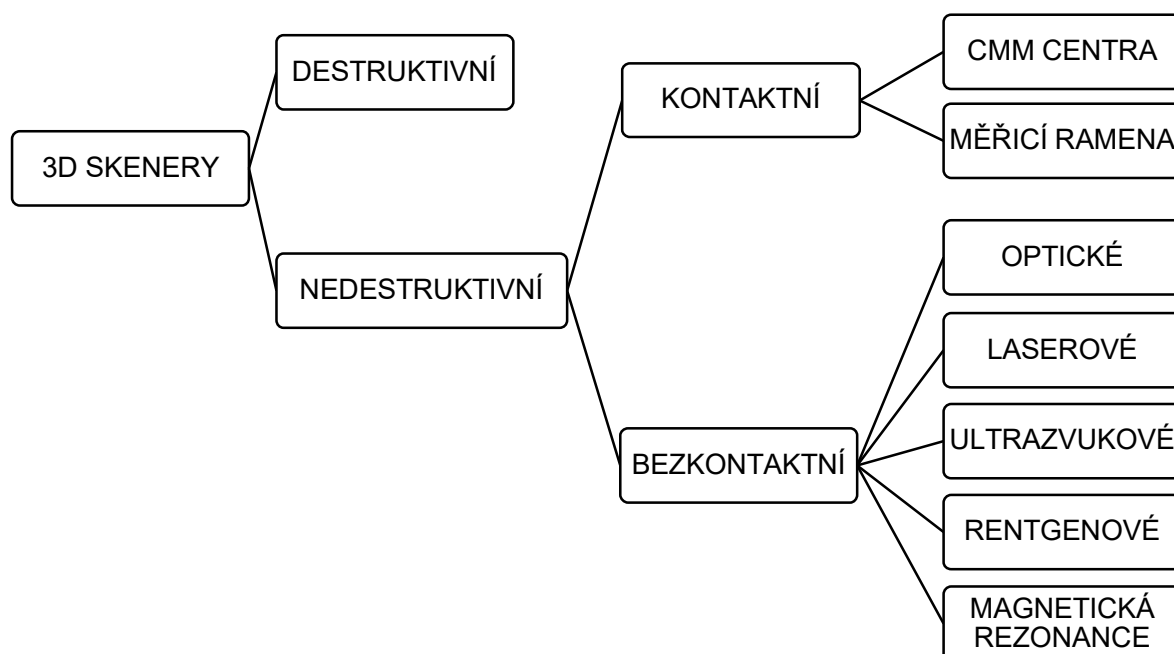
#### 2.1.1 Metody digitalizace

U procesu **2D digitalizace** je výsledný digitální obraz v rastrovém formátu, který lze přímo použít nebo upravit na vektorový formát vektorizací. Touto operací se rozumí převedení vyčištěného rastrového obrazu na vektorový, který reprezentuje

geometrické tvary či text. Pracuje se s ním jako s běžným textovým dokumentem nebo elektronovým výkresem. Použití má u starých výkresových dokumentací. Dále je možné upravit formát na animaci, schéma, prezentaci, dokumentaci i 3D model. Z průmětných křivek lze plochu či 3D těleso vymodelovat do hlavních rovin [8].

U **3D digitalizace** je výstupem soubor naměřených dat se souřadnicemi bodů v prostoru. Na rozdíl od modelů, které jsou vytvořeny pomocí CAD systémů, tyto datové soubory kromě bodů neobsahují informace o jiných základních geometrických útvarech. Co nejpřesnější digitální model původní předlohy lze vytvořit pomocí vizualizace souboru dat. I když je cílem získat objemové těleso, v technické praxi používané 3D skenery dokáží digitalizovat pouze daný povrch předlohy. Ve skutečnosti je tento povrch chápán softwarem při exportu do CAD systémů pouze jako mrak bodů, a tím je nazýván jako tzv. mrtvá geometrie. Aby bylo možno digitalizovaný model dále využívat, je třeba na tuto mrtvou geometrii aplikovat další postupy. Pokud je požadavkem pouze kontrolní měření několika bodů nebo vzájemné porovnávání modelů, lze používat tato digitalizovaná data [8].

### 2.1.2 Rozdělení 3D skenerů



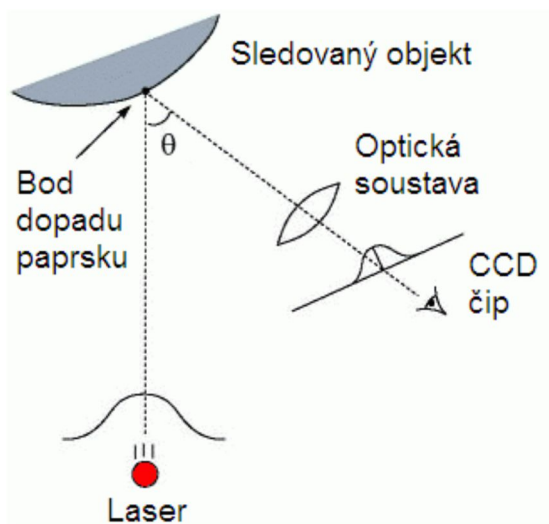
Obr. 2.2 Schéma rozdělení 3D skenerů [15].

Dle působení na digitalizovaný objekt lze skenery rozdělit na destruktivní a nedestruktivní. U destruktivního je i za cenu nevratného znehodnocení digitalizován celý objem společně s vnitřními dutinami. Při nedestruktivní metodě digitalizace nedochází k porušení skenovaného modelu, a to i u tvarově komplikovaných součástí, kde lze předpokládat problémy. Schéma rozdělení 3D skenerů znázorňuje obr. 2.2. Pro získání třetí souřadnice se využívá metod triangulace, měření doby letu světla nebo optická interferometrie. Triangulace se dělí na aktivní a pasivní [8, 16].

**Aktivní triangulace** vytváří trojúhelník, který obsahuje aktivní zdroj záření, povrch měřeného objektu a jeden snímač (CCD). Vzdálenost mezi snímačem a světelným zdrojem se nazývá triangulační báze. Neměnný je úhel, který svírá světelný paprsek s triangulační bází. Odražený paprsek dopadá na povrch snímače vždy pod jiným úhlem a na jiný bod. Dle znalosti polohy tohoto bodu je určen svíraný úhel mezi dopadajícím paprskem na snímači a triangulační bází. Z-ovou souřadnici lze vypočítat



za pomoci získaných informací. Jsou rozlišovány tři druhy aktivní triangulace podle druhu zdroje záření. 1D triangulací, která je zobrazena na obr. 2.3, se rozumí pouze jeden paprsek (např. laser). Princip 2D triangulace spočívá v promítání světelného pruhu na předmět. Zobrazením několika rovnoběžných čar nebo strukturovaného světelného svazku nastává 3D triangulace, která je rychlejší a používá se ke snímání předmětů v pohybu [15, 16].



Obr. 2.3 1D Aktivní triangulace [15].

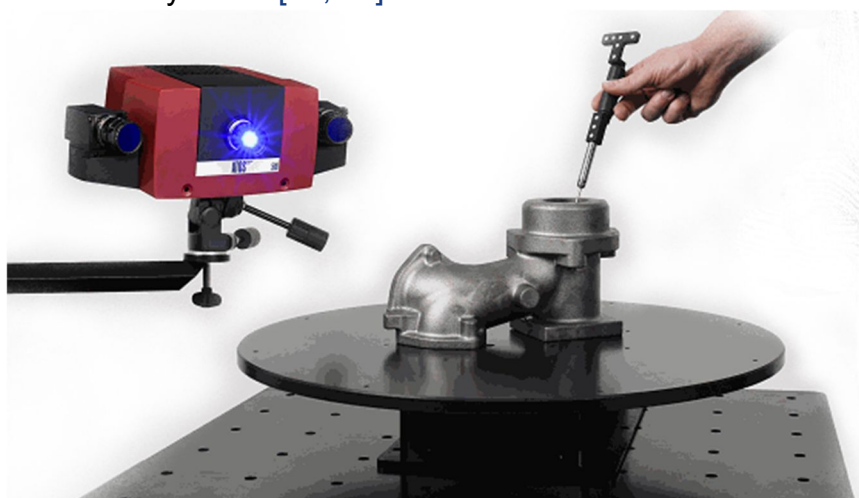
**Pasivní triangulace** neobsahuje vlastní zdroj záření. Třetí rozměr je tak získán pomocí dvojice CCD kamer, které mají konstantní a předem od sebe známou vzdálenost. Prostřednictvím CCD snímačů se získají dva stereoskopické snímky představující dva perspektivní obrazy. Metoda stereovidění je založena na principu zrkového systému, kde jsou lidské oči nahrazeny CCD kamerami. Oba sdružené paprsky svírají úhel (tzv. úhlová paralaxa), ze kterého lze určit vzdálenost povrchu od středu polohy obou snímačů [15, 16].

### 2.1.3 Optické skenery

Tento typ snímacích zařízení je založen na bezdotykové metodě, kde není kontakt mezi objektem a snímacím zařízením. Principem optických 3D skenerů je nasnímaní objektu z několika úhlů pomocí metody triangulace. Nasnímaná data jsou převedena do počítače k dalšímu zpracování. 3D model je vytvořen z 2D snímků. Objekty jsou otáčeny ručně nebo automaticky na otočném stole. Za výhody optických 3D skenerů lze považovat jejich rychlost, mobilitu, vysoké rozlišení, přesnost, nízkou hmotnost a jejich celkové rozměry. Jelikož lze tímto zařízením snímat objekty složitých tvarů i objekty různých velikostí, lze za výhodu považovat jeho flexibilitu. Rozměry snímaného objektu je možno zachytit v řádu milimetrů do hodnot několika metrů. Objekty s lesklým povrchem nebo objekty průhledné jsou obtížné ke skenování, což je hlavní nevýhodou tohoto typu skeneru. Nanesením křídové vrstvy na povrch snímaného objektu je zajištěno optimální skenování, díky němuž se zajistí výrazně lepší odraz fotonů. Digitalizovaný model se vytváří aproximační metodou. Pro přesnější spojení 3D tělesa je vhodné před skenováním nalepit několik referenčních bodů (centrované terčíky). Kromě získání 3D modelu je možné optický skener využít jako souřadnicové měřicí zařízení. [15, 17].

### 2.1.4 Systém ATOS



Systém ATOS (Advanced Topomeric Sensor od společnosti GOM), jenž lze vidět na obr. 2.4, patří ve své oblasti k nejpoužívanějším, a proto je vyhledáván pro nejnáročnější použití vzhledem k velmi přesnému a rychlému použití. Řadí se do kategorie optických bezkontaktních a pohyblivých skenerů, který využívá princip triangulace. Dvěma kamerami jsou zachycovány různé vzory proužků za promítání projektoru na měřený předmět. Aby bylo dosaženo celkové digitalizace, je nutné nasnímat objekt z různých úhlů, a poté dochází k automatickému převedení pořízených záběrů do společného souřadného systému. Tento systém je využíván především pro skenování a měření objektů ve FEM, CAD a CAM oblastech, a to buď u skenování složitých sestav lisovacích nástrojů, poškozených tvarových částí nebo ukládání optimalizovaných dat [15, 18].



Obr. 2.4 3D skener ATOS [19].

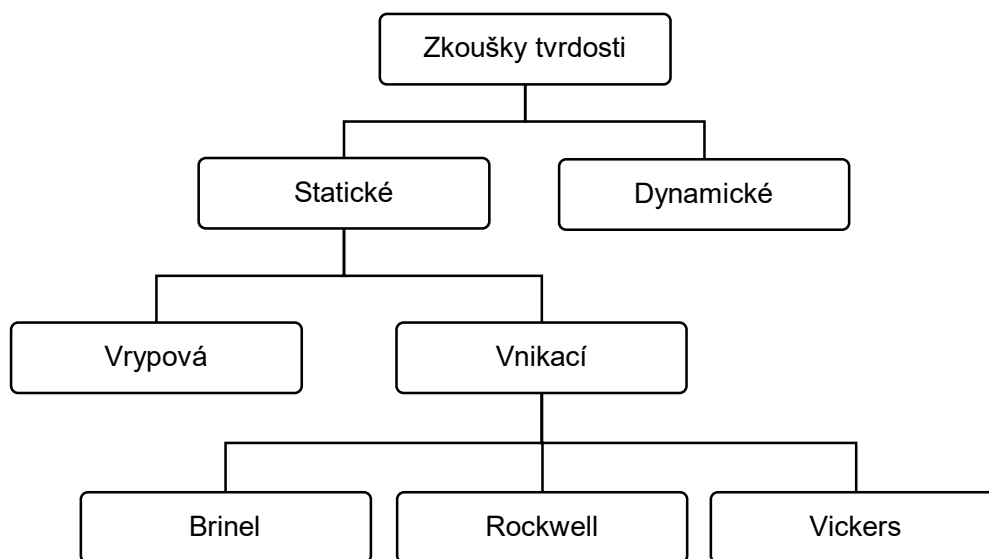
3D skener je umístěn na stativu a zajišťuje stabilitu při procesu. Snímací zařízení obsahuje senzor o dvou kamerách s projektorem, který promítá proužky. V experimentální práci je využíván typ ATOS Compact Scan ve variantě s 2 MPx kamerou. Další možností je varianta s 5 Mpx kamerou. Skener je schopen snímat velké komponenty s vysokou rychlostí a kvalitou naměřených dat díky využití technologie modrého světla ATOS Blue Light. Je schopen měřit i ve stísněných prostorách s minimálními náklady na údržbu. Výkonnější zařízení oproti ATOS Compact Scan představuje skener ATOS Triple Scan, který je schopen zachytit tři záběry na jedno měření, a tak obsahuje menší počet snímků s větší kvalitou. Srovnání parametrů znázorňuje tab. 2.1. [15, 18, 20].

Tab. 2.1 Parametry systémů ATOS Compact Scan a ATOS Triple Scan [14].

		
<b>Systém</b>	ATOS Compact Scan	ATOS Triple Scan
<b>Rozlišení CCD čipu</b>	2 x 2·106 až 5·106	2 x 5·106 až 12·106
<b>Plocha měření [mm<sup>2</sup>]</b>	40 x 30 až 1200 x 900	38 x 29 až 2000 x 1500
<b>Hustota bodů [mm]</b>	0,01 až 0,52	0,01 až 0,79
<b>Počet naměřených bodů na jeden záběr</b>	2 až 5 milionů	5 až 12 milionů

## 2.2 Zkoušky tvrdosti

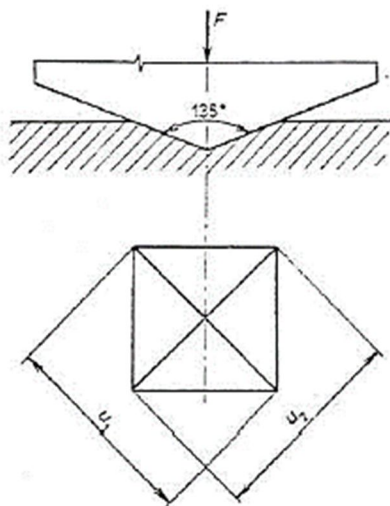
Tvrdost je pojmenována jako odpor materiálu při vnikání tělíska do povrchu materiálu. Výhodou zkoušek tvrdosti je jejich poměrně snadné a rychlé použití. U některých zkoušek není zapotřebí drahých zařízení, ani důkladné očištění vzorku. Zkoušky tvrdosti se dělí na zkoušky makrotvrdosti a mikrotvrdosti. U zkoušek mikrotvrdosti se používá menších zátěžných sil. Nejrozšířenější zkoušky tvrdosti u kovových materiálů jsou zkoušky vnikací dle Brinella, Rockwella nebo dle Vickerse. U všech těchto zkoušek je zkušebním tělískem indentor. Schéma rozdělení zkoušek tvrdosti je uvedeno na obr. 2.5. Dynamické zkoušky tvrdosti se dále dělí na dynamicko-elastické a dynamicko-plastické. V experimentální části se vyhodnocovala statická zkouška dle Vickerse [21, 22].



Obr. 2.5 Schéma zkoušek tvrdosti [23].

### 2.2.1 Zkouška dle Vickerse

Princip zkoušky tvrdosti dle Vickerse je vnikání do povrchu zkoušeného materiálu čtyřbokým jehlanem z diamantového materiálu o vrcholovém úhlu stěn  $136^\circ$ . Zkouška je velmi přesná a řadí se do statických vnikacích zkoušek, kterou popisuje norma ČSN EN ISO 6507. Princip zkoušky a následná deformace vtisku je znázorněna na obr. 2.6 [22].



Obr. 2.6 Princip zkoušky tvrdosti dle Vickerse [24].

640 HV 30/20 je označení tvrdosti dle Vickerse, kde číslo 640 je hodnota udávající tvrdost a HV představuje značku tvrdosti při přibližné hodnotě zkušebního zatížení 30 kgf (30 kgf = 294,2 N). Poslední hodnota 20 s je doba zkušebního zatížení, která se uvádí, pokud neleží v předepsaném rozsahu 10 až 15 s [24].

Před zkouškou je třeba provést přípravu vzorku tak, aby byl vyleštěný, hladký a rovný. Teplota při měření je v rozmezí 10 až 35 °C, doba zatěžování činí 2 až 8 s při následném působení 10 až 15 s. Tloušťka zkušební vzorku musí dosahovat 1,5x střední délky úhlopříčky vtisku. U ocelových materiálů jednotlivé vpichy dosahují od středu 3x střední délky úhlopříčky, od okraje činí hodnota 2,5x střední délky úhlopříčky vtisku. Zkouška se dělí do tří rozsahů dle zkušebního zatížení, které jsou znázorněny v tab. 2.2. Při vyhodnocení zkoušky se ze vzniklého vtisku, který je uveden na obr. 2.6, odečtou z mikroskopu úhlopříčky  $u_1$  a  $u_2$ . Dále se z nich vypočítá střední hodnota dle vztahu (2.1) jako aritmetický průměr obou úhlopříček [24].

$$u_{stř} = \frac{u_1 + u_2}{2} \text{ [mm]} \quad (2.1)$$

, kde:

- $u_{stř}$  [mm] - střední hodnota úhlopříček,
- $u_1$  [mm] - délka první úhlopříčky,
- $u_2$  [mm] - délka druhé úhlopříčky.

Optické zorné pole mikroskopu pro správné vyhodnocení musí být v rozmezí 25 % až 75 %. Dle této hodnoty se tvrdost HV odečte z tabulek. Tvrdost je vyjádřena jako podíl zkušebního zatížení k ploše povrchu a vypočítá se ze vztahu (2.2) [24].

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{u^2} \text{ [-]} \quad (2.2)$$

, kde:

- HV [-] - tvrdost dle Vickerse,
- F [N] - zatěžující síla,
- u [mm] - průměrná hodnota úhlopříčky.

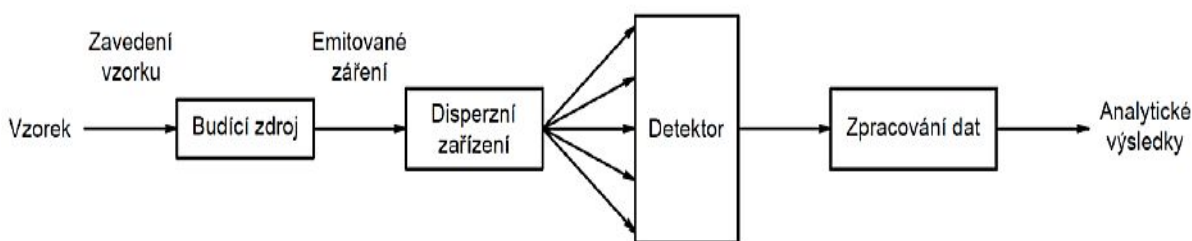
Tab. 2.2 Velikosti zkušebního zatížení [24].

Zkouška tvrdosti		Zkouška tvrdosti při nízkém zatížení		Zkouška mikrotvrdosti	
Značka tvrdosti	Zkušební zatížení [N]	Značka tvrdosti	Zkušební zatížení [N]	Značka tvrdosti	Zkušební zatížení [N]
<b>HV 5</b>	49,3	<b>HV 0,2</b>	1,961	<b>HV 0,010</b>	0,0891
<b>HV 10</b>	98,7	<b>HV 0,3</b>	2,942	<b>HV 0,015</b>	0,1471
<b>HV 20</b>	1961	<b>HV 0,5</b>	4,903	<b>HV 0,02</b>	0,1961
<b>HV 30</b>	294,2	<b>HV 1</b>	9,807	<b>HV 0,025</b>	0,2452
<b>HV 50</b>	490,3	<b>HV 2</b>	19,610	<b>HV 0,05</b>	0,4903
<b>HV 100</b>	980,7	<b>HV 3</b>	29,420	<b>HV 0,1</b>	0,9807

## 2.3 Optická emisní spektrometrie

Metoda optické emisní spektrometrie je založena na excitaci valenčních elektronů v atomech prvků v budicím zdroji do vyššího energetického stavu a při následné deexcitaci (vyzáření) dojde k měření intenzity emitovaného záření o specifické vlnové délce pro každý prvek. Setrvání atomů v excitovaném stavu (metastabilním) je krátkodobé. Převod vzorku z tuhé fáze nebo roztoku do plynného stavu dochází pomocí procesu atomizace a excitace elektronů. Tato spektrometrie se využívá pro stanovení chemického složení běžně používaných kovů a slitin ve strojírenství a v metalurgii. Díky přenosným spektrometrům lze analyzovat materiály přímo na místě [25, 26, 27].

Přístroj pro zjišťování chemického složení se nazývá atomový emisní spektrometr a je tvořen budicím zdrojem, který dodává potřebnou energii pro vyvolání emise záření atomy vzorku. Přístroj se dále skládá z optického systému s disperzním prvkem a z detektoru s konečným vyhodnocením signálu. Schéma přístrojového uspořádání je uvedeno na obr. 2.7 [25, 26].



Obr. 2.7 Základní přístrojové uspořádání [26].

Mezi používané budicí zdroje, které se liší svými parametry, jež ovlivňují dosažené výsledky, patří plamen, elektrické výboje (obloukový výboj, jiskrový výboj, řízený oblouk, doutnavý výboj), plazmové zdroje či lasery [25, 28].

### Plamen

Metoda, používající plamen, se nazývá plamenová fotometrie, ve které je plamen používán jako nejjednodušší způsob excitace prvků. Plamen excituje jen málo prvků z periodické tabulky prvků. Jsou to alkalické kovy a kovy alkalických zemin. Pro vznik plamene se používají směsi paliv a oxidovadla. Nejčastější používaná směs je acetylen-vzduch a acetylen-oxid dusný. Teploty plamene se pohybují v rozmezí 2 000 až 3 000 °C. Vzorek vstříkovaný do plamene musí být ve formě aerosolu [26, 27].

### Elektrické zdroje

Mezi elektrické zdroje patří oblouk a jiskra. Dochází k excitaci vzorku v plazmatech elektrických výbojů, kde je atomům prvků dodávána vysoká energie. Základní parametry obloukového a jiskrového výboje znázorňuje tab. 2.3. Analyzované vzorky mohou být vodivé i nevodivé. Vodivé elektrody mají podobu elektrod a do nevodivých vzorků musí být přidávány přísady (uhlíkový prášek, tavidla, regulátory teploty), které jsou umístěny do dutiny v elektrodě. Elektroda je převážně tvořena uhlíkem, který slouží jako katoda. Anoda je tvořena kovy s malým počtem spektrálních čar (Cu, Ag, Al, Cd). Zařízení při vzniku elektrických výbojů jsou různorodá a mohou pracovat za atmosférického nebo sníženého tlaku. Elektrický výboj vzniká mezi elektrodami v důsledku vysokého napětí ve formě oblouku nebo jiskry [26, 27].

U jiskrového budicího zdroje dochází k přerušovanému střídavému výboji s vysokým napětím a krátkou dobou trvání. V okamžiku, kdy probíhá jiskrový výboj mezi elektrodami, dojde k excitaci příslušných částic do vyšších energetických stavů. Teploty, kterých se dosahuje v jiskrovém výboji, nabývají hodnot okolo 12 000 K [25, 28].

Tab. 2.3 Tabulka základních parametrů obloukového a jiskrového výboje [26].

	Oblouk	Jiskra
Doba trvání výboje [s]	neomezená	$10^{-6}$
Proudová hustota [A]	100 až 101	102 až 103
Teplota plazmatu [°C]	3500 až 7000	12000 až 30000
Charakter spektra	méně čar, převažují atomové čáry	mnoho čar, převažují iontové čáry
Spotřeba vzorku	velká (porušení vzorku)	malá
Využití v analytice	kvalita, stopová analýza	kvantita

### Plazmové zdroje

Buzení v plazmatu je v poslední době moderní metodou, která se používá. Plazma se definuje jako ionizovaný plyn obsahující dostatečnou koncentraci nabitých částic. Počet záporně a kladně nabitých iontů v celkovém objemu plazmatu musí být stejný. Plazma je elektricky vodivé, ale nevykazuje žádný náboj. Plazma vzniká dodáním velkého množství energie (elektrické pole, ionizující záření, vysoká teplota). V plazmatu odevzdávají elektrony při srážkách svou kinetickou energii atomům a molekulám, a tím se soustava zahřívá a ionizace se zvyšuje [26, 27].

### Optická část

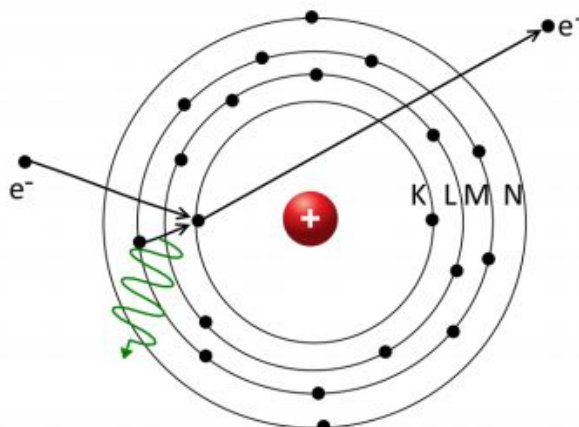
Polychromatické záření vyzářené excitovanými atomy ve zdroji vstupuje štěrbinou do optické části přístroje, kde je pomocí disperzního prvku rozloženo na monochromatické záření. Pomocí monochromátoru dochází k rozkladu záření, který separuje pouze úzký interval vlnových délek. Disperzním prvkem může být hranol nebo mřížka společně se systémem rovinných a dutých zrcadel. Po rozkladu polychromatického záření na disperzním prvkem vychází monochromatické záření ven z monochromátoru přes výstupní štěrbinu na detektor [26, 27].

## 2.4 Rentgenová spektrometrie

Rentgenová spektrometrie je jednou z nejpoužívanějších aplikací atomové spektroskopie subvalenčních elektronů v běžné analytické praxi. Tato metoda využívá interakci částic nebo záření o vysoké energii s atomy vzorku. Rentgenová spektrometrie je založena na interakci elektromagnetického záření krátkých vlnových délek o velikosti 0,01 až 100 nm s atomy, které mohou rentgenové záření pohlcovat (rentgenová absorpční spektrometrie) nebo je mohou při excitaci vysílat (rentgenová fluorescenční spektrometrie). Z energetického hlediska se jedná o oblast v rozsahu 100 eV až 150 keV [27].

Při interakci atomu s urychlenými nabitými částicemi (elektrony, protony) nebo fotony o dostatečné energii nastane vyražení elektronů z vnitřní části atomu, které obíhají v orbitalech ve specifických vzdálenostech od jádra, které jsou uvedeny na obr. 2.8. Na vnitřních slupkách jsou elektrony vázány pevněji a je obtížné tyto částice odstranit z atomu. Proto se používá RTG záření o vysoké energii. Vzniklá vakance, která je způsobená vyražením elektronu z orbitalu, je zaplněna elektronem

z vyšší hladiny. Energetický rozdíl mezi oběma hladinami je uvolněn ve formě RTG záření s intenzitou úměrnou koncentraci prvků, které se ve spektru projeví charakteristickou čarou. Toho lze dosáhnout dvěma způsoby excitací [26, 27].



Obr. 2.8 Schéma vzniku RTG záření [29].

Primární excitace vzniká proudem urychlených částic, nejčastěji elektronů na zkoumaný vzorek. Při srážkách elektronů je možné dojít k pružné a nepružné srážce. Při pružné srážce narazí elektron na jádro atomu, změní svůj směr, ale nezmění svou energii. V případě nepružné srážky elektron změní směr i svou energii, kterou ztratí celou nebo pouze její část. Při primární excitaci elektron neproniká do velké hloubky vzorku, tudíž na přípravu vzorku není kladen velký důraz. RTG záření produkované primární excitací má spojité čárové spektrum. Zatímco sekundární excitace vzniká v případě vyražení elektronu proudem fotonů s vysokou energií. Vzniklá sekundární excitace poskytuje pouze čárové spektrum. Tato metoda je využívána daleko častěji než metoda primární excitace [28, 30].

#### 2.4.1 Rentgenová fluorescenční spektrometrie

Principem metody rentgenové fluorescenční spektrometrie je zaznamenávání a vyhodnocování sekundárního záření emitované vzorkem. Zkoumaný druh prvků ve vzorku je možné zjistit pomocí vlnových délek charakteristických čar ve spektru, jejichž procentuální zastoupení je dáno intenzitou čar. Tato metoda je používána pro analýzu prvků, které mají periodické číslo větší než 5 (dusík) [26, 27].



Obr. 2.9 Základní přístrojové uspořádání [27].

Základní instrumentaci pro XRF lze vidět na obr. 2.9 obsahující tři základní části. V první části se jako zdroj budící energie stává samotné buzení charakteristického záření. Dále dochází k interakci RTG záření se zkoumaným vzorkem, který emituje sekundární záření. Sekundární paprsky následně dopadají na detektor, kde se vyhodnocují spektra [27].

Jako vhodný zdroj primárního rentgenového záření, který ozáří vzorek, se jeví rentgenová lampa (rentgenka). Dalším zdrojem záření je buzení radioizotopy. Rentgenová lampa je nejběžnější zdroj RTG záření. Lampa se skládá ze žhaveného wolframového vlákna, které tvoří katodu umístěnou uvnitř trubice. Ze žhaveného vlákna vylétají elektrony, které jsou urychlovány v elektrickém poli

směrem k protilehlé anodě tvořenou kovovým terčíkem Cr a W. Vlivem zbrzdění elektronu v materiálu anody vzniká spojité RTG spektrum. Při dopadu elektronu na anodu dochází k emisi RTG záření, které postranním okénkem z prvku Be vychází ven. Energie elektronů dopadajících na anodu je přeměněna na teplo, tudíž musí být rentgenky chlazeny [26, 27, 31].

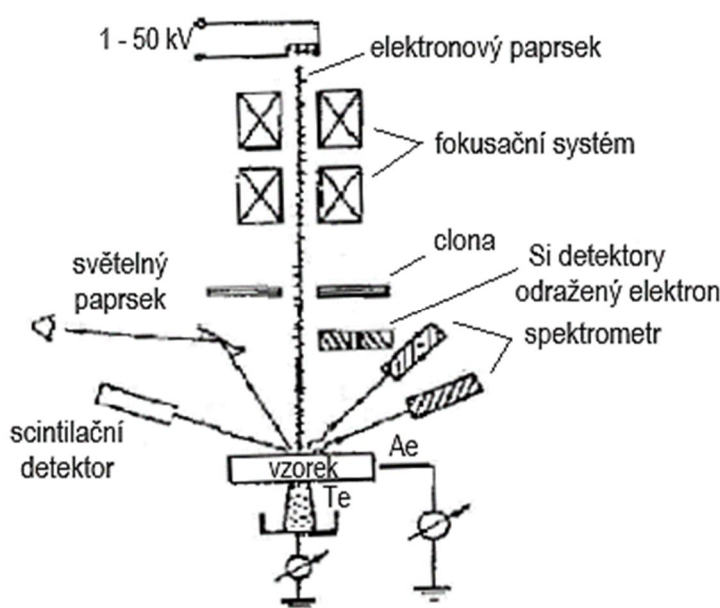
Rozklad (disperze) rentgenového záření se provádí podle vlnových délek (přístroje vlnově disperzní) nebo podle energie fotonů (přístroje energiově disperzní). Vlnově disperzní přístroje využívají difrakci rentgenového záření na krystalických rovinách. Energetická disperze na rozdíl od vlnové disperze vzniká přímo na detektoru, do kterého vstupuje sekundární záření. Detektor snímá současně celé spektrum a mění energii fotonů v elektrické pulsy, jejichž velikost je úměrná energii dopadajících fotonů. Ty jsou zesíleny a dále zpracovány multikanálovým analyzátozem. Poloha kanálu definuje energii fotonů (vlnovou délku) a četnost impulzů intenzity záření o příslušné energii. Rentgenové záření je tedy rozděleno podle energie [26, 27, 28].

## 2.5 Mikroskopie

V dané kapitole je charakterizována elektronová a optická mikroskopie, které se využívají v různých odvětvích jako je lékařství, biologie, chemický průmysl nebo materiálové inženýrství. Obě mikroskopie jsou nezbytnou součástí analýzy testovaných vzorků.

### 2.5.1 Elektronová mikroskopie

Princip metody elektronové mikroskopie spočívá v urychlování svazku elektronů na plošku vzorku vysokým napětím až 50 kV. Elektrony pronikají do velmi malé hloubky (mikrometrů) pod povrch vzorku. Při interakci elektronu se vzorkem dochází k několika procesům. Část elektronů je absorbována (50 % až 90 % celkového proudu elektronů) a část je odražena. U odražených elektronů dochází k emisi sekundárních elektronů, tudíž ke vzniku rentgenového záření. To je využíváno při tzv. rentgenové mikroanalýze, kde je detekováno primární RTG záření detektorem. Tato metoda je spojením elektronového mikroskopu a elektronové mikrosondy [26, 27, 28].



Obr. 2.10 Schéma elektronové mikrosondy [28].



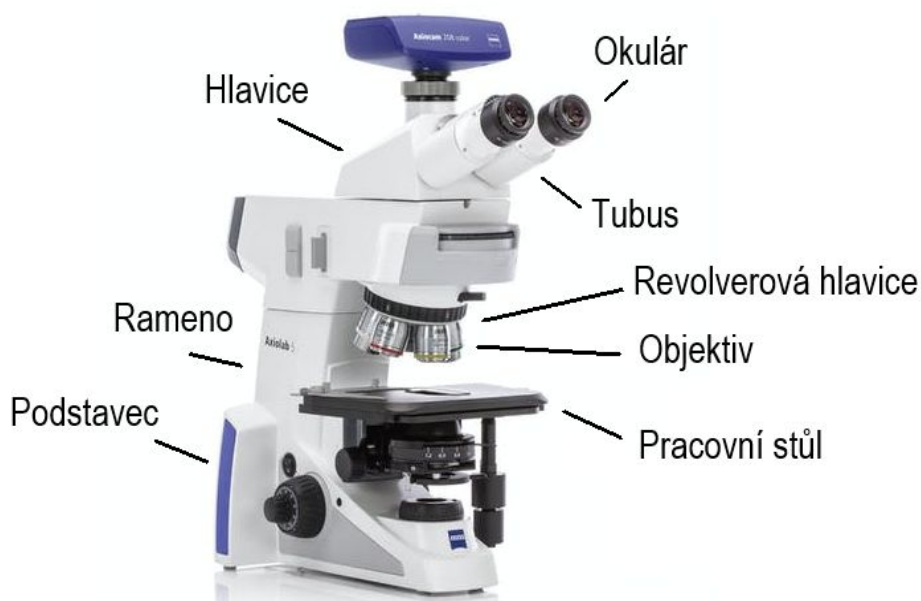
Elektronový mikroskop, zobrazen na obr. 2.10, se skládá z elektronové trysky, která je užívána jako zdroj elektronů. Nejpoužívanějším typem trysky z ekonomického důvodu je žhavené wolframové vlákno. Na definovanou plochu jsou elektrony urychlovány pomocí vysokého napětí a dráhu letu mění systém elektromagnetických a elektrostatických čoček (fokusační systém). Magnetické čočky umožňují snadnou stabilizaci elektronových paprsků a skládají se z cívky generující magnetický tok a magnetických pólů [28, 32].

Elektronová mikroskopie slouží pro zkoumání povrchových jevů materiálu, pro zkoumání reakcí na rozhraní fází (koroze), a také pro technologickou kontrolu při výrobě materiálu pomocí elektronového mikroskopu. Mikroskop využívá pro zobrazení vzorku elektronový svazek. Elektronovou mikroskopii lze rozdělit na transmisní elektronovou mikroskopii (TEM), která pracuje na bázi prozáření vzorku pomocí prošlých elektronů, a rastrovací elektronovou mikroskopii (SEM) pracující na principu postupného snímání vzorku bod po bodu. Takto je postupně skládán obraz vzorku. [28, 32].

### 2.5.2 Optická mikroskopie

Optický neboli světelný mikroskop je zařízení, který využívá viditelné světlo a systém čoček ke zvětšení snímků malých předmětů, které nelze pouhým okem spatřit. Optické mikroskopy mohou být jednoduché, ačkoli existují i složitější, jejichž cílem je zlepšit rozlišení a kontrast vzorku. Obraz z optického mikroskopu lze zachytit i běžnými kamerami citlivými na světlo a vytvořit tak mikrofotografii. V současné době jsou k dispozici digitální mikroskopy, viz obr. 2.11, kterými pomocí CCD kamery (Charge Coupled Device – elektronická součástka pro snímání obrazové informace) lze zachytit digitální obraz. Zkoumaný vzorek se tak zobrazí přímo na obrazovce počítače [33].

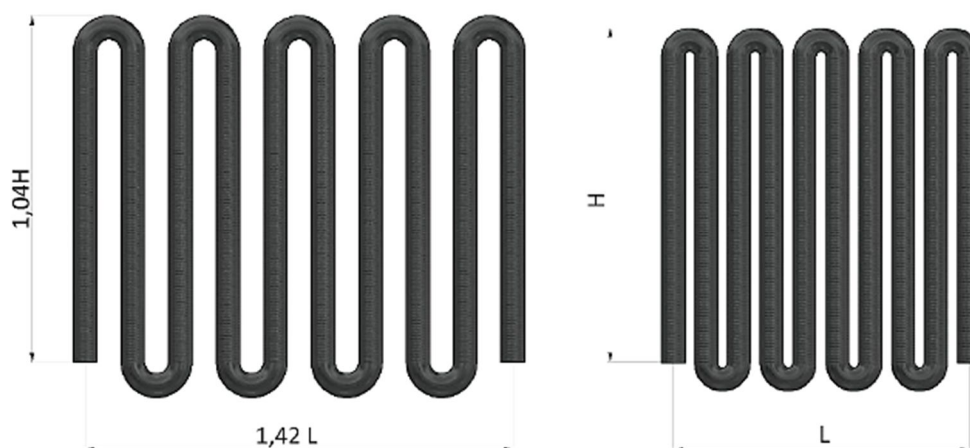
Optická mikroskopie se využívá ke studiu topologie povrchu. Jestliže je požadavek na odhalení vlastností jako je koroze, eroze, praskliny, pórovitost nebo inkluze, vyšetření se často provádí na vyleštěném a nenaleptaném stavu. Pokud je u oceli potřeba odhalit mikrostrukturální fáze, jako je ferit, martenzit či austenit, musí se materiál vzorku naleptat. Po nanesení leptadla optická mikroskopie odhalí velikost a tvar zrn, oduhličování nebo jakékoli vícefázové struktury [34].



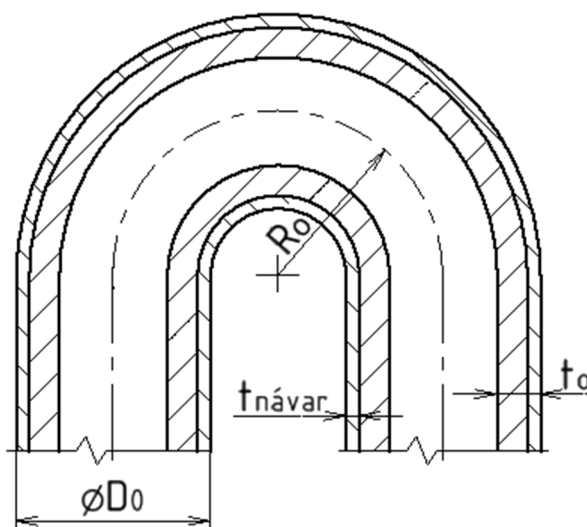
Obr. 2.11 Optický mikroskop [35].

### 3 DEFINICE KRITICKÝCH MÍST A SPECIFIKACE MOŽNÝCH VAD

Ohyb trubek do požadovaných tvarů vzniká až po samotném návaru. Z důvodu složitosti procesu ohýbání je nutné dosáhnout požadovaných parametrů jako minimální tloušťka stěny, přípustná odchylna kruhovitosti, zvlnění nebo povrch, který musí být bez vad (rýhy, zářezy nebo trhliny). Eliminace vytváření trhlín umožní větší produkci jednotlivých výrobků. Samotným tvářecím ohybem trubky je generováno mnoho kritických oblastí a možných vad. Tváření je možné provádět za tepla nebo za studena bez trnu. V experimentální části bylo použito tváření za studena bez trnu. U oblouku s ohybem  $1D$  je poměr zkrácení stěny na vnitřní straně ku prodloužení na vnější straně  $1:3$ . U superkritického ohybu  $0,7D$ , zobrazen na obr. 3.2, je poměr  $1:6$  a tím se výrazně mění i silové zatížení a zároveň se zredukuje prostor systému. U tohoto ohybu je náchylnost k tvorbě vad a možných trhlín daleko větší, jelikož je potřeba vyvinout větší sílu. Hadovitý systém obou ohybů je zobrazen na obr. 3.1. K vytváření prasklin, šíření trhlín a delaminaci dochází především v oblasti svaru u obou materiálů trubky. Ve většině případů vznikají defekty při nedodržení technologie [1, 36].



Obr. 3.1 Hadovitý systém  $180^\circ$  s ohybem  $1D$  (vlevo) a s ohybem  $0,7D$  (vpravo) [1].



Obr. 3.2 Bimetalový trubkový oblouk  $180^\circ$  s prodlouženými konci a ohybem  $0,7D$ .

Při procesu ohýbání se trvale mění křivost ohýbané součásti vlivem lokálních sil nebo ohybových momentů a zmenšuje se poloměr ohybu. Při ohybu trubek je proces stejný jako u ohybu pásů. Před definováním kritických míst je nutné zjistit kritéria

technologičnosti ohýbané trubky z hlediska síly stěn, poloměru ohybu nebo stupně obtížnosti ohýbání, který ukazuje možnost vzniku defektů. Tab. 3.1 udává mezní hodnoty jednotlivých kritérií procesu ohýbání [36, 37].

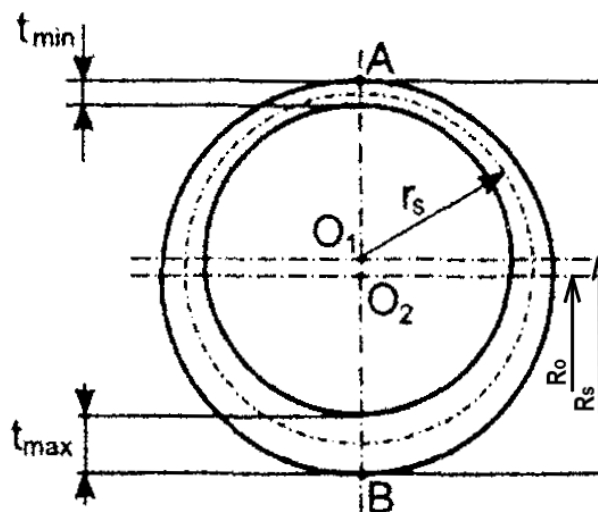
Tab. 3.1 Kritéria technologičnosti [36].

Stupeň obtížnosti procesu	Nevhodné podmínky	$t_0/D_0 \leq 0,05$	$R_{\text{vnitřní}}/D_0 \leq 2,5$
	Přijatelné podmínky	$t_0/D_0 = 0,075$	$R_{\text{vnitřní}}/D_0 = 2,5$
	Optimální podmínky	$t_0/D_0 \geq 0,1$	$R_{\text{vnitřní}}/D_0 \geq 3$
Relativní tloušťka stěny	Tenkostěnné	$t_0/D_0 < 0,1$	
	Tlustostěnné	$t_0/D_0 > 0,05$	
Relativní poloměr ohybu	Ostrý	$R_{\text{vnitřní}}/D_0 \leq 6$	
	Volný	$R_{\text{vnitřní}}/D_0 > 6$	

Dalším parametrem je stanovení minimálního poloměru ohybu, který je ovlivňován faktory jako je plasticita, tloušťka stěny nebo metoda ohýbání. Vlivem odlišného druhu namáhání na trubkovém oblouku je definováno první kritické místo na vnitřní a vnější straně trubky. Na vnější straně trubky je materiál natahován a tím namáhán na tah, na vnitřní straně je naopak stlačován a namáhán na tlak. K dalším vznikajícím poruchám při ohybu patří zvlnění na vnitřní straně trubky, odpružení po dokončení ohybu, vznik ovality (zploštění) a ztenčení vnější stěny trubky. Eliminací vzniků těchto defektů je dosaženo užitím různých typů stabilizačních vložek a výplní. Mezi ně patří výplně tuhé, sypké, tekuté, elastické nebo mechanické. Nejběžnější mechanickou výplní jsou stabilizační trny. Jiným typem eliminace je použití osové tlakové přídavné síly [1,36].

### 3.1 Definování minimální tloušťky stěny $t_{\min}$

K pěchování trubky obvykle dochází v místě oblouku na vnitřní straně, kde je materiál stlačován. Na vnější straně je materiál natahován a dochází tím ke ztenčení stěny. V extrémním případě dosáhne tahové napětí meze pevnosti, a to vede ke vzniku trhlin v důsledku vyčerpání plasticity materiálu. Schéma přesunu materiálu v místě ohybu lze vidět na obr. 3.3 [36].



Obr. 3.3 Schéma přesunu materiálu v místě ohybu [36].

Z těchto důvodů je nutno připravit polotovary, aby nedošlo k výraznému nepoměru tloušťky návaru na protilehlých stranách. Zvolením správné technologie nebo využitím výplně se dá částečně omezit ztenčování vnější stěny. Dále se dá tento děj eliminovat zvolením metody procesu ohýbání za současného tlaku. Z důvodu vysokého zatížení vnitřním tlakem, především v instalačních systémech, nesmí ztenčení překročit hranici 25 % tloušťky stěny. Pokud k tomu dojde, je nutno provést po ohybu tepelné zpracování žíhání ke snížení pnutí. Výpočet minimální tloušťky stěny  $t_{min}$  a následné dosazení pro ohyb  $0,7D$  je uvedeno vztahem (3.1). Rozměry jsou získány z CAD modelu využívaného u experimentální části [36, 38].

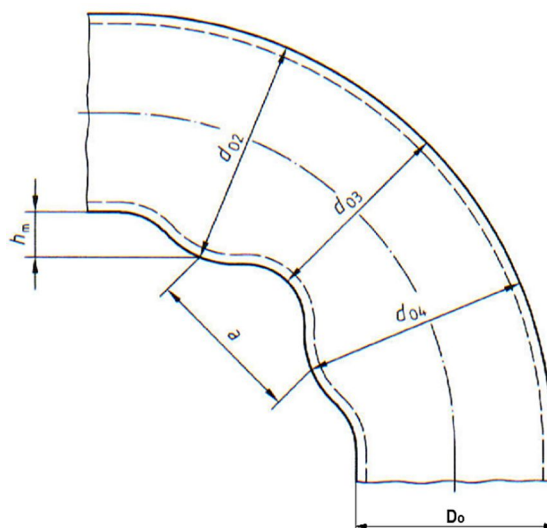
$$t_{min} = t_0 \cdot \left(1 - \frac{D_0 - t_0}{2 \cdot R_0}\right) = 9,85 \cdot \left(1 - \frac{44,3 - 9,85}{2 \cdot 39,655}\right) = 5,35 \text{ mm} \quad (3.1)$$

, kde:

$t_{min}$ [mm]	-	požadovaná minimální tloušťka trubky,
$t_0$ [mm]	-	výchozí tloušťka stěny,
$R_0$ [mm]	-	poloměr ohybu měřený k ose trubky,
$D_0$ [mm]	-	jmenovitý vnější průměr trubky.

### 3.2 Zvlnění na vnitřní straně trubkového ohybu

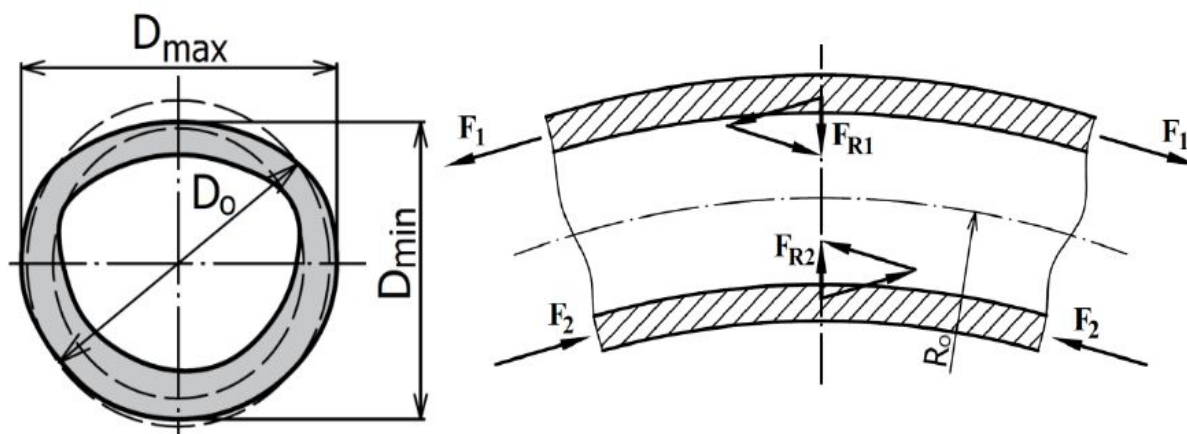
Tato několikanásobná vlna, připomínající nerovnosti, nastává na vnitřní straně trubky, což je patrné na obr. 3.4. Příčinou tohoto děje je pěchování materiálu trubky v místě ohybu, následná ztráta stability, a nakonec zvlnění trubkového oblouku. V provozech, kde jsou kladeny vysoké nároky na ohyb, je tento jev nežádoucí, neboť v místě zvlnění po čase dochází k únavovým porušením. Tento děj lze omezit výplněmi nebo odlišnou technologií ohýbání. Ve firmách si volí limitní počet vln dle funkce dílce. Norma uvádí nepřijatelnost zvlnění do hodnoty jmenovitého vnějšího průměru 80 mm. Výjimkou je pouze předpoklad, kde vrcholová a dolní část nepřekročí mezní hodnotu odchylek kruhovitosti. Podmínky přijatelnosti zvlnění jsou stanoveny amplitudou zvlnění a roztečí vlny [36, 38].



Obr. 3.4 Zvlnění na vnitřní straně trubky [38].

### 3.3 Ovalita (zploštění) trubky

Jednoduchou zkouškou kruhovitosti vnitřního průměru je kontrola kuličkou o rozměrech, které jsou předepsány firmou a jejich normami. Přípustné hodnoty jsou ověřovány průchodem kuličky, která se prostrčí skrz trubkový oblouk. Změna průřezu z kružnice na elipsu u vnějšího průměru zobrazující obr. 3.5 vlevo je hodnocena pomocí odchylky kruhovitosti, stanovená rovnicí (3.2). Do určité míry lze ovalitu potlačit užitím výplně. Vysvětlení vzniku zploštění znázorňuje obr. 3.5 vpravo, kde je uvedeno rozložení vnitřních sil vyvolané ohybovým momentem. Radiální síly  $F_{R1}$  a  $F_{R2}$  jsou výslednice sil  $F_1$  a  $F_2$  způsobené tahovým, příp. tlakovým napětím [39].

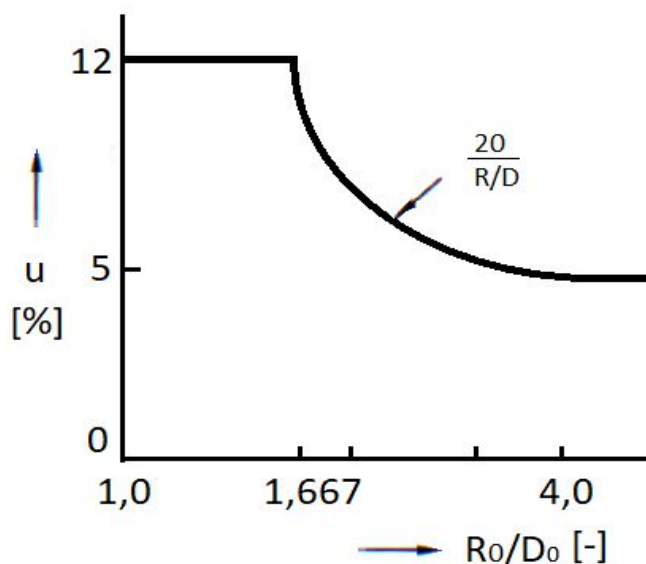


Obr. 3.5 Schéma ovality zploštění (vlevo) a rozklad sil v místě ohybu (vpravo) [39].

$$u = 2 \cdot \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}} \cdot 100 [\%] \quad (3.2)$$

- , kde:
- $u$  [%] - odchylka kruhovitosti,
  - $D_{max}$  [mm] - maximální vnější průměr naměřený na vrcholu trubkového profilu,
  - $D_{min}$  [mm] - minimální vnější průměr naměřený ve stejném místě jako  $D_{max}$ .

Přípustné hodnoty odchylek kruhovitosti dle poměru  $D_0/R_0$  jsou stanoveny normou ČSN EN 12952-5. Na obr. 3.6 jsou uvedeny mezní hodnoty pro ohyby  $\geq 1D$  při jedné operaci. Pro superkritický ohyb  $0,7D$  není pro jednu operaci mezní hodnota stanovena [36, 38].



Obr. 3.6 Mezní odchytky kruhovitosti pro jednu operaci [38].

### 3.4 Odpružení trubky

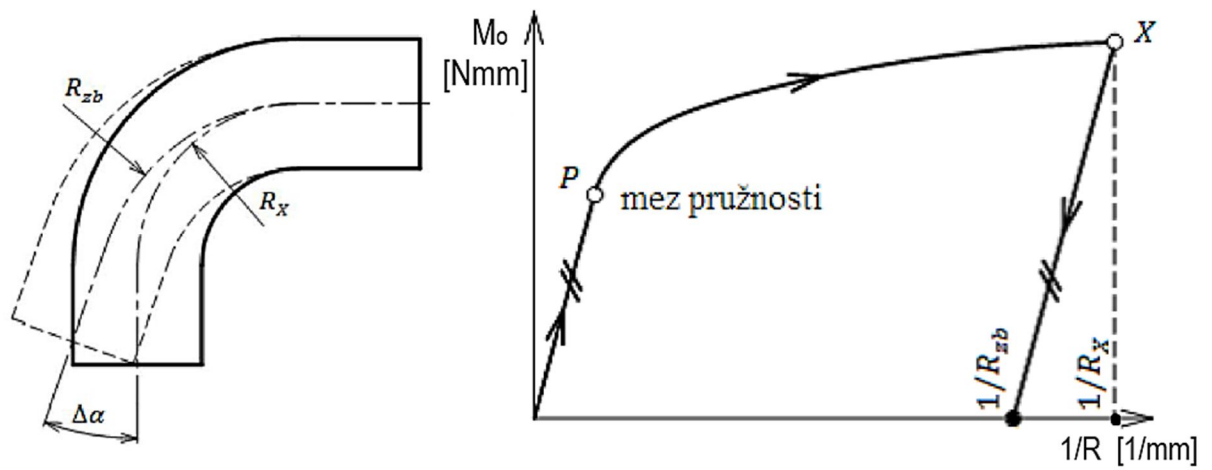
Odpružení trubkového oblouku, viz obr. 3.7 vlevo, je děj způsobený pružnými deformacemi při ohýbání, které po uvolnění zatížení vymizí. Tvar ohýbané součásti nebude kopírovat po ohybu přesný tvar nástroje. Z obr. 3.7 vpravo je vidět nejprve elastickou deformaci dílu a po překročení meze kluzu (bod P) je trubka deformována plasticky. Plastická deformace určuje finální tvar konce trubky. Konečná hodnota poloměru ohybu po uvolnění se stanoví pomocí zbytkového poloměru  $R_{zb}$ , který je dán vztahem (3.3). Převrácená hodnota zbytkového poloměru se nazývá zbytková křivost  $1/R_{zb}$ . Po uvolnění ohybového momentu si tyto hodnoty ohýbaný díl zachovává [36, 39].

$$R_{zb} = \frac{R_0}{1 - \frac{M_0 \cdot R_0}{E \cdot J}} [\text{mm}] \quad (3.3)$$

Úhel odpružení lze stanovit přímo z rovnice (3.4) [36].

$$\Delta\alpha = \alpha - \alpha' = \frac{M_0 \cdot R_0}{E \cdot J} \cdot \alpha [^\circ] \quad (3.4)$$

, kde:	$R_{zb}$ [mm]	-	zbytkový poloměr,
	$R_0$ [mm]	-	poloměr ohybu vztažený k ose trubky,
	$M_0$ [N·mm]	-	ohybový moment,
	$E$ [MPa]	-	modul pružnosti materiálu v tahu,
	$J$ [mm <sup>4</sup> ]	-	kvadratický moment průřezu,
	$\Delta\alpha$ [°]	-	úhel odpružení,
	$\alpha$ [°]	-	úhel ohybu před odlehčením,
	$\alpha'$ [°]	-	úhel ohybu po odlehčení.



Obr. 3.7 Odpružení po ohybu (vlevo) a schematické znázornění velikosti odpružení [39].

## 4 ROZMĚROVÁ A TVAROVÁ ANALÝZA

V této analýze se měřila tloušťka stěn trubkového oblouku v podélném a příčném směru pomocí optických mikroskopů. Ze získaných snímků jsou znázorněny vzniklé praskliny při ohybu na vnitřní straně trubkového oblouku. Dále je uveden rozbor průběhu odchylek a kontrola kruhovitosti skenovaných dílů s poloměrem ohybu 1D a 0,7D pomocí 3D skeneru GOM Atos Compact sken 2M, MV250. Trubkový oblouk, který vykazoval vzniklé nežádoucí odpružení, se dále pro analýzu nepoužíval.

Rozměry ocelové trubky před návarem a samotným ohybem činí na vnějším průměru 38 mm a na vnitřním 26 mm. U vnějšího průměru je stanoven na každé straně návar o tloušťce 2 až 4 mm. Navařování Inconelu 625 na ocelovou trubku proběhlo metodou CMT (Cold Metal Transfer). Tato metoda je modifikací svařování MIG/MAG. Přídavný drát se pohybuje směrem k obrobku, po detekci zkratu se drát posune zpět do hubice. Při zpětném pohybu se uvolní kapka roztaveného kovu. Výhodou této metody je menší vnesené teplo (cca  $0,2 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$ ) a nízká tepelná deformace. Snížení tvorby tepla má pozitivní vliv na nižší hodnotu tloušťky roztaveného základního materiálu [40].

Proces ohýbání byl proveden na ohýbacím stroji AMOB CH 120, uveden na obr. 4.1, který je schopen ohnout trubku s maximálním průměrem 114,3 mm a stěnou 8 mm. Rychlost ohýbání u trubkových oblouků s poloměrem ohybu 0,7D standardně činila  $1^\circ\cdot 1,0 \text{ s}^{-1}$ . U ohybu 1D rychlost ohýbání byla nepatrně vyšší. Hodnota činí  $1^\circ\cdot 0,9 \text{ s}^{-1}$ . Síla na přítlaku byla na stroji nastavena na maximum [41].



Obr. 4.1 Ohýbací stroj AMOB CH 120 [41].

### 4.1 Měření tloušťky stěn trubkového oblouku

V prvním kroku bylo provedeno měření na trubkovém oblouku s poloměrem ohybu 0,7D pomocí optodigitálního metalografického mikroskopu Olympus DSX 100, který slouží k pozorování makrostruktury a lomových ploch. Objektiv mikroskopu pracuje s širokouhlým zoomem s optikou 16x a maximálním zvětšením 30x. U tohoto přístroje je možno přibližovací hlavu naklápět a pozorovat vzorek z jiného úhlu pohledu bez jakékoli úpravy mikroskopu. Před tímto rozbořem se část trubkového oblouku rozřízla v podélném směru na dvě poloviny. Dále se vzorek brousil na metalografické brusce PX500 LECO na papírech o zrnitosti 80 a 220. Metalografický mikroskop a poloautomatickou brusku lze vidět na obr. 4.2. Měření se provádělo jak na celém bimetalovém materiálu, tak i na samotném návare z Inconelu 625 [42].





Obr. 4.2 Mikroskop Olympus DSX 100 (vlevo) a bruska PX500 LECO (vpravo) [42, 43].

V další části byla měřena tloušťka stěny na metalografickém mikroskopu ZEISS Neophot 32. Síla stěny u této analýzy byla hodnocena z vyříznutého segmentu rovné trubky bez ohybu, na rozdíl od měření u mikroskopu Olympus DSX 100. Metalografický mikroskop ZEISS Neophot 32 umožňuje pozorování na světlém nebo tmavém poli a polarizovaném světle. Je vybaven kamerou a softwarem pro obrazovou analýzu Axiovision a je schopen pracovat s 2000x zvětšením. Tento přístroj je uveden na obr. 4.3. Měření bylo provedeno v příčném řezu na vyříznutém segmentu o tloušťce 10 mm pouze u návaru Inconel 625. Vzorek se rozdělil po obvodu na 3 stejné části. Před analýzou se provedla příprava vzorku v podobě broušení a následného leštění bez leptání, které nebylo nutné použít pro hodnocení tloušťky vzorku. [44].



Obr. 4.3 Mikroskop ZEISS Neophot 32 [45].

#### 4.1.1 Měření v podélném řezu pomocí mikroskopu Olympus DSX 100



Obr. 4.4 Znárodnění vnitřní a vnější strany v podélném řezu trubkového oblouku.

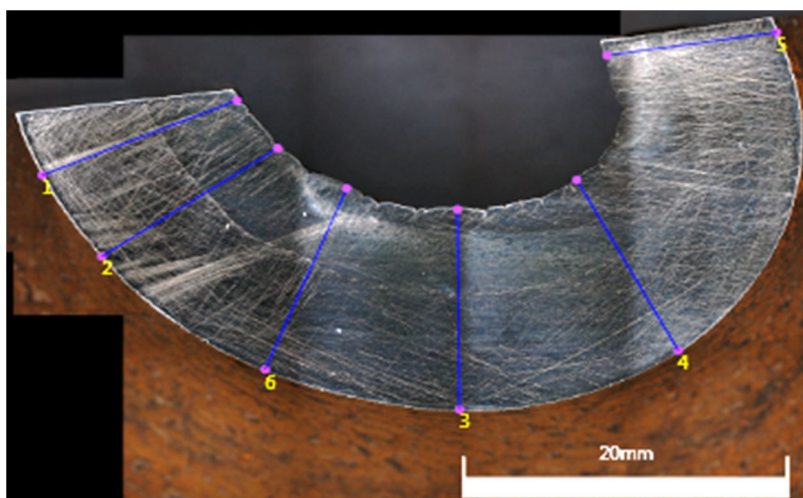
V první fázi se měření provedlo pro vnitřní a vnější část ohybu bimetalové trubky se superkritickým poloměrem ohybu  $0,7D$ . Podélný řez trubkového oblouku je znázorněn na obr. 4.4. Z naměřených hodnot byl přístrojem vypočítán aritmetický průměr dle vztahu (4.1) a směrodatná odchylka dle rovnice (4.2). Na vnitřní části ohybu lze vidět nárůst materiálu, naopak na vnější části došlo ke ztenčení stěny. Síla stěny trubkového oblouku se mění v průběhu ohybu. Oba obrazy ohybu jsou zobrazeny na obr. 4.5 a obr. 4.6. Na vnitřní straně proběhlo měření na 6 místech a na vnější na 12 místech. Hodnoty z měření aritmetického průměru a směrodatné odchylky jsou zaneseny do tab. 4.1.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \text{ [mm]} \quad (4.1)$$

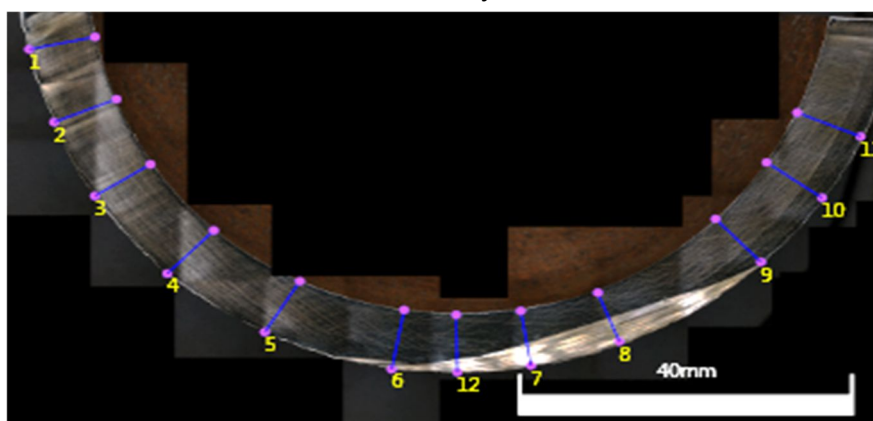
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \text{ [mm]} \quad (4.2)$$

, kde:

$\bar{x}$ [mm]	-	aritmetický průměr,
$\sigma$ [mm]	-	směrodatná odchylka,
$n$ [-]	-	počet měření,
$x_i$ [mm]	-	$i$ -té měření.



Obr. 4.5 Obraz vnitřní stěny trubkového oblouku.



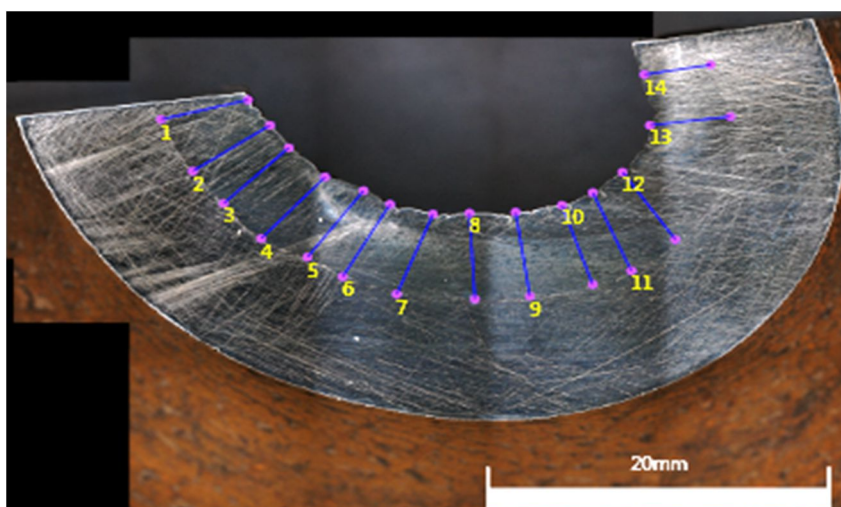
Obr. 4.6 Obraz vnější stěny trubkového oblouku.

Nejvyšší hodnota tloušťky vnitřní strany je ve 3. místě měření, které bylo provedeno v blízkosti vrcholu trubkového oblouku. Naopak v 5. místě je hodnota nejnižší, tedy v místě, kde je materiál zapřen do nástroje při procesu ohýbání. Při měření tloušťky vnější stěny ohybu bylo provedeno 12 měření. Nejnižších hodnot dosahuje tloušťka stěny v místech 7 a 8, maximálních hodnot v místech měření 5 a 6.

Tab. 4.1 Výsledky měření tloušťky vnitřní a vnější stěny bimetalového trubkového oblouku.

Místo měření	Vzdálenost [mm]	
	Vnitřní	Vnější
1	13,02	8,11
2	13,07	8,19
3	13,49	8,07
4	13,09	8,31
5	10,57	8,38
6	13,20	8,60
7	-	7,88
8	-	7,43
9	-	8,22
10	-	8,38
11	-	8,37
12	-	8,19
<b>Aritmetický průměr [mm]</b>	12,74	8,18
<b>Směrodatná odchylka [mm]</b>	0,98	0,29

V další fázi proběhlo měření tloušťky pouze návaru Inconelu 625. Na vnitřní části, obr. 4.7, se provedlo 14 měření. Na vnější části pouze 4 měření, obr. 4.8, z důvodu nesprávné metalografické přípravy vzorku, neboť navařená vrstva vykazovala špatnou viditelnost pod mikroskopem. Tloušťka návaru dosahovala menších hodnot než tloušťka stěny základní ocelové trubky (tloušťka stěny ocelové trubky v základním stavu měla vyšší hodnotu než tloušťka samotného návaru). Výsledky měření vnitřní i vnější stěny návaru společně s aritmetickým průměrem a směrodatnou odchylkou jsou zaznamenány v tab. 4.2.



Obr. 4.7 Obrázek vnitřní stěny návaru trubky.



Obr. 4.8 Obrázek vnitřní stěny návaru trubky.

Při měření celého trubkového oblouku i samotného návaru dosahuje tloušťka materiálu na vnitřní straně ohybu vyšších hodnot, jelikož dochází k přesunu materiálu z vnější strany do vnitřní. Nejmenší hodnoty nabývají v místě měření 13 a 14 u vnitřní stěny, tedy ve stejném místě jako u celkového oblouku. Nejvyšších hodnot je dosaženo v místě měření 7 a 8, tedy v místě zvlnění materiálu.

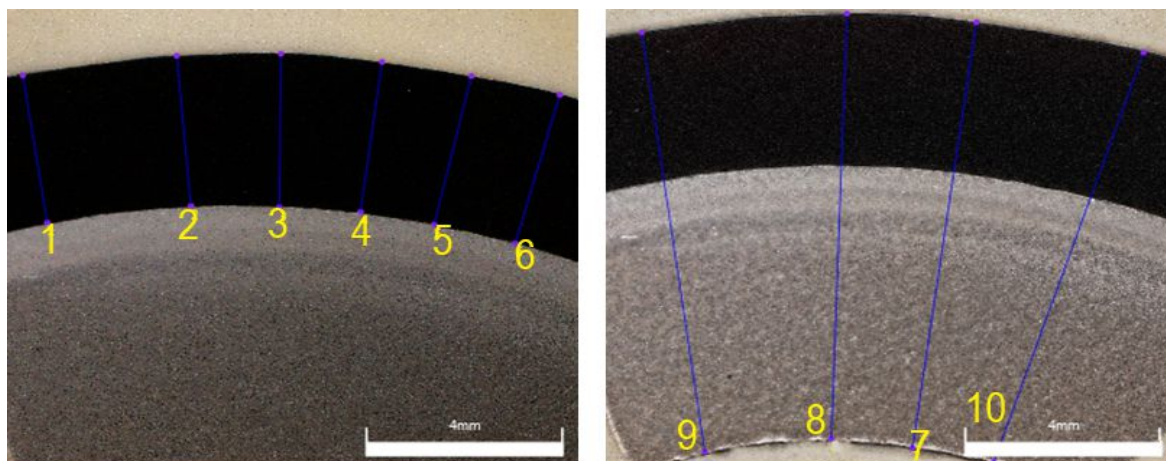
Tab. 4.2 Výsledky měření tloušťky vnitřní a vnější stěny návaru trubkového oblouku.

Místo měření	Vzdálenost [mm]	
	Vnitřní	Vnější
1	5,26	3,22
2	5,44	2,90
3	5,30	3,18
4	5,53	3,07
5	5,49	-
6	5,53	-
7	5,71	-
8	5,69	-
9	5,62	-
10	5,53	-
11	5,64	-
12	5,43	-
13	4,75	-
14	3,93	-
<b>Aritmetický průměr [mm]</b>	5,34	3,09
<b>Směrodatná odchylka [mm]</b>	0,46	0,13

Velikost vnitřních i vnějších stěn trubky se mění v závislosti na průběhu ohybu. Hodnoty u vnitřní části trubky se pohybují kolem 13 mm z důvodu natažení trubky. Pouze v místě 5 je hodnota 10 mm. U vnější části se hodnoty pohybují okolo 8 mm. Z vysokých hodnot směrodatných odchylek u vnitřní části trubky lze predikovat rozptyl v hodnotách tloušťky stěn. Tloušťka vnitřní části návaru se v různých místech značně liší a pohybuje se od hodnoty 3,93 mm až do hodnoty 5,71 mm. U vnější části činí hodnota návaru přibližně 3 mm.

#### 4.1.2 Měření v příčném řezu pomocí mikroskopu Olympus DSX 100

Měření tloušťky stěny trubky i návaru proběhlo nejen v místě ohybu, ale i v příčném řezu rovné části trubkového oblouku. Bylo provedeno celkem 6 měření u návaru a 4 měření u celé stěny trubky, viz obr. 4.9. Hodnoty obou měření jsou znázorněny v tab. 4.3 a dosahují hodnot u návaru 3,43 mm a 9,67 mm u trubky.

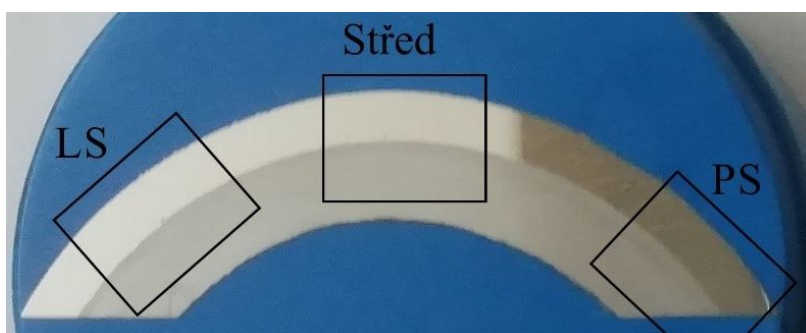


Obr. 4.9 Měření tloušťky stěny návaru a trubky rovné části.

Tab. 4.3 Výsledky měření tloušťky návaru a trubky rovné části trubkového oblouku.

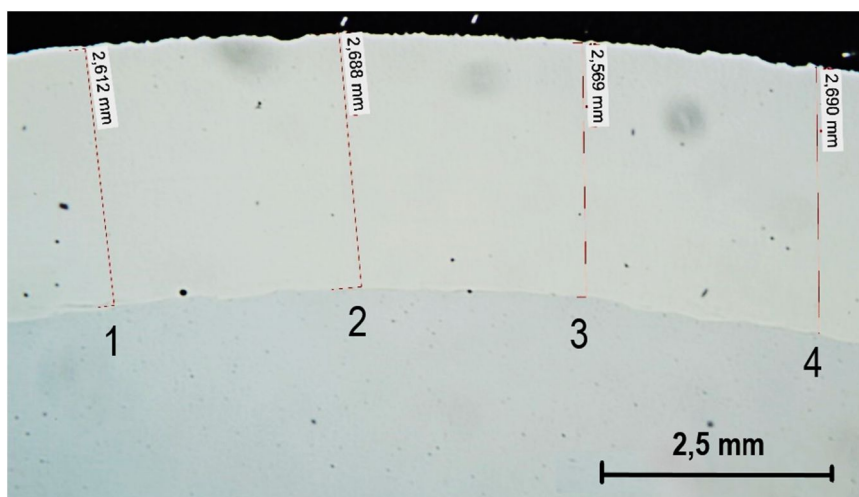
Místo měření	Vzdálenost [mm]	
	Návar	Trubkový oblouk
1	3,37	-
2	3,40	-
3	3,47	-
4	3,42	-
5	3,44	-
6	3,48	-
7	-	9,71
8	-	9,61
9	-	9,57
10	-	9,77
<b>Aritmetický průměr [mm]</b>	3,43	9,67
<b>Směrodatná odchylka [mm]</b>	0,04	0,08

#### 4.1.3 Měření v příčném směru pomocí mikroskopu ZEISS Neophot 32

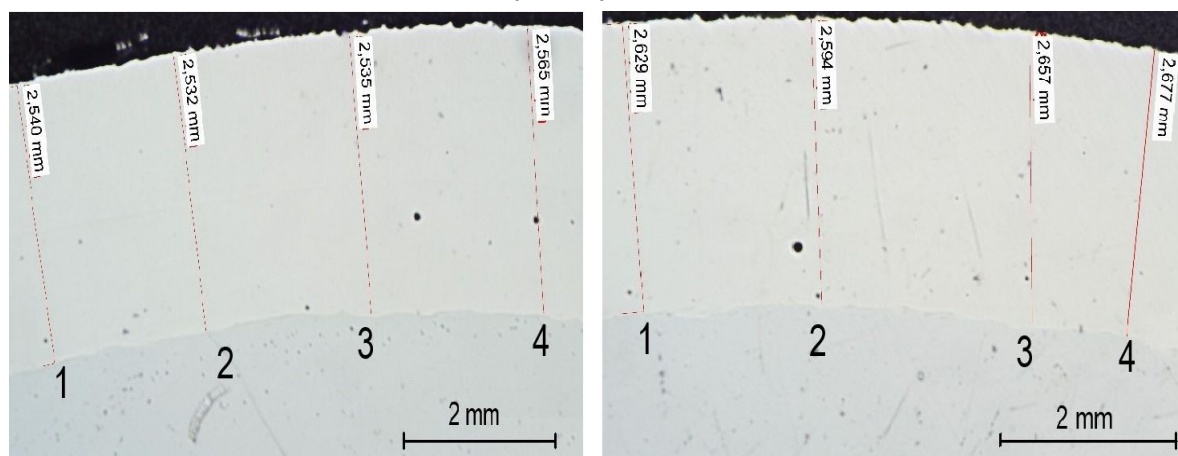


Obr. 4.10 Místa měření tloušťky stěny návaru [46].

Pomocí mikroskopu ZEISS Neophot 32 měření tloušťky probíhalo přibližně po 60° ve třech místech, které jsou znázorněny na obr. 4.10 a jsou zaostřeny přednostně na pozorovanou vrstvu návaru. Nejprve na levé straně, dále uprostřed vzorku, a nakonec na pravé straně výbrusu. Na všech místech byla vykonána 4 měření s minimálním odstupem 1 mm od následujícího místa. Všechny naměřené hodnoty návaru Inconel 625 z jednotlivých měření jsou zaneseny do tab. 4.4. Na obr. 4.11 je zobrazeno měření středu segmentu a na obr. 4.12 jsou uvedeny obrázky levé a pravé hodnotící části [46].



Obr. 4.11 Měření tloušťky vrstvy v prostřední části vzorku [46].



Obr. 4.12 Měření tloušťky vrstvy v levé a pravé části vzorku [46].

Tab. 4.4 Výsledky měření v jednotlivých částech vzorku návaru [46].

Číslo měření	Vzdálenost [mm]		
	Střední část	Levá část	Pravá část
1	2,61	2,54	2,63
2	2,69	2,53	2,59
3	2,57	2,54	2,66
4	2,69	2,57	2,68
<b>Aritmetický průměr [mm]</b>	2,64	2,55	2,64
<b>Směrodatná odchylka [mm]</b>	0,05	0,02	0,03

Hodnoty tloušťek jsou ve všech místech měření přibližně stejné. Z hodnot každé části je vypočítán aritmetický průměr a směrodatná odchylka. Tloušťka stěny návaru měřená v prostřední části činí 2,64 mm, v levé 2,55 mm a v pravé části 2,64 mm.

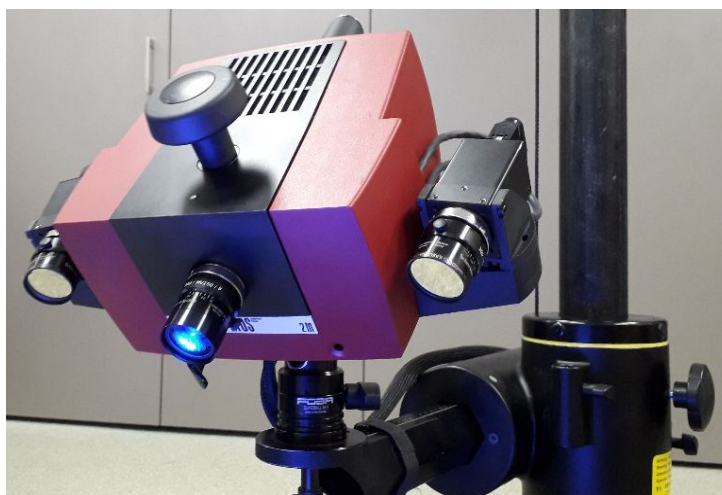
## 4.2 Analýza rozměrů a kruhovitosti pomocí 3D skeneru ATOS

Před samotnou rozměrovou analýzou pomocí 3D skeneru se provedla kapilární zkouška dle normy ČSN EN ISO 3452-1 potřebná k vyloučení možných trhlin na stranách ohýbané trubky. Prvním krokem zkoušky bylo očištění zkoušeného povrchu trubkového oblouku pomocí rozpouštědla za účelem odstranění nečistot. Dále se na dílec rovnoměrně nanasla penetrační vrstva a po uplynutí penetrační doby se odstranil přebytečný penetrant. V závěrečné fázi se na zkoušený povrch trubkového oblouku rovnoměrnou tenkou vrstvou aplikovala vývojka v podobě bílého prášku, která slouží pro poskytnutí kontrastu pozadí. Tento proces je uveden na obr. 4.13. Po zaschnutí se zkouška vyhodnotila [47].



Obr. 4.13 Kapilární zkouška ohybu 0,7D [47].

Část rozměrové analýzy byla provedena pomocí 3D skeneru GOM Atos Compact scan 2M, MV 250, který je uveden na obr. 4.14. Tento optický skener od společnosti GOM je umístěn na stativu s rozlišením kamery 2 Mpx. Pracovní rozsah činí 0,4 až 1,2 m<sup>2</sup> a minimální vzdálenost mezi dvěma skenovanými body je 0,02 mm. Software tohoto skeneru využívá technologii modrého světla a je přímo určen pro použití ke kontrole kvality. Práce začíná kalibrací 3D skeneru, aby výsledky byly co nejpřesnější. Následně se vzorky očistily a odmastily a byly na ně nalepeny body potřebné k určení polohy. Pro samotné skenování je nutno nanést antireflexní sprej pro lepší viditelnost. V tomto případě se nanasla antireflexní křídový sprej MR 2000. Samotné skenování bylo provedeno rotačně o 360° a rozděleno do 12 dílů. Poté se provedla samotná analýza v programu GOM Inspect [47, 48].



Obr. 4.14 3D skener GOM Atos Compact sken 2M, MV 250.

V programu se nejprve ze souboru STL naimportovala skenovaná součást. Poté se ručně upravily vady na dané bimetalové trubce, jako jsou výstupky, které se odstranily a vyplnily oříznutou plochu. Po úpravě počtu bodů a následném přepočtu sítě (polygonizace) se nastavil globální souřadný systém tak, aby byl u každé analyzované součásti stejný. K vytvoření CAD modelu v programu Autodesk Inventor bylo zapotřebí na všech dílcích změřit vnější a vnitřní průměr rovné části trubky. U ohybu 0,7D se vypočítal aritmetický průměr třech dílců, které byly snímány skenerem. Nakonec se porovnávaly odchylky měřených vzorků od vytvořeného modelu.



Obr. 4.15 Trubkové oblouky s poloměrem ohybu 0,7D.

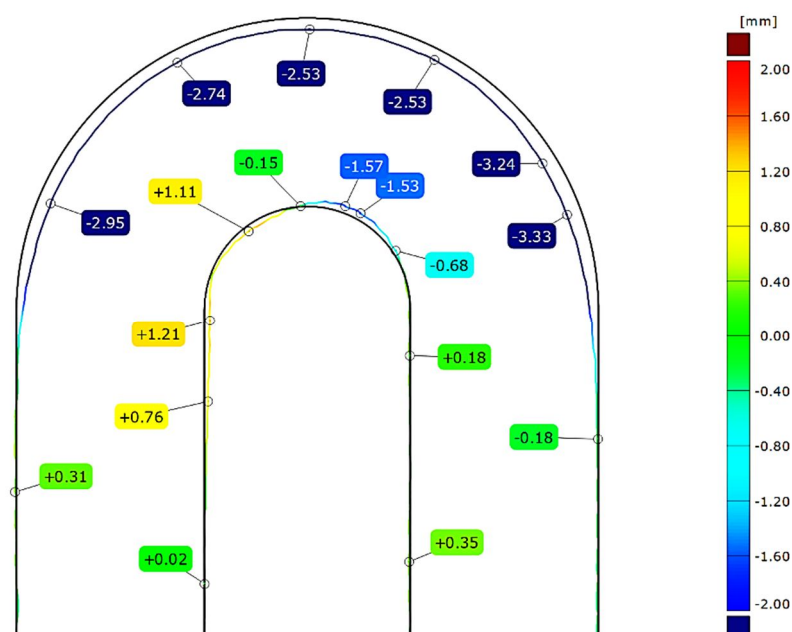
Na obr. 4.15 jsou znázorněny vzorky se superkritickým ohybem 0,7D. Dílec 1 byl využit pro měření odchylek kruhovitosti. Dílec 1 byl využit pro měření odchylek kruhovitosti. Trubkové oblouky 2, 4 a 6 byly využity pro pozorování průběhu odchylek v podélném řezu. Vzorky 3 a 5 měly na vnější straně trhliny, a tak nebyly využity pro analýzu.

#### 4.2.1 Průběh odchylek snímaných vzorků vůči CAD modelu

Analýza u ohybu 1D proběhla pouze na jednom vzorku, u 0,7D ohybu byly měřeny tři vzorky. Průměr vnější části trubky CAD modelu při 1D ohybu činil 42 mm a vnitřní části trubky 25 mm. U superkritického ohybu 0,7D byly hodnoty CAD modelu vnějšího i vnitřního rozměru získány z aritmetického průměru. Vnější průměr trubky činil 44,3 mm a vnitřní průměr 24,6 mm. Vnitřní průměr u obou ohybů se oproti trubce před navařováním, která činí 26 mm, liší. Daný rozdíl může být způsoben tepelným ovlivněním při navařování nebo deformací při ohýbání. Délka prodloužených konců není podstatná při zjišťování odchylek u ohybu. Z obr. 4.16 lze vidět průběh odchylek

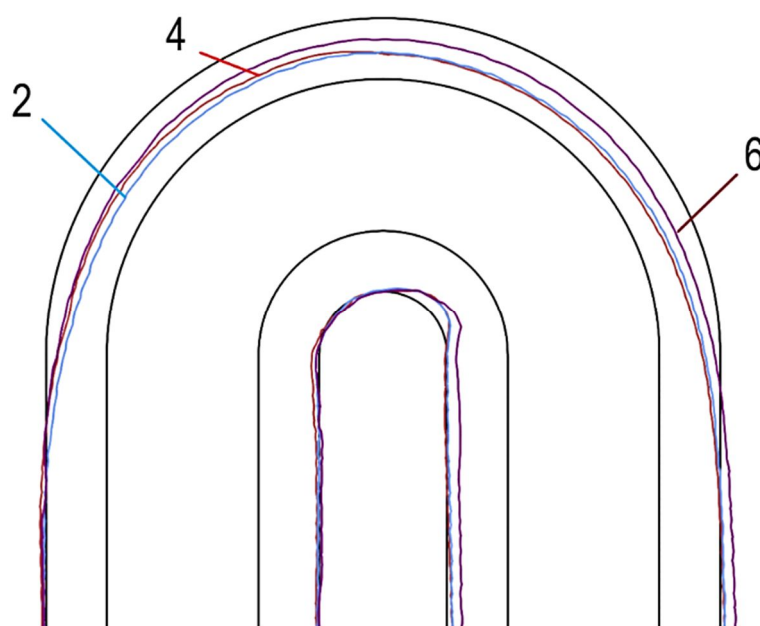


v podélném řezu CAD modelu vůči měřenému dílu u kritického ohybu 1D, na obr. 4.17 jsou znázorněny podélné řezy vzorků ohybu 0,7D a CAD modelu.



Obr. 4.16 Průběh odchylek trubkového oblouku 1D v podélném řezu [47].

Z analýzy podélného řezu trubky u obou ohybů jsou zřejmé deformace. Vnější strana trubky vnějšího oblouku je natažena, čímž se zde sníží její tloušťka. Zároveň dojde v místě ohybu ke zmenšení vnějšího průměru trubky a u vnitřní strany ohybu trubky dojde k pěchování a deformacím. U vzorku 6 lze vidět na vnější ploše menší deformaci, jelikož rychlost ohýbání byla o 25 % nižší než u vzorku 2 a 4, kde činila rychlost  $1^\circ \cdot s^{-1}$ . Vzniklé nerovnoměrnosti na vnitřní části jsou zapříčiněny použitým nástrojem a navalováním trubky na nástroj. Na vnitřní straně ohybu 0,7D lze vidět větší deformace po pěchování než u ohybu 1D. Důvodem je skutečnost, že parametry obou ohybů byly od sebe odlišné. U vzorku 2 a 4 vypadá průběh odchylek podobně, jelikož ohyb probíhal za stejných parametrů [47].

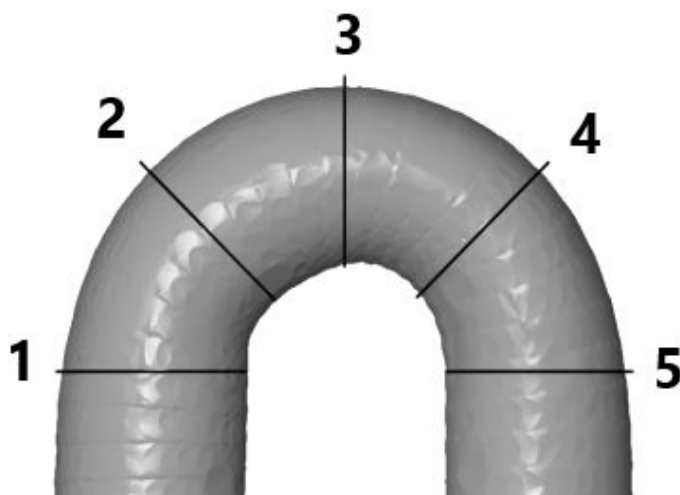


Obr. 4.17 Podélné řezy trubkových oblouků s poloměrem ohybu 0,7D [47].

#### 4.2.2 Měření odchylek kruhovitosti

Odchytky kruhovitosti byly vyhodnocovány u obou trubkových oblouků v příčných řezech po 45° od počátečního řezu. U kritického ohybu 1D bylo provedeno 5 měření a 7 měření u superkritického ohybu 0,7D. U ohybu 0,7D byla odchylka stanovena na vzorku číslo 1. U tohoto vzorku bylo provedeno i hodnocení vnitřních rozměrů trubkového oblouku. Mezní hodnota kruhovitosti byla využita dle normy ČSN EN 12952-5, i když norma nezahrnuje materiál s návarem ochranného kovu. I přesto tato norma byla využita pro kontrolu odchylek kruhovitosti [47].

##### Trubkový oblouk s poloměrem ohybu 1D



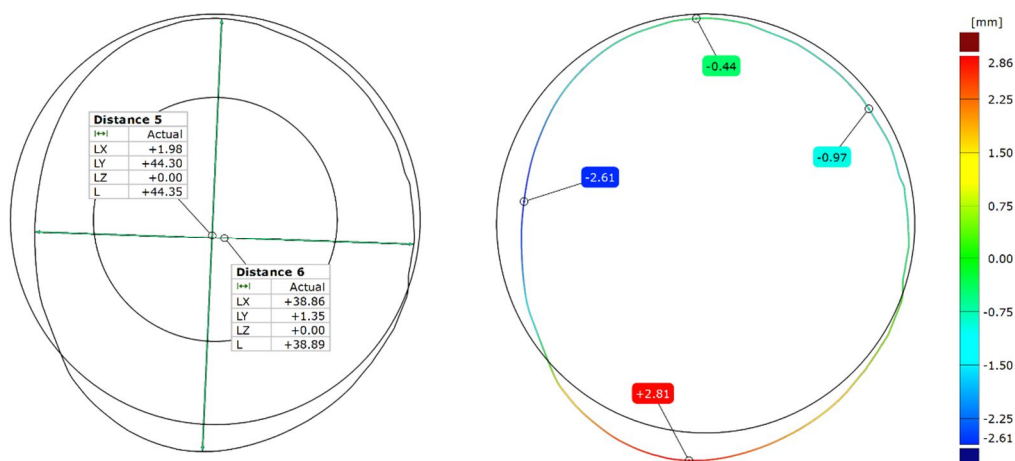
Obr. 4.18 Poloha řezů na definovaném poloměru ohybu 1D [47].

Vzorový výpočet odchylky kruhovitosti (4.3) pro první řez ohybu 1D je vypočítán dle vztahu (3.2). Hodnoty odchylek pro všechny řezy jsou zaneseny v tab. 4.5. Mezní hodnota kruhovitosti 12 % je překročena v 3 a 4 místě měření, kde vznikla nerovnoměrnost v důsledku pěchování materiálu a následného odtlačení od nástroje. Částečnou eliminací je použití sypkých nebo vytavitelných výplní trubek. V případě použití výplně trubek však dochází k praskání návare Inconelu 625 i oceli 16Mo3. Na obr. 4.18 jsou znázorněny polohy řezů na definovaném poloměru ohybu 1D. Třetí řez (vlevo) společně s průběhem odchylek vůči CAD modelu (vpravo) je uveden na obr. 4.19. Z těchto řezů lze vidět zploštění v levé části, což vede k prodloužení v dolní části kružnice, kdy hodnota přesahuje ideální kružnici o více než 2,5 mm [47].

$$u = 2 \cdot \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}} \cdot 100 = 2 \cdot \frac{43 - 41,7}{43 + 41,7} \cdot 100 = 3,06 \% \quad (4.3)$$

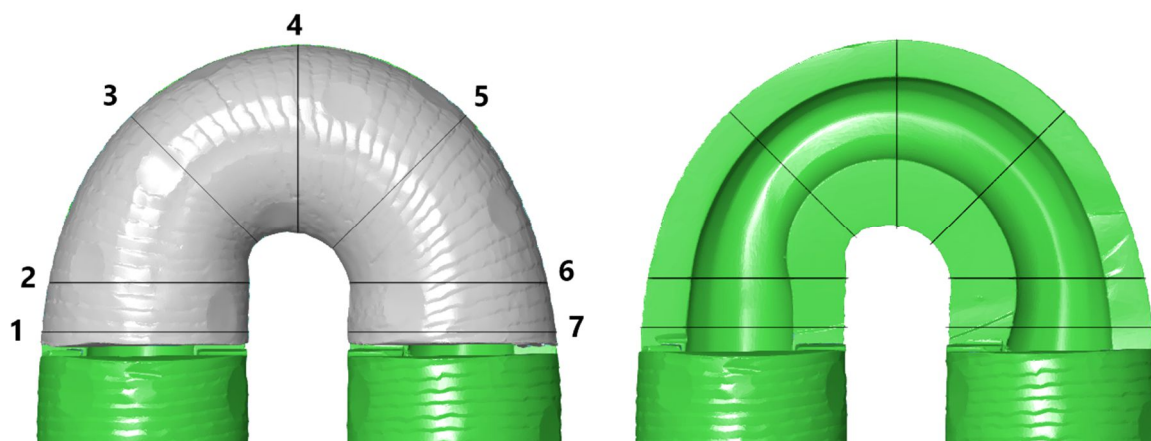
Tab. 4.5 Odchytky kruhovitosti vzorku na definovaném poloměru ohybu 1D [47].

Číslo řezu	$D_{max}$ [mm]	$D_{min}$ [mm]	$u$ [%]
1	43,00	41,70	3,06
2	43,23	40,27	7,08
3	44,35	38,89	13,11
4	44,28	38,11	14,97
5	43,27	40,40	6,86



Obr. 4.19 Řez 3 u ohybu 1D s vyhodnocenými rozměry (vlevo) a průběh odchylek vůči CAD modelu (vpravo) v 3. řezu.

### Trubkový oblouk s poloměrem ohybu 0,7D



Obr. 4.20 Poloha řezů na dílci s definovaným poloměrem ohybu 0,7D [47].

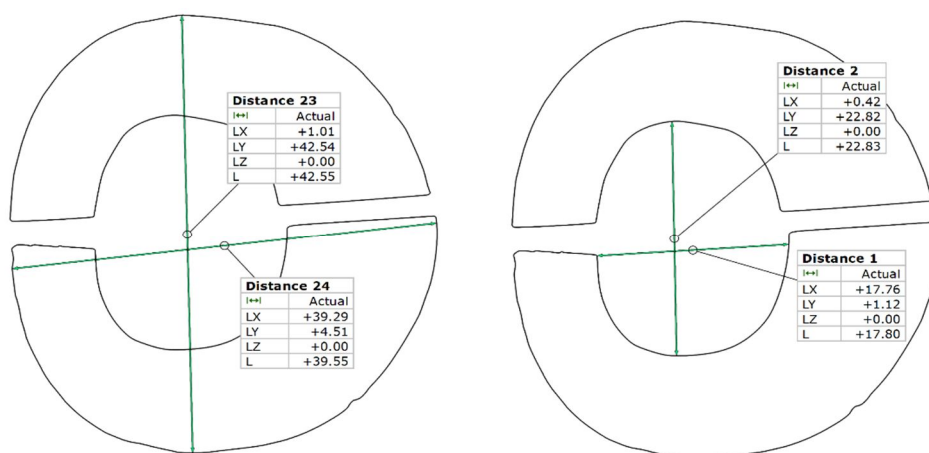
U trubkového oblouku 0,7D bylo provedeno 7 řezů, které jsou znázorněny na obr. 4.20. Zjišťovaly se odchylky kruhovitosti pro vnější i vnitřní trubkový rozměr u prvního vzorku. Řezy jsou umístěny po 45° od druhého do šestého řezu. U prodloužených konců jsou rovnoběžné řezy. Hodnoty jsou vypočítány dle vztahu (3.3) a následně zaneseny do tab. 4.6 pro vnější rozměr a do tab. 4.7 pro vnitřní rozměr trubky. Mezní hodnota kruhovitosti pro 0,7D není dle normy ČSN EN 12952-5 pro jednu operaci stanovena. Pro ohyb při dvou operacích dosahuje mezní hodnota odchylky kruhovitosti 18 %, přičemž mezi oběma operacemi ohýbání je předpokládáno tepelné zpracování. Pro vnitřní rozměr není odchylka kruhovitosti normou stanovena a její kontrola podléhá pouze zkoušce kuličkou procházející skrz trubkový oblouk, která proběhla úspěšně. Na obr. 4.21 lze vidět vnější a vnitřní rozměry 4. řezu a průběh odchylek u ohybu na obr. 4.22.

Tab. 4.6 Odchylyky kruhovitosti vnějších rozměrů trubkového oblouku 0,7D [47].

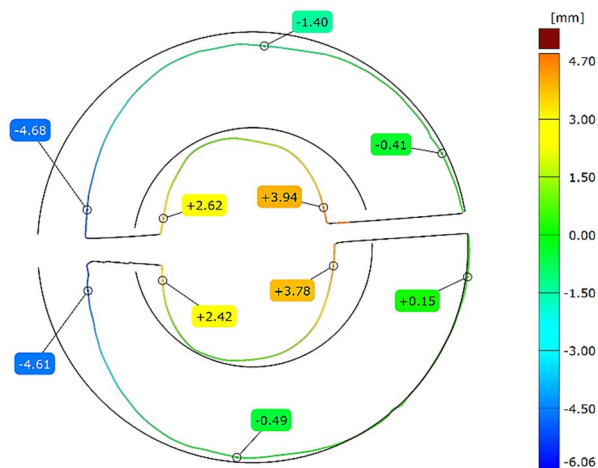
Číslo řezu	$D_{\max}$ [mm]	$D_{\min}$ [mm]	u [%]
1	43.78	43.03	1.72
2	42.71	41.75	2.27
3	42.26	37.32	12.41
4	42.54	39.55	7.28
5	42.72	39.49	7.85
6	43.57	41.23	5.51
7	44.66	43.45	2.74

Tab. 4.7 Odchylyky kruhovitosti vnitřních rozměrů trubkového oblouku 0,7D [47].

Číslo řezu	$d_{\max}$ [mm]	$d_{\min}$ [mm]	u [%]
1	25.34	24.56	3.12
2	24.19	22.08	9.12
3	23.19	16.91	31.32
4	22.82	17.76	24.93
5	23.31	18.45	23.27
6	24.51	19.91	20.71
7	25.37	22.58	11.63



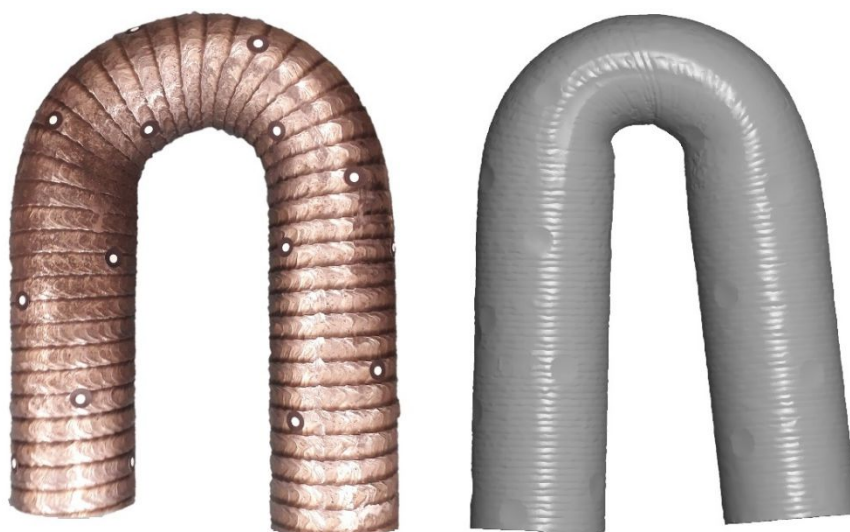
Obr. 4.21 Vnější (vlevo) a vnitřní (vpravo) rozměry 4. řezu.



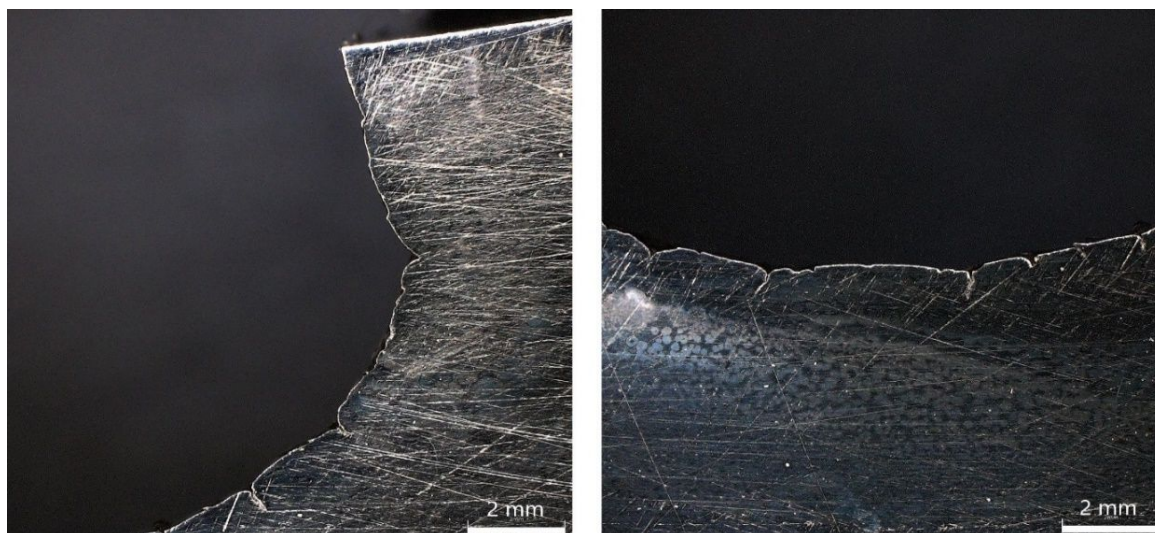
Obr. 4.22 Průběh odchylek u ohybu 0,7D vůči CAD modelu u 4. řezu.

### 4.3 Vzniklé vady trubkového oblouku při ohybu

Na obr. 4.23 (vlevo) je zobrazen trubkový oblouk  $1D$ , u kterého odpružení není viditelné. Lépe se odpružení projevilo u vzorků s poloměrem ohybu  $0,7D$ , znázorněno na obr. 4.23 (vpravo). Jelikož se jedná o menší poloměr ohybu, dochází k větším pružným deformacím při tomto procesu tváření. U tohoto poloměru ohybu je také děj ovlivněn odlišnými parametry ohýbání. Další defekty jsou viditelné na obr. 4.24, kde jsou znázorněny trhliny na vnitřní straně trubkového oblouku. Tento jev byl prokazatelný ze zkoumání na mikroskopu Olympus DSX 100 pouze u superkritického ohybu  $0,7D$ . V neposlední řadě se na vnější straně trubkového oblouku vyskytla trhlina v důsledku ztenčení stěny, která je znázorněna na obr. 4.25. Tento jev je zapříčiněn vysokou rychlostí ohýbání.



Obr. 4.23 Trubkový oblouk s poloměrem ohybu  $1D$  a  $0,7D$ .



Obr. 4.24 Praskliny na stranách vnitřní části trubkového oblouku.



Obr. 4.25 Trhlina materiálu na vnější straně při ohybu.

## 5 MATERIÁLOVÁ ANALÝZA

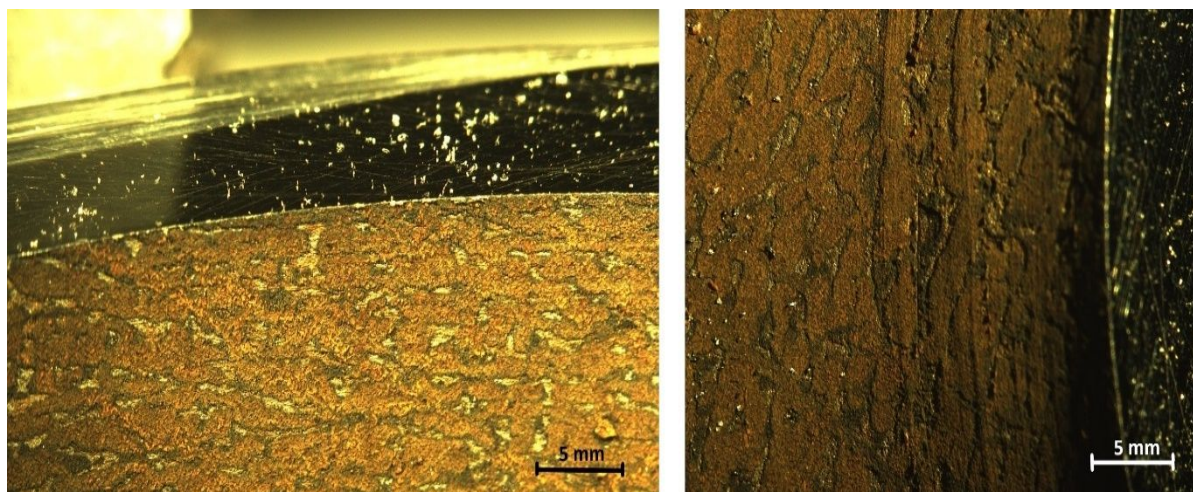
V této kapitole se pomocí mikroskopů analyzuje povrch trubkového oblouku z pohledu trhlin, chemického složení, mikrostruktury a tvrdosti při nízkém zatížení. Chemické složení materiálu se zjišťovalo optickým emisním spektrometrem a ručním rentgenofluorescenčním spektrometrem. Z hlediska mikroanalýzy chemického složení z povrchu materiálu se analýza provedla metodou EDS (Energiově Disperzní Spektrometrie) pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu s rentgenovým mikroanalyzátorem.

### 5.1 Makroanalýza povrchu

Pro identifikaci trhlin v materiálu byly provedeny dvě analýzy. Nejprve byly znázorněny detaily vnitřního ohybu trubky v podélném řezu pomocí metalografického mikroskopu Olympus DSX 100, který byl využit při měření tloušťky bimetalové trubky. Na obr. 5.1 nejsou viditelné trhliny na stěně vzorku. Jsou patrné pouze deformace po stlačování materiálu na vnitřní straně a na povrchu stěny jsou rýhy po podélném řezu, které se neodstranily ani po následném broušení. Vnitřní povrch trubky je znázorněn na obr. 5.2, u kterého jsou vidět na povrchu síťové trhliny v místě ohybu, které nejsou v řezu viditelné.

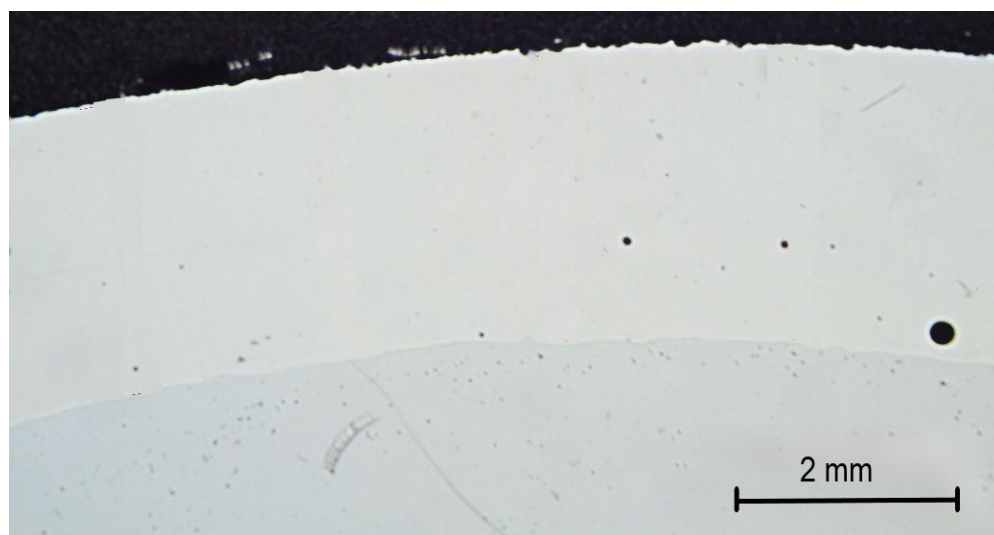


Obr. 5.1 Makroanalýza stěny v podélném řezu trubky.



Obr. 5.2 Síťové trhliny na vnitřní straně povrchu.

V další fázi byla makrostruktura povrchu hodnocena pouze u vrstvy návaru na rovné trubce před ohybem. Tato analýza byla provedena společně s měřením tloušťky stěny optickým metalografickým mikroskopem ZEISS Neophot 32. Pro lepší vyhodnocení se část vyříznutého segmentu zalisovala. Z obr. 5.3 lze vidět na vrstvě i základním materiálu černé částice vzniklé při přípravě výbrusu vzorku. Naopak na obou materiálech nejsou viditelné trhliny na stěně ani svarové chyby ani poškození povrchu z důvodu vyleštění vzorku. Také nejsou pozorovány nekovové nečistoty či vměstky [46].



Obr. 5.3 Makrostruktura vrstvy návaru v příčném směru.

## 5.2 Vyhodnocení mikrostruktury a tvrdosti materiálu

Pomocí tvrdoměru LECO AMH 55 a metalografického mikroskopu Olympus GX51 byla vyhodnocena tvrdost a mikrostruktura materiálu. Příprava vzorku pro obě analýzy začala uřezáním části vzorku z čelních stran dodaných bimetalových trubkových oblouků pomocí metalografické kotoučové pily Leco Viper 300M2. Následně byly za tepla vzorky zalisovány do lisovací hmoty Struers Isofast na metalografickém lisu LECO PR-4X, který využívá nízkou pracovní výšku 380 mm a 4 výměnné velikosti forem. Lisování proběhlo za působení tlaku 2600 kPa při teplotě 180 °C po dobu 4 min. Vzorky se dále brousily na poloautomatické univerzální brusce a leštičce PX500 LECO s použitím brusných papírů firmy HERMES. Zrnitost brusných papírů dle EN značení FEPA činila 80, 120, 240, 600, 1000 a 2000. Dalším krokem bylo leštění vzorků na plátně LECO Brown Technotron. Použita byla diamantová pasta LECO PREMIUM GRADE o velikosti diamantovaných částic 3 a 1  $\mu\text{m}$ . Nakonec byl uříznutý materiál očištěn ultrazvukovým přístrojem SONIC-2 od firmy Polsonic, který je uveden společně s lisem PR-4X na obr. 5.4 [49].





Obr. 5.4 Lis PR-4X (vlevo) a čistič SONIC-2 (vpravo) [49, 50].

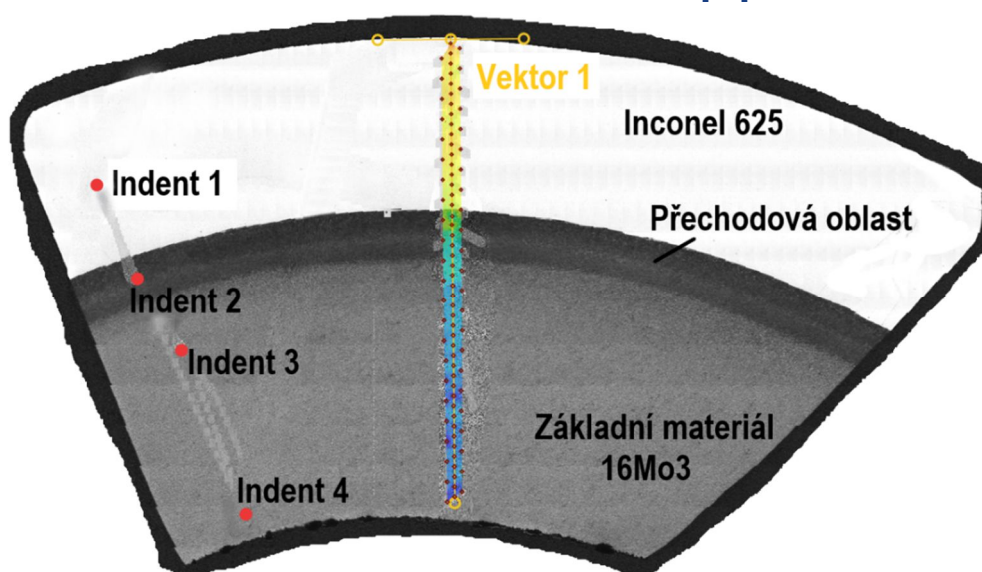
Dále pomocí optického metalografického mikroskopu ZEISS Neophot 32 byla hodnocena pouze mikrostruktura na rovné části trubky. Metalografická příprava vzorku začala uříznutím segmentu o tloušťce 10 mm z rovné trubky, který byl rozdělen na šest stejných částí po 60°. Po zalisování se jeden ze vzorků podrobil rozboru mikrostruktury. Pro tyto účely bylo nutno vzorek připravit. Příprava vzorků spočívala v broušení, leštění a ve vyvolání mikrostruktury za použití leptadla. Nital 3 %. Použité leptadlo bylo využito i u vyhodnocení mikrostruktury pomocí mikroskopu Olympus GX51. Tento typ leptadla je primárně určen pro nízkouhlíkové a nízkolegované oceli. Pro superslitiny na bázi niklu není vhodné. Pokud by použití leptadla překročilo delší čas, nebo by se využil agresivnější typ leptadla, oblast základního materiálu by zčernala z důvodu přeleptání. Proto nelze dosáhnout optimálního naleptání obou materiálů návaru i oceli současně. Avšak Inconel 625 má při pokojové teplotě jednofázovou austenitickou strukturu tvořenou zrny tuhého roztoku  $\gamma$  [46].

### 5.2.1 Měření tvrdosti materiálu při nízkém zatížení

Měření tvrdosti bylo provedeno v příčném řezu rovné části bimetalové trubky po metalografické přípravě vzorku. Použit byl automatický tvrdoměr LECO AMH 55, který je znázorněn na obr. 5.5. Tento přístroj je schopen měřit povrchy, které jsou poškrábané, leptané nebo špatně osvětlené. V prvním kroku byly provedeny zkušební vpichy ve všech třech zkoumaných oblastech zkušební vzorku. Dalším krokem bylo zhotovení vektoru napříč vzorkem. Směr postupu měření vedl od vnějšího průměru trubky k vnitřnímu průměru. Pro oba typy měření tvrdosti, které jsou zobrazeny na obr. 5.6, se zvolila zkouška dle Vickerse se zatížením 0,5 kgf. Doba prodlevy při zatížení trvala 13 s. Při zkoušce bylo dodrženo pravidlo, že vzdálenost mezi vpichy byla větší než 3x střední uhlopříčka vtisku a vzdálenost od okraje 2,5x střední uhlopříčka vtisku dle normy ČSN EN ISO 6507-1. Hodnoty jsou zaneseny do tab. 5.1, ze které lze vidět, jak hodnoty klesaly v závislosti na vzdálenosti od osy vektoru. Při měření tvrdosti u vektoru napříč zkušebním vzorkem se řídilo opět dle normy ČSN EN ISO 6507-1, kdy vzdálenost od okraje činí 100  $\mu\text{m}$  a mezi vpichy činí hodnota 3x střední uhlopříčky vtisku. Provedlo se celkem 92 vpichů od vnější vrstvy Inconelu 625 přes přechodovou oblast až po oblast náležící pouze oceli 16Mo3. Bílou oblast charakterizuje samotný návar z Inconelu 625 přecházející do oblasti ocelové trubky skrz přechodovou oblast. Vybrané hodnoty vpichů jsou zaznamenány v příloze 1 [51].



Obr. 5.5 Tvrdoměr LECO AMH 55 [51].

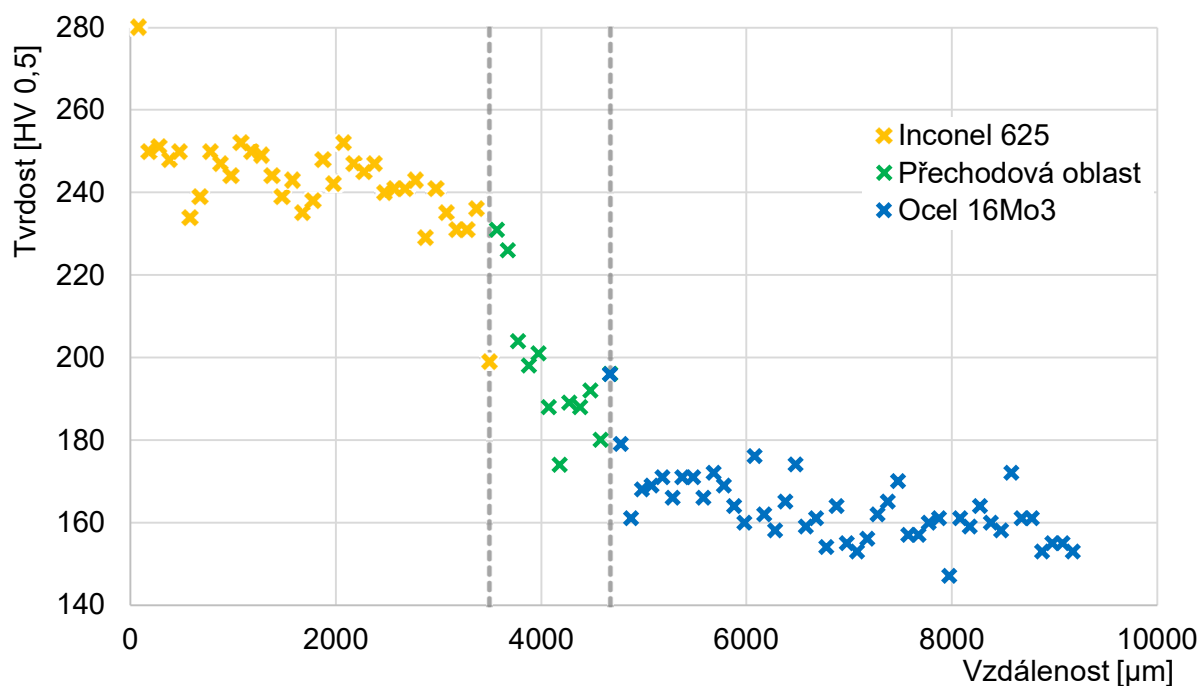


Obr. 5.6 Zkušební vpichy a vektor tvrdosti přímé části bimetálové trubky [47].

Tab. 5.1 Hodnoty tvrdostí měřené v odsazených bodech.

Odsazení vpichu	Oblast	Vzdálenost od osy vektoru [ $\mu\text{m}$ ]	Tvrdost [HV 0,5]
1	Inconel 625	-8373	241
2	Přechodová oblast	-7579	200
3	Ocel 16Mo3	-6653	167
4	Ocel 16Mo3	-5427	165

Z obr. 5.7 lze vypočítat vysoké hodnoty tvrdosti u Inconelu 625, které postupně se vzrůstající vzdáleností klesaly směrem od povrchu. Hodnoty návaru dosahovaly tvrdosti nad 200 HV 0,5. V přechodové oblasti hodnoty rychle klesají až do oblasti základní ocelové trubky, kde se tvrdost materiálu pohybovala kolem 170 HV 0,5.



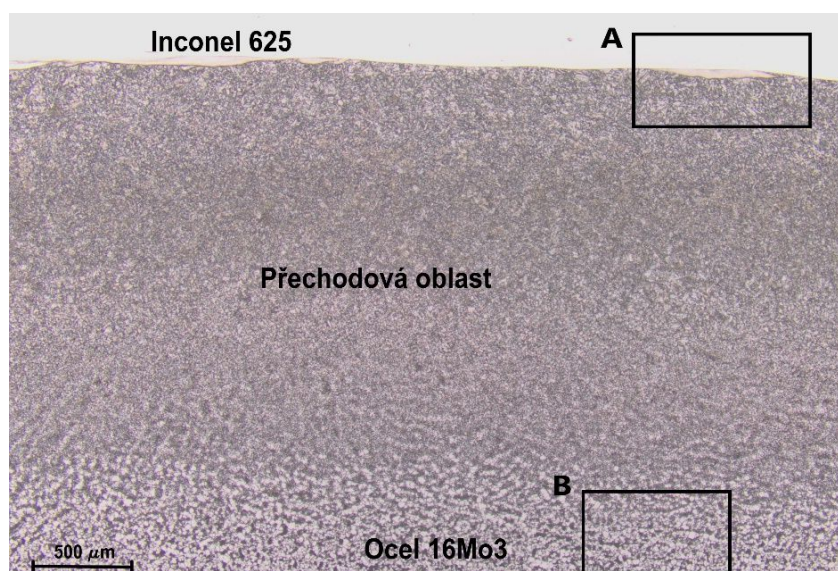
Obr. 5.7 Grafická závislost tvrdosti při nízkém zatížení na vzdálenosti.

### 5.2.2 Vyhodnocení mikrostruktury pomocí mikroskopu Olympus GX51

Po přípravě vzorku se mikrostruktura odebraného segmentu z ohýbané trubky vyvolala pomocí leptadla NITAL 5 %. Po naleptání vzorků se hodnotila mikrostruktura na světelném metalografickém mikroskopu Olympus GX51, který je uveden na obr. 5.8. Příklad poskytuje vysokou kvalitu obrazu s vysokým rozlišením z důvodu velmi dobré stability.

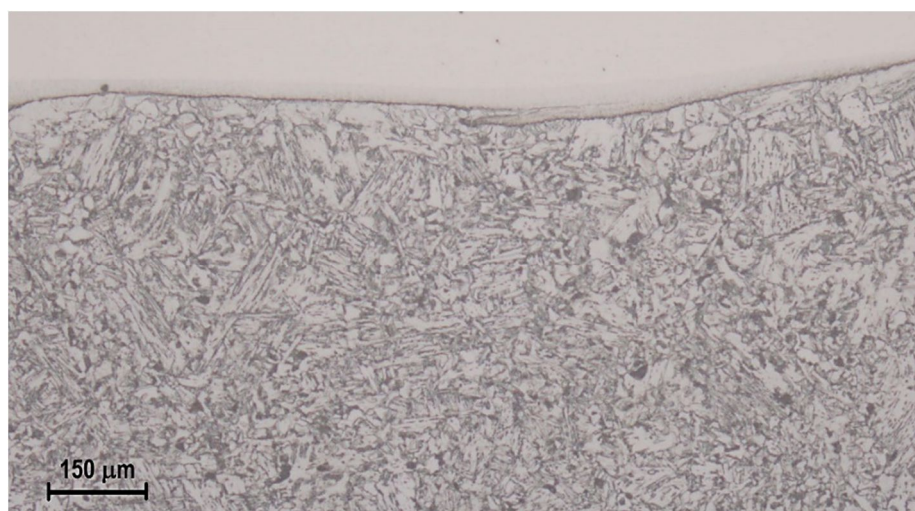


Obr. 5.8 Metalografický mikroskop Olympus GX51 [52].



Obr. 5.9 Mikrostruktura bimetalové trubky.

Z obr. 5.9 lze vidět nenaleptanou slitinu Inconel 625 v horní části z důvodu nevhodného leptadla na tuto superslitinu. Pod niklovou superslitinou se nachází přechodová oblast. Jedná se o tepelně ovlivněnou oblast oceli vznikající při navařování, která zahrnuje oblast natavení a přehřátí. Při natavení se základní materiál zahřál nad teplotu  $Ac_1$  a rychle ochladil. Tímto procesem vznikly z perlitu jehlice martenzitu společně se zrny feritu, které jsou zobrazeny na obr. 5.10. V této struktuře jsou ještě malé částičky vzniklé feriticko-cementické směsi sorbitu. U oblasti přehřátí nedošlo k překročení teploty  $Ac_1$ , a tak nedošlo k fázové transformaci. Došlo pouze k zhrubnutí zrn feritu.



Obr. 5.10 Přechodová oblast (A) natavení.

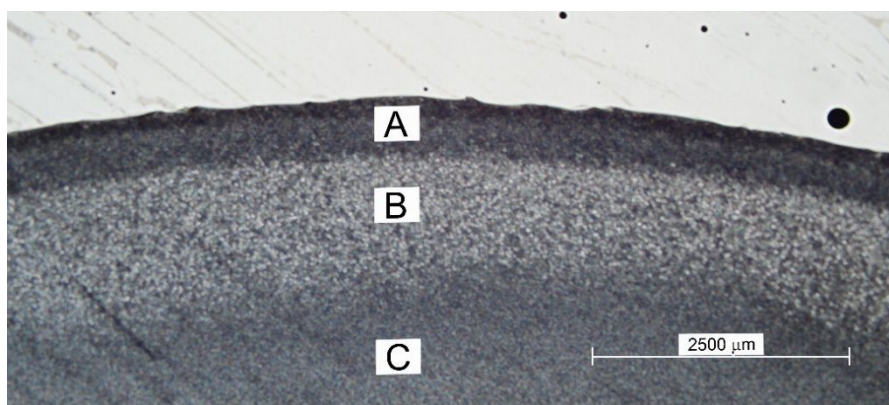
Na obr. 5.11 lze vidět feriticko-perlitickou strukturu. Jedná se o základní materiál ocelové trubky 16Mo3. Převážnou část struktury tvoří tvárný ferit. Na hranicích zrn se objevuje perlit a vyloučené karbidy.



Obr. 5.11 Mikrostruktura základního materiálu 16Mo3.

### 5.2.3 Vyhodnocení mikrostruktury pomocí mikroskopu ZEISS Neophot 32

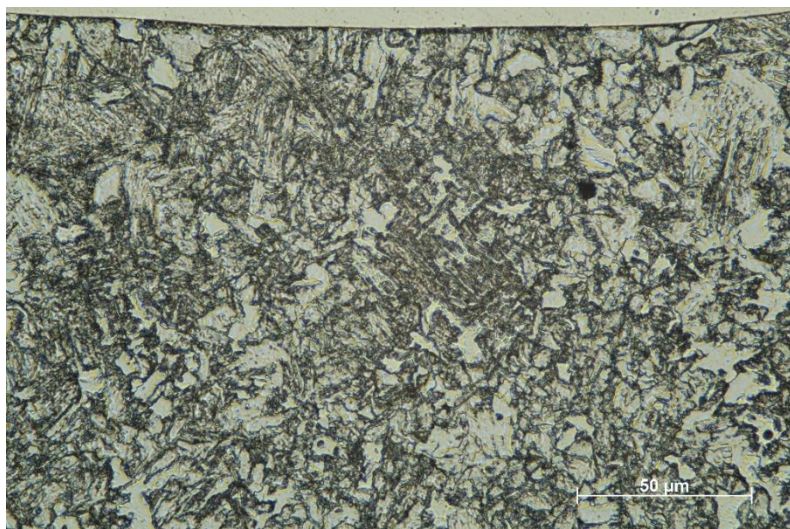
Na obr. 5.12 jsou vyznačeny tři oblasti A, B a C, které jsou vyhodnoceny. Oblast C je tvořena pouze základním materiálem oceli 16Mo3. Oblast A a B je přechodová, ve které dochází k natavení a přehřátí materiálu. Bílá oblast zobrazuje návar Inconel 625, který se nedokázal naleptat, jelikož leptadlo Nital 3 % není vhodné pro návar ze superslitiny niklu [46].



Obr. 5.12 Vyhodnocované oblasti v přechodové fázi mezi Inconel 625 a oceli 16Mo3 [46].

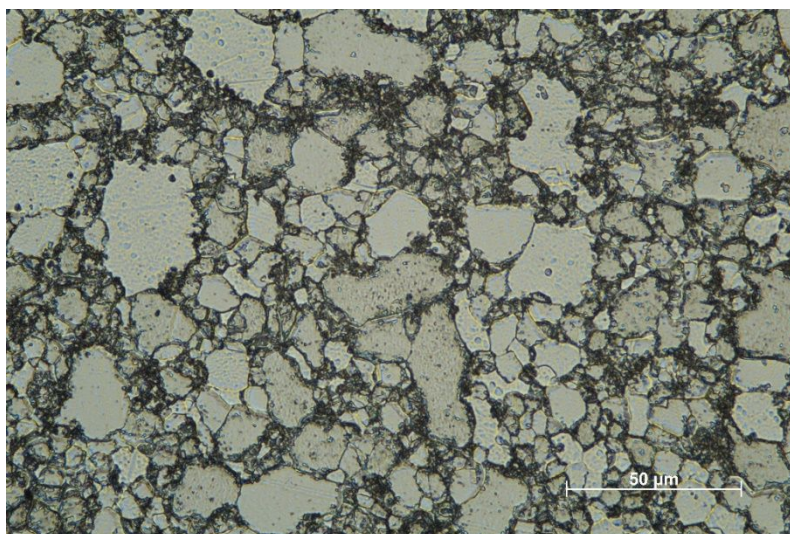
#### Rozbor mikrostruktury v přechodové oblasti

Přechodová část mezi návarem Inconel 625 a základním materiálem z oceli je rozdělena na oblasti natavení a přehřátí. V první oblasti (A) dochází k částečnému natavení základního materiálu nad teplotu  $A_{c1}$  do oblasti stabilního austenitu. Po následném rychlém ochlazení se zrna perlitu transformují na jehlice martenzitu, které jsou spolu se zrny feritu zobrazeny na obr. 5.13. Z původní feriticko-perlitické struktury se tedy struktura změnila na martenzitickou se zrny feritu. Při delší časové prodlevě nad teplotou  $A_{c1}$  by se zrna feritu proměnila v austenit a vznikla by při ochlazení martenzitická struktura se zbytkovým austenitem [46].



Obr. 5.13 Přejchodová oblast – natavení základního materiálu 16Mo3 [46].

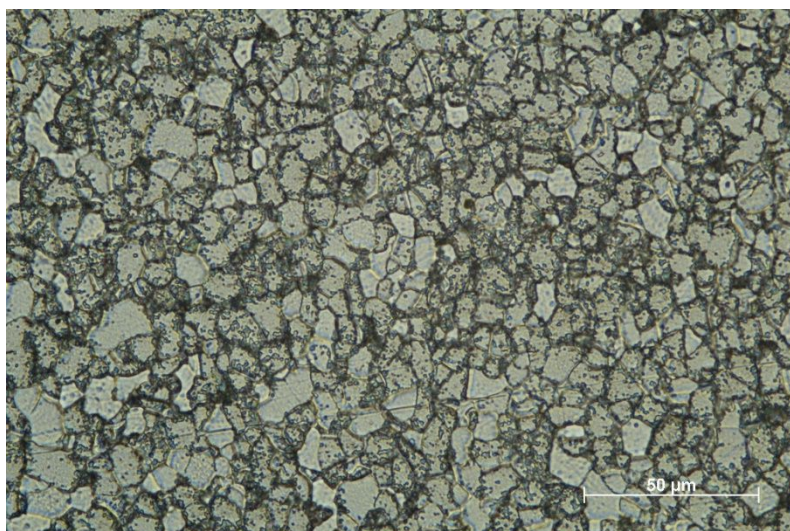
Druhou oblastí v přechodové fázi je přehřátí základního materiálu (B), u které lze vidět hrubou feriticko-perlitickou strukturu. Teplota v této oblasti nedosáhla teploty  $A_{c1}$ , tudíž zde nedošlo k přeměně struktury. Z obr. 5.14 je patrné zhrubnutí feritických zrn v důsledku výdrže na teplotě pod  $A_{c1}$  při průchodu elektrody po povrchu. Na hranici těchto zrn se vyskytuje perlit s vyloučenými částicemi karbidů [46].



Obr. 5.14 Přejchodová oblast – přehřátí základního materiálu 16Mo3 [46].

### Rozbor mikrostruktury základního materiálu 16Mo3

Feriticko-perlitická struktura základního materiálu oceli 16Mo3, označena písmenem C, je zobrazena na obr. 5.15. Oproti přechodové oblasti přehřátí jsou vidět jemnější zrna perlitu a feritu. Na hranicích zrn je vidět vyloučené jemné karbidové částice [46].



Obr. 5.15 Mikrostruktura základního materiálu trubky 16Mo3 [46].

### 5.3 Analýza chemického složení trubkového oblouku

Pro rozbor chemického složení byly vybrány dvě metody. První z nich je optická emisní spektrometrie (OES) provedená na přenosném optickém emisním spektrometru Hitachi PMI-Master Smart, uvedeném na obr. 5.16 vlevo. Spektrometr je možné využít na těžko dostupných místech díky nízké váze a rozměrům. Navzdory tomu je výkon analytického rozboru velmi vysoký. V terénu dokáže provést 300 měření na jedno nabití. Další funkcí přístroje je získání velmi rychlého chemického složení zkoumaného dílu a zároveň je schopen přiřadit značku materiálu pomocí databáze prvků GRADE Database, která obsahuje  $12 \cdot 10^6$  značek a  $34 \cdot 10^4$  materiálů. U této metody má technologická příprava zkoumaného dílu zásadní vliv na správnost analytických výsledků. Pro analýzu byl použit pouze malý objem jednoho vzorku. Nejprve bylo nutné odstranit z povrchu ovlivněnou vrstvu. Následně se povrch obrousil korundovým papírem o zrnitosti 40 nebo 60 (jemný povrch je spíše na závadu). Není vhodné se poté povrchu dotýkat z důvodu zanechání mastných stop, jež mohou nepříznivě ovlivnit výsledek analýzy. Po dokončené analýze je na povrchu zkušebního vzorku spálená oblast o  $\phi$  5 mm [53, 54].

Druhou metodou analýzy chemického složení je rentgenofluorescenční spektrometrie (XRF). Tato metoda využívá XRF analyzátor Hitachi X-MET8000, zobrazen vpravo na obr. 5.16. Přístroj se snadno ovládá a ve firmách často používá z důvodu kontroly materiálu při nechtěné záměně materiálu. Spektrometr ovšem není schopen rozpoznat obsah uhlíku v materiálu. Z důvodu nízké (1,5 kg) hmotnosti je velice ergonomický a využitelný v nepříznivých podmínkách, např. v dešti a v prachu. Navíc dokáže analyzovat i prášek nebo kapalinu. Metoda XRF nevyžaduje zvláštní úpravu povrchu vzorku. Jedná se o nedestruktivní technologii analýzy chemického složení [54, 55].



Obr. 5.16 OES Hitachi PMI-Master Smart (vlevo) a XRF analyzátor Hitachi X-MET8000 (vpravo) [54, 55].

Analýza chemického složení metodou OES a XRF v hmotnostních procentech je zobrazena v tab. 5.2. V tab. 5.3 je chemické složení návaru niklové slitiny Inconel 625. Průměrné výsledky jsou získány z pěti analýz jdoucích paralelně za sebou. U všech analýz OES byl vzorek hodnocen z povrchu v hloubce 10 mm až 20 mm. Zatímco u analýz XRF byla hloubka měření řádově 100  $\mu\text{m}$ . U oceli 16Mo3 nejsou obsaženy prvky Ti, Nb ani Fe. Návar z niklové slitiny neobsahuje fosfor. Z databáze materiálů jsou v tab. 5.3 nejprve uvedeny přípustné koncentrace prvků slitiny 2.4831 jako přídatný materiál niklové superslitiny. V dalších dvou řádcích jsou hodnoty z analýzy OES a XRF.

Tab. 5.2 Analýza chemického složení ocelové trubky 16Mo3.

Trubka	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Mo
OES [hm %]	0,21	0,67	0,21	0,011	0,010	0,04	0,05	0,13	0,022	0,29
XRF [hm %]	-	0,61	0,31	0,019	0,009	0,04	0,05	0,15	0,090	0,26

Tab. 5.3 Analýza chemického složení návaru Inconel 625.

Návar		C	Mn	Si	S	Cr	Ni
2.4831	min	-	-	-	-	20,00	60,00
	max	0,10	0,50	0,50	0,015	23,00	-
OES		0,03	0,01	0,11	0,004	21,30	63,00
XRF		-	0,06	0,14	-	22,00	64,40

Návar		Cu	Al	Mo	Ti	Nb	Fe
2.4831	min	-	-	8,00	-	3,00	-
	max	0,50	0,40	10,00	0,40	4,50	5,00
OES		0,01	0,26	9,90	0,24	3,80	0,66
XRF		0,12	0,39	8,60	0,18	3,50	0,53



## 5.4 Mikroanalýza chemického složení z povrchu bimetalové trubky

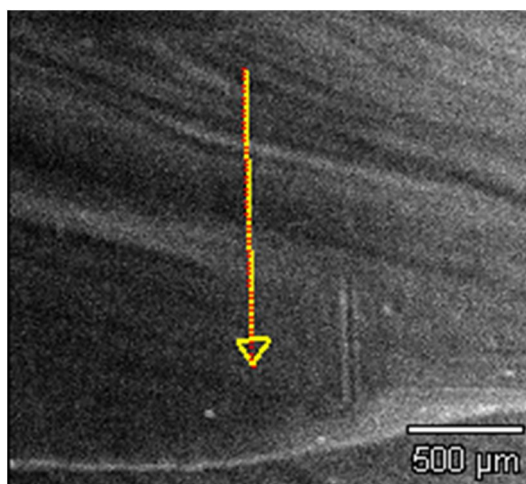


Obr. 5.17 Elektronový mikroskop Tescan Vega s mikroanalýzátorem Noran Six/300.

Z vyříznutého segmentu byly provedeny dvě analýzy měření. Nejprve pouze z povrchu návaru Inconelu 625 a následně na rozhraní návaru a ocelové trubky 16Mo3. U tohoto rozboru se provedlo i bodové měření chemického složení. Z obou analýz bylo vyhodnoceno chemické složení a četnost zastoupení hlavních a doprovodných prvků. Rozbor mikroanalýzy chemického složení vyříznutého segmentu byl proveden na rastrovacím elektronovém mikroskopu REM Tescan Vega 5135 s rentgenovým mikroanalýzátorem Noran Six/300, znázorňující obr. 5.17. U mikroskopu je budícím zdrojem elektronů wolframové vlákno. Mikroskop je principiálně schopen pracovat s 20 až 500 000 násobným zvětšením a urychlovacím napětím do 30 kV. Chemické složení materiálu se vyhodnocuje pomocí X-Ray mikroanalýzátoru Noran Six/300, který vyhodnotí mapu prvků z objemu až  $3 \mu\text{m}^3$  metodou Line scan. Metoda je založena na lineárním snímání kamerou po řádcích. Řádek je naskenován pouze jednou a data se vyhodnocují v průběhu skenování dalšího řádku. Dochází tak k velmi rychlému zpracování dat. Speciální příprava vzorku na tuto analýzu nebyla nutná. Vyříznutý vzorek se pouze očistil v ethanolu [56, 57, 58].

### 5.4.1 Analýza materiálu Inconel 625 z povrchu bimetalové trubky

V první části analýzy se provedl rozbor chemického složení z povrchu návaru Inconelu 625 na válcové části, což je znázorňeno na obr. 5.18. V tab. 5.4 je uvedeno chemické složení prvků zobrazeného povrchu materiálu v hmotnostních a atomových procentech s relativní chybou měření. Největší zastoupení náleží prvkům Ni a Cr. Zastoupení prvků odpovídá stanoveným koncentracím vzhledem k charakteru tohoto materiálu. Prvek Mo není v tab. 5.4 uveden, jelikož jeho koncentrace vzhledem k celému zkoumanému povrchu byla pod detekčním minimem.

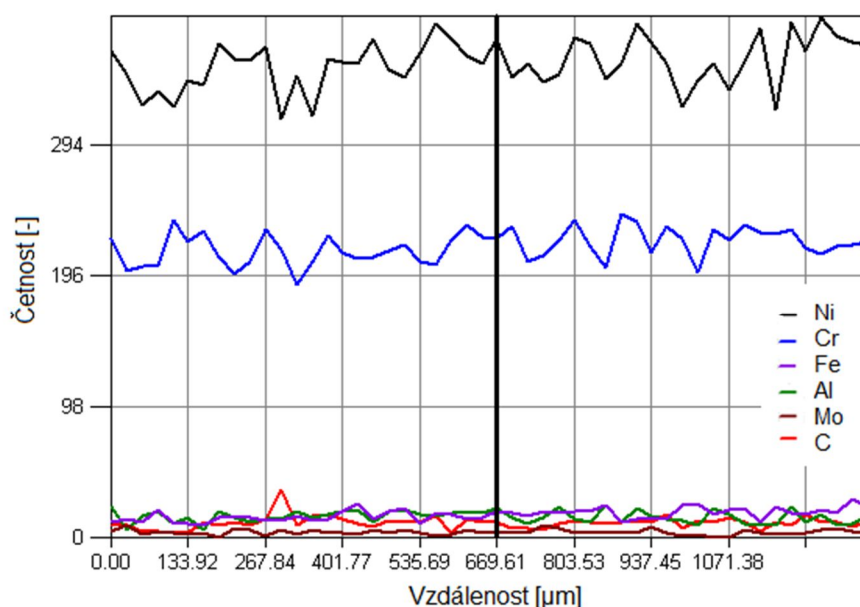


Obr. 5.18 Analyzovaná plocha povrchu Inconel 625 [47].

Tab. 5.4 Chemické složení Inconelu z povrchu uvedeného na obr. 5.18.

Prvek	Množství [hm %]	Množství [atom %]
C	5,61 ± 4,70	20,36 ± 20,36
F	4,18 ± 4,18	9,58 ± 13,17
Al	0,87 ± 0,79	1,40 ± 1,40
Cr	24,35 ± 1,78	20,40 ± 1,48
Fe	0,63 ± 0,63	0,49 ± 0,69
Ni	64,37 ± 5,26	47,77 ± 3,87

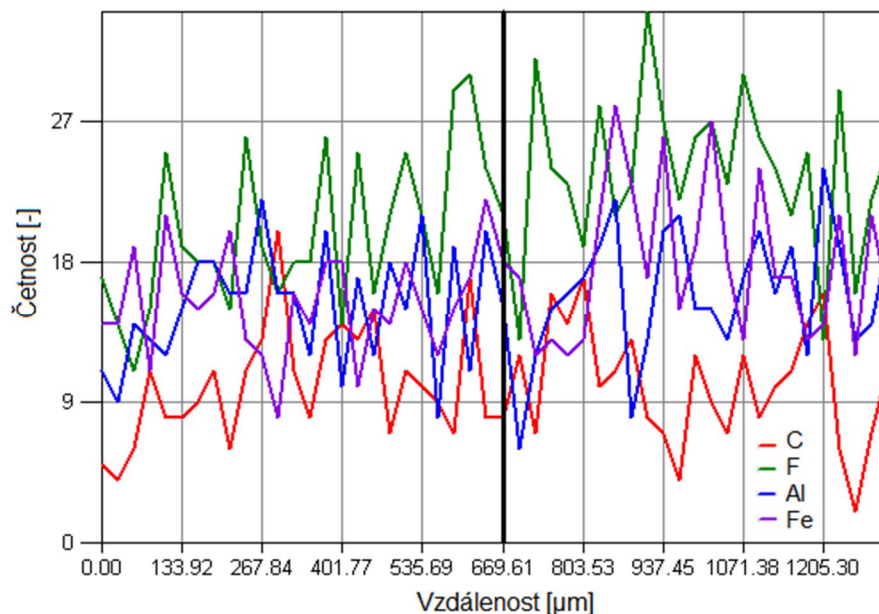
V druhém kroku mikroanalýzy bylo provedeno měření chemického složení ve směru vyznačené žluté šipky, obr. 5.18. Četnost hlavních prvků Ni a Cr je znázorněna na obr. 5.19 společně s hodnotami uvedenými v tab. 5.5, které jsou získány z poloviny měření měřené vzdálenosti z vyznačené černé čáry. Četnost doprovodných prvků Inconelu 625 je vyobrazena na obr. 5.20, kde je upraveno měřítko osy y na četnost 36 celkového rozsahu. Obr. 5.20 tedy ukazuje na přesnější hodnoty při měření doprovodných prvků uvedených v tab. 5.6.



Obr. 5.19 Průběh chemického složení povrchu materiálu Inconel 625 [47].

Tab. 5.5 Chemické složení prvků z obr. 5.19.

Prvek	C	Al	Cr	Fe	Ni	Mo
Četnost [-]	11	22	224	20	373	5



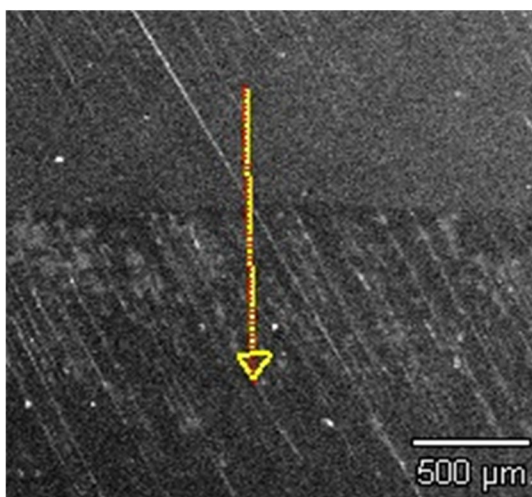
Obr. 5.20 Průběh chemického složení povrchu doprovodných prvků Inconel 625 [47].

Tab. 5.6 Chemické složení doprovodných prvků z obr. 5.20.

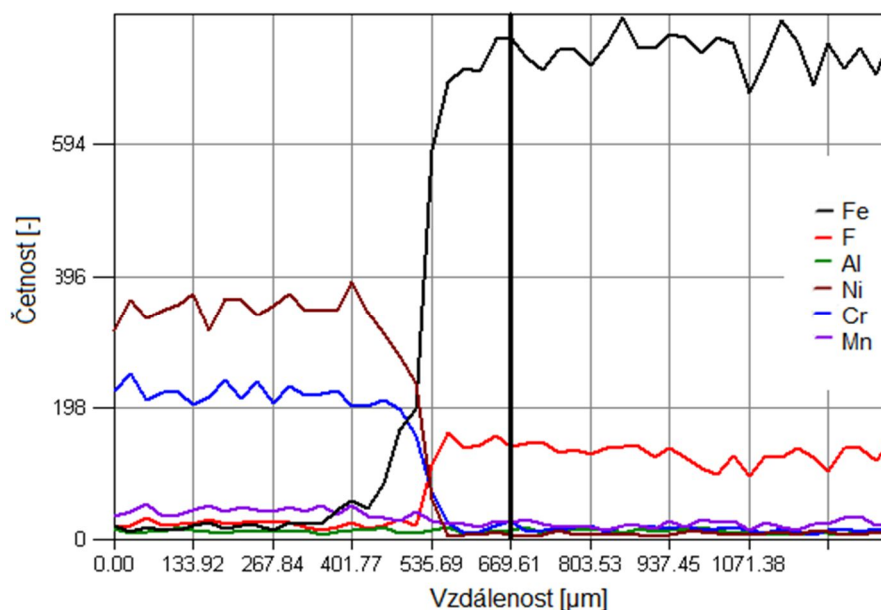
Prvek	C	F	Al	Fe
Četnost [-]	8	21	15	18

#### 5.4.2 Analýza rozhraní materiálů Inconel 625 a oceli 16Mo3

První částí rozboru je stanovení chemického složení prvků z povrchu v příčném řezu v přechodové části, tj. na rozhraní Inconelu 625 a oceli 16Mo3. Postup analýzy byl obdobný. Na obr. 5.21 je zobrazeno měření ve směru žluté šipky z vnější části směrem do středu trubky. Ze závislosti četnosti na vzdálenosti, viz obr. 5.22, lze vidět vzrůstající množství Fe v místě přechodu do základní ocelové trubky přibližně od hodnoty 535  $\mu\text{m}$ . Tento prvek v materiálu Inconel 625 nemá velké zastoupení. Naopak hodnota Ni a Cr od této vzdálenosti klesne výrazně na minimum. Obsažené množství Ni a Cr vyskytující se v oceli je společně s dalšími prvky uvedeno v tab. 5.7.



Obr. 5.21 Rozhraní Inconel 625 - ocel 16Mo3 [47].

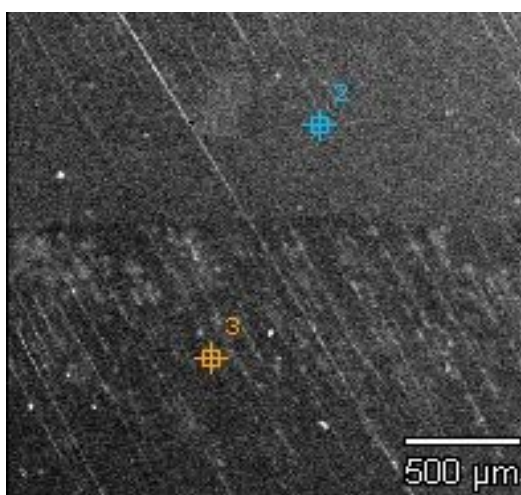


Obr. 5.22 Rozhraní Inconel 625 - ocel 16Mo3 [47].

Tab. 5.7 Chemické složení prvků z obr. 5.22.

Prvek	F	Al	Cr	Mn	Fe	Ni
Četnost [-]	139	13	28	25	754	7

Druhou částí mikroanalýzy je bodové měření chemického složení, znázorněno na obr. 5.23. Bodová mikroanalýza slouží k prokázání přítomnosti určitého prvku či k provedení spektrální analýzy v mikroobjemu. Toto měření bylo provedeno ve dvou místech. První bod (označení 2) se umístil nad tepelně ovlivněnou oblast do místa návaru a druhý bod (označení 3) pod přechodovou oblast do materiálu oceli 16Mo3. Analyzátor Noran Six/300 je schopen zjišťovat bodové chemické složení zkoumaného materiálu. Při analýze dochází k měření na jednotlivých energetických hladinách v keV emitovaného RTG záření. Odpovídajícím vlnovým délkám na energetických hladinách jsou přisuzovány jednotlivé prvky, které jsou vyhodnocovány a zapsány do tab. 5.8 a tab. 5.9. Výstupem této analýzy je spektrum četnosti rentgenového signálu v jednotlivých energetických oknech, což jsou píky charakteristické pro jednotlivé prvky. Výška píků je úměrná koncentraci daného prvku ve vzorku.

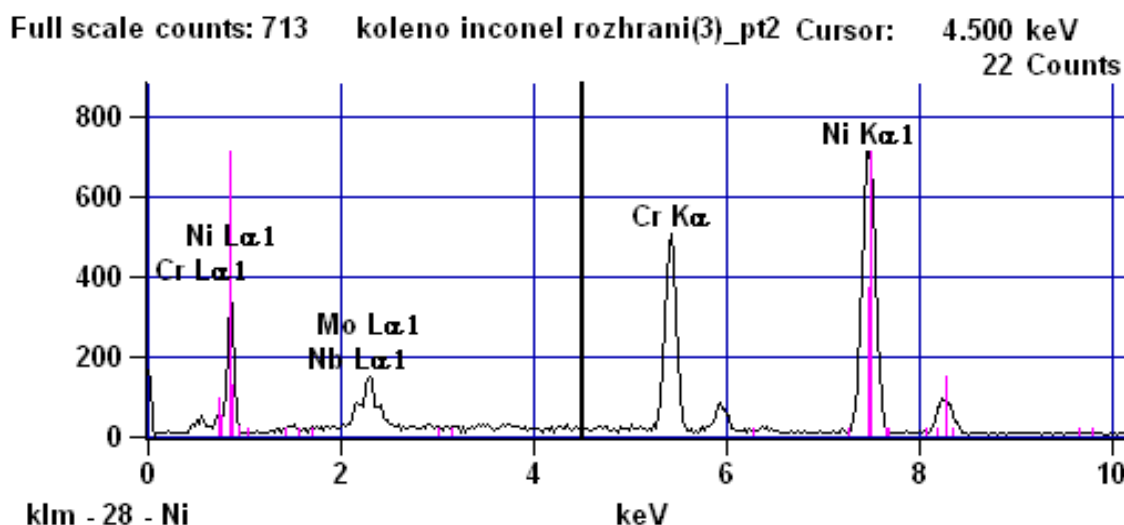


Obr. 5.23 Rozhraní Inconel 625 - ocel 16Mo3 [47].

Závislost, znázorněná na obr. 5.24 pro bod 2, popisuje EDS spektrum prvků obsažených v materiálu Inconel 625, kde je nejvíce zastoupen prvek Ni společně s prvkem Cr. Naopak k méně zastoupeným prvkům patří prvky Mo a Nb, u kterých je menší odezva emitovaného RTG záření. V měřeném bodě 3, který je vyhodnocen na obr. 5.25, jsou hlavními zastupujícími prvky Mn a Fe.

Tab. 5.8 Chemické složení materiálu Inconel v bodě 2.

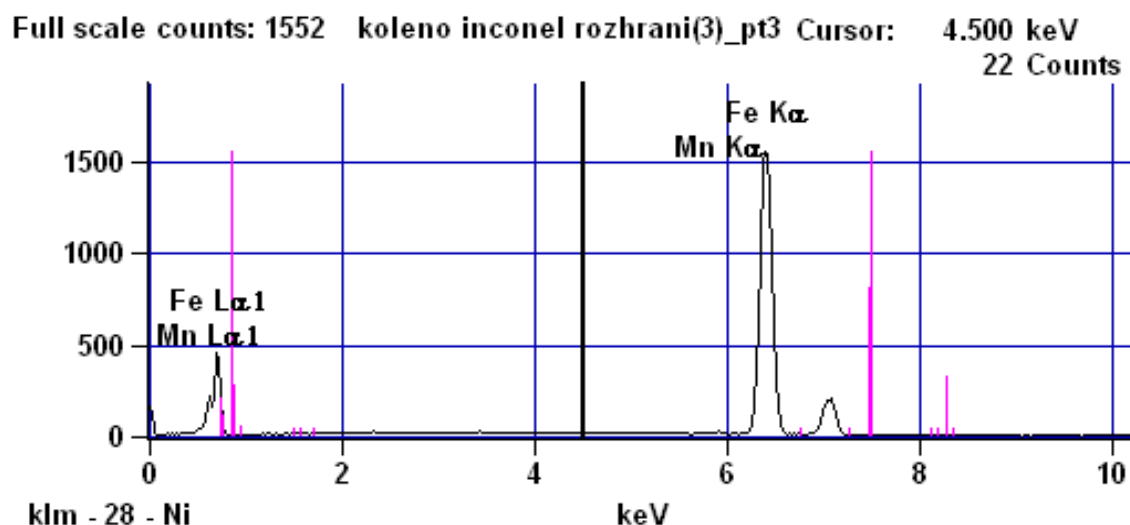
Prvek	Množství [hm %]	Množství [Atom %]
Cr	23,70 ± 0,45	27,13 ± 0,52
Ni	64,71 ± 1,02	65,60 ± 1,03
Nb	3,82 ± 0,60	2,45 ± 0,39
Mo	7,77 ± 0,45	4,82 ± 0,28



Obr. 5.24 EDS spektrum zájmových prvků v bodě 2 [47].

Tab. 5.9 Chemické složení materiálu ocel 16Mo3 v bodě 3.

Prvek	Množství [hm %]	Množství [Atom %]
Mn	0,87 ± 0,16	0,89 ± 0,17
Fe	99,13 ± 0,96	99,11 ± 0,96



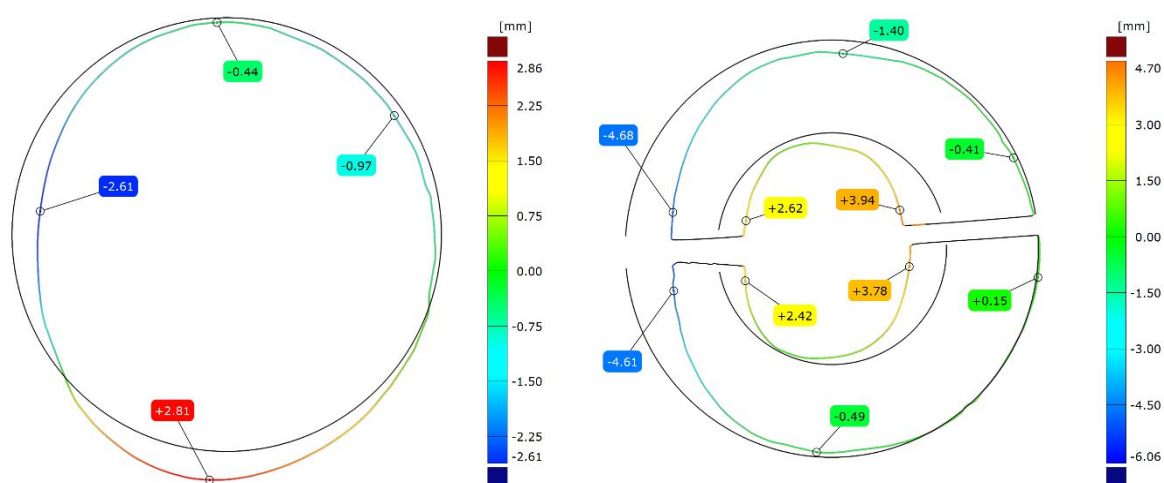
Obr. 5.25 EDS spektrum zájmových prvků v bodě 3 [47].

## 6 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

V první fázi experimentální části byl vykonán rozbor tloušťky stěn, kde byla provedena analýza na trubce po ohybu a v druhé části na rovné trubce před ohýbáním. Tloušťka stěny na vnitřní straně celé bimetalové stěny činí  $(12,74 \pm 0,98)$  mm. V 5. místě měření se hodnota výrazně liší od ostatních. Tato naměřená hodnota je v místě, kde je materiál zapřen do nástroje, a kde nedochází k velkému přesunu materiálu. Na vnější straně je průměrná hodnota tloušťky  $(8,18 \pm 0,29)$  mm. Rozdíl oproti vnitřní straně je na vybraných místech až 5 mm. Z tab. 4.2 je patrné, že průměrná tloušťka návaru na vnitřní straně činí  $(5,34 \pm 0,46)$  mm, tudíž překračuje stanovenou mezní hodnotu návaru 2 až 4 mm. Na vnější straně z důvodu menšího počtu měření nejsou patrné odlišné rozměry, a tak nabývá tloušťka průměrné hodnoty  $(3,09 \pm 0,13)$  mm. Tato analýza byla provedena pouze u ohybu 0,7D. U ohybu 1D lze předpokládat nižší hodnoty návaru na vnitřní straně, neboť přesun materiálu není zdaleka tak velký.

V příčném řezu vyříznutého segmentu z rovné části prodlouženého konce trubkového oblouku se pohybovaly hodnoty tloušťky návaru i celé stěny podobně. To lze potvrdit i ze směrodatné odchylky, která nabývá malých hodnot. Průměrná hodnota návaru činí  $(3,43 \pm 0,04)$  mm a pohybuje se v mezní stanovené hodnotě. U analýzy pomocí mikroskopu ZEISS Neophot 32 byla tloušťka vrstvy návaru v pravé části oblasti nepatrně nižší oproti střední a levé straně. Průměrná hodnota ze všech tří pozorovaných oblastí je  $(2,607 \pm 0,058)$  mm.

U analýzy pomocí 3D skeneru ATOS se porovnávaly odchylky trubkového oblouku. Při podélném řezu lze vidět odchylky na vnitřní, a především na vnější straně u ohybu 1D i 0,7D. U dílce s kritickým poloměrem ohybu 1D lze vidět poměrně přesné kopírování CAD modelu části konce, kde byla trubka ukotvena. Naopak u prodloužených konců s superkritickým poloměrem ohybu 0,7D lze vidět poměrně velké odlišnosti rozměrů v důsledku odpružení trubky. Také v místě ohybu na vnější i vnitřní straně jsou u superkritického ohybu znatelně větší deformace. U vzorku 6 v důsledku vyšší rychlosti ohýbání o 25 % jsou patrné velké nerovnoměrnosti oproti CAD modelu. U vzorků 3 a 5 se vyskytlo přetržení na vnější ploše trubkového oblouku.



Obr. 6.1 Příčný řez 90° trubkového oblouku 1D (vlevo) a 0,7D (vpravo).

Na obr. 6.1 jsou řezy v 90° u trubkových oblouků 1D vlevo a 0,7D vpravo. U kontroly kruhovitosti v příčném směru u ohybu 1D na pravé a horní straně řez

kopíruje vytvořený CAD model. Na spodní straně hodnota překračuje 2,81 mm v nejrozšířenějším místě. Naopak na levé vnější stěně materiál chybí. U ohybu 0,7D se materiál rozšířil na levé a pravé straně. Celá levá část se v důsledku ohýbání přesunula blíže k ose kružnic. V posledním kroku kapitoly byly uvedeny vady, které se vyskytly při ohýbání. Viditelné odpružení je u dílce s poloměrem ohybu 0,7D, neboť dochází k větším pružným deformacím. Na vnitřní straně trubkového oblouku jsou viditelné deformace. Důvodem tohoto jevu je skutečnost, že došlo k příliš velkému stlačování, při kterém byla překročena soudržnost materiálu.

U materiálové analýzy byla v prvním kroku rozebrána makrostruktura stěny. Trhliny v materiálu nejsou na všech zkoumaných fotografiích patrné. Síťové trhliny se vyskytují pouze v místě oblouku na povrchu z vnitřní strany. Nečistoty na stěnách jsou způsobeny nedokonalou přípravou vzorků. U pozorování návaru je vidět kompaktní a homogenní vrstvu, která je rovnoměrná po celém povrchu vzorku [46].

V další fázi se v příčném řezu hodnotila tvrdost při nízkém zatížení na celé stěně trubky, a to ve dvou krocích. V prvním kroku se provedly v různých oblastech stěny jednotlivé vpichy. Ve druhém kroku se vyhodnotil vektor tvrdosti od vnějšího průměru trubky k vnitřnímu průměru. Nejvyšší hodnoty tvrdosti dosahují u materiálu Inconel 625, které činí přibližně 240 HV<sub>0,5</sub>. Směrem k základnímu materiálu se postupně tvrdost snižuje, což znázorňuje graf 5.7. Tvrdost základní ocelové trubky je přibližně 165 HV<sub>0,5</sub>, zatímco v přechodové části se výrazně liší. Důvodem je vznikající martenzit v přechodové části natavení, který způsobuje vyšší tvrdost. Pod natavením je oblast přehřátí, u které se nevyskytuje martenzit a v této oblasti je tudíž nižší tvrdost.

Při rozboru mikrostruktury pomocí mikroskopů Olympus GX51 i ZEISS Neophot 32 se při pozorování nepodařilo naleptat návar ze superslitiny Inconel 625, jelikož leptadlo Nital 3 % není vhodné pro tento druh materiálu. V přechodové oblasti natavení se zrna perlitu transformují na jehlice martenzitu, neboť dochází k rychlému ochlazení, kdy je teplo odvedeno do základního materiálu. Avšak tato struktura je nežádoucí z důvodu možnosti výskytu vodíkové křehkosti, která je při samotném ohybu nepřijatelná. V oblasti přehřátí dochází pouze k zhrubnutí zrna. Základní materiál má dle teorie feriticko-perlitickou strukturu.

V poslední fázi materiálové analýzy bylo vyhodnoceno chemické složení materiálu pomocí tří metod. Nejprve byla provedena analýza z objemu pomocí optické emisní spektrometrie a rentgenofluorescenční spektrometrie. Následně se provedla analýza z povrchu vzorku pomocí metody EDS. U základního materiálu i u návaru se chemické složení u metody OES i XRF přibližně shodovalo s teoretickým předpokladem. Díky databázi materiálů u metody OES lze z chemického složení zkoumaného vzorku, u kterého není známý původ, přiřadit značku materiálu vzorku. U metody EDS bylo hodnoceno chemické složení ve třech fázích. V první fázi z návaru na válcové části, v druhé v přechodové oblasti v příčném řezu a v posledním kroku bodovým měřením, viz obr. 5.24 až 5.25. Z obr. 5.22 lze vidět nejprve vyšší množství prvků Ni a Cr. Po překročení přechodové oblasti je zřejmý nárůst prvků Fe a F. Hodnoty chemického složení materiálu u návaru metodou EDS se liší od původního složení materiálu (tab. 1.3) nárůstem prvků F a C. Tato změna prvků je znázorněna v tab. 5.4. Prvky F a C se do materiálu dostaly v průběhu dělení materiálu nebo během přípravy vzorku. Vysoké chyby měření, které lze vidět v tab. 5.4, jsou způsobeny oscilováním střední hodnoty četnosti, které je znázorněno na obr. 5.20. Toto je dáno heterogenitou materiálu při měření bod po bodu po celé linii. Výsledný obraz chemického složení materiálu lze vypočítat z celé linie měření.

---

## 7 DISKUSE

Ve většině firem se hadovité systémy pro spalovací zařízení vyrábějí pouze z jednoho materiálu, a to z důvodu cenové dostupnosti. Následkem tohoto procesu je však krátká životnost a odolnost vůči vysokým teplotám. Cílem této práce bylo ověřit, zda použitím bimetalového materiálu, jehož úkolem je zvýšit životnost a účinnost systému u přehříváků či ekonomizérů, nedochází při ohybu k rozměrovým, tvarovým či materiálovým změnám.

Navarením vrstvy Inconelu 625 vzniká ovšem několik kritických míst, jež jsou potřeba zohlednit. Z 3. kapitoly vyplývá, že teorie ohybu trubek počítá s trubkami vyrobenými pouze z jednoho materiálu. Je tedy nutné provést jak kontrolní výpočty ohybu, tak výpočty z hlediska ekonomického, které nebyly předmětem této diplomové práce.

U trubkového oblouku 1D měla svarová housenka návaru zploštělý tvar na rozdíl od ohybu 0,7D. Svarová housenka u tohoto typu je více nahuštěna na sebe. Toto je důkazem, že navařování u všech dílců neprobíhalo stejně. V dalších fázích analýzy je nutno rozebrat a porovnat svařovací technologie. Zároveň je potřeba provést rozbor mikrostruktury návaru Inconel 625, který se nepodařilo naleptat, jelikož nebylo dostupné správné leptadlo.

Možnost inovativního řešení je ohýbání trubek za tepla nebo za studena s následným tepelným zpracováním v podobě rekrystalizačního žíhání. Při tomto procesu se zdeformovaná zrna po ohybu vrátí zpět do původního stavu a materiál tak získá své původní vlastnosti. Toto se týká pouze oceli 16Mo3, jelikož rekrystalizace probíhá za teplot pod  $A_{c1}$  a nedotkne se tak materiálu Inconel 625. Otázkou je, zdali by nebylo vhodnější zvolit jiný základní materiál trubky s lepšími vlastnostmi.



---

## ZÁVĚR

Záměrem této práce bylo poukázat na inovativní řešení použití bimetalového materiálu v tlakových částech kotlů, neboť z důvodu agresivního prostředí je výběr materiálu velmi důležitý. Optimální variantou je kombinace fyzikálních, chemických i mechanických vlastností. Svařením trubkových oblouků vzniká hadovitý systém a následně např. deskový přehřívák. V práci je popsána charakteristika použitého bimetalového materiálu i metody, které byly využity pro analýzy. Na trubkových obloucích byla definovaná kritická místa. Součástí práce je zhodnocení dosažených výsledků.

Z teoretického rozboru je stanoveno kritické místo na vnější straně ohybu trubky, kde dochází ke ztenčení stěny. Toto stanovisko se v praktické části analýzy potvrdilo. Na vnitřní straně by mělo dle předpokladu docházet ke zvlnění. Z experimentu jsou ovšem patrné deformace, neboť došlo k přerušení soudržnosti materiálu. Kritický ohyb 1D i superkritický ohyb 0,7D jsou za hranicí předpokladu, jelikož ze stanovených kritérií technologičnosti vyplývá, že ohyb menší než 2,5D bez použití trnu není vhodný.

U měření tvrdosti materiálu při nízkém zatížení se prokázala vysoká tvrdost návaru Inconel 625 a následné promísení materiálů v přechodové oblasti. Mikrostruktura oceli 16Mo3 se shoduje s teoretickým rozbohem. V přechodové oblasti natavení je viditelná martenzitická struktura způsobená navařováním, a tedy zvyšováním teploty, kdy došlo k transformaci zrn perlitu na austenit, a následně díky rychlému ochlazení na martenzit. Materiály Inconel 625 i ocel 16Mo3 o známém chemickém složení byly podrobeny analýzám OES a XRF, kde výsledné koncentrace prvků odpovídaly tabulkovým hodnotám. U metody EDS se chemické složení analyzovaných vzorků v některých prvcích liší. Nadbývajcí prvky se do materiálu dostaly při dělení či přípravě vzorků.

V dalších fázích projektu je potřeba provést zhodnocení ekonomických nákladů, které budou zahrnovat navařování Inconelu 625 na základní ocelovou trubku. Lze předpokládat, že použitím bimetalového materiálu se sice zvýší pořizovací náklady, avšak životnost přehříváků či ekonomizérů se prodlouží.

Závěrem lze konstatovat, že všechny vytyčené cíle diplomové práce byly splněny.

---

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MULTUŠ, Radek a Martin SLANÝ. *Vývoj nové řady bimetalových trubkových oblouků 180° s prodlouženými konci a návarem ze superslitiny, technologie jejich výroby a návrh metodiky testování.*
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 Edelstähle* [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. FÜRbacher, Ivan, Karel MACEK a Josef STEIDL. *Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty: oceli, litiny, neželezné kovy.* Praha: Verlag Dashöfer, 1998. ISBN 80-862-2902-5.
7. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II.* 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
8. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
9. 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>
10. Niklové slitiny. *Bibus Metals* [online]. [cit. 2019-10-28]. Dostupné z: [http://new.bibus.cz/pdf/Special\\_Metals/Nikl/Niklove\\_slitiny.pdf](http://new.bibus.cz/pdf/Special_Metals/Nikl/Niklove_slitiny.pdf)
11. DONACHIE, Matthew J. a Stephen James DONACHIE. *Superalloys: a technical guide.* 2nd ed. Materials Park: ASM International, 2002. ISBN 0-87170-749-7.
12. MÁLEK, Jakub. *Vliv mikrostruktury na vlastnosti vybraných slitin Ni a Co pro vysokoteplotní aplikace.* Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Jakub Horník, Ph.D.
13. STRZELCZAK, Katarzyna a Agata DUDEK. The structure and coefficient of friction of welded nickel alloys inconel 625 and inconel 718. *Tribologia* [online]. 2018(5), 109-115 [cit. 2019-10-29]. ISSN 0208-7774.
14. ZOUHAR, Jan. *Reverzní inženýrství: 3D skenery.* [přednáška]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2.3.2020.
15. KOLÁŘ, Jakub. *Návrh replikované výroby zvolené součásti za využití technologie Reverse engineering a Rapid prototyping.* Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Martin Slaný, Ph.D.

16. SKOUPÝ, Pavel. *3D optické měřicí a skenovací systémy pro strojírenství*. Brno, 2007. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. David Paloušek.
17. ŠIMONÍK, Martin. Digitalizace - její princip a rozdělení. *MMspektrum* [online]. 2004 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/digitalizace-jeji-princip-a-rozdeleni.html>
18. NAVRÁTIL, Robert. *Technologie skenování ve 3D* [online]. In: . 2013 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://drive.google.com/file/d/1gNo43fiZwcaVoQvcT0JJWsvD3zoX9oO3/view>
19. 3D skenování. *MTeZ s.r.o.* [online]. [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://www.mtez.cz/3d-skenovani>
20. ATOS Compact Scan. *MCAE Systems* [online]. [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/cs/produkty/kompaktni-trida-3d-mereni/>
21. DORAZIL, Eduard. *Nauka o materiálu I*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983.
22. MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu: Kovy a kovové materiály 1. část*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03379-1.
23. SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2010. ISBN 978-80-7043-417-8.
24. ČSN EN ISO 6507-01. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
25. KLOUDA, Pavel. *Moderní analytické metody*. 2., upr. a dopl. vyd. Ostrava: Pavel Klouda, 2003. ISBN 80-863-6907-2.
26. NĚMCOVÁ, Irena, Petr RYCHLOVSKÝ a Ludmila ČERMÁKOVÁ. *Spektrometrické analytické metody*. Praha: Karolinum, 1998. ISBN 80-718-4365-2.
27. PRAUS, Petr a Jiřina VONTOROVÁ. *Analytická chemie II*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2015. ISBN 978-80-248-3734-5.
28. ČERNOHORSKÝ, Tomáš a Pavel JANDERA. *Atomová spektroskopie*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 1997. ISBN 80-719-4114-X.
29. KLÁTIL, Michal. *Vlastnosti rentgenového záření a jejich využití*. Hradec Králové, 2017. Diplomová práce. Přírodovědecká fakulta Univerzity Hradec Králové. Vedoucí práce RNDr. Daniel Jezbera.
30. OTRUBA, Vítězslav. *Analytická RTG spektrometrie (XRF spektrometrie)*. Dostupné také z: [https://is.muni.cz/el/1431/podzim2013/C7031/um/14\\_AS\\_RTG.pdf](https://is.muni.cz/el/1431/podzim2013/C7031/um/14_AS_RTG.pdf)
31. GUTHRIE, James M. Overview of X-ray Fluorescence. *Archaeometry Laboratory* [online]. University of Missouri–Columbia, c1996-2017 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: [https://archaeometry.missouri.edu/xrf\\_overview.html](https://archaeometry.missouri.edu/xrf_overview.html)

- 
32. MAŇKA, Tadeáš. *Srovnání zobrazovacích možností transmisního a rastrovacího elektronového mikroskopu*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Jakub Zlámal, Ph.D.
33. DI GIANFRANCESCO, Augusto. Technologies for chemical analyses, microstructural and inspection investigations. *Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants* [online]. Elsevier, 2017, 2017, s. 197-245 [cit. 2020-06-07]. DOI: 10.1016/B978-0-08-100552-1.00008-7. ISBN 9780081005521. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081005521000087>
34. EBNESAJJAD, Sina. Surface and Material Characterization Techniques. *Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding* [online]. Elsevier, 2014, 2014, s. 39-75 [cit. 2020-06-07]. DOI: 10.1016/B978-0-323-26435-8.00004-6. ISBN 9780323264358. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780323264358000046>
35. ZEISS Axiolab 5 for Materials. *ZEISS* [online]. [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/microscopy/int/products/light-microscopes/axiolab-for-materials.html#shop>
36. SAMEK, Radko, Eva ŠMEHLÍKOVÁ a Zdeněk LIDMILA. *Speciální technologie tváření*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4406-5.
37. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
38. ČSN EN 12952-5. *Vodotrubné kotle a pomocná zařízení - Část 5: Provedení a konstrukce částí kotle namáhaných tlakem*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
39. ŠROM, Jan. *Analýza procesu ohybu trubky*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Eva Peterková, Ph.D.
40. SELVI, S., A. VISHVAKSENAN a E. RAJASEKAR. Cold metal transfer (CMT) technology - An overview. *Defence Technology* [online]. 2018, **14**(1), 28-44 [cit. 2020-06-22]. DOI: 10.1016/j.dt.2017.08.002. ISSN 22149147. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214914717301022>
41. AMOB SA CH120 CNC Booster boiler tube bending machine. *AMOB* [online]. AMOB, 2020 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://www.amobgroup.com/amob-sa-ch-120-cnc-booster-boiler-tube-bending-machine/>
42. *OLYMPUS: Opto-digital Microscope DSX100*. Dostupné také z: [https://www.lri.se/pdf/olympus/DSX100\\_en\\_3.pdf](https://www.lri.se/pdf/olympus/DSX100_en_3.pdf)
43. PX400/PX500 Grinder/Polisher Series. *LECO* [online]. 2019 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://eu.leco.com/product/px400-px500-grinder-polisher-series>
44. Optical Microscope II Neophot 32. *Norwegian micro-and nanofabrication facility* [online]. NorFab, 2020 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://www.norfab.no/technologies/characterization/usn-mst-lab/optical-microscope-ii-neophot-32/>
-

- 
45. Metalografický mikroskop ZEISS Neophot 32. *Ústav fyziky materiálů AV ČR, v.v.i.* [online]. [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://www.ipm.cz/vybaveni/metalograficky-mikroskop-zeiss-neophot-32/>
  46. BARÉNYI, Igor a Jozef MAJERNÍK. *Výskum materiálových vlastností návaru vrstvy zliatiny Inconel 625 na oceli 16Mo3*. Trenčín, 2020.
  47. 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. p. 181-199. ISBN: 978-80-8075-889-9.
  48. GOM ATOS Compact Scan 2M. *Aniwaa* [online]. Copyright © Aniwaa Pte., 2020 [cit. 2020-03-11]. Dostupné z: <https://www.aniwaa.com/product/3d-scanners/gom-atos-compact-scan-2m/>
  49. *PR4X Mounting System*. LECO Corporation, 2013. Dostupné také z: <http://www.zyporah.com/DESCARGAS/METALOGRAFIA/pr4x.pdf>
  50. Myjka ultradźwiękowa Sonic-2. *Polsonic* [online]. POLSONIC Palczyński Sp. J., 2020 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <http://www.polsonic.com/myjka-ultradzwiekowa-sonic-2.html>
  51. AMH55 Automated Hardness Testing System. *LECO* [online]. 2019 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.leco.com/product/amh55-hardness-testing-systems>
  52. Inverzní metalografický mikroskop Olympus GX51. *Ústav fyziky materiálů AV ČR, v.v.i.* [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.ipm.cz/vybaveni/inverzni-metalograficky-mikroskop-olympus-gx51/>
  53. PMI-MASTER Smart. *PCS Divize Analytika* [online]. [www.pcs.cz](http://www.pcs.cz), 2019 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://pcsanalytika.cz/produkt/pmi-master-smart-2/>
  54. *PCS Divize Analytika* [online]. [www.pcs.cz](http://www.pcs.cz), 2019 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://pcsanalytika.cz/domovska-stranka/hitachi-high-tec/>
  55. Handheld XRF analysers | X-MET8000 range. *Hitachi - Hightech* [online]. Hitachi High-Tech Analytical Science, 2020 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://hha.hitachi-hightech.com/en/product-range/products/handheld-xrf-libs-analysers/handheld-xrf-analysers#>
  56. Elektronowy mikroskop skaningowy firmy Tescan Vega 5135. *Politechnika Poznańska* [online]. Poznaň: Politechnika Poznańska [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.put.poznan.pl/pl/urzadzenie/elektronowy-mikroskop-skaningowy-firmy-tescan-vega-5135>
  57. Laboratoře katedry strojírenství. *Fakulta vojenských technologií* [online]. Brno: Univerzita obrany, 2019 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: [https://www.unob.cz/fvt/struktura/k216/Stranky/lab\\_2012.aspx](https://www.unob.cz/fvt/struktura/k216/Stranky/lab_2012.aspx)
  58. Quality right down the line. *Stemmer Imaging* [online]. [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.stemmer-imaging.com/en-de/technical-tips/line-scan-cameras/>
-

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol/Zkratka	Jednotka	Popis
$D_a$	mm	Jmenovitý vnější průměr trubky
$D_{max}$	mm	Maximální vnější průměr naměřený na vrcholu trubkového profilu
$D_{min}$	mm	Minimální vnější průměr naměřený na vrcholu trubkového profilu
$D_0$	mm	Jmenovitý vnější průměr trubky
$E$	MPa	Modul pružnosti materiálu v tahu
$F$	N	Zátěžující síla
$F_1, F_2$	N	Výslednice sil
$F_{R1}, F_{R2}$	N	Radiální síly
$J$	mm <sup>4</sup>	Kvadratický moment průřezu
$M_0$	N·mm	Ohybový moment
$R_0$	mm	Poloměr ohybu vztažený k ose trubky
$R_{vnitřní}$	mm	Vnitřní poloměr ohybu
$R_{zb}$	mm	Zbytkový poloměr
$d_{max}$	mm	Maximální vnitřní průměr naměřený na vrcholu trubkového oblouku
$d_{min}$	mm	Minimální vnitřní průměr naměřený na vrcholu trubkového oblouku
$n$	-	Počet měření
$t_0$	mm	Výchozí tloušťka stěny
$t_{min}$	mm	Požadovaná minimální tloušťka trubky
$u$	%	Odchylka kruhovitosti
$u$	mm	Průměrná hodnota úhlopříčky
$u_{stř}$	mm	Střední délka uhlopříčky
$u_1$	mm	Délka první uhlopříčky
$u_2$	mm	Délka druhé uhlopříčky
$\bar{x}$	mm	Aritmetický průměr
$x_i$	mm	i-té měření
$\alpha$	°	Úhel ohybu před odlehčením
$\alpha'$	°	Úhel ohybu po odlehčení
$\Delta\alpha$	°	Úhel odpružení
$\gamma_1$	-	Základní fáze niklových superslitin
$\gamma'$	-	Primární intermetalická fáze
$\gamma''$	-	Sekundární intermetalická fáze
$\sigma$	-	Nerovnovážná fáze
$\sigma$	mm	Směrodatná odchylka
ATOS	-	Advance Topomeric Sensor
BCC	-	Kubická prostorově středěná mřížka (Body Centred Tetragonal)
BCT	-	Tetragonální prostorově středěná mřížka (Body Centred Tetragonal)

---

CAD	-	Computer Aided Design/Drawing
CAM	-	Computer Aided Manufacturing
CCD	-	Charge Coupled Device
CMT	-	Cold Metal Transfer
ČSN	-	Československá státní norma
EDS	-	Energiově disperzní spektrometrie
EN	-	Evropská norma
FCC	-	Kubická plošně středěná mřížka (Face Centered Cubic)
FEM	-	Finite element method
HV	-	Tvrdość dle Vickerse
ISO	-	International organization for standardization
MAG	-	Metal Active Gas
OES	-	Optická emisní spektrometrie
RTG	-	Rentgenové záření
REM (SEM)	-	Rastrovací (skenovací) elektronová mikroskopie
STL	-	Nativní formát souboru stereolitografického programu
TEM	-	Transmisní elektronová mikroskopie
WIG	-	Wolfram Inert Gas
W-Nr.	-	Číslo materiálu
XRF	-	Rentgenofluorescenční spektrometrie
ZM	-	Základní materiál

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Tabulka vybraných hodnot tvrdosti u vektoru



## Příloha 1

Vpich	Vzdálenost [mm]	Tvrдост
10	978 $\mu\text{m}$	244 HV
11	1 078 $\mu\text{m}$	252 HV
12	1 179 $\mu\text{m}$	250 HV
13	1 278 $\mu\text{m}$	249 HV
14	1 378 $\mu\text{m}$	244 HV
15	1 478 $\mu\text{m}$	239 HV
16	1 579 $\mu\text{m}$	243 HV
17	1 678 $\mu\text{m}$	235 HV
18	1 777 $\mu\text{m}$	238 HV
19	1 878 $\mu\text{m}$	248 HV
20	1 978 $\mu\text{m}$	242 HV
21	2 078 $\mu\text{m}$	252 HV
22	2 178 $\mu\text{m}$	247 HV
23	2 278 $\mu\text{m}$	245 HV
24	2 378 $\mu\text{m}$	247 HV
25	2 478 $\mu\text{m}$	240 HV
26	2 577 $\mu\text{m}$	241 HV
27	2 677 $\mu\text{m}$	241 HV
28	2 777 $\mu\text{m}$	243 HV
29	2 877 $\mu\text{m}$	229 HV
30	2 977 $\mu\text{m}$	241 HV
31	3 077 $\mu\text{m}$	235 HV
32	3 177 $\mu\text{m}$	231 HV
33	3 277 $\mu\text{m}$	231 HV
34	3 373 $\mu\text{m}$	236 HV
35	3 500 $\mu\text{m}$	199 HV
36	3 572 $\mu\text{m}$	231 HV
37	3 673 $\mu\text{m}$	226 HV
38	3 773 $\mu\text{m}$	204 HV
39	3 879 $\mu\text{m}$	198 HV
40	3 974 $\mu\text{m}$	201 HV
41	4 077 $\mu\text{m}$	188 HV
42	4 179 $\mu\text{m}$	174 HV
43	4 277 $\mu\text{m}$	189 HV
44	4 378 $\mu\text{m}$	188 HV
45	4 477 $\mu\text{m}$	192 HV
46	4 580 $\mu\text{m}$	180 HV
47	4 672 $\mu\text{m}$	196 HV
48	4 778 $\mu\text{m}$	179 HV
49	4 877 $\mu\text{m}$	161 HV
50	4 979 $\mu\text{m}$	168 HV
51	5 078 $\mu\text{m}$	169 HV
52	5 178 $\mu\text{m}$	171 HV
53	5 278 $\mu\text{m}$	166 HV
54	5 377 $\mu\text{m}$	171 HV