

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

**AKCELEROVANÉ ŽÍHÁNÍ TENKOSTĚNNÝCH  
NEREZOVÝCH PROFILŮ**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Autor:** Bc. Růžena Malá

**Studijní obor:** Výrobní a materiálové inženýrství

**Vedoucí práce:** Ing. Zdeněk Pitrmuc

**Praha 2019**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Malá** Jméno: **Růžena** Osobní číslo: **434481**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Akcelerované žihání tenkostěnných nerezových profilů**

Název diplomové práce anglicky:

**Accelerated annealing of thin-wall stainless steel profile**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Literární rešerše o vlastnostech nerezových materiálů
- 2) Možnosti TZ a vlastnosti pevné atmosféry
- 3) Základní technologické zkoušky akcelerovaného žihání
- 4) Analýza změn tvrdosti a mikrostruktury
- 5) Koncepční návrh zařízení pro akcelerované žihání

Seznam doporučené literatury:

- 1) Stainless steel (ASM specialty handbook) - J.R. Davis, ISBN13: 9780871705037
- 2) Steel Heat Treatment Handbook - George E. Toten, ISBN-13: 978-0824727413

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Zdeněk Pitrmuc, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **02.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **19.07.2019**

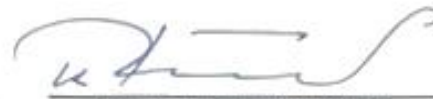
Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_



Ing. Zdeněk Pitrmuc  
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis díkara(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

23. 4. 2019

Datum převzetí zadání

Malá

Podpis studentky

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracovala samostatně a veškeré podklady jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne .....

.....

Bc. Růžena Malá

**Poděkování:**

Děkuji Ing. Zdeňkovi Pitrmucovi za odborné vedení mé diplomové práce, a také za rady a pomoc při práci v laboratořích.

**Anotace:**

Diplomová práce pojednává o problematice deformačního zpevnění tenkostěnných nerezových profilů a o možnostech jejich tepelného zpracování pro zmenšení deformačního zpevnění. Cílem práce je pomocí technologických zkoušek rozpouštěcího žihání určit parametry žihání pro obnovení tvařitelnosti materiálu v mezioperačním zpracování. Hlavním hodnotícím kritériem je změna tvrdosti, která s poklesem deformačního zpevnění klesá. Další zkoumaná vlastnost je mikrostruktura a její změna po tepelném zpracování. Výsledky analýz vedly k vytvoření koncepčního návrhu zařízení pro žihání konkrétních nerezových profilů.

**Klíčová slova:**

Deformační zpevnění, korozivzdorná ocel, tepelné zpracování, rozpouštěcí žihání, změna tvrdosti.

**Annotation:**

The master's thesis is focused on the problem of deformation hardening of thin-wall stainless steel profiles and about the possibilities of their heat treatment for reducing the deformation hardening. The aim of work is to determine the annealing parameters by means of dissolution annealing tests to restore the formability of the material between the processing. The main assessment criterion is a change in hardness, which decreases with a decrease in deformation hardening. Another property investigated is the microstructure and its change after heat treatment. The results of the analyzes led to the creation of a conceptual design of equipment for annealing of specific stainless steel profiles.

**Key words:**

Deformation hardening, stainless steel, heat treatment, solution annealing, change in hardness.

## Obsah

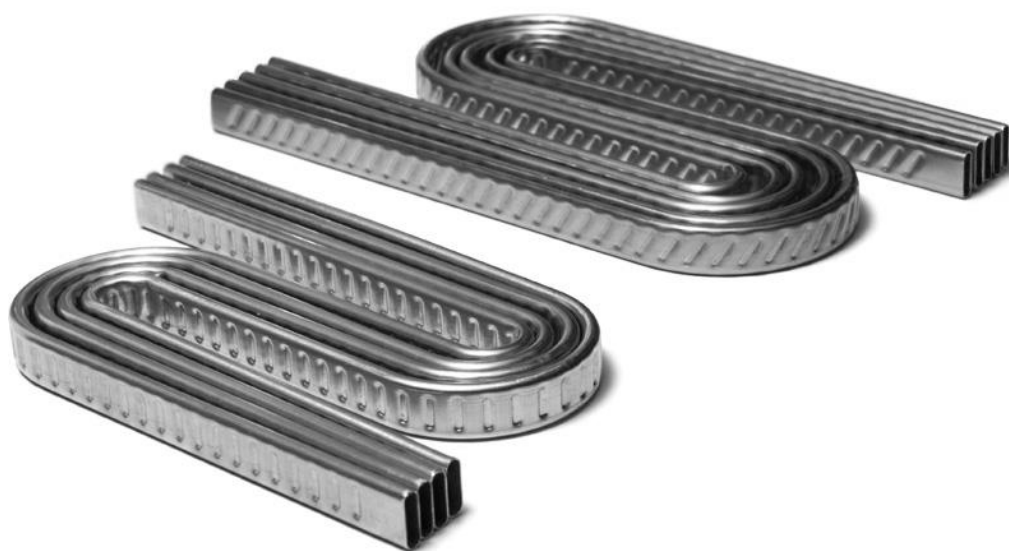
1. Úvod.....	8
2. Korozivzdorné oceli.....	10
2.1 Austenitické korozivzdorné oceli.....	12
2.1.1 Dělení austenitických korozivzdorných ocelí.....	12
2.1.2 Fyzikální vlastnosti austenitických korozivzdorných ocelí.....	15
2.1.3 Ocel AISI 304L (1.4307).....	16
2.1.4 Ocel AISI 316L (1.4404).....	17
3. Deformační zpevnění.....	18
4. Tepelné zpracování austenitických korozivzdorných ocelí.....	20
5. Možnosti ohřevu při žihání.....	22
5.1 Ohřev v peci.....	22
5.2 Vakuový ohřev.....	22
5.3 Indukční ohřev.....	23
5.4 Výpočet doby potřebné k ohřevu.....	23
5.4.1 Sdílení tepla vedením.....	23
5.4.2 Sdílení tepla prouděním.....	24
5.4.3 Sdílení tepla sáláním.....	24
5.4.4 Ohřev materiálu.....	24
5.5 Ochranné atmosféry používané při žihání.....	27
6. Metalografická příprava vzorků.....	29
6.1 Odběr vzorků.....	29
6.2 Fixace vzorků.....	29
6.3 Broušení vzorků.....	30
6.4 Leštění vzorků.....	31
6.5 Leptání vzorku.....	31
7. Měření tvrdosti dle Vickerse.....	32
8. Úvod do experimentu.....	34
8.1 Stanovení parametrů měření tvrdosti.....	34
8.2 Zařízení pro měření.....	34
8.3 Měření tvrdosti tvářených trubiček.....	36

8.1.1	Výsledky měření tvrdosti trubiček po tváření .....	37
8.4	Zjišťování možné velikosti deformačního zpevnění .....	38
8.4.1	Postup tváření plechu.....	38
8.4.2	Hodnoty tvrdosti ohýbaných vzorků .....	39
8.5	Zjištění teploty žihání pro odpevnění.....	39
8.5.1	Výsledky měření tvrdosti externě žihaných vzorků .....	40
8.5.2	Zjišťování závislosti odpevnění na době výdrže na teplotě.....	42
8.6	Experimentální zjištění doby náběhu na žihací teplotu.....	45
8.7	Experimentální určení přesné doby žihání pro konkrétní vzorky .....	45
8.7.1	Tvrdot vzorků po žihání – trubičky AISI 304L, t = 0,3 mm.....	46
8.7.2	Tvrdot vzorků po žihání – trubičky AISI 304L, t = 2 mm.....	47
8.7.3	Tvrdot vzorků po žihání – trubičky AISI 316L, t = 0,3 mm.....	48
8.7.4	Analýza mikrostruktury .....	49
9.	Návrh zařízení pro žihání.....	58
9.1	Návrh linky Termomacchine.....	59
9.1.1	Prověření možnosti použití a integrace linky Termomacchine .....	60
9.2	Návrh linky EFD Induction.....	61
9.2.1	Prověření možnosti použití a integrace linky Termomacchine .....	62
10.	Závěr.....	64
11.	Zdroje .....	66
12.	Seznam obrázků .....	70
13.	Seznam tabulek .....	72
14.	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	74
15.	Přílohy .....	77

## 1. Úvod

Automobilový průmysl prochází během posledních let řadou výrazných změn. Požadavky na změnu se týkají nejen nových technických řešení automobilů, ale i zefektivnění výroby, a to jak automobilových výrobců, tak i jejich dodavatelů a tím snížení nákladů. Změny jsou dále ovlivněny stále přísnějšími ekologickými požadavky na minimalizaci spalin a zvyšujícími se požadavky bezpečnostních standardů.

Jedna z cest, dnes hojně využívaná, pro snížení emise výfukových plynů je použití EGR (Exhaust Gas Recirculation) výměníku. EGR je součástka motoru, která umožňuje propojení výfukového a sacího potrubí, čímž umožňuje zpětné vedení spalin do sání a tím pomáhá snížit emise výfukových plynů. Součástí EGR výměníku jsou trubičky (obr. 1), které musejí odolávat prostředí spalin, vysoké teplotě a následně nízké teplotě a chladicí kapalině. Proto jsou vyráběny z austenitické korozivzdorné oceli. Tlak automobilových výrobců je na zmenšení EGR výměníku. Proto jsou trubičky konstruovány tak, aby měly co největší teplosměnnou plochu a mohla se zmenšit jejich velikost.



*Obrázek 1 - Příklad tenkostěnné svařované nerezové trubky [10]*



Současné technické a technologické možnosti umožňují vyrábět trubičky složitých tvarů na plně automatizovaných linkách a to rychlostí 10 m/min. Vyrábějí se z plechu, který je tvářen a následně svařen. Pro požadavky čím dál menších a složitějších tvarů nastává problém s tvařitelností materiálu a je potřeba trubičky mezioperačně vyžíhat pro snížení deformačního zpevnění a zvýšení tažnosti. Žihání je dnes nejčastěji prováděno ve vakuové peci, což je neefektivní z důvodu potřeby skladování, časové a personální náročnosti. Poptávka výrobců je po možnostech kontinuálního žihání ve výrobní lince.

Zařízení pro průběžné tepelné zpracování se věnuje hned několik firem. Problematika mezioperačního žihání těchto nerezových profilů je ale složitější, než aplikace, na které jsou linky standardně dodávány. Jeden z problémů je rychlost linky. Žihání ve vakuových pecích běžně probíhá v řádu až desítek minut, což by při rychlosti linky 10 m/min znamenalo velmi dlouhý úsek. Další problém je potřeba ochranné atmosféry, protože nerezové trubičky nebudou dále nijak opracovány.

Cílem této práce je tedy prověření možnosti zapojení žihací sekce do linky, která vyrábí trubičky z austenitické korozivzdorné oceli. Toto řešení by napomohlo nejen zkvalitnění výroby, ale i její vyšší efektivitě, menší personální zátěži a díky tomu všemu i ve výsledku nižší ceně. [37] [38]

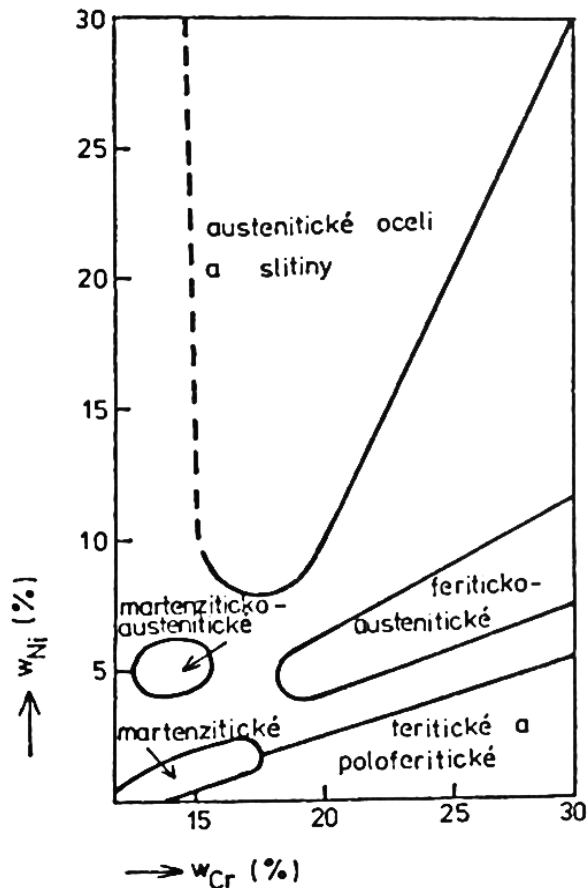
## 2. Korozivzdorné oceli

Korozivzdorné oceli patří mezi konstrukční kovové materiály. Vyznačují se svým typickým chemickým složením. Základním legujícím prvkem různých typů korozivzdorných ocelí je chrom (Cr), díky němuž dochází ke skokové změně standardního elektrochemického potenciálu a z oceli podléhající korozi se stává ocel pasivovaná. [1] [2]

Pasivace je složitý jev, díky němuž je podstatně omezena chemická reaktivita kovů a slitin, které se pak chovají jako imunní. Kovy nebo slitiny jsou v pasivním stavu pokryty tenkým neviditelným povlakem oxidu, který je tvořen reakcí s okolním prostředím. Tento tenký (100 až 500  $\mu\text{m}$ ) ochranný film pak působí jako bariéra. Pasivace povrchu ocelí závisí na přítomnosti dostatečného množství oxidačního činidla. V místech, kde je pasivní vrstva nehomogenní nebo poškozená a povrch není v kontaktu s dostatečným množstvím oxidačních látek nebo v elektrolytech obsahujících halogenidy dochází k nestabilitě pasivní vrstvy a koroznímu napadení korozivzdorných ocelí. [2] [3]

K pasivaci oceli dochází při koncentraci chromu min 12 % a obsahu uhlíku do 0,1 %. Dalším významným legujícím prvkem korozivzdorných ocelí je nikl (Ni). Ten se využívá nejen díky své elektrochemické ušlechtilosti, ale také pozitivně ovlivňuje mechanické vlastnosti. Mezi další legující prvky korozivzdorných ocelí patří mangan (Mn), molybden (Mo), měď (Cu) a další (Si, Al, Ti, Nb, Ta, W, V), které jsou obsaženy max. do několika procent. Charakteristické je pro korozivzdorné oceli velmi nízký obsah síry (S) a fosforu (P) a to max. do 0,03 %.

Rozlišujeme dle chemického složení a struktury tři základní typy jednofázových korozivzdorných ocelí – martenzitické, feritické a austenitické. Dvoufázové rozlišujeme na austeniticko-feritické, martenziticko-austenitické a martenziticko-feritické. [1] [2]



Obrázek 2 - Vyznačení oblasti chemických složení různých typů korozivzdorných ocelí [3]

Jednotlivé slitinové prvky můžeme dle vztahu k železu a soustavě Fe-C dělit do dvou hlavních skupin:

- 1) Prvky, které zvětšují oblast existence feritu, jejich představitelem je chrom a označují se jako feritotvorné. Patří mezi ně molybden, křemík, titan, hliník, niob, beryllium, vanad, wolfram a další.
- 2) Prvky, které rozšiřují a otevírají oblast austenitu, jejich představitelem je nikl a označují se jako austenitotvorné. Patří mezi ně uhlík, dusík a dále mangan a měď, které tvoří při určitých koncentracích intermediální sloučeniny a otevírající oblast austenitu jen omezeně. [3]

## 2.1 Austenitické korozivzdorné oceli

Přidáním niklu, manganu, popř. dusíku ke slitinám železa s chromem vzroste odolnost proti elektrochemické a plynné korozi a zároveň dojde ke stabilizaci kubické plošně středěné mřížky. Tyto oceli si podrží austenitickou strukturu za normální teploty, ale i za velmi nízkých teplot. Jsou pevné při zvýšených teplotách, dobře tvařitelné a nejsou feromagnetické. Z důvodu nepřítomnosti fázových přeměn jsou tyto oceli citlivé k růstu zrna za vysokých teplot bez možné regenerace tepelným zpracováním. Zhrubnutí zrna u austenitických ocelí ale nevede ke zkřehnutí. [1] [3]

Pro získání různých vlastností se složení austenitické oceli upravuje změnou obsahu základních prvků a přisazováním slitinových prvků. Dolegování austenitických ocelí je ale omezeno, neboť feritotvorné prvky snižují stabilitu austenitu. Cílem je zvýšení:

- celkové korozní odolnosti (chrom, molybden, měď, křemík)
- odolnosti proti mezikrystalové korozi (titan, niob)
- mechanických vlastností (dusík)
- obrobiteľnosti (síra, selen, fosfor, olovo, měď)
- odolnosti proti praskavosti svarů (mangan)
- odolnosti proti bodové a štěrbinové korozi (molybden, křemík, dusík)
- odolnosti proti koroznímu praskání (omezení obsahu fosforu)
- pevnosti při tečení (molybden, titan, niob, bór)
- žáruvzdornosti (chrom, hliník, křemík, nikl) [1] [3]

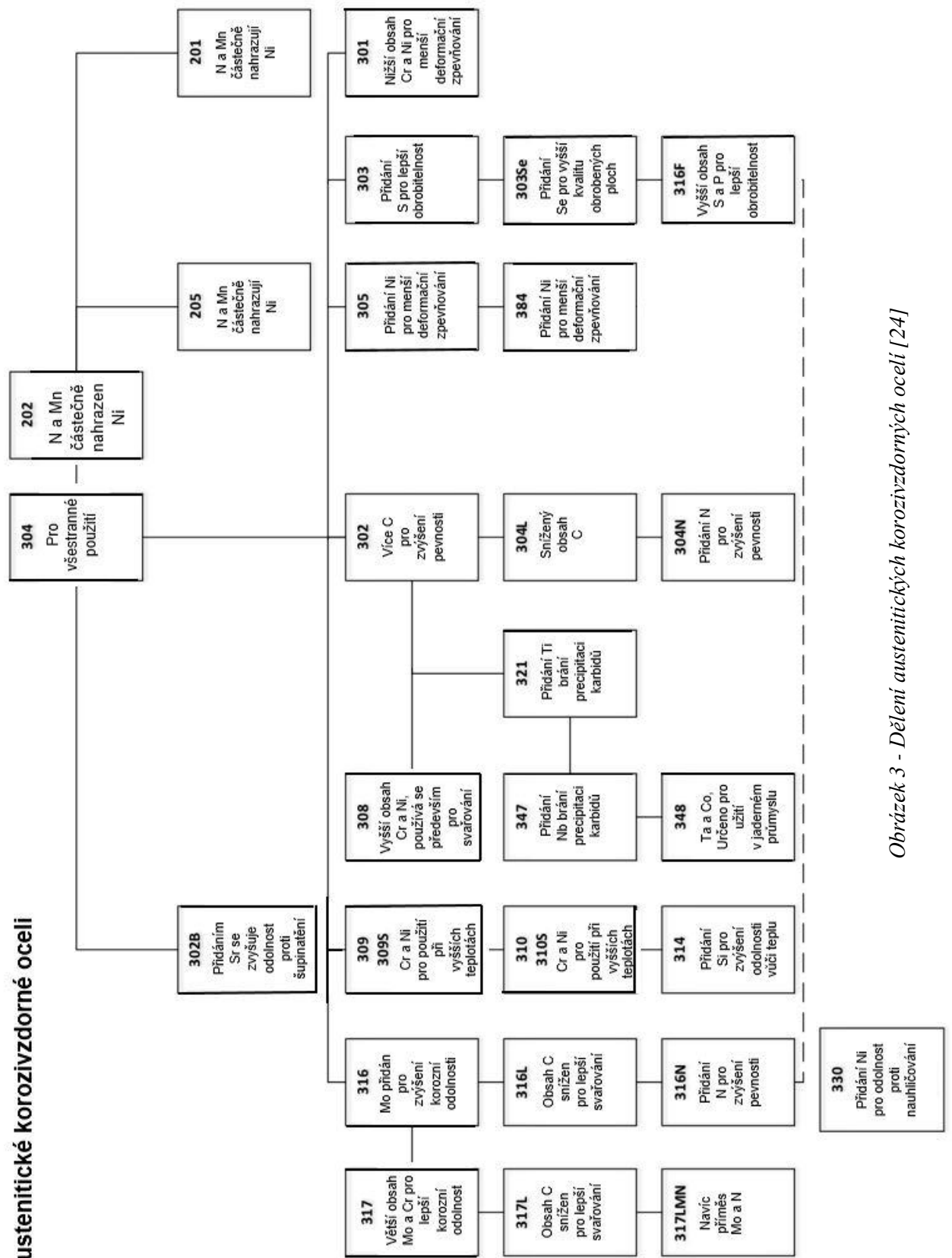
### 2.1.1 Dělení austenitických korozivzdorných ocelí

Podle základních slitinových prvků dělíme dále austenitické korozivzdorné oceli na:

- a) Chromniklové oceli – obsahují 12-25 % chromu, 8-38 % niklu, 0,01-0,15 % uhlíku, mohou být dále legovány dusíkem, molybdenem, mědí. Stabilizované chromniklové oceli obsahují titan a niob pro zvýšení mechanických vlastností a korozní odolnosti. Jsou to velice rozšířené korozivzdorné austenitické oceli a mají využití i v chemickém průmyslu. Nejvíce používané jsou oceli typu X5CrNi18-9 a X2CrNi18-9 (AISI 304 resp. AISI 304L), odolávají dobře v oxidačních prostředích a organickým kyselinám.
- b) Chromniklmolybdenové oceli – do základní chromniklové oceli je přidáno 2-4,5 % molybdenu a tím se značně zvýší její pasivace. Vyrábějí se rovněž jako stabilizované a nestabilizované. Používají se tam, kde oceli bez molybdenu nemají dostačující korozní odolnost – v prostředích obsahujících halogenidy (média chladicích systémů, průmyslové vody, mořská voda). Odolávají zředěné kyselině sýrové a organickým kyselinám.

- c) Chromanganové oceli – obsahují 10-12 % chromu, 14-25 % manganu, 0,02-0,08 % uhlíku, dále legovány dusíkem, molybdenem, mědí. Mohou být také stabilizované titnem a niobem. Tyto oceli se vyvíjeli a nadále vyvíjí se snahou nahradit v austenitických korozivzdorných ocelích drahý austenitotvorný nikl stejně působícími manganem a dusíkem.
- d) Vysokolegované – trendem vývoje je zavádění vysokolegovaných typů austenitických korozivzdorných ocelí, které mají zvýšenou korozní odolnost proti různým typům koroze, někdy dokonce jen pro jediné konkrétní použití. Obsahují 19-23 % chromu, do 30 % niklu, do 7 % molybdenu a měď. Dále mají velmi nízký obsah uhlíku a obsahují dusík. Tyto oceli mají vysokou odolnost proti celkové a mezikrystalové korozi v základním materiálu i ve svarových spojích. Jsou odolné proti neoxidačním minerálním kyselinám, znečištěným halogenidům a proti silným organickým kyselinám. [1] [3] [4]

## Austenitické korozivzdorné oceli



Obrázek 3 - Dělení austenitických korozivzdorných ocelí [24]

## 2.1.2 Fyzikální vlastnosti austenitických korozivzdorných ocelí

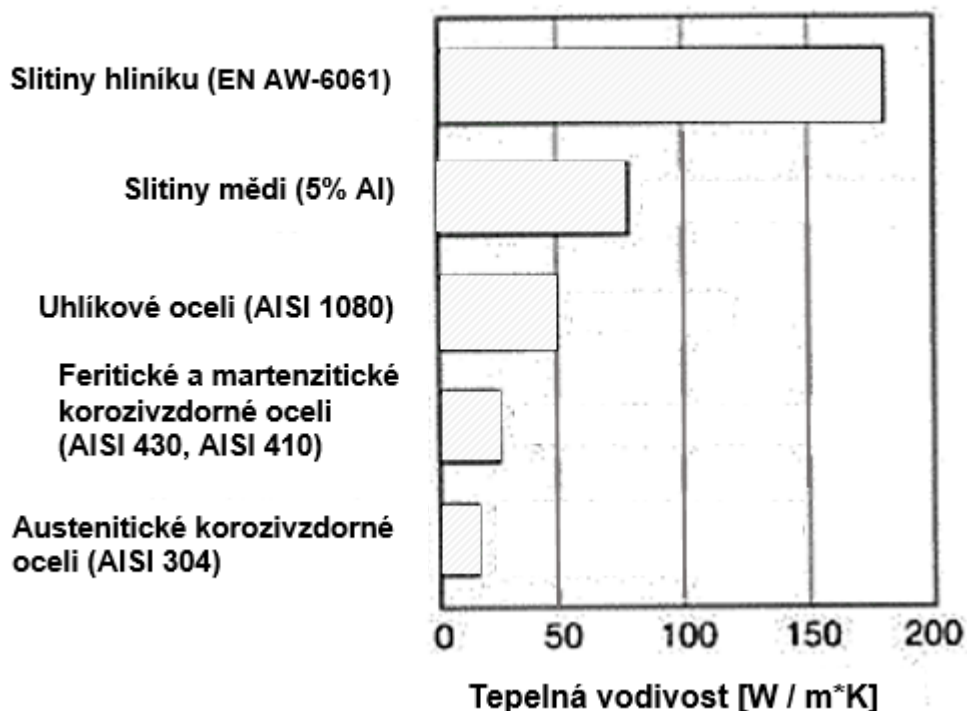
Mezi základní fyzikální vlastnosti austenitických korozivzdorných ocelí řadíme hustotu, Youngův modul pružnosti, tepelnou vodivost, měrnou tepelnou kapacitu, teplotní roztažnost, elektrický odpor a termoelektrické vlastnosti.

Hustota neboli měrná hmotnost se u těchto typů ocelí pohybuje v rozmezí od 7,5 do 8 g/cm<sup>3</sup> v závislosti na teplotě (8 g/cm<sup>3</sup> při -196 °C, naopak 7,5 g/cm<sup>3</sup> při 800 °C). Modul pružnosti v tahu se se změnou složení nerezových ocelí příliš nemění a pohybuje se v rozsahu přibližně 190-210 GPa. Se změnou teploty se mění i modul pružnosti (viz tab. 1) [3] [8]

Tabulka 1 - Modul pružnosti korozivzdorných ocelí v závislosti na teplotě [8]

Modul pružnosti v závislosti na teplotě různých korozivzdorných ocelí							
	Youngův modul pružnosti [GPa]						
Typ oceli	-196 °C	20 °C	100 °C	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C
AISI 302	200	193	191	183,5	168,5	153,5	139
AISI 304	208	193	191	183	168	148	128
AISI 310		193	192	184	173	155	134
AISI 316		193	192	185	168,5	151	132
AISI 321		193	192	182	166	151	132
AISI 347	208	193	184	168	152	152	134
AISI 410		206	200	191	175	158	140
AISI 430		206	198	191	165	139	122

Nikl v austenitických korozivzdorných ocelích společně s dalšími přísadami snižuje tepelnou vodivost, která je u těchto typů ocelí výrazně nižší, než u uhlíkových ocelí a ještě nižší, nežli u slitin hliníku (viz obr. 4)



Obrázek 4 - porovnání tepelné vodivosti kovových materiálů [8]

Korozivzdorné oceli mají vysoký elektrický odpor. Přidávání přísad roste elektrický odpor, proto mají austenitické a duplexní slitiny vyšší elektrický odpor, než feritické a martenzitické, a ještě vyšší než uhlíkové oceli. [8]

### 2.1.3 Ocel AISI 304L (1.4307)

Ocel AISI 304L (EN 1.4307) je nízkouhlíková chromniklová austenitická ocel. Díky nízkému obsahu uhlíku je minimalizováno srážení karbidů při ohřevu, například během svařování, a tím je zlepšena odolnost proti mezikrystalové korozi. Ocel je dobře tvařitelná a svařitelná a díky tomu má velké využití v mnoha oblastech. Korozní odolnost je vynikající i v mnoha roztocích organických a anorganických sloučenin, které neobsahují halogeny.

Tabulka 2 Chemické složení AISI 304L [11]

Chemické složení AISI 304L							
C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	N
max 0,03 %	max 2 %	max 0,045 %	max 0,03 %	max 0,75 %	18 - 20 %	8 - 12 %	max 0,11 %



Při zpracování oceli AISI 304L je třeba zohlednit teplotní limity. Při výdrži na teplotě nad 1000 °C mikrostruktura oceli rekrystalizuje, snižuje se tvrdost, dochází ke snížení pevnosti a k růstu zrn. V rozmezí teplot 500-800 °C dochází ke srážení karbidů chromu na hranicích zrn (tzv. senzibilace), které křehnou slitinu. Vysrážení karbidů umožňuje vznik koroze po hranicích zrn, které jsou ochuzeny o chrom, a to zhoršuje kvalitu ocele. [5] [6] [7]

*Tabulka 3 - Mechanické vlastnosti AISI 304L [14]*

	pevnost [MPa]	mez kluzu $R_{p0,2}$ [Mpa]	tažnost [%]	tvrdost [HV]
304L	564	250	58	159

## 2.1.4 Ocel AISI 316L (1.4404)

Ocel AISI 316L (EN 1.4404) je chromniklová austenitická nestabilizovaná nízkouhlíková ocel. Oproti AISI 304L obsahuje molybden. Ocel je dobře svařitelná, díky nižšímu obsahu uhlíku nedochází v tepelně ovlivněné oblasti ke srážení karbidu a tím ke vzniku mezikrystalové koroze. Je vhodná pro tváření za studena. Korozní odolnost oceli AISI 316L je výborná, zvláště odolná je proti důlkové korozi v prostředí chloridů. Není vhodná do prostředí kyseliny dusičné a jejích výparů. [12] [13]

*Tabulka 4 - Chemické složení AISI 316L [11]*

Chemické složení AISI 316L								
C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	N	Mo
max 0,03 %	max 2 %	max 0,045 %	max 0,03 %	max 1 %	16,5 - 18,5 %	10 - 12 %	max 0,11 %	2 -2,5 %

*Tabulka 5 - Mechanické vlastnosti AISI 316L [14]*

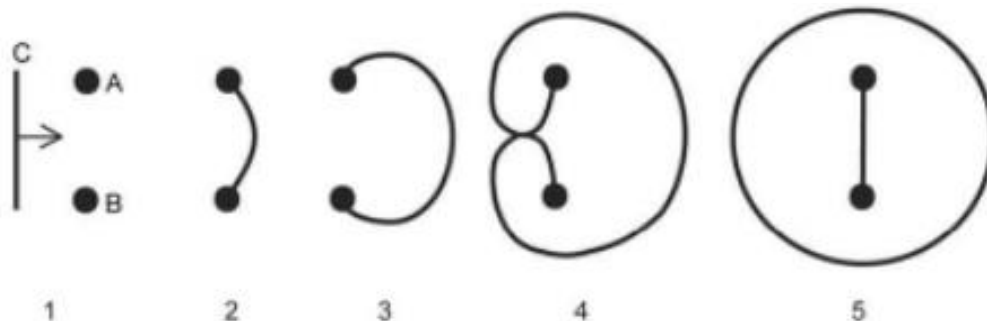
	pevnost [MPa]	mez kluzu $R_{p0,2}$ [Mpa]	tažnost [%]	tvrdost [HV]
316L	560	235	55	152

### 3. Deformační zpevnění

Při vhodné změně mikrostruktury kovových materiálů dochází k zvýšení jejich meze kluzu a meze pevnosti. Takový postup se nazývá zpevnění a je doprovázen snížením tažnosti a zvýšením tvrdosti. Mechanismus zpevnění souvisí s omezením pohyblivosti dislokací. Existuje několik způsobů zpevňování kovových materiálů:

- Deformační zpevnění
- Zpevnění působením legujících prvků nebo disperzních částic
- Zpevnění hranicemi zrn

Deformační zpevnění nastává při plastické deformaci materiálu (tváření) za studena, tzn. při teplotě nižší, než je teplota rekrytalizace. Základními mechanismy plastické deformace je deformace skluzem (pohyb dislokací ve skluzových rovinách) a deformace dvojčatěním. Při plastické deformaci dochází nejen ke skluzu dislokací, ale i ke vzniku nových dislokací ze zdrojů dislokací. Zdroj dislokací může být například Frank-Readův zdroj (obr. 5). Pro činnost zdroje je nutnost existence překážek pohybu dislokace. Těmi mohou být například tvrdé částice jiné fáze v mikrostruktuře. Při nárazu dislokace na tuto překážku se dislokace začne prohýbat a ve výsledku vzniká nová dislokace ve tvaru smyčky. Zbylý úsek zakotvený mezi částicemi se znovu prohýbá a opakuje se celý proces tvorby dislokace. Může vzniknout až několik set nových dislokací z jedné dislokace.

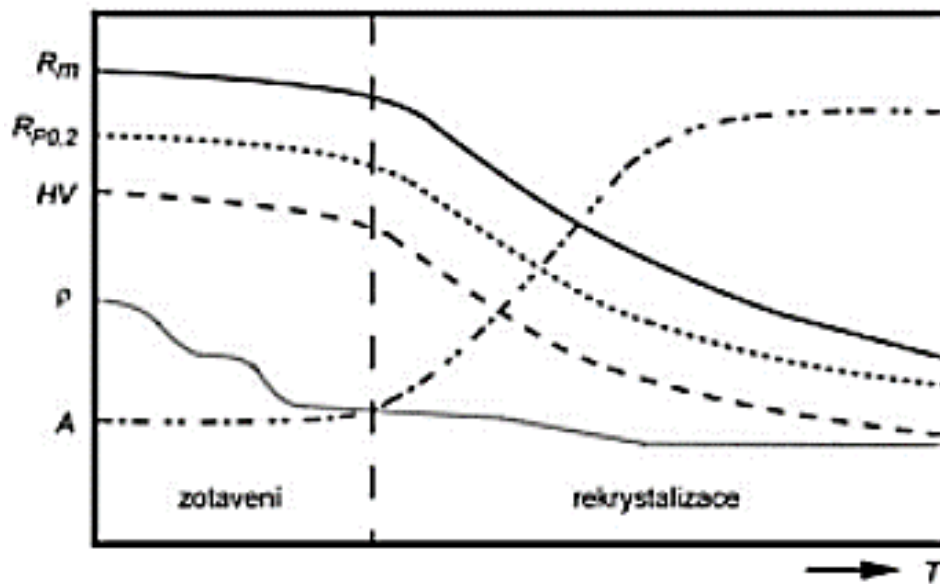


Obrázek 5 - Znárodnění Frank-Readova zdroje dislokací: A, B - překážky pohybu dislokace C; 1 - skluz dislokace; 2 - 4- prohýbání dislokace; 5- vznik nové dislokace [9]

Díky činnosti zdrojů dislokací roste jejich hustota. Dislokace si začnou vzájemně překážet ve skluzovém pohybu a navenek se to projeví deformačním zpevněním materiálu. Růst meze pevnosti deformačním zpevněním může být velmi značný (více než dvojnásobný) a materiál je pak obtížně tvaritelný.

Tvářením, byla do materiálu vložena energie, která se projevuje vysokou koncentrací strukturních poruch. Takovéto zpevnění materiálu je často nežádoucí (například pro další tvářecí operace) a proto se provádí odpevnění deformačně zpevněného materiálu vyžiháním při dostatečně vysoké teplotě.

Odpevňovací proces má dvě stádia – zotavení a rekrytalizaci. Při zotavení ( $0,25 T_{\text{tání}} [K]$ ) je zachovaná původní deformační textura, dochází ke snížení koncentrace bodových poruch a dislokací. Při rekrytalizaci ( $0,4 T_{\text{tání}} [K]$ ) vznikají z původně deformovaných zrn nová nedeformovaná zrna s nízkou koncentrací poruch a dochází tím ke změnám vlastností materiálu – pokles meze kluzu, meze pevnosti a tvrdosti a růst tažnosti (viz obr. 6). [9]



Obrázek 6 - Změna meze pevnosti, smluvní meze kluzu, tvrdosti, tažnosti a měrného elektrického odporu při odpevnění v závislosti na teplotě [9]

#### 4. Tepelné zpracování austenitických korozivzdorných ocelí

Základním cílem při tepelném zpracování austenitických korozivzdorných ocelí je:

- rozpuštěním karbidů, popřípadě dalších fází v austenitu získat homogenní tuhý roztok a optimální korozní odolnost
- potlačit zpevnění vyvolané tvářením (za tepla i za studena)
- vyvázat co nejvyšší množství uhlíku na stálé karbidy, tím omezit dlouhodobý tepelný vliv na stabilitu struktury a korozní odolnost

U austenitických korozivzdorných ocelí se k dosažení těchto cílů využívá rozpouštěcí žihání. To spočívá v ohřevu na 950-1175 °C (podle druhu oceli – viz tab. 6) a následném rychlém ochlazení. Chlazení je kritickou operací žihání austenitických korozivzdorných ocelí. Je nezbytné, aby byly ochlazeny na teplotu nižší než 450 °C ve velmi krátkém čase (1–2 min). Tím se vyhneme vylučování karbidů. U stabilizovaných austenitických korozivzdorných ocelí může být dle potřeby doplněno rozpouštěcí žihání stabilizačním žiháním při teplotě 850-950 °C po dobu 2-4 hodin, nebo jinými zvláštními způsoby tepelného zpracování při snížených teplotách. Cílem těchto operací je dosáhnout optimální korozní odolnosti při zvýšených pevnostních charakteristikách. Využívají se i u ocelí se sníženým obsahem uhlíku, které jsou určeny pro použití za zvýšených teplot. [3] [7]

Tabulka 6 - Doporučené žíhací teploty pro vybrané korozivzdorné oceli [7]

Typ oceli	Teplota žíhání [°C]
AISI 201	1010 - 1120
AISI 202	1010 - 1120
AISI 205	1065
AISI 301	1010 - 1120
AISI 302	1010 - 1120
AISI 303	1010 - 1120
AISI 304	1010 - 1120
AISI 304L	1010 - 1120
AISI 305	1010 - 1120
AISI 308	1010 - 1120
AISI 309	1040 - 1120
AISI 310	1040 - 1120
AISI 314	1150
AISI 316	1010 - 1120
AISI 316L	1010 - 1120
AISI 317	1010 - 1120
AISI 317L	1040 - 1095
AISI 321	955 - 1120
AISI 330	1065 - 1175
AISI 347	1010 - 1120
AISI 348	1010 - 1120
AISI 384	1040 - 1150

## **5. Možnosti ohřevu při žihání**

Vzhledem k tomu, že složení na povrchu nerezové oceli musí zůstat nezměněno, aby byla zachována správná ochrana proti korozi, je velmi důležité, aby byla při zpracování nerezových ocelí použita správná regulace teploty a vhodná atmosféra. To je důležité především u součástí, jejichž povrch nebude při dalším zpracování odstraněn (obroben).

V ideálním případě jsou pro tepelné zpracování korozivzdorných ocelí vhodné vakuové pece. Obecně pece s přímým ohřevem nejsou vhodné pro vysokoteplotní tepelné zpracování korozivzdorných ocelí, a to hlavně kvůli teplotní nerovnoměrnosti a oxidaci. Sálavé trubkové nebo elektricky vyhřívané pece, ve kterých se využívají kovové nebo křemíkové odpory jsou vhodné pro většinu operací tepelného zpracování korozivzdorných ocelí. [7]

### **5.1 Ohřev v peci**

Existují dva základní typy prostředí pecí, a to otevřená a řízená atmosféra. V rámci těchto dvou typů existuje celá řada konstrukcí pecí. Velmi častým případem pece s otevřenou atmosférou je komorová pec. Komorové pece se vyrábí v různých provedeních a velikostech s rozmanitým využitím. Různé konstrukce pecí mohou umožňovat vrchní, boční nebo spodní plnění. Některé pece jsou konstruovány pro zajištění co nejrychlejšího přesunu vsázky směrem k chlazení. Další možností pecí s otevřenou atmosférou jsou například průběžné pece. V pecích s otevřenou atmosférou dochází k oxidaci a oduhličování povrchu materiálu, což je velkou nevýhodou těchto pecí a nejsou tak vhodné pro velké množství aplikací. [29]

### **5.2 Vakuový ohřev**

Vakuové pece jsou jedny z nejlépe fungujících pecí s atmosférickou regulací a je v nich možno dosáhnout až 100 % neutrální atmosféry. Díky tomu při tepelném zpracování kovů nedochází k oxidaci povrchu a materiál je po zpracování stejně lesklý jako před zahřátím. Ve vakuu neproudí žádný plyn a k přenosu tepla dochází jen zářením. Vakuové pece nejsou určeny k ohřevu materiálu na teploty do 600 °C, protože při těchto teplotách je přenos tepla zářením velmi malý a velmi špatně se v tomto rozmezí reguluje teplota. K ochlazení se používá ochranná atmosféra, která je přivedena do komory. Nejčastěji je to dusík anebo argon. Výhodou vakuových pecí je i nízká spotřeba energie díky malým tepelným ztrátám. [29] [30]

### 5.3 Indukční ohřev

Indukční ohřev je rychlý, přesný, čistý, energeticky účinný, regulovatelný a opakovatelný. Využití indukčního ohřevu je možné v mnoha průmyslových aplikacích jako například pro tavení, kalení, popouštění, svařování, žíhání a mnoho dalších. Při indukčním ohřevu je využíváno elektromagnetické indukce – při vložení elektricky vodivého materiálu dovnitř cívky, jejímž vinutím protéká střídavý proud, indukují se střídavým magnetickým polem v dutině cívky ve vloženém předmětu vířivé proudy. Ty předmět zahřívají. Regulovatelnost je zajištěna možností změny kmitočtu. [31]

### 5.4 Výpočet doby potřebné k ohřevu

Teplu se mezi soustavou a okolím sdílí třemi základními způsoby:

- Vedením (kondukcí)
- Prouděním (konvekci)
- Sáláním (radiací) [21]

#### 5.4.1 Sdílení tepla vedením

Základem pro vedení tepla je existence teplotního pole, které vzniká tehdy, pokud je v materiálu přítomen rozdíl teplot. Vznikající teplotní pole se šíří všemi směry a může a nemusí být závislé na čase. Obecně je teplotní pole matematicky popsáno:

$$t = f(x, y, z, \tau) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.1)$$

Kde  $x, y, z$  jsou prostorové souřadnice a  $\tau$  je čas.

V teplotním poli jsou vytvářeny oblasti se stejnými teplotami. Taková oblast, kde všechny její body mají v určitém okamžiku stejnou teplotu se nazývá izotermická plocha. Množství tepla přenesené přes izotermický povrch za čas je tepelný tok  $P$  [W]. Hustota tepelného toku  $q$  [W/m<sup>2</sup>] je pak tepelný tok vztažený na jednotku izotermické plochy.

$$P = q * S \quad (5.2)$$

Množství tepla  $Q$  [J] procházející izotermickou plochou je součin tepelného toku a času.

$$Q = P * \tau \quad (5.3)$$

[19] [20] [21]

## 5.4.2 Sdílení tepla prouděním

Probíhá při pohybu tekutiny, dochází ke sdílení tepla například mezi tekutinou a tuhou látkou – proudící tekutina předává nebo odebírá teplo z povrchu okolních těles. Matematicky lze sdílení tepla konvekcí mezi tekutinou a tuhou látkou vyjádřit jako měrný tepelný tok  $q$  ve směru normály  $n$  k povrchu, nebo jako rovnost I. Fourierova zákona a Newtonova zákona.

$$q_{\text{konvekce}} = -\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right) = \alpha_{\text{konvekce}} * (t_{\text{povrch}} - t_{\text{tekutina}}) \quad (5.4)$$

Kde:  $q$  je měrný tepelný tok [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ]

$\alpha$  je součinitel přestupu tepla [ $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ ] [20]

## 5.4.3 Sdílení tepla sáláním

Sdílení tepla zářením není vázáno na hmotné prostředí, a tak může probíhat i ve vakuu. Uskutečňuje se elektromagnetickým vlněním, které se šíří rychlostí světla. Množství vysálané energie závisí na teplotě tělesa. Těleso, které při dané teplotě vyzařuje nebo pohlcuje na každé vlnové délce maximální možné množství sálavé energie se nazývá černé těleso. Ve skutečnosti takové těleso neexistuje, proto byl zaveden pojem šedé těleso. [20]

## 5.4.4 Ohřev materiálu

Cílem ohřevu materiálu je zajištění požadované teploty v ohřívaném materiálu. Fyzikální vlastnosti, které ovlivňují průběh ohřevu jsou: součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  [ $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ], měrná tepelná kapacita  $c_p$  [ $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ], hustota  $\rho$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ], součinitel teplotní vodivosti  $a$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ], součinitel tepelné jímavosti  $b$  [ $\text{J}/\text{m}^2\cdot\text{s}^{0.5}\cdot\text{K}$ ]. Mechanické vlastnosti ovlivňující ohřev materiálu jsou součinitel teplotní délkové roztažnosti  $\beta$  [ $\text{K}^{-1}$ ], modul pružnosti  $E$  [ $\text{MPa}$ ], mez pevnosti v tahu  $\sigma_{pt}$  [ $\text{MPa}$ ], poměrné prodloužení  $\varepsilon$  [%], poměrné zúžení  $\varphi$  [%].



Ohřev je děj nestacionární, zahrnuje vnější přestup tepla a vnitřní přestup tepla. Vnější přestup tepla určuje množství tepelné energie, které dopadne na povrch ohřivaného materiálu (vsázky) z okolního prostředí. Vnitřní přestup tepla řeší šíření tepelné energie ohřivaným materiálem. Rozdělení teplot v ohřivané vsázce určuje Biotovo kritérium, což je poměr vnitřního a vnějšího tepelného odporu v průřezu materiálu. Při řešení ohřevu je nutno určit dle Biotova (5.5) kritéria, zda se jedná o tenké nebo tlusté těleso [19] [20]

$$Bi = \frac{\alpha \cdot b}{\lambda} \quad (5.5)$$

$Bi < 0,25 \rightarrow$  tenké těleso

$Bi > 0,5 \rightarrow$  tlusté těleso

Kde:  $\alpha$  je součinitel přestupu tepla na povrchu tělesa [ $W/m^2 \cdot K$ ]

$b$  je tloušťka tělesa [m]

$\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti [ $W/m \cdot K$ ]

Při vnějším přestupu tepla dochází k šíření tepelné energie z okolní atmosféry na povrch ohřivaného materiálu, který je tak ohřátý na požadovanou teplotu. Při tomto ději dochází ke kombinovanému přestupu tepla konvekcí a zářením. Podíl konvekčního přestupu tepla se pohybuje v rozmezí 10 až 30 % z celkového množství dopadající energie. Tento poměr se mění s teplotou a v oblasti nad 900 °C ubývá konvekce a narůstá podíl záření. Konvekční režim, který se předpokládá do teploty 900 °C je charakterizován celkovým součinitelem tepla  $\alpha_{\Sigma}$ , radiační režim, který se předpokládá v oblasti nad 900 °C je charakterizován konstantou pece  $c_{pec}$ .

Ohřev tenkých těles, které se realizují v praxi je možno rozdělit do tří typů:

- a) Teplota pece je konstantní
- b) Tepelný tok, dopadající na materiál je konstantní
- c) Teplota pece je lineární funkce času

Velmi často je používán ohřev, kdy je teplota pece konstantní. Pro stanovení doby ohřevu v tomto režimu se vychází z předpokladu, že množství dodané tepelné energie vnějším přestupem tepla vyvolává ve vsázce odpovídající přírůstek entalpie. Důležité je, zda ohřev probíhá v konvekčním či radiačním režimu.

Pro zjištění doby náběhu na teplotu v konvekčním režimu je možno vycházet z rovnice (5.6).

$$\tau_k = \frac{b \cdot \rho \cdot c_p}{k_1 \cdot \alpha_\Sigma} \cdot \ln \frac{t_{pec} - t_0}{t_{pec} - t_k} \quad [s] \quad (5.6)$$

Kde:  $b$  je tloušťka stěny [m]

$\rho$  je hustota ohřívaného materiálu [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$c_p$  je měrná tepelná kapacita [ $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ]

$k_1$  je součinitel tvaru [1 – deska, 2 – válec, 3 – kulové tvary]

$\alpha_\Sigma$  je celkový součinitel tepla [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]

$t_{pec}$  je teplota pece [ $^\circ\text{C}$ ]

$t_0$  – teplota materiálu na začátku ohřevu [ $^\circ\text{C}$ ]

$t_k$  – požadovaná výsledná teplota [ $^\circ\text{C}$ ]

Pro stanovení  $\alpha_\Sigma$  byly sestaveny empirické vztahy, které jsou platné pro konkrétní případ.

Pro určení doby ohřevu v radiačním režimu slouží vztah (5.7).

$$\tau_k = \frac{b \cdot \rho \cdot c_p}{k_1 \cdot C_{pec}} \cdot \frac{10^8}{T_{pec}^3} \cdot [\psi(\theta_k) - \psi(\theta_0)] \quad [s] \quad (5.7)$$

Funkce  $\psi(\theta)$  má tvar:

$$\psi(\theta) = \frac{1}{4} \cdot \ln \frac{1+\theta}{1-\theta} + \frac{1}{2} \arctg \theta \quad (5.8)$$

Kde:  $C_{pec}$  je konstanta pece [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]

$\theta_0, \theta_k$  je teplotní simplex

$T_{pec}$  je teplota pracovního prostředí [K]

Teplotní simplex je možno vyjádřit:

$$\theta_0 = \frac{T_0}{T_{pec}} \quad ; \quad \theta_k = \frac{T_k}{T_{pec}} \quad [19] [20]$$

## 5.5 Ochranné atmosféry používané při žihání

Atmosféry, které se používají při tepelném zpracování kovů dělíme podle účinku na povrch materiálu na ochranné (zabraňují průběhu nežádoucích reakcí – oxidaci, oduhličení, nauhličení) a aktivní (vyvolávají žádanou chemickou reakci – nauhličení, oduhličení, nitridaci). [20]

Pro žihání korozivzdorných ocelí se jako ochranné plyny nejčastěji využívají směs vodíku a dusíku, a to v podobě disociovaného amoniaku (25 % dusíku a 75 % vodíku), směs 75 % dusíku a 25 % vodíku nebo čistý vodík. [22]

Vodík je silným dezoxidačním činidlem a jeho tepelná vodivost je přibližně sedmkrát větší než tepelná vodivost vzduchu. Jeho hlavní nevýhodou je, že je snadno absorbován většinou běžných kovů při zvýšené teplotě. To může mít za následek křehnutí zejména u vysokouhlíkových ocelí. Jeho využití je tedy zejména při jasném žihání nerezových a nízkouhlíkových ocelí. Používá se také při slinování žáruvzdorných materiálů jako je karbid wolframu a karbid tantalu a při pájení mědi. [23]

Tabulka 7 - Fyzikální vlastnosti vodíku [25] [26] [28]

Vlastnosti plynného vodíku při tlaku 0,10132 MPa					
Teplota tání [°C]	Teplota varu [°C]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	Molová hmotnost [kg/kmol]	Měrná tepelná kapacita [J/kg*K]	Tepelná vodivost [W/m*K]
-259,2	-252,7	0,08987	2,02	14304	0,1815

Dusík v molekulární podobě je pasivní vůči feritu a je tedy vyhovující atmosférou při žihání nízkouhlíkových ocelí. Při užití jako ochranná atmosféra pro oceli s vyšším obsahem uhlíku, musí být dusík zcela suchý, jelikož již malé množství vodní páry způsobuje oduhličení. Molekulový dusík je reaktivní s mnoha nerezovými ocelmi a v těchto případech nemůže být použit při jejich tepelném zpracování. V těchto případech se používají atmosféry s příměsí reaktivních plynů (více než 5 %). Reaktivní složky jsou obecně vodík a oxid uhelnatý. Takovéto atmosféry se typicky používají při žihání nerezové oceli, pájení natvrdo nebo při slinování kovů práškovou metalurgií. [23]

Tabulka 8 - Fyzikální vlastnosti dusíku [25] [27] [28]

Vlastnosti plynného dusíku při tlaku 0,10132 MPa					
Teplota tání [°C]	Teplota varu [°C]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	Molová hmotnost [kg/kmol]	Měrná tepelá kapacita [J/kg*K]	Tepelná vodivost [W/m*K]
-210,01	-195,8	1,784	28,01	1040	0,02583

V tabulce 17 jsou uvedeny stejné vlastnosti vzduchu pro porovnání.

Tabulka 9 - Fyzikální vlastnosti vzduchu [39]

Vlastnosti vzduchu					
Teplota tání [°C]	Teplota varu [°C]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	Molová hmotnost [kg/kmol]	Měrná tepelá kapacita [J/kg*K]	Tepelná vodivost [W/m*K]
-194,5	-213,4	1,29	28,96	1010	0,0237

## 6. Metalografická příprava vzorků

Základní metodou pro studium struktury kovů je světelná mikroskopie. Ta je založena na pozorování odraženého světla od rovinných řezů vzorků kovových materiálů světelným metalografickým mikroskopem. Metalografická analýza umožňuje posoudit jakost výroby kovových materiálů, vhodnost jejich použití pro daný účel, hodnocení svarových spojů nebo například měření tloušťky povlaků. Vzorky takto připravené ale mohou sloužit i jinému zkoumání než jen pozorování struktury, a to například pro měření tvrdosti.

Metalografie je destruktivní metoda zkoušky materiálu. Příprava metalografických vzorků zahrnuje odebrání vzorku materiálu, fixaci vzorků, broušení leštění a pro potřeby pozorování struktury leptání. [32] [33]

### 6.1 Odběr vzorků

Při odběru vzorku pro přípravu výbrusu je třeba dbát na to, aby nedošlo k nežádoucím deformacím povrchu nebo k tepelnému ovlivnění struktury. Při volbě způsobu odběru vzorku je třeba zohlednit tvrdost a obrobitelnost daného materiálu. Směr řezu je třeba volit s ohledem na to, co bude předmětem pozorování. V podélných řezech je možné pozorovat například stupeň plastické deformace, v příčném pak například hloubku povrchové vrstvy. Velmi častým způsobem dělení materiálu je abrazivní řezání. To je technologie dělení pomocí relativně tenkého rotujícího disku složeného z brusných částí (abraziva) a pojiva. Dle výběru vhodného abraziva je možno takto dělit velké množství materiálů, například diamantové kotouče s kovovou maticí se používají na řezání velmi tvrdých kovů, kamenů nebo keramiky. V průběhu řezání cirkuluje zařízením chladicí kapalina, která chrání vzorek před poškozením teplem a odstraňuje nečistoty z rezné plochy. Kvalita získaného povrchu abrazivním řezáním je velmi vysoká. [32] [33]

### 6.2 Fixace vzorků

Po odebrání vzorku je pro lepší manipulaci při následných operacích provedena fixace vzorku, která se nejčastěji provádí zalitím do pryskyřice, a to metodou za studena nebo za tepla (zalisováním). Takto připravené vzorky mají mnoho výhod při následném zpracování a to:

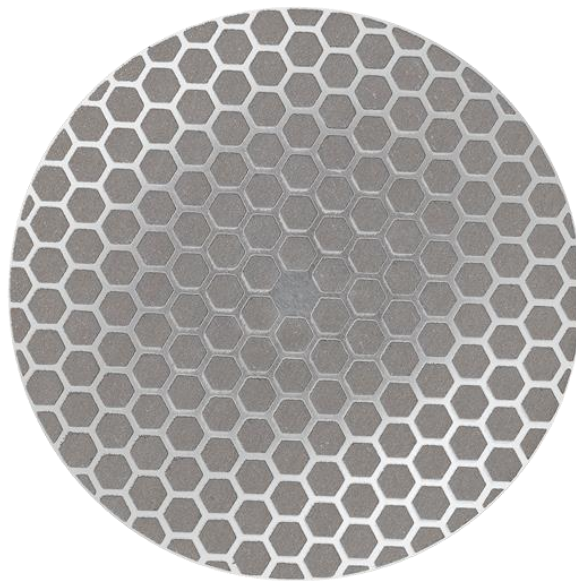
- Snadnější manipulace se vzorky, které jsou příliš malé, křehké nebo mají nevhodný tvar
- Zajištění ostrých hran
- Jednoduchá a pohodlná konfigurace pro automatické brusky a leštičky
- Identifikace a podrobnosti vzorků, které je možno uvést na zadní straně a nejsou časem degradovatelné
- Standardní velikost pro snadné skladování

Zalisování vzorku je prováděno za tepla a tlaku (100–180 °C, 250 barů) a je možné ho použít, pokud teplota a tlak neohrozí strukturu materiálu. Lisování je obecně levnější variantou pro fixaci vzorku a jeho výhodou je v zachování ostrosti hran.

Příprava vzorků za studena se provádí zalitím vzorku do formy při pokojové teplotě. K zalévání se používají akrylové nebo epoxidové pryskyřice, u nichž po zalití dochází k vytvrzení (polymerizaci). [32] [33]

### 6.3 Broušení vzorků

Vzorek, který slouží pro metalografické zkoumání je třeba nabrousit tak, aby drsnost na povrchu byla rovnoměrná s minimální nerovností povrchu. Broušení dnes ve většině případů probíhá na automatických broušicích strojích. Proces broušení můžeme rozdělit do dvou fází na rovinné broušení a jemné broušení. Rovinné broušení zajišťuje, že povrchy všech vzorků jsou podobné navzdory jejich různému počátečnímu stavu. K tomu se využívají brusné papíry s hrubými, pevnými abrazivními částmi, které rychle odstraňují materiál. Při jemném broušení vzniká povrch materiálu s malými deformacemi, které je následně možno odstranit leštěním. K tomu se využívají například jemné brusné kotouče se zapuštěnými diamantovými částicemi s použitím diamantových suspenzí. [32] [33] [34]



*Obrázek 7 - Brusný kotouč s diamantem pro jemné broušení [35]*

## **6.4 Leštění vzorků**

Leštěním vzorků má za cíl dosažení kvalitního zrcadlového povrchu tím, že odstraní zbylá poškození po předchozím broušení. Toho se dosahuje pomocí postupně jemnějších brusných částí. Leštění lze rozdělit do dvou různých procesů na diamantové leštění a oxidové leštění. Stejně jako broušení i leštění probíhá nejčastěji za pomoci automatické leštičky. [33] [34]

## **6.5 Leptání vzorku**

Leptání vzorku se používá pro odhalení mikrostruktury vzorku viditelné pod světelným mikroskopem. Vzorek vhodný pro leptání by měl mít pečlivě vyleštěnou rovinnou plochu bez šmouh a škrábanců. Vzorky lze leptat chemicky, elektrolyticky nebo tepelně. Pro každý materiál je vhodná jiná technologie leptání, jiné leptadlo i doba leptání. Leptání je velmi citlivá operace metalografické přípravy vzorku, protože pakliže dojde k pře leptání, je třeba vzorek znova brousit a leštit. Velmi častým leptadlem je tzv. Nital (2 až 5 % roztok  $\text{HNO}_3$  v ethanolu), který se používá pro chemické leptání nízkolegovaných ocelí a litin. Austenitické korozivzdorné oceli jsou chemicky velmi těžko naleptatelné, a proto se pro přípravu vzorků z těchto ocelí používá elektrolytické leptání. [32] [33]

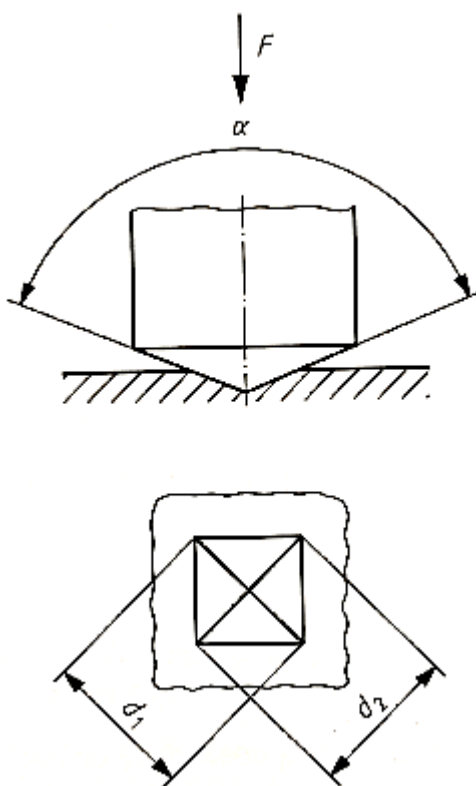
## 7. Měření tvrdosti dle Vickerse

Metoda měření a vyhodnocování tvrdosti kovových materiálů dle Vickerse je upraveno normou ČSN EN ISO 6507-1 Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda. Norma specifikuje metodu zkoušení tvrdosti kovových materiálů pro tři různé rozsahy zkušebních zařízení (viz tab. 10).

Tabulka 10 - Rozsahy zkušebního zařízení [15]

Rozsahy zkušebních zařízení, F [N]	Značka tvrdosti	Název
$F \geq 49,03$	$\geq \text{HV } 5$	Zkouška tvrdosti podle Vickerse
$1,961 \leq F \leq 49,03$	$\text{HV } 0,2 \text{ až } < \text{HV } 5$	Zkouška tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení
$0,009807 \leq F \leq 1,961$	$\text{HV } 0,001 \text{ až } < \text{HV } 0,2$	Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse

Principem měření tvrdosti dle Vickerse je vtlačování tělesa ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou do povrchu zkušebního tělesa. Následně se měří délka úhlopříčky vtisku, který v povrchu zůstane po odlehčení. Tvrdost podle Vickerse je úměrná podílu zkušebního zatížení k průmětu plochy vtisku, který se považuje za pravidelný čtyřboký jehlan o čtvercové základně se shodným vrcholovým úhlem jako vnikající těleso.



Obrázek 8 - Princip zkoušky měření tvrdosti dle Vickerse [15]



Výpočet výsledné tvrdosti dle Vickerse:

$$HV = \text{Konstanta} * \frac{\text{zkušební zatížení}}{\text{povrch plochy vtisku}} = 0,102 \frac{2F * \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \quad (7.9)$$

Kde: F je síla zkušebního zatížení [N]

d je aritmetický průměr délek, dvou úhlopříček  $d_1$  a  $d_2$  [mm]

HV je tvrdost podle Vickerse

$\alpha$  je vrcholový úhel protilehlých stran vnikajícího tělesa o tvaru jehlanu ( $136^\circ$ )

Konstanta je převodní faktor z kgf na N (0,102)

Značení tvrdosti podle Vickerse je sestaveno z hodnoty výsledné tvrdosti (7.9), HV jako značky tvrdosti, hodnoty použitého ekvivalentního zkušebního zatížení v kgf a popřípadě z doby zkušebního zatížení (pokud neleží v předepsaném rozsahu 10 až 15 s). [15]

## 8. Úvod do experimentu

V experimentální části této diplomové práce budou šetřeny vhodné parametry, konkrétně volba vhodné teploty a času pro mezioperační žíhání tenkostěnných nerezových profilů. Po získání těchto parametrů je cílem této práce koncepční návrh zařízení pro žíhání v kontinuální výrobní lince.

Ve spolupráci s firmou Attl a spol. s. r. o. Továrna na stroje, která se mimo jiné zabývá výrobou nerezových trubek a profilů budou zhodnocena vhodná dostupná řešení pro mezioperační žíhání jejich výrobků. Na kontinuální výrobní lince vyrábí nerezové trubky a profily různých tloušťek z různých materiálů. V této práci se zaměříme na trubičky vyráběné z oceli AISI 304L a AISI 316L, oválné, dimpované trubičky, z plechu tloušťky 0,3 mm, laserem svařované do EGR výměníků. Dále na nerezové trubky z plechu tloušťky 2 mm, svařované laserem z oceli AISI 304L vyráběné pro automotive. Všechny tyto produkty spojuje stejný problém, a to deformační zpevnění způsobené tvářecími operacemi. Součástí experimentu bude určení zpevnění, a to sledováním hodnoty tvrdosti, která při deformačním zpevnění roste (viz kapitola 3). Při stanovení vhodných parametrů pro rozpouštěcí žíhání se bude vycházet ze změn tvrdosti. Prověřeny budou také strukturní změny, konkrétně změny velikosti zrna.

### 8.1 Stanovení parametrů měření tvrdosti

Pro stanovení vhodného zatížení zkušebního tělesa udává norma ČSN EN ISO 6507-1 podmínku velikosti vtisku, kdy pro ocel platí, že vzdálenost od středu vtisku k hraně zkušebního tělesa musí být nejméně 2,5 násobek střední délky úhlopříčky vtisku. Této podmínce nejlépe vyhovuje pro plech tloušťky 0,3 mm zatížení 2,943 N, což je 0,3 kgf a pro plech tloušťky 2 mm zatížení 4,905 N, což je 0,5 kgf.

Norma také stanovuje výdrž na zkušebním zatížení, které musí být v rozmezí 10 až 15 s. Pro experiment byla stanovena doba výdrže na zkušebním zatížení na 12 s.

Měření tvrdosti při těchto parametrech se řadí dle ČSN EN ISO 6507-1 do metody zkoušení tvrdosti při nízkém zatížení a výsledná tvrdost bude značena: HV 0,3 respektive HV 0,5. [15]

### 8.2 Zařízení pro měření

Měření tvrdosti bylo provedeno na metalografických výbrusech. Ty byly zhotoveny metodou preparace za tepla pomocí lisu Stuers CitoPress. Následovalo mechanizované broušení a leštění na brusce Stuers Tegramin. Měření tvrdosti probíhalo na plně automatickém měřícím zařízení FM – ARS 900 s FM 100.



Obrázek 9 - Lis Struers CitoPress pro zhotovení (zapékání) metalografických výbrusů [16]



Obrázek 10 - Metalografická bruska a leštička Struers Tegamin – 25 [16]

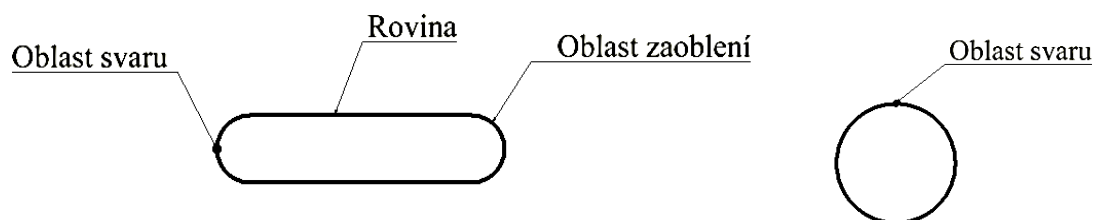


Obrázek 11 - Mikrotvrdoměr FM-100 [17]

### 8.3 Měření tvrdosti tvářených trubiček

Plech, ze kterých jsou zhotoveny trubičky jsou od dodavatelů dodávány s tvrdostí 150 HV. Tvářením dochází k deformačnímu zpevnění, což se projevuje zvýšenou tvrdostí. Měření tvrdosti u trubiček po tváření zjistíme velikost deformačního zpevnění.

Měření u oválných trubiček bylo provedeno ve třech oblastech – v oblasti svaru, zaoblení a roviny. U kruhové trubičky pak v oblasti svaru a ve zbylé oblasti (viz obr. 12).



Obrázek 12 – Názorné vyznačení oblastí měření

### 8.1.1 Výsledky měření tvrdosti trubiček po tváření

Tabulka 11 - Výsledky měření tvrdosti vzorku AISI 316L, ve stavu po tváření,  $t = 0,3$  mm

AISI 316L, $t = 0,3$ mm		
HV 0,3		
oblast svaru	oblast ohybu	oblast roviny
238	237	247
236	220	224
286	250	231
279	245	270
	255	219
	240	243
	237	244
		235
$\varnothing 260$	$\varnothing 241$	$\varnothing 239$

Tabulka 12 - Výsledky měření tvrdosti vzorku AISI 304L, ve stavu po tváření,  $t = 0,3$  mm

AISI 304L, $t = 0,3$ mm		
HV 0,3		
oblast svaru	oblast ohybu	oblast roviny
266	226	224
230	222	232
231	224	236
242	229	236
	230	279
	250	236
	225	276
		225
$\varnothing 242$	$\varnothing 229$	$\varnothing 243$

Tabulka 13 - Výsledky měření tvrdosti vzorku AISI 304L, ve stavu po tváření,  $t = 2 \text{ mm}$

AISI 304L, $t = 2 \text{ mm}$	
HV 0,5 mm	
oblast svaru	zbylá oblast
225	217
231	260
220	237
218	229
	236
	242
	211
	239
$\varnothing 224$	$\varnothing 234$

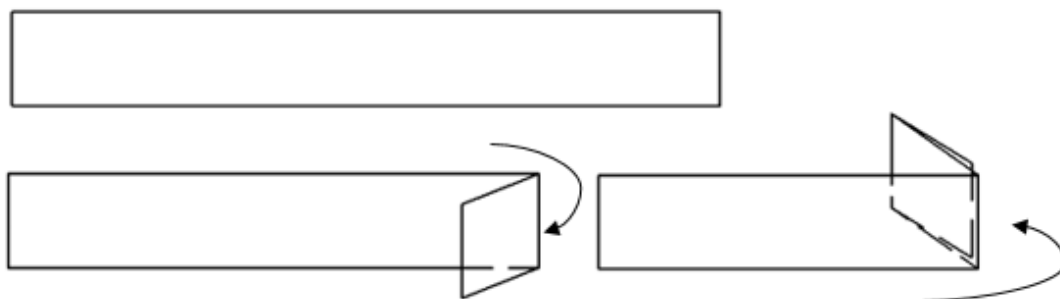
Z výsledků měření tvrdosti vzorků po tváření je možné určit, že došlo k deformačnímu zpevnění materiálu a tvrdost tvářením vzrostla přibližně o 90 HV.

## 8.4 Zjišťování možné velikosti deformačního zpevnění

Při výrobě nerezových trubiček došlo u materiálu AISI 304L k růstu velikosti tvrdosti přibližně na HV 230. Materiál je ale možné tvářením zpevnit na vyšší hodnoty tvrdosti. Experimentálně ohýbáním plechu byly určeny možné vyšší hodnoty tvrdosti.

### 8.4.1 Postup tváření plechu

Plechý tloušťek 0,3 mm a 2 mm z oceli AISI 304L byly pro dosažení vyššího deformačního zpevnění ohýbány dle obrázku 13.



Obrázek 13 - Způsob ohýbání plechu pro dosažení většího deformačního zpevnění

## 8.4.2 Hodnoty tvrdosti ohýbaných vzorků

Tabulka 14 - Výsledky měření tvrdosti tvářených plechů,  $t = 0,3$  mm

AISI 304L, $t = 0,3$ mm	
HV 0,3	
oblast roviny	oblast ohybu
261	424
296	297
308	386
280	403
241	450
226	393
225	399
280	380
∅ 265	∅ 392

Tabulka 15 - Výsledky měření tvrdosti tvářených plechů,  $t = 2$  mm

AISI 304L, $t = 2$ mm	
HV 0,5	
oblast roviny	oblast ohybu
227	323
253	326
241	288
237	352
285	320
238	337
227	380
251	320
∅ 245	∅ 331

U plechu tloušťky 0,3 mm bylo dosaženo většího deformačního zpevnění. Díky menší tloušťce byl v místě ohybu menší poloměr což způsobilo větší deformaci. U tenčího plechu byla průměrná tvrdost v místě ohybu 392 HV 0,3 oproti 331 HV 0,5 u tlustšího plechu. Rozdíl v nejvyšších průměrných tvrdostech takto ohýbaného plechu oproti tvářeným trubičkám je u 0,3 mm vzorku přibližně 150 HV, u 2 mm vzorku 100 HV.

## 8.5 Zjištění teploty žhání pro odpevnění

Z rešerše o vlastnostech materiálu AISI 304L a AISI 316L a jejich tepelného zpracování bylo zjištěno, že vhodná teplota pro rozpouštěcí žhání je v rozmezí 1010 °C až 1120 °C (viz tab. 6). Pro potvrzení vhodné teploty žhání v tomto rozmezí a vyloučení nižších žhacích teplot bylo provedeno experimentální žhání zkoumaných vzorků. Žhání bylo provedeno externě, firmou D&K Brazing s. r. o. v kontinuální žhací peci s dusíkovo-vodíkovou atmosférou. Parametry žhání jsou uvedeny v tabulce 16.

Tabulka 16 - Parametry externě žíhaných vzorků

Externě žíhané vzorky					
číslo vzorku	tloušťka plechu [mm]	materiál	teplota	rychlost linky	výdrž na teplotě
1-6	0,3	ASI 316L	900°C	0,5 m/min	1,5 min
7-11	0,3	AISI 304L	900°C	0,5 m/min	1,5 min
12-17	0,3	AISI 316L	1100°C	0,5 m/min	1,5 min
18-22	0,3	AISI 304L	1100°C	0,5 m/min	1,5 min
23-27	0,3	AISI 304L	1100°C	0,3 m/min	5 min
28	2	AISI 304L	1100°C	0,5 m/min	1,5 min

### 8.5.1 Výsledky měření tvrdosti externě žíhaných vzorků

Tabulka 17 - Tvrdost po žíhání,  
vzorek č. 1

Vzorek č. 1		
HV 0,3		
oblast svaru	oblast ohybu	oblast roviny
186	178	204
225	181	203
198	186	213
224	188	177
∅ 208	∅ 183	∅ 199

Tabulka 18 - Tvrdost po žíhání,  
vzorek č. 12

Vzorek č. 12		
HV 0,3		
oblast svaru	oblast ohybu	oblast roviny
144	130	136
143	135	135
136	144	140
140	133	134
∅ 141	∅ 136	∅ 136

Při žíhání na teplotě 900 °C dojde u trubiček z oceli AISI 316L při výdrži 1,5 min ke snížení tvrdosti v oblasti roviny přibližně o 40 HV. Při teplotě 1100 °C, která je v doporučeném rozmezí teplot, dojde k výrazně většímu snížení tvrdosti, a to při stejné výdrži přibližně o 100 HV v oblasti roviny na hodnotu 136 HV 0,3.



Tabulka 19 - Tvrdost po žihání,  
vzorek č. 7

Vzorek č. 7		
HV 0,3		
oblast svaru	oblast ohybu	oblast roviny
231	251	218
223	256	208
220	240	230
225	204	215
∅ 225	∅ 238	∅ 218

Tabulka 20 - Tvrdost po žihání,  
vzorek č. 18

Vzorek č. 18		
HV 0,3		
oblast svaru	oblast ohybu	oblast roviny
149	149	153
158	153	156
155	162	151
154	158	160
∅ 154	∅ 156	∅ 155

U oceli ASI 304L se při žihací teplotě 900 °C a době výdrže 1,5 min odpevnění neprojevovalo. Oproti tomu při teplotě 1100 °C, která je z rozmezí doporučených teplot došlo při výdrži 1,5 min k výraznému odpevnění, v oblasti roviny o přibližně 80 HV na 155 HV 0,3.

Tabulka 21 - Tvrdost po žihání,  
vzorek č. 23

Vzorek č. 23		
HV 0,3		
oblast svaru	oblast ohybu	oblast roviny
144	130	136
143	135	135
136	133	140
140	142	134
∅ 141	∅ 135	∅ 136

Tabulka 22 - Tvrdost po žihání,  
vzorek č. 28

Vzorek č. 28	
HV 0,5	
oblast svaru	oblast ohybu
152	146
167	162
168	158
163	153
∅ 163	∅ 155

Vzorek číslo 23 je z oceli ASI 304L s tloušťkou stěny 0,3 mm stejně jako vzorek číslo 18, ale výdrž na teplotě byla u vzorku 23 5 minut oproti 1,5 minuty u vzorku 18. S takto výrazně delším časem už dojde jen k menšímu dalšímu odpevnění, v oblasti roviny přibližně o 20 HV. Je vidět, že závislost doby výdrže na výsledné tvrdosti není lineární.

Vzorek 28 taktěž z oceli AISI 304L má tloušťku stěny 2 mm. U něj došlo k poklesu tvrdosti v oblasti ohybu přibližně o 80 HV na 155 HV 0,5. To je stejná velikost poklesu tvrdosti jako u vzorku s tloušťkou stěny 0,3 mm, kde došlo k odpevnění v oblasti roviny také o 80 HV. U volby žíhacích parametrů je tedy nejvíce důležitá volba vhodné teploty a čas výdrže. Tloušťka materiálu výslednou tvrdost neovlivnila.

### **8.5.2 Zjišťování závislosti odpevnění na době výdrže na teplotě**

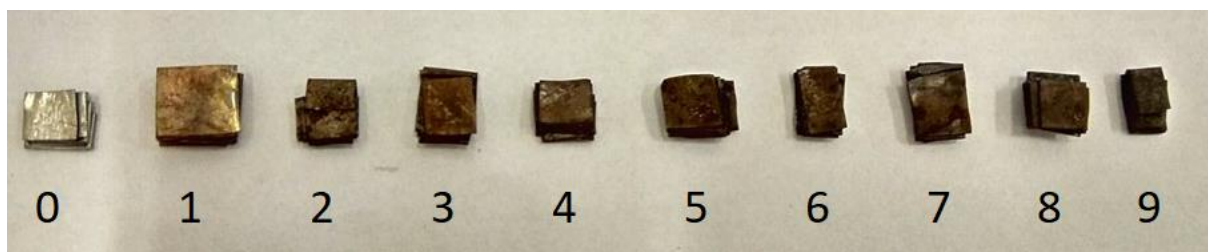
Pro zjištění závislosti velikosti odpevnění (poklesu tvrdosti) na době výdrže na teplotě bylo provedeno experimentální žíhání. Devět vzorků (AISI 304L,  $t = 0,3$  mm) tvářených (viz 8.4.1) na průměrnou tvrdost v oblasti roviny na 265 HV 0,3 a v oblasti ohybu na 392 HV 0,3 bylo postupně vyndáváno z žíhací pece zahřáté na 1100 °C. Po změření jejich výsledné tvrdosti byla zjištěna závislost výsledné tvrdosti na době umístění vzorku v žíhací peci. K experimentu byla použita vzduchová kalici a žíhací pec Nabertherm (obrázek 14), vzorky byly po vyjmutí z pece chlazeny vodou.



*Obrázek 14 - Kalici a žíhací pec [18]*

Tabulka 23 - Přehled doby v peci u žíhaných vzorků

vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8	9
doba v peci [s]	40	60	80	100	120	140	160	180	600

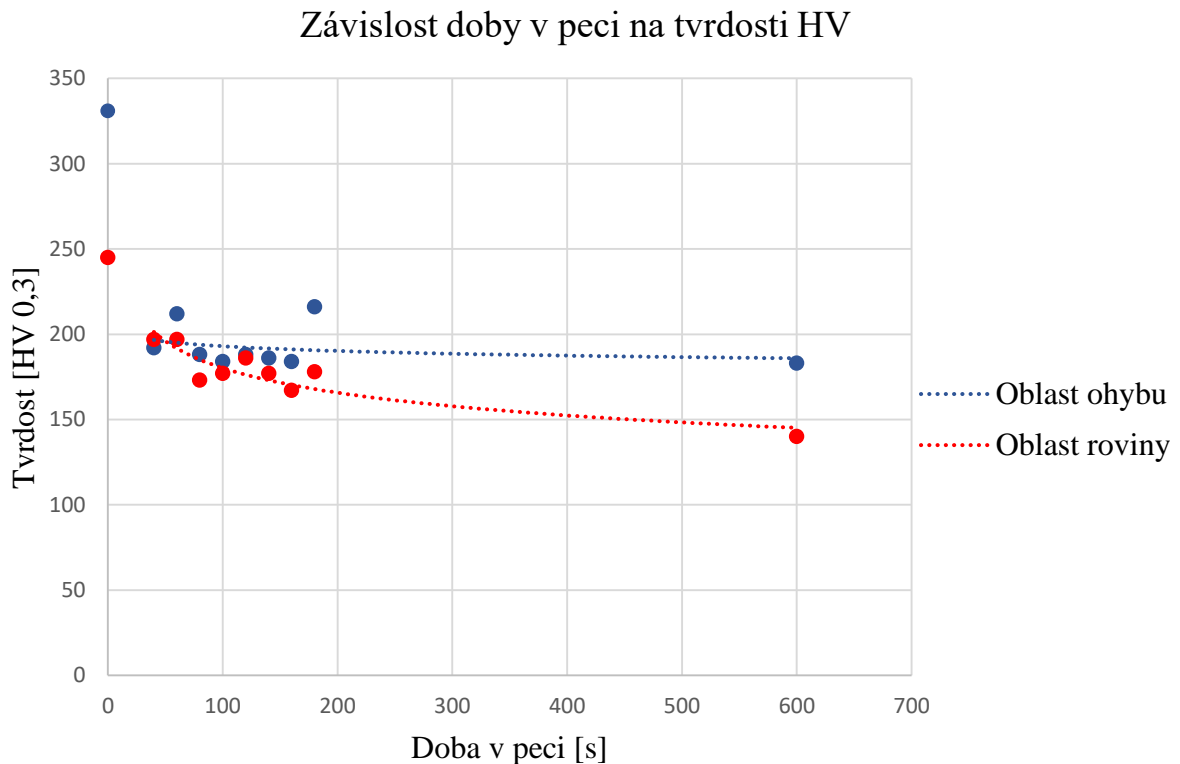


Obrázek 15 - Vyžíhané vzorky po vyndání z pece

Tabulka 24 - Tvrdost žíhaných vzorků

Vzorek č. 1		Vzorek č. 2		Vzorek č. 3	
HV 0,3		HV 0,3		HV 0,3	
oblast ohybu	oblast roviny	oblast ohybu	oblast roviny	oblast ohybu	oblast roviny
190	200	201	205	202	185
186	215	224	210	180	174
218	177	180	184	173	174
185	189	224	173	190	185
183	205	232	215	194	148
∅ 192	∅ 197	∅ 212	∅ 197	∅ 188	∅ 173
Vzorek č. 4		Vzorek č. 5		Vzorek č. 6	
HV 0,3		HV 0,3		HV 0,3	
oblast ohybu	oblast roviny	oblast ohybu	oblast roviny	oblast ohybu	oblast roviny
189	178	176	169	209	182
166	174	194	170	170	196
182	168	173	195	182	169
204	174	192	198	186	162
180	189	207	197	185	184
∅ 184	∅ 177	∅ 188	∅ 186	∅ 186	∅ 177
Vzorek č. 7		Vzorek č. 8		Vzorek č. 9	
HV 0,3		HV 0,3		HV 0,3	
oblast ohybu	oblast roviny	oblast ohybu	oblast roviny	oblast ohybu	oblast roviny
176	162	203	186	169	175
166	164	204	173	206	176
185	162	215	195	180	160
206	164	214	175	174	16
186	184	242	163	184	171
∅ 184	∅ 167	∅ 216	∅ 178	∅ 183	∅ 140

Po změření tvrdosti vzorků, tvářených na průměrnou tvrdost v oblasti roviny na 265 HV 0,3 a v oblasti ohybu na 392 HV 0,3 a následně žíhaných různé doby výdrže v peci můžeme shrnout, že k největšímu odpevnění při teplotě pece 1100 °C dojde do 40 s výdrže v peci. To dojde k odpevnění až o 200 HV v oblasti ohybu. Po dalších výdržích už je rozdíl ve výsledné tvrdosti minimální a při výdrži v peci 10 minut dojde k odpevnění o dalších 20 - 30 HV. Z těchto výsledků můžeme usoudit, že hledaná doba žíhání bude v rozmezí do 40s.



Obrázek 16 - Graf závislosti doby v peci na výsledné tvrdosti

Při koncepčním návrhu linky bude důležitým faktorem způsob ohřevu trubiček, respektive doba náběhu na žíhací teplotu (1100 °C). Z předchozího experimentu jsme zjistili rozmezí času, v kterém dojde k odpevnění, ale zahrnuje jednak náběh na žíhací teplotu ale i dobu samotného žíhání.

Dobu náběhu na teplotu žíhání jsme určily výpočtem (dle 5.4) pro trubičky z AISI 304L,  $t = 0,3$  mm na 21,6 s. Tuto hodnotu ověříme experimentem.

## 8.6 Experimentální zjištění doby náběhu na žíhací teplotu

Ocel se změnou teploty mění svou barvu. Při dosažení teploty 1100 °C má ocel svítivě žlutou barvu. V žíhací peci se dosažení teploty pozná při pozorování tak, že zkoumaný ocelový vzorek změní barvu na barvu okolí a splyne. Tehdy je dosaženo teploty okolí, to znamená v našem případě teploty 1100 °C. Při experimentu byly opakovaně pozorovány vzorky - trubička s tloušťkou stěny 0,3 mm, umístěné do žíhací pece vyhřáté na 1100 °C. Pomocí stopky byl určen čas náběhu na teplotu.

*Tabulka 25 - Experimentální určení doby náběhu na teplotu  
pro  $t = 0,3$  mm*

číslo pokusu	doba náběhu na teplotu [s]
1	22,6
2	23,2
3	23,1
4	22,9
5	22,7
průměrný čas	22,9

Výsledkem měření je experimentální určení času náběhu na teplotu 1100 °C v peci s otevřenou atmosférou pro vzorky s tloušťkou stěny 0,3 mm 23 s.

## 8.7 Experimentální určení přesné doby žíhání pro konkrétní vzorky

Po experimentálním zkoumání zpevněných vzorků a jejich schopnosti odpevnění bylo zjištěno, že potřebný čas v peci k dosažení dostatečného poklesu tvrdosti materiálu je 40 s. Se znalostí doby náběhu na žíhací teplotu bude proveden závěrečný experiment, při němž budou do pece vyhřáté na 1100 °C vloženy trubičky z výroby z oceli AISI 304L s tloušťkou stěny 0,3 mm a 2 mm a trubičky z oceli AISI 316L s tloušťkou stěny 0,3 mm. Budou vyndávány z pece po 20 s s následným prudkým ochlazením ve vodě. Po analýze změn tvrdosti a následné analýze změn mikrostruktury bude určen přesný žíhací čas pro návrh žíhací linky.

## 8.7.1 Tvrdość vzorků po žihání – trubičky AISI 304L, t = 0,3 mm

Tabulka 26 - Tvrdość vzorků AISI 304L,  
t = 0,3 mm, po žihání 20s

AISI 304L, t = 0,3 mm, 20 s		
HV 0,3		
oblast svaru	oblast ohybu	oblast roviny
232	239	236
241	240	199
222	213	200
212	229	215
207	226	228
	253	201
	199	202
		209
∅ 223	∅ 228	∅ 211

Tabulka 27 - Tvrdość vzorků AISI 304L,  
t = 0,3 mm, po žihání 40s

AISI 304L, t = 0,3 mm, 40 s		
HV 0,3		
oblast svaru	oblast ohybu	oblast roviny
235	234	211
241	233	204
236	204	212
251	207	205
	240	218
	232	170
	233	196
		205
∅ 241	∅ 226	∅ 203

Tabulka 28 - Tvrdość vzorků AISI 304L,  
t = 0,3 mm, po žihání 60s

AISI 304L, t = 0,3 mm, 60 s		
HV 0,3		
oblast svaru	oblast ohybu	oblast roviny
226	216	212
233	209	199
193	227	212
196	222	195
	238	194
	210	211
	206	189
		181
∅ 212	∅ 218	∅ 199

Tabulka 29 - Tvrdość vzorků AISI 304L,  
t = 0,3 mm, po žihání 80s

AISI 304L, t = 0,3 mm, 80 s		
HV 0,3		
oblast svaru	oblast ohybu	oblast roviny
220	182	174
191	193	178
213	194	184
215	212	189
	207	183
	198	190
	200	200
		182
∅ 210	∅ 198	∅ 185

Tabulka 30 - Tvrdość vzorků AISI 304L,  
t = 0,3 mm, po žihání 100s

AISI 304L, t = 0,3 mm, 100 s		
HV 0,3		
oblast svaru	oblast ohybu	oblast roviny
194	195	181
192	213	186
187	215	181
183	209	206
	200	183
	203	194
	199	195
		177
∅ 189	∅ 205	∅ 188

## 8.7.2 Tvrđost vzorků po žihání – trubičky AISI 304L, t = 2 mm

Tabulka 31 - Tvrđost vzorků AISI 304L, t = 2 mm, po žihání 20s

AISI 304L, t = 2 mm, 20 s	
HV 0,5 mm	
oblast svaru	zbylá oblast
203	217
209	207
204	201
208	210
	209
	207
	214
	203
∅ 206	∅ 209

Tabulka 32 - Tvrđost vzorků AISI 304L, t = 2 mm, po žihání 40s

AISI 304L, t = 2 mm, 40 s	
HV 0,5 mm	
oblast svaru	zbylá oblast
203	195
213	206
201	200
190	202
	198
	195
	194
	203
∅ 202	∅ 199

Tabulka 33 - Tvrđost vzorků AISI 304L, t = 2 mm, po žihání 60s

AISI 304L, t = 2 mm, 60 s	
HV 0,5 mm	
oblast svaru	zbylá oblast
198	204
200	203
203	199
194	199
	201
	208
	186
	206
∅ 199	∅ 201

Tabulka 34 - Tvrđost vzorků AISI 304L, t = 2 mm, po žihání 80s

AISI 304L, t = 2 mm, 80 s	
HV 0,5 mm	
oblast svaru	zbylá oblast
191	179
201	178
193	166
202	168
	163
	166
	172
	187
∅ 197	∅ 172

Tabulka 35 - Tvrđost vzorků AISI 304L, t = 2 mm, po žihání 100s

AISI 304L, t = 2 mm, 100 s	
HV 0,5 mm	
oblast svaru	zbylá oblast
195	161
165	169
170	176
170	177
	169
	167
	171
	175
∅ 175	∅ 171

### 8.7.3 Tvrdość vzorků po žihání – trubičky AISI 316L, t = 0,3 mm

Tabulka 36 - Tvrdość vzorků AISI 316L,  
t = 0,3 mm po žihání 20 s

AISI 316L, t = 0,3 mm, 20 s		
HV 0,3		
oblast svaru	oblast ohybu	oblast roviny
239	251	261
242	251	256
195	273	218
198	251	189
203	234	191
	191	266
	236	189
		203
∅ 215	∅ 241	∅ 222

Tabulka 37 - Tvrdość vzorků AISI 316L,  
t = 0,3 mm po žihání 40 s

AISI 316L, t = 0,3 mm, 40 s		
HV 0,3		
oblast svaru	oblast ohybu	oblast roviny
209	192	195
214	162	157
222	184	198
193	166	175
207	180	197
	198	195
	197	224
		165
∅ 209	∅ 183	∅ 188

Tabulka 38 - Tvrdość vzorků AISI 316L,  
t = 0,3 mm po žihání 60 s

AISI 316L, t = 0,3 mm, 60 s		
HV 0,3		
oblast svaru	oblast ohybu	oblast roviny
208	178	228
204	192	178
177	192	200
180	218	158
195	241	194
	193	201
	186	177
		163
∅ 193	∅ 200	∅ 187

Tabulka 39 - Tvrdość vzorků AISI 316L,  
t = 0,3 mm po žihání 80 s

AISI 316L, t = 0,3 mm, 80 s		
HV 0,3		
oblast svaru	oblast ohybu	oblast roviny
206	184	191
186	179	201
173	186	174
199	199	168
193	206	192
	157	167
	158	188
		169
∅ 191	∅ 181	∅ 181

Tabulka 40 - Tvrdość vzorků AISI 316L,  
t = 0,3 mm po žihání 100 s

AISI 316L, t = 0,3 mm, 100 s		
HV 0,3		
oblast svaru	oblast ohybu	oblast roviny
210	233	190
216	234	167
235	229	170
229	191	184
212	203	197
	199	201
	174	213
		187
∅ 220	∅ 209	∅ 189



Z výsledků experimentálního žíhání v peci s otevřenou atmosférou můžeme určit, že již po 20 s dojde u trubiček po tváření k mírnému odpevnění a tím poklesu tvrdosti. Po 40 s je pokles v oblasti roviny na tvrdost přibližně 200 HV u všech zkoumaných vzorků, což je pro potřeby dalšího zpracovávání trubiček dostačující. Při odečtení doby náběhu na teplotu 1100 °C 23 s vychází minimální doba výdrže na teplotě 1100 °C pro dostatečné odpevnění 17 s. Po výdrži v peci 100 s dojde k dalšímu poklesu tvrdosti. U trubičky s větší tloušťkou stěny je tento pokles výraznější, a to až na hodnotu 170 HV, u trubiček s tloušťkou stěny 0,3 mm jen na 190 HV. Je zajímavé, že za přibližně stejný čas (90 s) v peci při stejné teplotě byl pokles tvrdosti u trubiček externě žíhaných větší. Je to dáno jinou konstrukcí pece a také použitím ochranné vodíkovo-dusíkové atmosféry. Vodík má výrazně větší tepelnou vodivost než vzduch.

### 8.7.4 Analýza mikrostruktury

Pro většinu aplikací je žádoucí jemnozrná struktura oceli, avšak při tepelném zpracování, konkrétně při rozpouštěcím žíhání austenitické korozivzdorné oceli dochází ke hrubnutí zrna. Pomocí analýzy mikrostruktury trubiček ve stavu před žíháním a po žíhání určíme, k jak velkému zhrubnutí zrna dojde po 100 s v žíhací peci při teplotě 1100 °C. Analýza byla provedena na celkem šesti vzorcích (viz tab. 41)

*Tabulka 41 - Vzorky pro analýzu mikrostruktury*

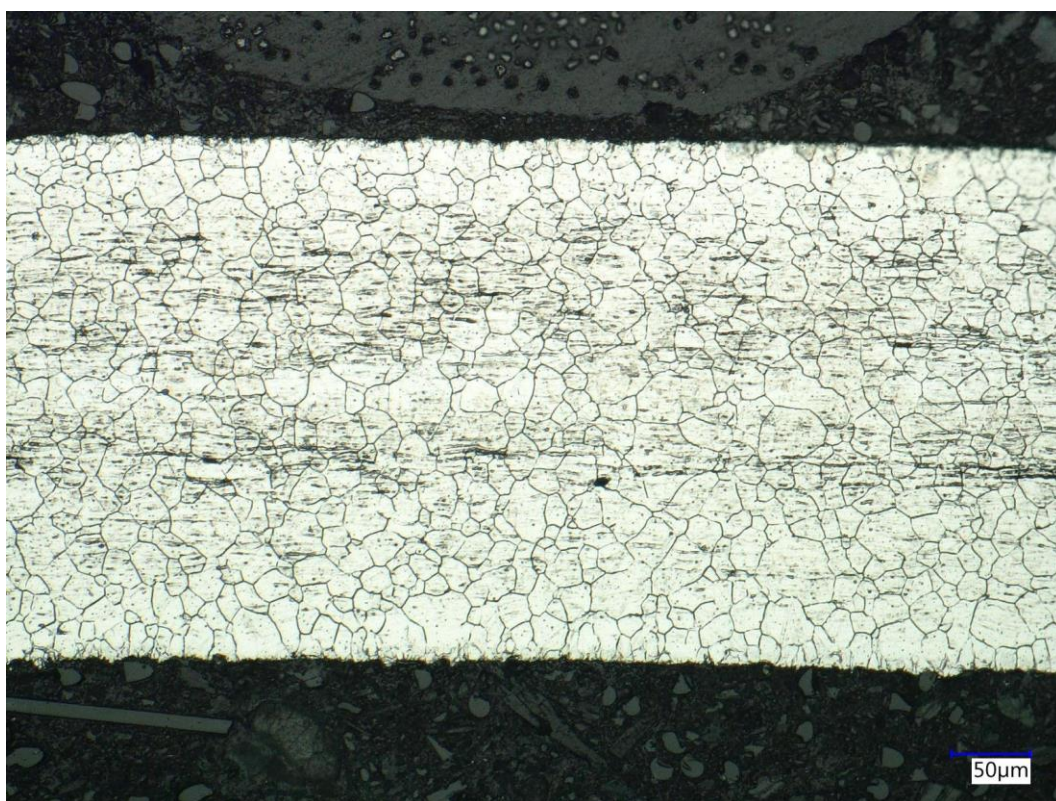
číslo vzorku	typ vzorku	stav
1	trubička AISI 304L, t = 0,3 mm	tvářená
2	trubička AISI 304L, t = 0,3 mm	žíhaná (100 s v peci)
3	trubička AISI 304L, t = 2 mm	tvářená
4	trubička AISI 304L, t = 2 mm	žíhaná (100 s v peci)
5	trubička AISI 316L, t = 0,3 mm	tvářená
6	trubička AISI 316L, t = 0,3 mm	žíhaná (100 s v peci)

Metalografické výbrusy těchto vzorků byly pečlivě nabroušeny a naleštěny a následně elektroliticky naleptány. Parametry leptání jsou v tabulce 42.

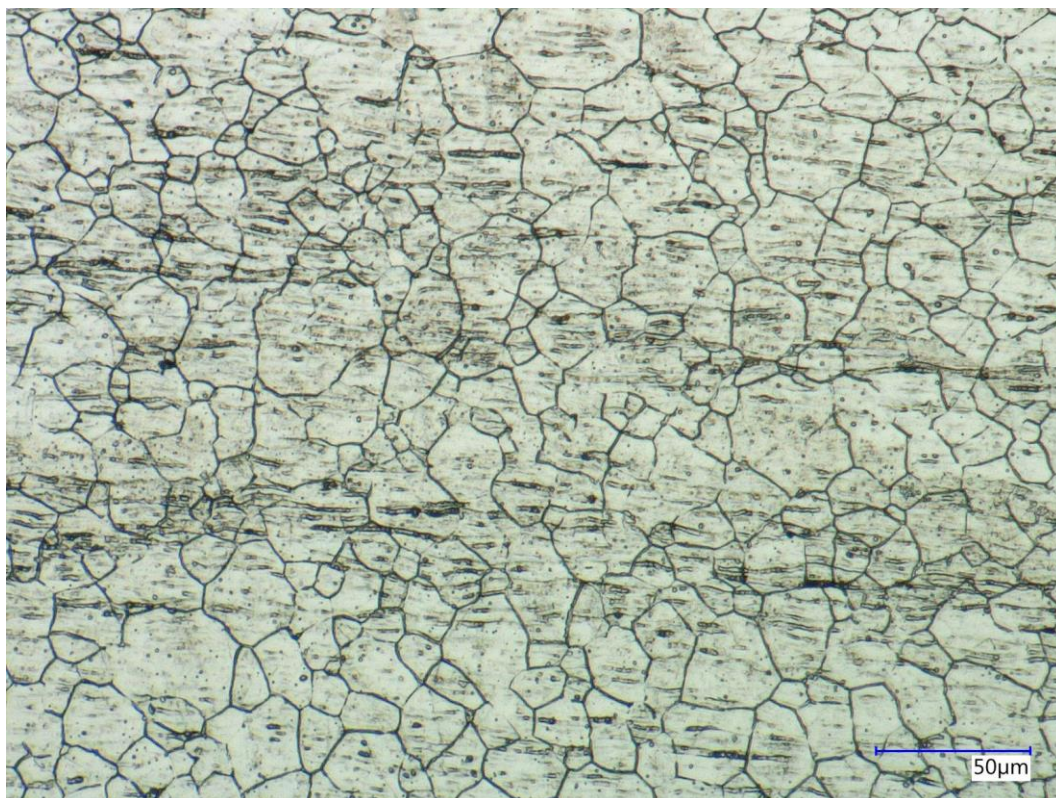
*Tabulka 42 - Parametry elektrolytického leptání vzorků*

napětí [V]	leptadlo	doba leptání [s]
1,3	roztok 50% HNO <sub>3</sub> + 50% H <sub>2</sub> O (destilovaná)	120

Vzorek č. 1 – AISI 304L,  $t = 0,3$  mm, tvářený

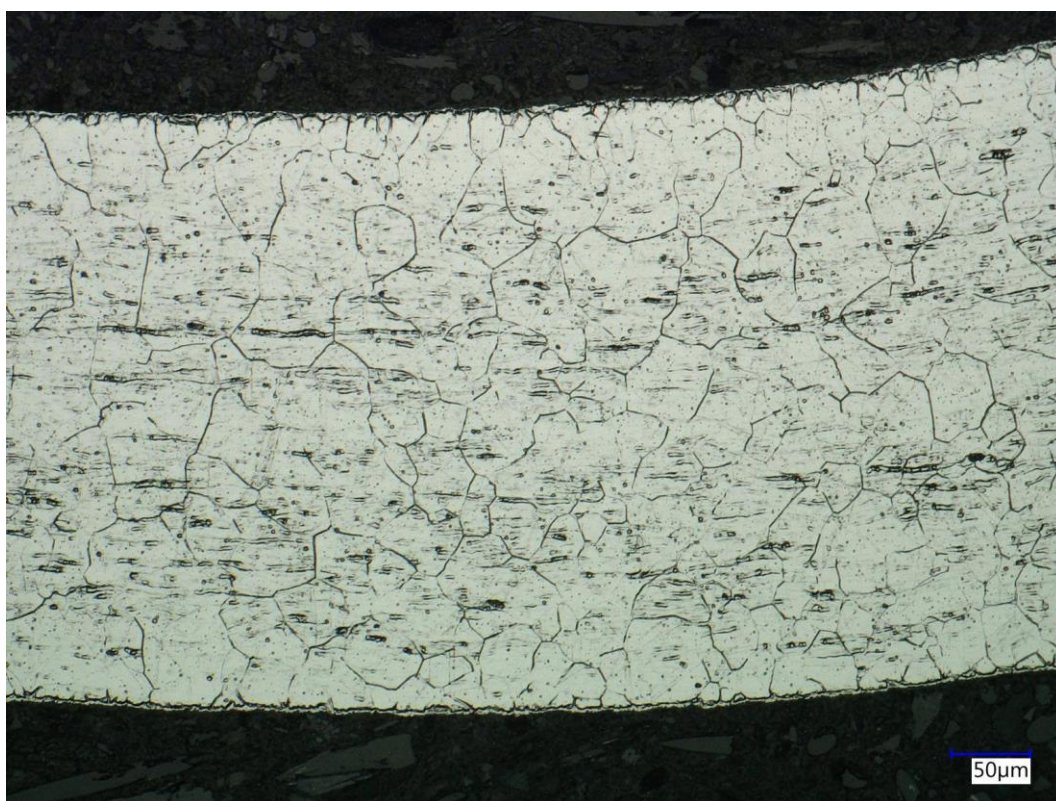


*Obrázek 17 - Mikrostruktura, AISI 304L,  $t = 0,3$  mm, tvářený*

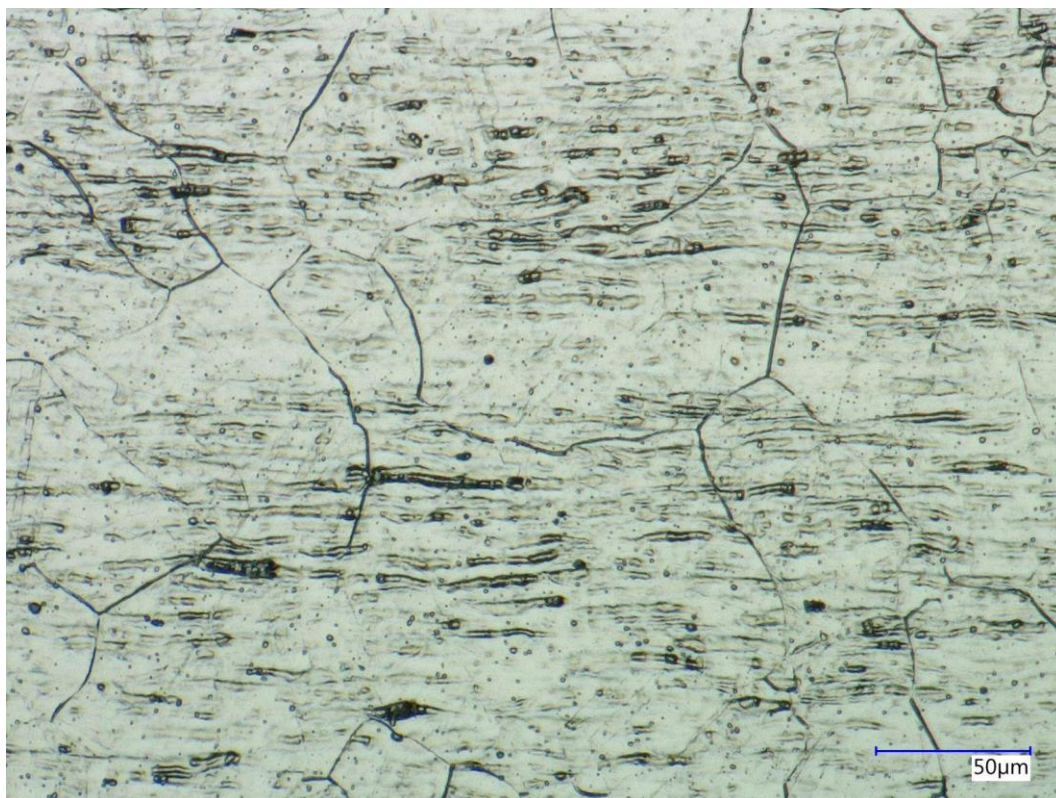


*Obrázek 18 - Mikrostruktura, AISI 304L,  $t = 0,3$  mm, tvářený*

Vzorek č. 2 - AISI 304L,  $t = 0,3$  mm, žíhaný

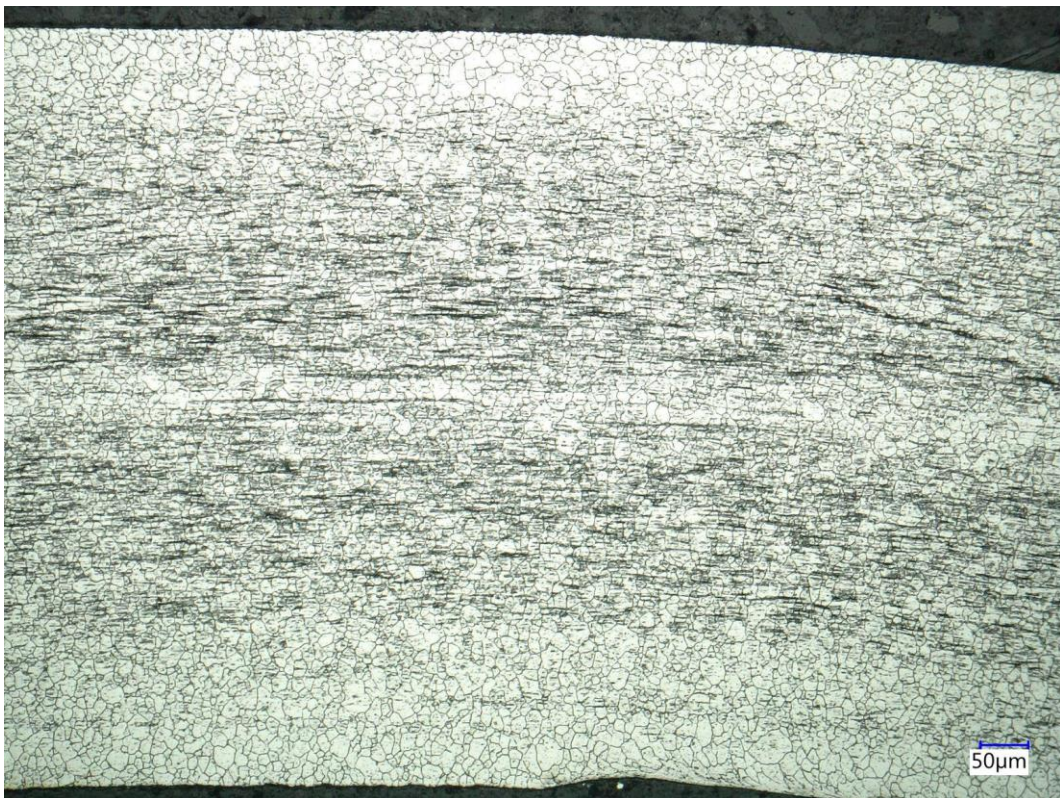


*Obrázek 19 - Mikrostruktura, AISI 304L,  $t = 0,3$  mm, žíhaný*

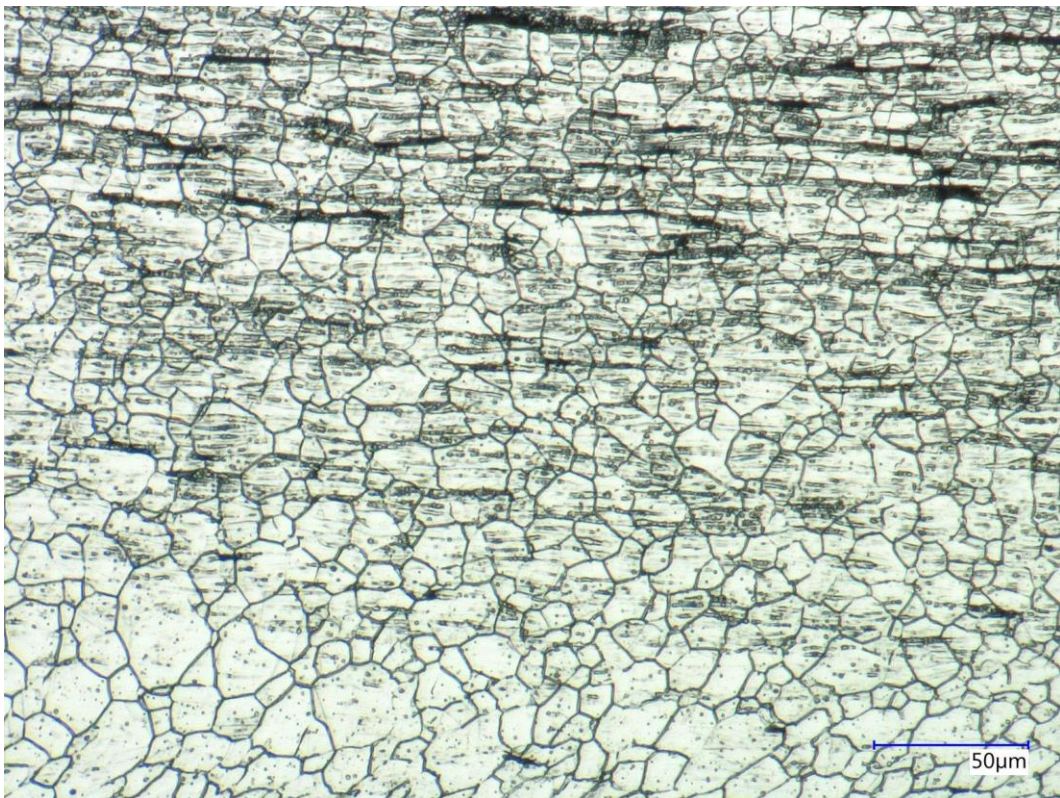


*Obrázek 20 - Mikrostruktura, AISI 304L,  $t = 0,3$  mm, žíhaný*

Vzorek č. 3 - AISI 304L,  $t = 2\text{ mm}$ , tvářený

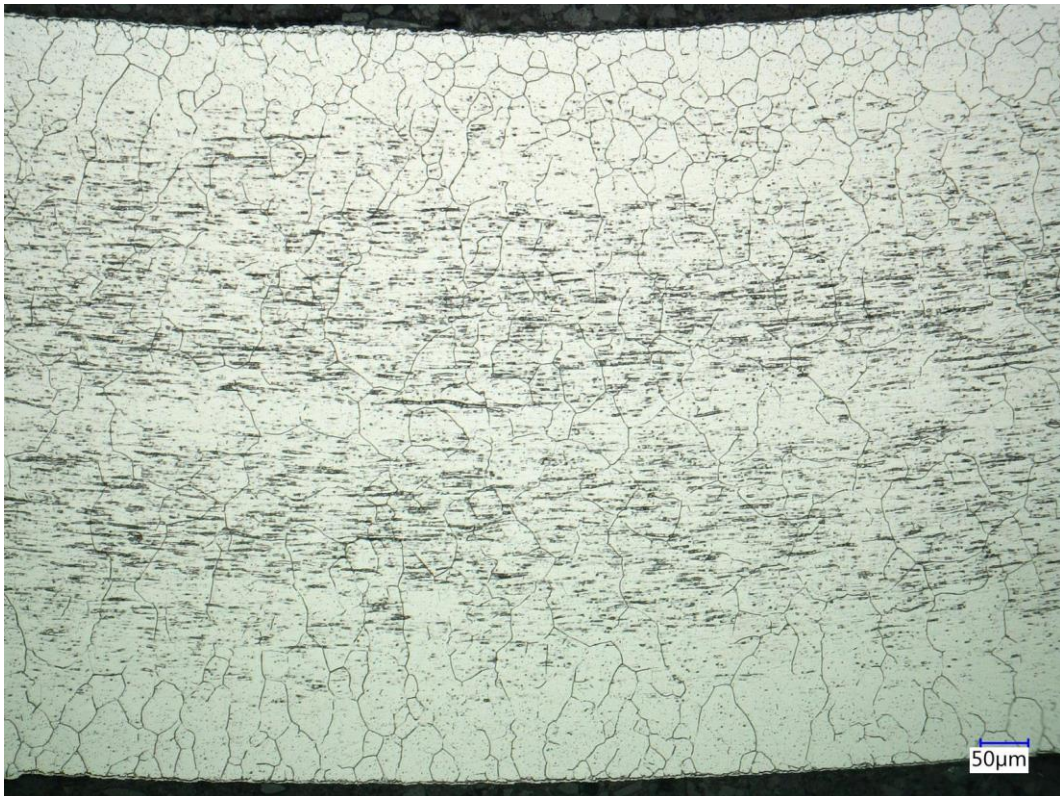


*Obrázek 21 - Mikrostruktura, AISI 304L,  $t = 2\text{ mm}$ , tvářený*

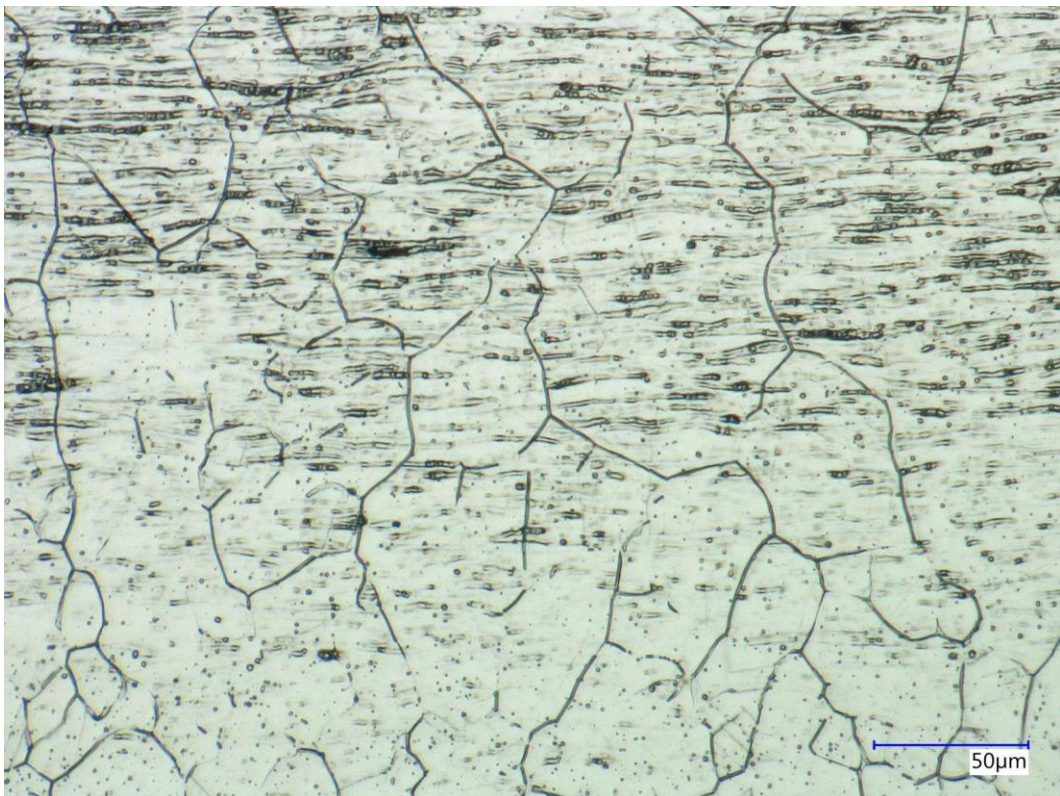


*Obrázek 22 - Mikrostruktura, AISI 304L,  $t = 2\text{ mm}$ , tvářený*

Vzorek č. 4 - AISI 304L,  $t = 2$  mm, žíhaný

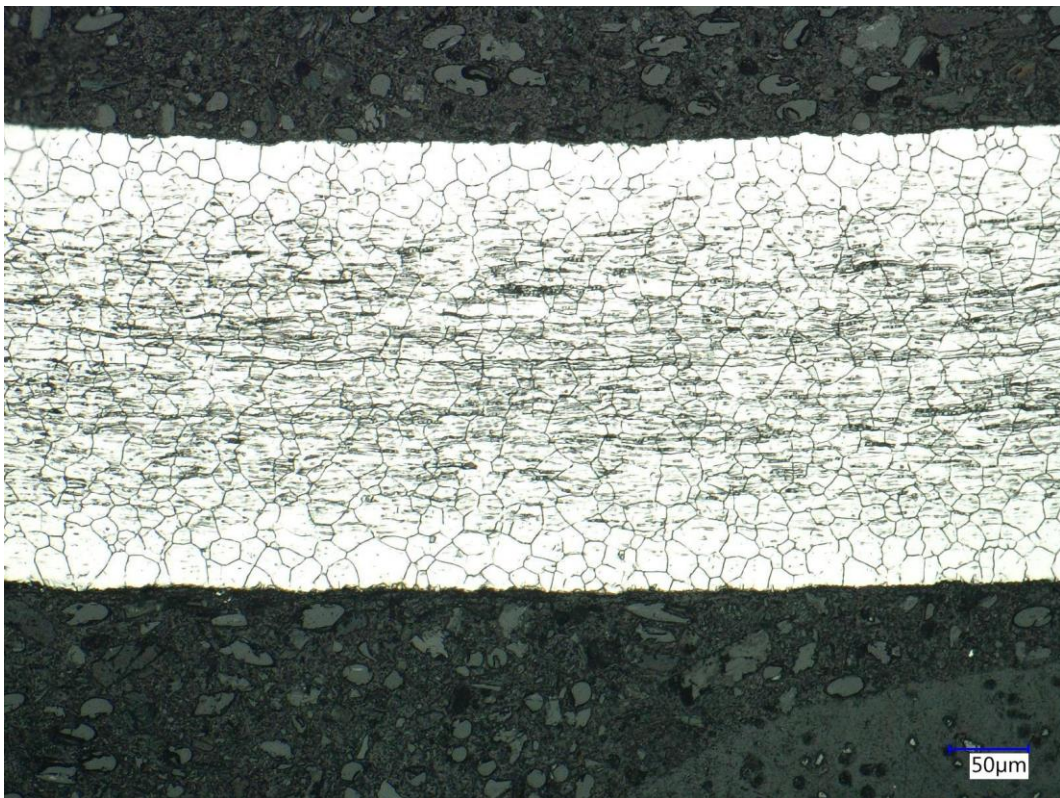


Obrázek 23 - Mikrostruktura, AISI 304L,  $t = 2$  mm, žíhaný

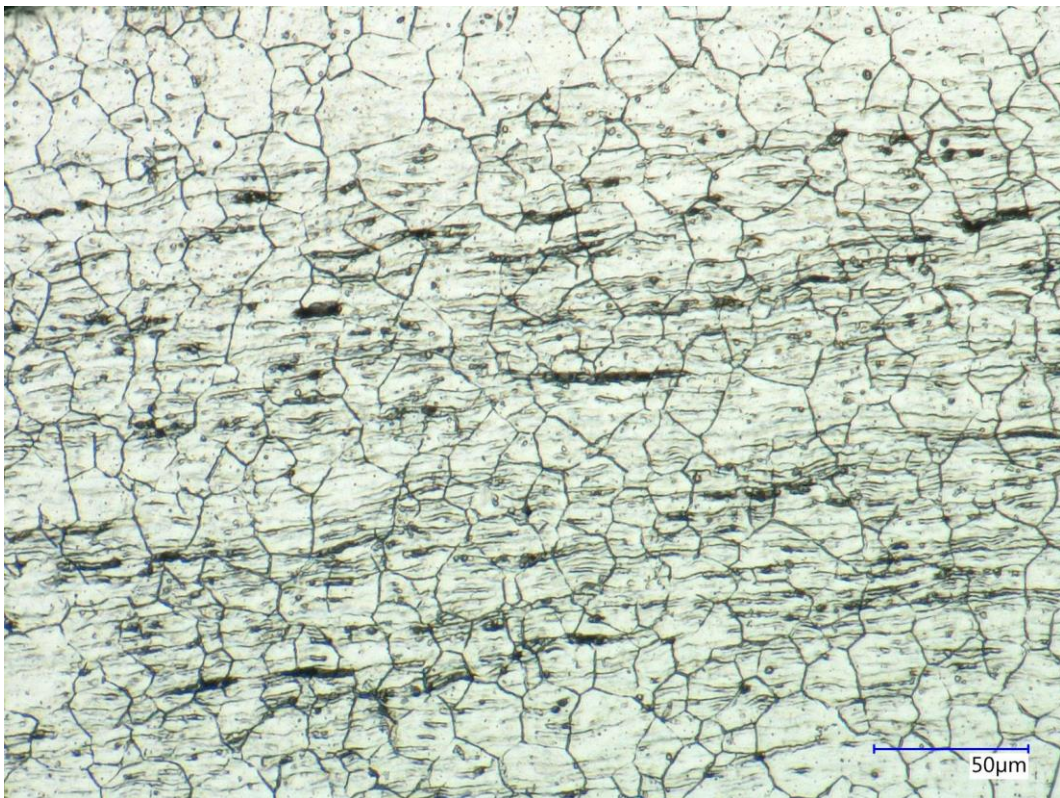


Obrázek 24 - Mikrostruktura, AISI 304L,  $t = 2$  mm, žíhaný

Vzorek č. 5 – AISI 316L,  $t = 0,3$  mm, tvářený

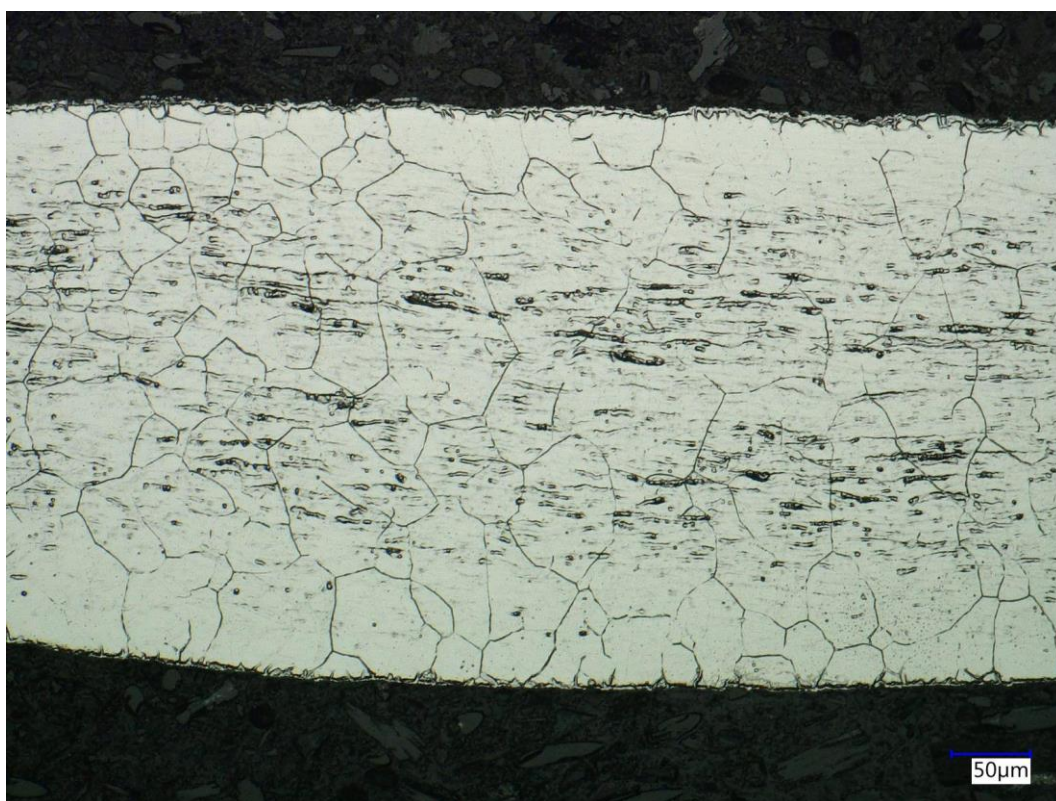


*Obrázek 25 - Mikrostruktura, AISI 316L,  $t = 0,3$  mm, tvářený*

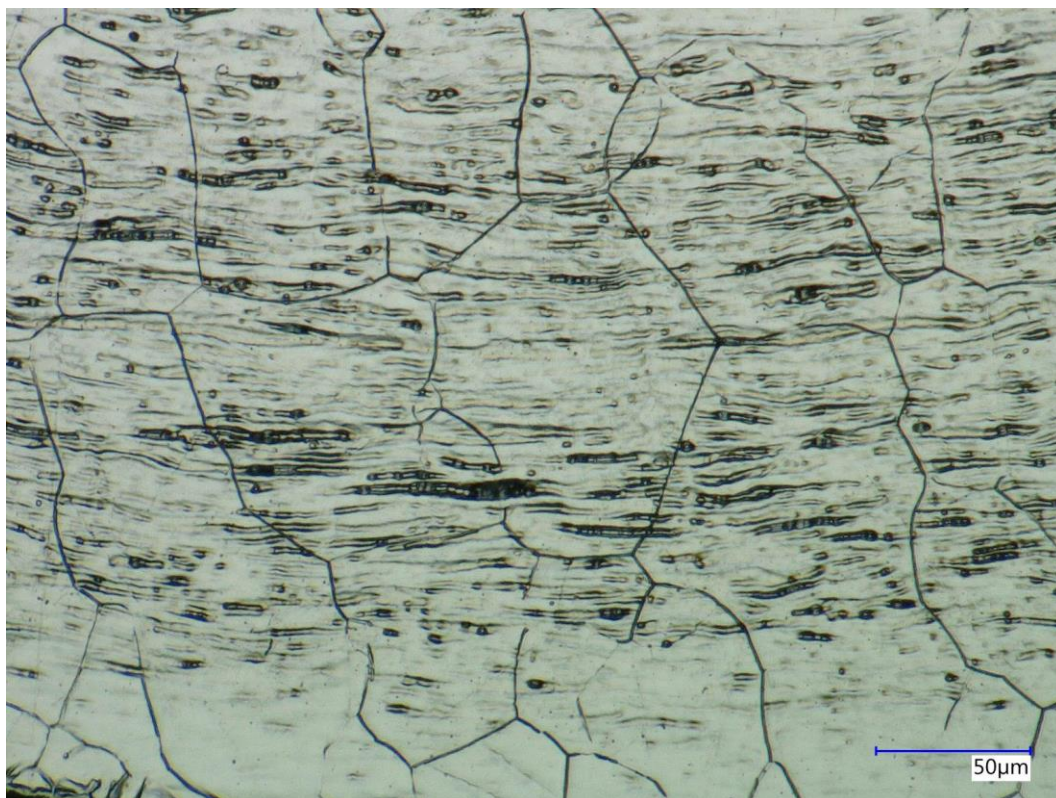


*Obrázek 26 - Mikrostruktura, AISI 316L,  $t = 0,3$  mm, tvářený*

Vzorek č. 6 - AISI 316L,  $t = 0,3$  mm, žíhaný



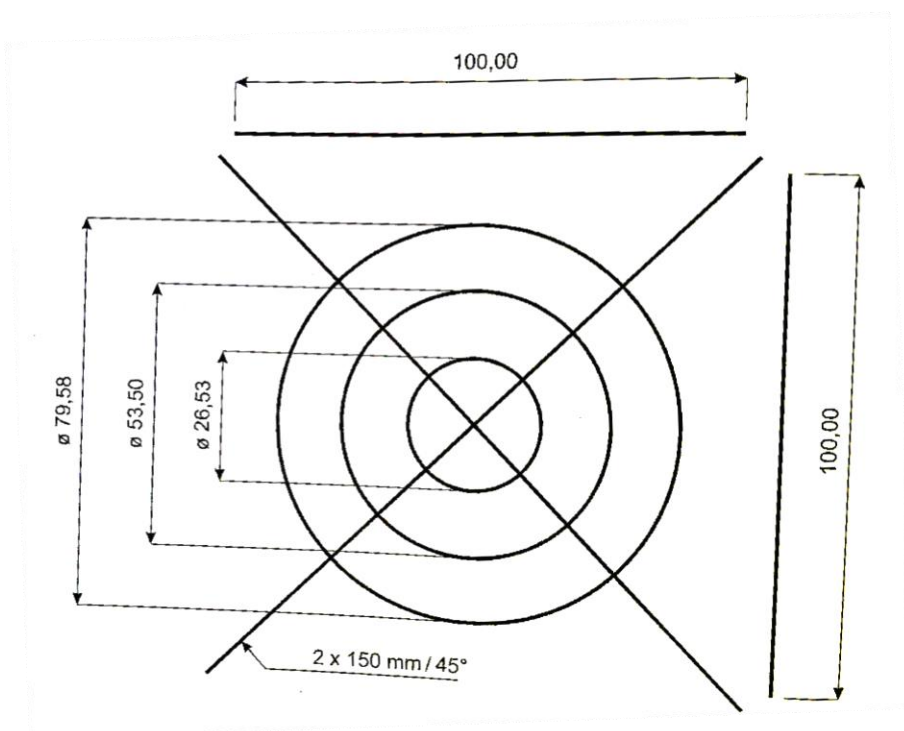
*Obrázek 27 - Mikrostruktura, AISI 316L,  $t = 0,3$  mm, žíhaný*



*Obrázek 28 - Mikrostruktura, AISI 316L,  $t = 0,3$  mm, žíhaný*

Ze zachycených snímků mikrostruktury tvářených a žíhaných vzorků je jasné patrné, že žíháním po dobu 100 s při teplotě 1100 °C struktura zhrubla. Pro přesnější určení velikosti zhrubnutí použijeme hodnocení velikosti zrna dle normy ASTM E112, kde je dle různých parametrů přiřazeno struktuře číslo G (od 00 do 14). Toto číslo pak představuje hrubozrnnost nebo naopak jemnozrnnost struktury.

Číslo G bude určeno dle parametru  $l$  (průměrná délka úseku), který se dle normy ČSN EN ISO 643 Ocel – Mikrografické stanovení velikosti zrn, stanovuje průsečíkovou metodou. Norma udává, jak mají být sestrojeny úsečky (obr. 29), pomocí kterých se určí počet protnutých hranic. Ze známé délky úsečky, známého měřítka a zjištěného množství protnutých hranic se výsledně určí průměrná délka úseku  $l$ .



Obrázek 29 - Doporučená velikost a orientace testovacích obrazců pro průsečíkovou metodu [32]



V následující tabulce jsou dle průměrné délky úseku přiřazeny jednotlivým vzorkům čísla velikosti G. Tabulka, dle které přiřazení proběhlo je součástí normy ASTM E112 a je přiložena jako příloha 1 k této práci.

*Tabulka 43 - Čísla velikosti zrna G zkoumaných vzorků*

číslo vzorku	průměrná délka úseku l [ $\mu\text{m}$ ]	číslo velikosti zrna G
1	14,95	9
2	36,66	6
3	12,60	9,5
4	43,70	6
5	16,03	8,5
6	49,41	5,5

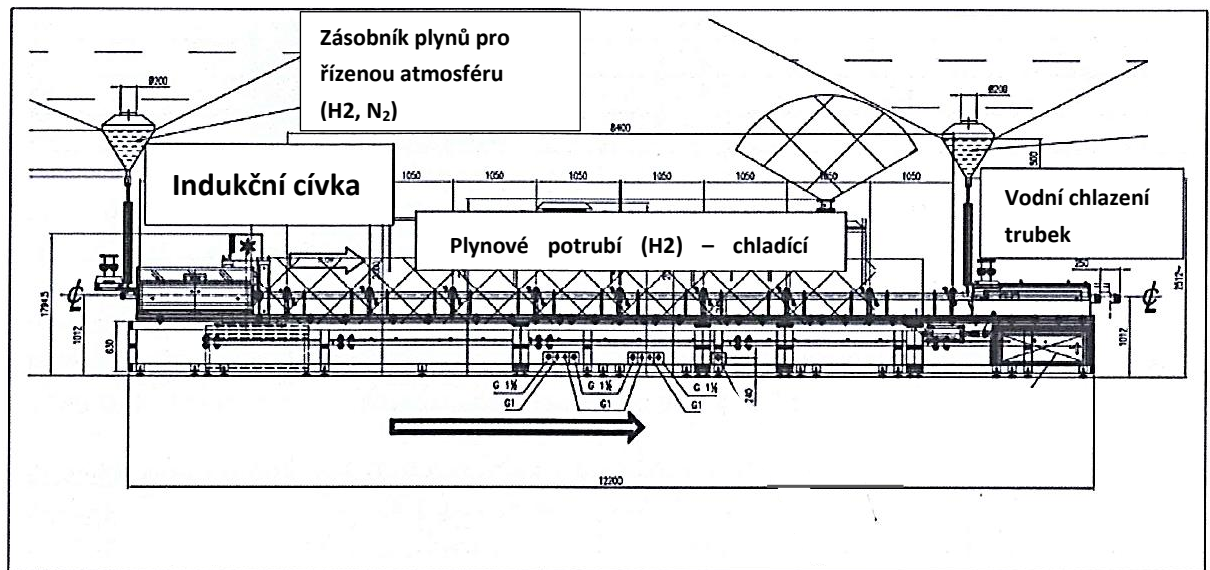
## 9. Návrh zařízení pro žíhání

Při návrhu linky pro konkrétní operaci a konkrétní užití se bude vycházet z experimentálně zjištěných vlastností trubiček. Dále také z dnes používaných technických řešení pro žíhání zapojené ve výrobní lince a v neposlední řadě při návrhu různých řešení bude zhodnocena ekonomická stránka problematiky.

Mnoho firem se již specializuje na výrobu linek pro tepelné zpracování. Tyto linky se nejvíce zaměřují na technologii kalení. Praktické využití nabízejí například pro lokální kalení zubů pásových pil. Rozpouštěcí žíhání austenitické korozivzdorné oceli je specifické. Při tepelném zpracování je důležitá ochranná atmosféra, jelikož daný produkt nebude již dále obráběn ani jinak upraven. Ochranná atmosféra používaná pro austenitické korozivzdorné oceli je jiná oproti atmosférám pro uhlíkové oceli, kde se velmi často používá dusíková atmosféra. Dalším specifikem je chlazení, které musí probíhat rychle a také v ochranné atmosféře.

Dále tedy budou prověřeny možnosti nabízených linek dvou předních výrobců zařízení. Bude posouzena vhodnost použití dostupných technologií pro tepelné zpracování a možnost integrovat takovéto zařízení do výrobní linky na výrobu trubiček do EGR výměníků.

## 9.1 Návrh linky Termomacchine



Obrázek 31 - Layout návrhu indukční žíhací linky Termomacchine [36]



Obrázek 30 - Fotka kontinuální žíhací linky Termomacchine [36]

Žíhací linka společnosti Termomacchine je vhodná pro aplikaci rozpouštěcího žíhání trubiček z austenitické korozivzdorné oceli. Linka je dělena do tří částí: indukční ohřev, modul chlazení plynem, vodní chlazení

#### 1. Indukční ohřev

V části indukčního ohřevu je uložena indukční cívka s výkonem generátoru 40-60 kW. K indukčnímu boxu je připojen pyrometrický modul, který slouží pro pozorování teploty ohřívané trubičky. Po celou dobu ohřevu musí být trubička chráněna ochrannou atmosférou. Nejideálnější je použití 100 % vodíku, který zaručuje naprosto lesklý povrch. Délka indukční cívky se odvíjí od doby výdrže na teplotě.

#### 2. Modul chlazení

Trubičky, které jsou již vyžíhané z předchozí sekce je třeba velmi rychle zchladit. K tomu je využito chlazení plynným vodíkem. Chlazení probíhá z teploty 1100 °C na teplotu přibližně 100 °C. Doporučení výrobce pro naši aplikaci je minimální délka chladicí sekce 5 m pro maximální rychlost linky 8 m/min.

#### 3. Vodní chlazení

Z modulu chlazení plynem vyjdou trubičky s teplotou kolem 100 °C. Pro cílové dochlazení na pokojovou teplotu slouží poslední část linky. Tam budou trubičky výsledně schlazeny vodní sprchou. Tato sekce bude dlouhá 0,5 m. [36]

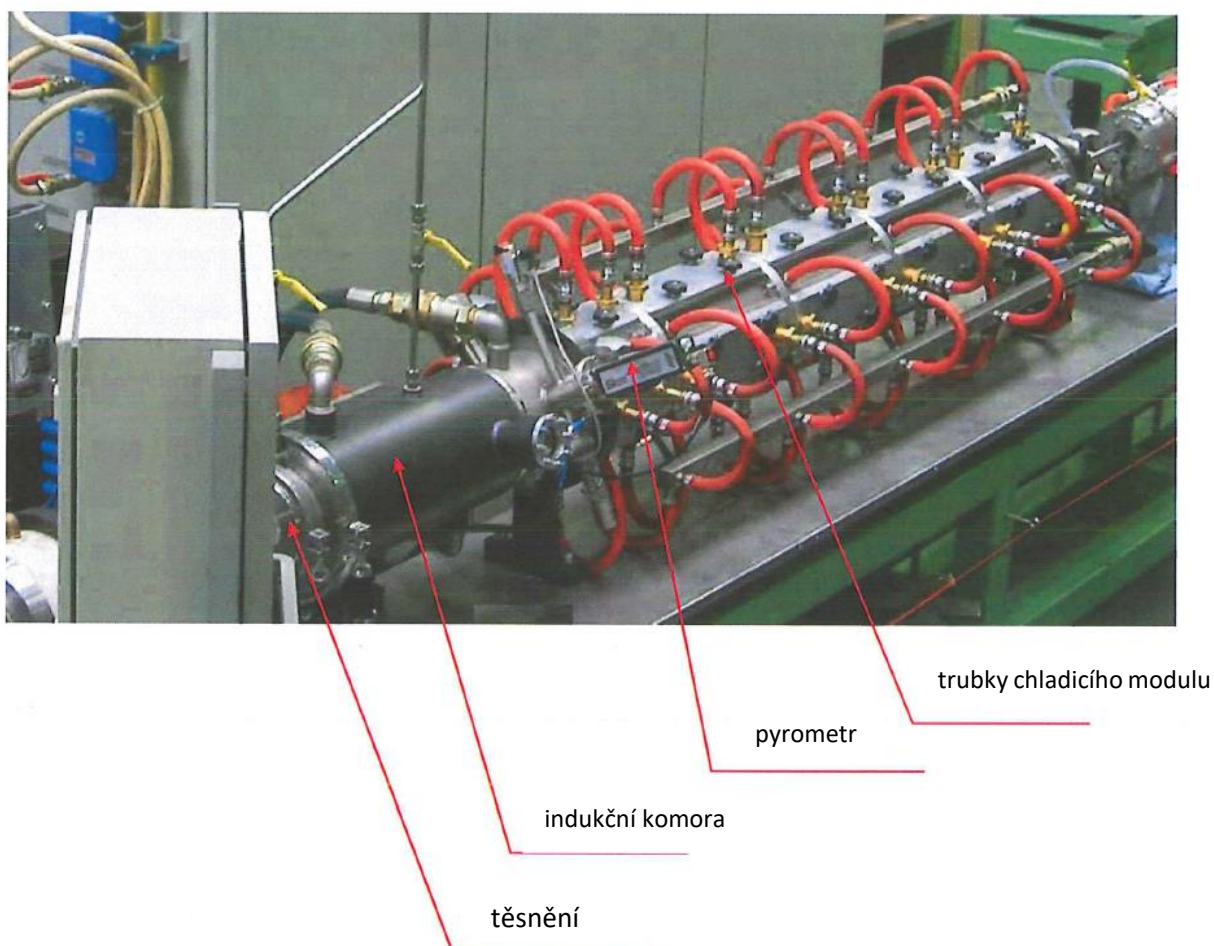
### **9.1.1 Prověření možnosti použití a integrace linky Termomacchine**

Linka Termomachine je konstrukčně vyhovující. Použití indukce pro ohřev je díky rychlému náběhu na teplotu vhodné pro co nejkratší ohřevovou část linky. Konkrétně pro naše použití, kdy byla z proběhlých experimentálních žíhání stanovena dostatečná doba výdrže v peci s otevřenou atmosférou 40 s, zjištěna byla také doba náběhu na teplotu 1100 °C v peci, a to 23 s. Indukční ohřev zajistí ohřátí trubičky na teplotu 1100 °C během 1-2 s. Z toho vyplývá požadovaná doba průjezdu ohřívací indukční sekcí na 18 s. Délka indukční cívky by tedy pro rychlost linky 10 m/min měla být 3 m.

Chlazení pomocí průtoku plynným vodíkem je pro výslednou kvalitu výrobku ideální. Vlastnosti materiálu však dovolují chladit jen například do 200 °C s následným dochlazením vodní sprchou. V těchto teplotách neprobíhají v materiálu žádné přeměny a nedojde k jeho zoxidování. Tím je možné zkrátit část modulu chlazení plynem. Pro rychlost linky 10 m/s by pro chlazení z 1100 °C pak byla dlouhá 5,5 m. Část vodního chlazení bude ponechána dle návrhu výrobce.

Linka Termomacchine pro žhání zkoumaných vzorků by měla celkovou délku 9 m. Dle jejího návrhu konstrukce a zařízení je možnost linku integrovat do výrobní linky. Nevýhodou je její velká délka, s kterou je potřeba počítat při dimenzování výrobní haly.

## 9.2 Návrh linky EFD Induction



Obrázek 32 - Schéma indukční žhací linky EFD [40]

Linky pro rozpouštěcí žhání EFD využívají technologie indukčního ohřevu EFD. Tato firma se specializuje na využití indukčního ohřevu pro různé průmyslové aplikace. Jsou schopny dodat linku s efektivnější ohřevovou sekcí a díky tomu může být celková délka linky kratší.

Linka se skládá z frekvenčního měniče pro regulaci indukčního ohřevu, vstupního plynového těsnění, komory pro ohřev s ochrannou atmosférou a indukční cívkou, měřicí komory s pyrometrem, chladicí komory s trubičkovými chladicími prvky, výchozí chladicí vodní sprchy, panelu pro kontrolu atmosféry a řídicí jednotky pro řízení procesu obsluhou.

### 1. Frekvenční měnič

Pro malé tloušťky stěn je třeba frekvence indukčního ohřevu mezi 50–70 kHz pro zajištění nejvyšší účinnosti zařízení. Navržený frekvenční měnič dodává indukční výkon 150 – 220 kW při frekvenci mezi 50 až 70 kHz. To umožňuje nastavit rychlost linky dle aktuálního požadavku.

### 2. Komora ohřevu

Na kraji komory pro ohřev je umístěno plynové těsnění pro zajištění izolace ochranné atmosféry. Uvnitř komory je umístěn indukční ohřev – cívka. Celková délka indukčního ohřevu je 0,6 m.

### 3. Chladicí komora

Speciální technologie chlazení s trubičkovými chladicími elementy je navržen tak, že chladicí sekce bude přibližně 4,5 m dlouhá s následným 0,5 m dlouhým úsekem s vodní chladicí sprchou. Pro chlazení je opět důležitá ochranná atmosféra, aby nedocházelo k oxidaci a oduhličování, proto se využívá k ochraně vodík. [40]

## 9.2.1 Prověření možnosti použití a integrace linky EFD

Ohřevová indukční část linky EFD má výrazně vyšší výkon (čtyřikrát) než linka Termomacchine. Dle výrobce zaručí i v délce 0,6 m dostatečné odpevnění. Z výsledků analýzy odpevnění trubiček by délka indukčního ohřevu měla být 3 m.

Chladicí komora je navržena v délce 4,5 m. Díky speciální technologii chlazení s trubičkovými chladicími elementy, které jsou vždy navrženy dle průměru chlazené trubičky dojde v této délce k požadovanému zchlazení.

Následný modul s vodní sprchou je dlouhý 0,5 m.

Celkově by délka žíhací linky společnosti EFD měla být dle výrobce dlouhá 5,6 m. Výrazné zkrácení linky oproti lince Termomacchine je způsobeno efektivnějším a výkonnějším indukčním ohřevem. Dle výsledků doby potřebné pro odpevnění, vycházejících z této práce by délka indukčního ohřevu měla být delší a to 3 m. Celková délka linky by pak byla 8 m.

Žíhací sekce EFD je integrovatelná do výrobní linky. Pokud by díky know-how výrobce dokázal indukční ohřev zajistit odpevnění materiálu při délce ohřevového modulu 0,6 m, byla by tato varianta výhodnější.

## 10. Závěr

Teoretická část této diplomové práce obsahuje shrnutí základních vlastností korozivzdorných ocelí se zaměřením na austenitické korozivzdorné oceli. Je zde popsán princip deformačního zpevnění, ke kterému dochází v důsledku tváření. Dále je popsána možnost tepelného zpracování technologií rozpouštěcího žhání pro snížení deformačního zpevnění austenitických korozivzdorných ocelí.

Při tepelném zpracování jsou zásadní čtyři faktory: teplota tepelného zpracování, doba výdrže, rychlost ochlazování a použití ochranné atmosféry. Z literatury byla známa citlivost austenitických korozivzdorných ocelí na tvorbu mezikrystalové koroze, která je způsobena precipitací chromu a tvorbou karbidů v rozmezí teplot 500 – 800 °C. Proto je zapotřebí při tepelném zpracování zajistit velmi rychlé ochlazení, aby ocel nebyla zbytečně dlouhou dobu vystavena teplotám, při nichž může dojít ke vzniku mezikrystalové koroze.

Povrch vyráběných trubíček nebude po tepelném zpracování následně nijak opracován. Proto je třeba volit prostředí v žhací komoře takové, aby na povrch materiálu nemělo tepelné zpracování vliv – tzn., aby nedocházelo k oxidaci nebo oduhličení. Ochranné atmosféry, které se používají pro austenitickou korozivzdornou ocel a jsou vhodné pro užití v takto vysokých teplotách jsou vodík nebo směs vodíku a dusíku. Vodík má výborné vlastnosti pro použití během žhání – má velkou tepelnou vodivost a po žhání je ocel lesklá bez známek oxidace. Nevýhodou čistě vodíkové atmosféry je její vysoká cena. Při použití čistě vodíkové atmosféry je také třeba velmi dbát na bezpečnost na pracovišti. Proto se často volí jako ochranná atmosféra směs vodíku a dusíku, díky které je také povrch materiálu chráněn před oxidací a oduhličením. Pro naše použití byla v dalších fázích návrhu uvažovaná čistě vodíková atmosféra.

Teplota zpracování byla šetřena experimentem. Při žhání při teplotě 900 °C došlo u trubíček k minimálnímu poklesu tvrdosti. Oproti tomu při teplotě 1100 °C došlo k výraznému odpevnění a tvrdost po výdrži 1,5 min na teplotě 1100 °C klesla až na hodnoty tvrdosti plechu před tváření. Rozdíl je ale v mikrostruktuře materiálu. Vlivem tepelného zpracování došlo ke zhrubnutí zrna, a to z hodnot velikosti zrna  $G = 9$  po tváření na hodnotu  $G = 6$  po žhání. V dalších fázích návrhu bylo uvažováno pouze s teplotou 1100 °C.

Doba výdrže na teplotě byla zjišťována experimentálním žháním. Vzorčky byly postupně vyndávány z pece a po proměření jejich tvrdosti určena doba minimální výdrže pro dostatečné odpevnění. K hlavnímu poklesu tvrdosti dojde po době 40 s v peci na hodnotu přibližně 200 HV, což je dostatečné pro další zpracování. Při delší době výdrže tvrdost nadále klesala, ale již jen velmi pozvolna, zároveň dochází k dalšímu hrubnutí zrna, což je nežádoucí. Vhodná doba setrvání na teplotě byla stanovena na 40 s a s touto dobou výdrže bylo dále uvažováno při návrhu a hodnocení linek.



Na základě získaných poznatků byly hodnoceny dva návrhy předních světových výrobců žíhacího in line zařízení. Tato zařízení byla v mezích publikovatelných podkladů popsána a zhodnocena. Návrhy výrobců se výrazně liší v navržených sekcích ohřevu, disponují odlišnými výkony induktorů a jinou chladicí technologií. U těchto návrhů byla prověřena možnost jejich využití pro mezioperační žíhání ve výrobní lince nerezových profilů a s ohledem na výsledky experimentů měření odpevnění byly upraveny délky sekce ohřevu na 3 m pro rychlost linky 10 m/min. Upravena byla i délka chladicí sekce, která by měla trubičky chladit na teplotu 200 °C místo navržených 100 °C s následným chlazením vodní sprchou na pokojovou teplotu. Při tomto procesu může dojít k lehkému prohnutí trubiček, avšak po žíhací sekci následují další tvářecí operace a výsledná kalibrace, kde dojde k narovnání.

Všechny cíle diplomové práce byly splněny.

## 11. Zdroje

[1] MACEK, Karel, Jiří JANOVEC, Peter JURČI a Petr ZUNA. *Kovové materiály*. Praha: ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03513-1.

[2] BRENNER, Otakar. Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2003, (4), 84 [cit. 2019-02-20]. DOI: 030417. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/korozivzdorne-oceli-jako-konstrukcni-materialy.html>

[3] ČÍHAL, Vladimír. Korozivzdorné oceli a slitiny. Praha: Academia, 1999. Česká matice technická (Academia). ISBN 80-200-0671-0.

[4] Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2003, (6), 76 [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/korozivzdorne-oceli-jako-konstrukcni-materialy-2-2.html>

[5] STEEL, Marlin. What's the Difference Between Grade 304 and 304L Stainless Steel?. Marlin Steel Wire Products [online]. 2017 [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://www.marlinwire.com/blog/difference-between-grade-304-and-304l-stainless-steel>

[6] SWITZNER, N.T. Predicting microstructure and strength for AISI 304L stainless steel forgings. *Materials Science & Engineering A* [online]. 2019, (745), 474-483 [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509318317337>

[7] DOSSETT, Jon L. a Howard E. BOYER. Practical heat treating. 2nd ed. Materials Park, Ohio: ASM International, c2006. ISBN 978-0-87170-829-8.

[8] DAVIS, J. R. Stainless steels. Materials Park, Ohio: ASM International, c1994. ISBN 9780871705037.

[9] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1.

[10] *Attl* [online]. Attl a spol. s.r.o. Továrna na stroje, 2018 [cit. 2019-06-19]. Dostupné z: <https://www.attl.cz/>

[11] Chemické složení korozivzdorných ocelí. *Italinox* [online]. 2015 [cit. 2019-06-20]. Dostupné z: <https://www.italinox.cz/plechy/prehled-rozmeru-a-povrchu/chemicke-slozeni>

[12] Outokumpu Supra range. *Outokumpu* [online]. 2019 [cit. 2019-06-20]. Dostupné z: [https://www.outokumpu.com/products/ranges/supra?gclid=CjwKCAjw3azoBRAXEiwA-64OoVSwBRu4Qly-ZywIqOXIZi9FwY-TIU9UCqQukFummZEMjc4AgC7cBoCXAcQAvD\\_BwE](https://www.outokumpu.com/products/ranges/supra?gclid=CjwKCAjw3azoBRAXEiwA-64OoVSwBRu4Qly-ZywIqOXIZi9FwY-TIU9UCqQukFummZEMjc4AgC7cBoCXAcQAvD_BwE)

- [13] Nerezová ocel 1.4404. *Inox, spol s. r. o.* [online]. 2019 [cit. 2019-06-20]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14404.html>
- [14] *ASM Aerospace Specification Metals, Inc.* [online]. Florida, 2019 [cit. 2019-06-21]. Dostupné z: <http://www.aerospacemetals.com/contact-aerospace-metals.html>
- [15] ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda.* Praha: Český normalizační institut, 2018.
- [16] *Direct industry* [online]. 2019 [cit. 2019-06-22]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/>
- [17] Microhardness tester. *TSI System* [online]. 2015 [cit. 2019-06-22]. Dostupné z: <http://www.tsisystem.cz/public/media/tvrdomery/Kompletni%20prospekt.pdf>
- [18] Průmyslová kalící a žíhací pec CLM 70. *Vypalovací keramické pece* [online]. [cit. 2019-06-24]. Dostupné z: <https://www.keramicka-pec.cz/-/eshop/0/0/5/329-Prumyslova-kalici-a-zihaci-pec-CLM-70>
- [19] KLEČKOVÁ, Zuzana. *Pece a energetické hospodářství* [online]. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2014 [cit. 2019-06-26]. ISBN ISBN 978-80-248-3371-2. Dostupné z: [http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin\\_Animace/Opory/02\\_Metalurgicke\\_inzenyrstvi/23\\_Pec\\_e\\_a\\_energeticke\\_hospodarstvi/Kleckova\\_Pece\\_a\\_energeticke\\_hospodarstvi.pdf](http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/23_Pec_e_a_energeticke_hospodarstvi/Kleckova_Pece_a_energeticke_hospodarstvi.pdf)
- [20] ADÉLA, Macháčková a Mrňková LENKA. *Průmyslové pece* [online]. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2019-06-26]. ISBN ISBN 978-80-248-3372-9. Dostupné z: [http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin\\_Animace/Opory/02\\_Metalurgicke\\_inzenyrstvi/24\\_Prumyslove\\_pece/Machackova\\_Prumyslove\\_pece.pdf](http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/24_Prumyslove_pece/Machackova_Prumyslove_pece.pdf)
- [21] *Sdílení tepla v tepelných výměnících: Aplikovaná termomechanika - Přednáška 5* [online]. Praha: Katedra technických zařízení budov, Fakulta stavební, ČVUT v Praze, 2011 [cit. 2019-06-26]. Dostupné z: <http://tzb.fsv.cvut.cz/files/vyuka/125yatm/prednasky/125yatm-05.pdf>
- [22] RUDNEV, Valery a George E. TOTTEN. *ASM Handbook: Volume 04C - Induction Heating and Heat Treatment* [online]. Ohio: ASM International, 2014 [cit. 2019-07-11]. ISBN 978-1-68015-234-0. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpASMHVCI5/asm-handbook-volume-4c/asm-handbook-volume-4c>

- [23] DOSSETT, Jon L. a George E. TOTTEN. *ASM Handbook: Volume 04B - Steel Heat Treating Technologies* [online]. Ohio: ASM International, 2014 [cit. 2019-07-11]. ISBN 978-1-68015-233-3. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpASMHVBS2/asm-handbook-volume-4b/asm-handbook-volume-4b>
- [24] Stainless Steel Grades and Families: Explained. In: *Unified Alloys* [online]. 2019 [cit. 2019-07-12]. Dostupné z: <https://www.unifiedalloys.com/blog/stainless-grades-families>
- [25] Fyzikální vlastnosti vybraných plynů a par. In: *Tzb info* [online]. 2019 [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/8-fyzikalni-vlastnosti-vybranych-plynu-a-par>
- [26] TUČEK, Vít, Ludmila DVOŘÁKOVÁ a Jiří HANZAL. Vodík. In: *Česká asociace technických plynů* [online]. Praha, 2004 [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <http://www.catp.cz/publikace/vodik.pdf>
- [27] DVOŘÁKOVÁ, Ludmila, Zdena POJEZNÁ, Jan HAMERNÍK a Miroslav HOLUB. Dusík. In: *Česká asociace technických plynů* [online]. Praha, 2014 [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: [file:///C:/Users/msili/Downloads/CATP\\_1\\_14\\_dusik.pdf](file:///C:/Users/msili/Downloads/CATP_1_14_dusik.pdf)
- [28] *Periodická tabulka: Chemické prvky* [online]. 2017 [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/>
- [29] BRYSON, William E. *Heat Treatment - Master Control Manual* [online]. Munich: Hanser Publishers, 2015 [cit. 2019-07-13]. ISBN 978-1-5231-0126-9. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHTMCM002/heat-treatment-master/heat-treatment-master>
- [30] DAĐOUREK, Karel. Vybrané technologie povrchového zpracování: Vakuové tepelné zpracování. In: *Katedra materiálů* [online]. 2006 [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_magistri/VTM/vtm%20Dad/07vakuoveTZ.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/VTM/vtm%20Dad/07vakuoveTZ.pdf)
- [31] EFD Indukční ohřev. *P - COM, spol. s r.o.* [online]. 2014 [cit. 2019-07-13]. Dostupné z: <http://www.pcom.cz/Indukcni%20ohrev%20EFD.htm>
- [32] ČIŽMÁROVÁ, Elena, Jakub HORNÍK, Zdeňka JENÍKOVÁ a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické v Praze, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [33] VANDER VOORT, George F. *ASM Handbook, Volume 09 - Metallography and Microstructures* [online]. Ohio: ASM International, 2004 [cit. 2019-07-14]. ISBN 978-1-61503-147-4. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpASMHVMM1/asm-handbook-volume-09/asm-handbook-volume-09>

- [34] BJERREGAARD, Leila, Kay GEELS, Birgit OTTESEN a Michael RÜCKERT. *Metalog Guide* [online]. Fourth edition. Rødovre: Struers A/S, 2002 [cit. 2019-07-14]. ISBN 87-987767-0-3. Dostupné z: <https://www.struers.com/-/media/Library/Brochures/English/Metalog-Guide.pdf>
- [35] MD-Allegro. In: *Struers* [online]. [cit. 2019-07-14]. Dostupné z: [https://e-shop.struers.com/CZ/CS/products/Grinding/MD-Grinding/MD-Allegro\\_250\\_mm\\_\(10\)\\_dia\\_5\\_pcs\(40500066\).aspx](https://e-shop.struers.com/CZ/CS/products/Grinding/MD-Grinding/MD-Allegro_250_mm_(10)_dia_5_pcs(40500066).aspx)
- [36] Termomacchine [online]. [cit. 2019-07-18]. Dostupné z: <https://www.termomacchine.com>
- [37]\_Automobilový průmysl: Trendy budoucnosti. *Měsíčník EU aktualit* [online]. EU Office, 2015, (144), 8-12 [cit. 2019-07-18]. ISSN 1801-5042. Dostupné z: [https://www.csas.cz/static\\_internet/cs/Evropska\\_unie/Mesicnik\\_EU\\_aktualit/Mesicnik\\_EU\\_aktualit/Prilohy/mesicnik\\_2015\\_09.pdf](https://www.csas.cz/static_internet/cs/Evropska_unie/Mesicnik_EU_aktualit/Mesicnik_EU_aktualit/Prilohy/mesicnik_2015_09.pdf)
- [38] DUSIL, Tomáš. EGR ventil: Postrach moderních motorů. K čemu vlastně slouží? A proč je tak problémový?. *Auto.cz* [online]. 2017 [cit. 2019-07-18]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/egr-ventil-postrach-modernich-motoru-k-cemu-vlastne-slouzi-a-proc-je-tak-problemovy-103380>
- [39] Vzduch. In: *ConVERTER* [online]. 2002 [cit. 2019-07-18]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/vzduch.htm>
- [40] EFD induction [online]. [cit. 2019-07-18]. Dostupné z: <https://www.efd-induction.com/>
- [41] ASTM E112, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013

## 12. Seznam obrázků

Obrázek 1 - Příklad tenkostěnné svařované nerezové trubky [10] .....	8
Obrázek 2 - Vyznačení oblasti chemických složení různých typů korozivzdorných ocelí [3].....	11
Obrázek 3 - Dělení austenitických korozivzdorných ocelí [24] .....	14
Obrázek 4 - porovnání tepelné vodivosti kovových materiálů [8] .....	16
Obrázek 5 - Znázornění Frank-Readova zdroje dislokací: A, B - překážky pohybu dislokace C; 1 - skluz dislokace; 2 - 4 - prohýbání dislokace; 5 - vznik nové dislokace [9].....	18
Obrázek 6 - Změna meze pevnosti, smluvní meze kluzu, tvrdosti, tažnosti a měrného elektrického odporu při odpevnění v závislosti na teplotě [9].....	19
Obrázek 7 - Brusný kotouč s diamantem pro jemné broušení [35] .....	30
Obrázek 8 - Princip zkoušky měření tvrdosti dle Vickerse [15] .....	32
Obrázek 9 - Lis Stuers CitoPress pro zhotovení (zapékání) metalografických výbrusů [16].....	35
Obrázek 10 - Metalografická bruska a leštička Stuers Tegramin – 25 [16] .....	35
Obrázek 11 - Mikrotvrdoměr FM-100 [17] .....	36
Obrázek 12 – Názorné vyznačení oblastí měření .....	36
Obrázek 13 - Způsob ohýbání plechu pro dosažení většího deformačního zpevnění .....	38
Obrázek 14 - Kalicí a žíhací pec [18] .....	42
Obrázek 15 - Vyžíhané vzorky po vyndání z pece .....	43
Obrázek 16 - Graf závislosti doby v peci na výsledné tvrdosti .....	44
Obrázek 17 - Mikrostruktura, AISI 304L, t = 0,3 mm, tvářený .....	50
Obrázek 18 - Mikrostruktura, AISI 304L, t = 0,3 mm, tvářený .....	50
Obrázek 19 - Mikrostruktura, AISI 304L, t = 0,3 mm, žíhaný.....	51
Obrázek 20 - Mikrostruktura, AISI 304L, t = 0,3 mm, žíhaný.....	51

Obrázek 21 - Mikrostruktura, AISI 304L, t = 2 mm, tvářený .....	52
Obrázek 22 - Mikrostruktura, AISI 304L, t = 2 mm, tvářený .....	52
Obrázek 23 - Mikrostruktura, AISI 304L, t = 2 mm, žíhaný .....	53
Obrázek 24 - Mikrostruktura, AISI 304L, t = 2 mm, žíhaný .....	53
Obrázek 25 - Mikrostruktura, AISI 316L, t = 0,3 mm, tvářený .....	54
Obrázek 26 - Mikrostruktura, AISI 316L, t = 0,3 mm, tvářený .....	54
Obrázek 27 - Mikrostruktura, AISI 316L, t = 0,3 mm, žíhaný .....	55
Obrázek 28 - Mikrostruktura, AISI 316L, t = 0,3 mm, žíhaný .....	55
Obrázek 29 - Doporučená velikost a orientace testovacích obrazců pro průsečíkovou metodu [32] .....	56
Obrázek 30 - Fotka kontinuální žíhací linky Termomachine [36] .....	59
Obrázek 31 - Layout návrhu indukční žíhací linky Termomacchine [36] .....	59

### 13. Seznam tabulek

Tabulka 1 - Modul pružnosti korozivzdorných ocelí v závislosti na teplotě [8] .....	15
Tabulka 2 Chemické složení AISI 304L [11] .....	16
Tabulka 3 - Mechanické vlastnosti AISI 304L [14] .....	17
Tabulka 4 - Chemické složení AISI 316L [11] .....	17
Tabulka 5 - Mechanické vlastnosti AISI 316L [14] .....	17
Tabulka 6 - Doporučené žíhací teploty pro vybrané korozivzdorné oceli [7] .....	21
Tabulka 7 - Fyzikální vlastnosti vodíku [25] [26] [28] .....	27
Tabulka 8 - Fyzikální vlastnosti dusíku [25] [27] [28] .....	28
Tabulka 9 – Fyzikální vlastnosti vzduchu [39] .....	28
Tabulka 10 - Rozsahy zkušebního zařízení [15] .....	32
Tabulka 11 - Výsledky měření tvrdosti vzorku AISI 316L, ve stavu po tváření, t = 0,3 mm .....	37
Tabulka 12 - Výsledky měření tvrdosti vzorku AISI 304L, ve stavu po tváření, t = 0,3 mm .....	37
Tabulka 13 - Výsledky měření tvrdosti vzorku AISI 304L, ve stavu po tváření, t = 2 mm .....	38
Tabulka 14 - Výsledky měření tvrdosti tvářených plechů, t = 0,3 mm .....	39
Tabulka 15 - Výsledky měření tvrdosti tvářených plechů, t = 2 mm .....	39
Tabulka 16 - Parametry externě žíhaných vzorků .....	40
Tabulka 17 - Tvrdost po žíhání, vzorek č. 1 .....	40
Tabulka 18 - Tvrdost po žíhání, vzorek č. 12 .....	40
Tabulka 19 - Tvrdost po žíhání, vzorek č. 7 .....	41
Tabulka 20 - Tvrdost po žíhání, vzorek č. 18 .....	41
Tabulka 21 - Tvrdost po žíhání, vzorek č. 23 .....	41



Tabulka 22 - Tvrdost po žihání, vzorek č. 28 .....	41
Tabulka 23 - Přehled doby v peci u žiháných vzorků.....	43
Tabulka 24 - Tvrdost žiháných vzorků .....	43
Tabulka 25 - Experimentální určení doby náběhu na teplotu pro $t = 0,3$ mm .....	45
Tabulka 26 - Tvrdost vzorků AISI 304L, $t = 0,3$ mm, po žihání 20s .....	46
Tabulka 27 - Tvrdost vzorků AISI 304L, $t = 0,3$ mm, po žihání 40s .....	46
Tabulka 28 - Tvrdost vzorků AISI 304L, $t = 0,3$ mm, po žihání 60s .....	46
Tabulka 29 - Tvrdost vzorků AISI 304L, $t = 0,3$ mm, po žihání 80s .....	46
Tabulka 30 - Tvrdost vzorků AISI 304L, $t = 0,3$ mm, po žihání 100s .....	46
Tabulka 31 - Tvrdost vzorků AISI 304L, $t = 2$ mm, po žihání 20s .....	47
Tabulka 32 - Tvrdost vzorků AISI 304L, $t = 2$ mm, po žihání 40s .....	47
Tabulka 33 - Tvrdost vzorků AISI 304L, $t = 2$ mm, po žihání 60s .....	47
Tabulka 34 - Tvrdost vzorků AISI 304L, $t = 2$ mm, po žihání 80s .....	47
Tabulka 35 - Tvrdost vzorků AISI 304L, $t = 2$ mm, po žihání 100s .....	47
Tabulka 36 - Tvrdost vzorků AISI 316L, $t = 0,3$ mm po žihání 20 s .....	48
Tabulka 37 - Tvrdost vzorků AISI 316L, $t = 0,3$ mm po žihání 40 s .....	48
Tabulka 38 - Tvrdost vzorků AISI 316L, $t = 0,3$ mm po žihání 60 s .....	48
Tabulka 39 - Tvrdost vzorků AISI 316L, $t = 0,3$ mm po žihání 80 s .....	48
Tabulka 40 - Tvrdost vzorků AISI 316L, $t = 0,3$ mm po žihání 100 s .....	48
Tabulka 41 - Vzorky pro analýzu mikrostruktury .....	49
Tabulka 42 - Parametry elektrolytického leptání vzorků.....	49
Tabulka 43 - Čísla velikosti zrna G zkoumaných vzorků.....	57

## 14. Seznam použitých zkratek a symbolů

Cr	Chrom
Ni	Nikl
Mn	Mangan
Mo	Molybden
Cu	Měď
Si	Křemík
Al	Hliník
Ti	Titan
Nb	Niob
Ta	Tantal
W	Wolfram
V	Vanad
S	Síra
P	Fosfor
Fe	Železo
C	Uhlík
H	Vodík
N	Dusík
HNO <sub>3</sub>	Kyselina dusičná
EGR	Recirkulace výfukových plynů (Exhaust Gas Recirculation)
AISI	Americký institut pro železo a ocel (American Iron and Steel Institut)
ASTM	Americká společnost pro zkoušení a materiály (American Society for Testing and Materials)
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma (European Standard)

ISO	Mezinárodní norma (International Standard)	
t	tloušťka	[m]
T	Teplota	[K]
P	Tepelný tok	[W]
q	Měrný tepelný tok	[W/m <sup>2</sup> ]
S	Plocha	[m <sup>2</sup> ]
Q	Teplo	[J]
τ	Čas	[s]
λ	Součinitel tepelné vodivosti	[W /m · K]
α	Součinitel přestupu tepla	[W/m <sup>2</sup> · K]
c <sub>p</sub>	Měrná tepelná kapacita	[J/kg·K]
ρ	Hustota	[kg/m <sup>3</sup> ]
a	Součinitel teplotní vodivosti	[m <sup>2</sup> /s]
b	Součinitel tepelné jímavosti	[J/m <sup>2</sup> · s <sup>0,5</sup> · K]
β	Součinitel teplotní délkové roztažnosti	[K <sup>-1</sup> ]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
σ <sub>pt</sub>	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
ε	Poměrné prodloužení	[%]
φ	Poměrné zúžení	[%]
Bi	Biotovo kritérium	
b	Tloušťka stěny/tělesa	[m]
k <sub>1</sub>	Součinitel tvaru	
C <sub>pec</sub>	Konstanta pece	[W/m <sup>2</sup> ·K]
θ	Teplotní simplex	
F	Síla	[N]
d	průměr	[m]

HV	Tvrđost dle Vickerse	
kgf	Kilogram force	jednotka síly
G	Číslo velikosti zrna	
l	Průměrná délka úseku	[m]

# 15. Přílohy

Příloha číslo 1: Vztah velikosti zrna vypočítaný pro stejnoměrně, náhodně orientovaná zrna z normy ASTM E112 [41]



**TABLE 4 Grain Size Relationships Computed for Uniform, Randomly Oriented, Equiaxed Grains**

Grain Size No. G	$\bar{N}_A$ Grains/Unit Area		$\bar{A}$ Average Grain Area		$\bar{d}$ Average Diameter		$\bar{r}$ Mean Intercept		$\bar{N}_L$ No./mm
	No./in. <sup>2</sup> at 100X	No./mm <sup>2</sup> at 1X	mm <sup>2</sup>	$\mu\text{m}^2$	mm	$\mu\text{m}$	mm	$\mu\text{m}$	
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0