

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA  
FAKULTA MATERIÁLOVĚ-TECHNOLOGICKÁ

KATEDRA MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ

**Vývoj zušlechťení ocelí C110 a T95 dle API 5CT**

Development of Quenching and Tempering of C110 and T95 Steels According to API 5CT

Student:

Bc. et Bc. Martin Chovanec

Vedoucí diplomové práce:

prof. Dr. Ing. Jaroslav Sojka

Ostrava 2019

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta materiálově-technologická  
Katedra materiálového inženýrství

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. et Bc. Martin Chovanec**

Studijní program: N3923 Materiálové inženýrství

Studijní obor: 3911T036 Progresivní technické materiály

Téma: **Vývoj zušlechťení ocelí C110 a T95 dle API 5CT**  
**Development of Quenching and Tempering of C110 and T95 Steels**  
**According to API 5CT**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod a cíl práce.
2. Teoretická část: a) Popis válcovny trub a výroby bezešvých trub Mannesmannovou metodou; b) Kalení ocelí a popis kalicích soustav; c) Popouštění a popis krokové pece; d) Základní oceli dle API 5CT.
3. Experimentální část: a) Popis zkoumaného materiálu a jeho chemické složení; b) Postup a parametry tepelného zpracování; c) Výsledky zkoušení mechanických vlastností a strukturní analýza.
4. Závěry.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] CALLISTER, W. D. *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. 7. vyd. New York: John Wiley & Sons, 2007, 722 s. ISBN 0-471-73696-1.
- [2] TOTTEN, G. E. *Steel Heat treatment, Metallurgy and technologies*. 2. vyd. Boca Raton: CRC Press, 2007, 820 s. ISBN 0-8493-8455-9.
- [3] *ASM Handbook, Volume 04, Heat treating*. Materials Park Ohio: ASM International, 2002. ISBN 0-87170-379-3.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Dr. Ing. Jaroslav Sojka**

Datum zadání: 30.11.2018

Datum odevzdání: 23.04.2019



  
prof. Ing. Vlastimil Vodárek, CSc.  
vedoucí katedry

  
prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.  
děkanka fakulty

# Zásady pro vypracování diplomové práce

## I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

## II.

### Uspořádání diplomové práce:

- |  |  |
|--|--|
| 1. Titulní list  | 6. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky |
| 2. Originál zadání DP  | 7. Obsah DP                                  |
| 3. Zásady pro vypracování DP   | 8. Textová část DP                           |
| 4. Prohlášení + místopřísečné prohlášení   | 9. Seznam použité literatury                 |
| 5. Prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP | 10. Přílohy                                  |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP.

ad 4) Prohlášení + místopřísečné prohlášení napsané na zvláštním a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP.

ad 5) V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právnickými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 6) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 7) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 8) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 10).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 9) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků. Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690. Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.
- ad 10) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

### III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*  
*Fakulta materiálově - technologická*  
*Katedra .....*

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*


dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení DP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

### IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia Fakulty materiálově – technologické, Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2018/2019.

Ostrava 12. 11. 2018

  
**Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.**  
děkanka Fakulty materiálově- technologické  
VŠB-TU Ostrava

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 18. 4. 2019 .....

  
.....  
podpis (jméno a příjmení studenta)

## **PODĚKOVÁNÍ**

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu práce prof. Dr. Ing. Jaroslavu Sojkovi za odborné rady a vedení, konzultantu Ing. Pavlu Kukuczkoovi za praktickou pomoc při realizaci výzkumné části a dalším pracovníkům TŽ a.s. - Válcovny trub, konkrétně středisku technologie, válcovací tratě a zušlechťovně Velký Mannesmann, při zpracování této diplomové práce.

Taktéž bych chtěl poděkovat své rodině za čas, podmínky a trpělivost, které mi poskytla.

## ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vývojem zušlechtění jakostí C110 a T95 vyrobených z oceli s označením C95/110. Cílem je dosažení mechanických hodnot stanovených normou API 5CT vhodným režimem tepelného zpracování. Jedná se tedy o dosažení hodnot meze pevnosti v tahu, meze kluzu, tažnosti a tvrdosti. Tento vývoj probíhal na provozu Válcovny trub-TRINECKÉ ŽELEZÁRNY a.s., konkrétně na středisku Velký Mannesmann. Předmětem zkoumání byly trubky o rozměrech 244,48 x 11,05 mm a 269,88 x 21,06 mm ve dvou různých tavných v každém rozměru, které plně vyhovovaly chemickému složení daném výše uvedenou prováděcí normou. Celkem bylo pro tento výzkum vyrobeno 14 ks trub. K vyhodnocení mikrostruktury byly z trubek odebrány vybrané vzorky jak po kalení, tak i po popouštění pro obě jakosti.

Klíčová slova: trubky; kalení; popouštění; struktura; VM; API 5CT; martenzit; bainit.

## ABSTRACT

These Diploma thesis deals with the development of the quenching and tempering of the steels C110 and T95 made of the steel with the designation C95/110. The aim is to achieve the mechanical properties required by the API 5CT standard by an appropriate heat treatment mode. It is therefore the achievement of tensile strength, yield strength, elongation at fracture and hardness values. This development was carried out on the Válcovna trub-TRINECKÉ ŽELEZÁRNY a.s., namely the Large Mannesmann centre. The subject of the investigation were tubes with dimensions of 244.48 x 11.05 mm and 269.88 x 21.06 mm in two different heats in each dimension which were fully conform to the chemical composition given in the abovementioned implementing standard. In total, 14 pieces of tubes were produced for this research. To evaluate the microstructure, selected samples were taken from the tubes both after quenching and after tempering for both steel grades.

Keywords: tubes; quenching; tempering; structure; VM; API 5CT; martensite; bainite

## Obsah

<b>1. Úvod a cíl práce .....</b>	<b>4</b>
<b>2. Teoretická část .....</b>	<b>5</b>
<b>2. 1 Popis válcovny trub a výroby bezešvých trub Mannesmannovou metodou .....</b>	<b>5</b>
<b>2. 2 Kalení ocelí a popis kalicí soustavy.....</b>	<b>12</b>
<b>2. 3 Popouštění a popis krokové pece .....</b>	<b>20</b>
<b>2. 4 Základní jakosti oceli dle API 5CT .....</b>	<b>24</b>
<b>3. Experimentální část .....</b>	<b>28</b>
<b>3. 1 Popis zkoumaného materiálu a jeho chemické složení.....</b>	<b>28</b>
<b>3. 2 Postup zušlechtění jakosti C110 a výsledky mechanických zkoušek .....</b>	<b>30</b>
<b>3. 3 Postup zušlechtění jakosti T95 a výsledky mechanických zkoušek.....</b>	<b>33</b>
<b>3. 4 Vyhodnocení mikrostruktury.....</b>	<b>34</b>
<b>4. Závěr .....</b>	<b>46</b>
<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>48</b>



## 1. Úvod a cíl práce

Provoz válcovny trub patřící do skupiny Třineckých železáren a.s., patří k jednomu z nejvýznamnějších dodavatelů bezešvých trub po celém světě. Výroba zde byla započata v roce 1883, a trubky vyrobené v tomto závodě slouží například jako konstrukce haly svinovského nádraží, berlínského stadionu, horské dráhy v Buffalu a Madridu, součást kolotoče ve Vídeňském Prátru, nebo také pro ropné vrty s vysokou přesností. Jako další lze zmínit použití v energetice, chemickém a automobilovém průmyslu, či rozvody vody, ropy i plynu. Vzhledem k neustálým pokrokům ve vývoji a technologii se požadavky zákazníků neustále zvyšují, proto se i tento provoz neustále zdokonaluje, aby byl na trhu konkurenceschopný.

V teoretické části, je popsán provoz Válcovny trub, spadající do skupiny Třineckých železáren a.s., a výroba trub od vsázky až po konečné ochlazování se zaměřením na Mannesmannův způsob výroby trub, včetně fotografií agregátů sloužících k jejich výrobě. Další kapitolou je základní popis zušlechtění, tedy kalení a popouštění včetně popisu tunelové a krokové pece, ve kterých probíhal samotný výzkum, jenž je předmětem této práce. V následující kapitole jsou popsány základní jakosti, které uvádí norma API 5CT. Součástí jsou i požadavky na chemické složení, výrobu i mechanické vlastnosti pro jednotlivé jakosti.

Cílem této diplomové práce je vývoj jakostí C110 a následně T95 z oceli označené C95/110. Za předpokladu odlití vsázky s chemickým složením odpovídajícím mezinárodní normě API 5CT se jedná o nalezení vhodného tepelného zpracování k dosažení mechanických hodnot vyplývajících z výše uvedené normy. K tomuto výzkumu budou použity trubky v rozměrech 244,48 x 11,05 mm a 269,88 x 21,06 mm. V každém rozměru budou použity dvě stejné tavby. Celkem bude k výzkumu použito 14ks trub pro jakost C110 a z toho 8ks k následnému vývoji na jakost T95. Z těchto trub budou z různých etap tepelného zpracování odebrány vzorky k vyhodnocení mechanických vlastností a mikrostruktury pomocí světelné mikroskopie.

## 2. Teoretická část

V této části diplomové práce se věnuji teorii související se základním popisem Válcovny trub TŽ, kde popisují produkty vyrobené v tomto závodě včetně operací nutných k jejich výrobě a také druhy vyráběných materiálů a jejich použití. Dále jsou zde popsány procesy zušlechtnění, které korespondují se zpracováním zkoumaného materiálu, a je zde také popis pecí a kalícího zařízení. Součástí teoretické části jsou i fotografie obou použitých pecí a kalícího zařízení včetně základních parametrů nutných pro jejich provoz. Jako další část zde popisují základní rozdělení jakostí oceli uváděnými v normě API 5CT včetně jejich základních vlastností a použití.

### 2.1 Popis válcovny trub a výroba bezešvých trub Mannesmannovou metodou

Provoz Válcovna trub (dále jen VT) spadá do konceptu TŽ, a jak vychází z názvu, vyrábí se zde bezešvé trubky vyrobené poutním válcováním za tepla. Výroba trubek je rozdělena dle střediska na Velký Mannesmann (dále jen VM) a Malý Mannesmann (dále jen MM). Na MM se vyrábějí bezešvé trubky na dvou poutních válcovacích stolicích, a to v rozměrech od průměr 60,3 mm až do průměr 159 mm ve tloušťkách stěn od 6,3 mm do 36 mm. Válcují se zde trubky ocelí třídy 11 až 17, tzn. uhlíkové, ušlechtilé i legované. Vsázkovým materiálem pro výrobu jsou především válcové kontislitky, ale také to mohou být výkovky, sochory nebo výlisky. Průměr této vsázky je dle vyráběného sortimentu v rozmezí 150, 180 a 210 mm a v délkách od 600 mm do 1850 mm.

Tento vsázkový materiál je nasazen do karuselové pece, kde probíhá ohřev na teploty cca 1180 °C až 1300 °C. Doba setrvání v peci se pohybuje v rozmezí 85 až 245 minut v závislosti na rozměrech a druhu vstupního materiálu. Po dostatečném ohřátí předvalku v peci je po válnici dopraven k důlčikovacím stroji, který provede vystředění pro potřeby následného děrování, kdy je za pomoci děrovacího hrotu nasazeném na děrovací tyč získán dutý předvalek. Tento dutý předvalek putuje střídavě na obě poutní stolice.

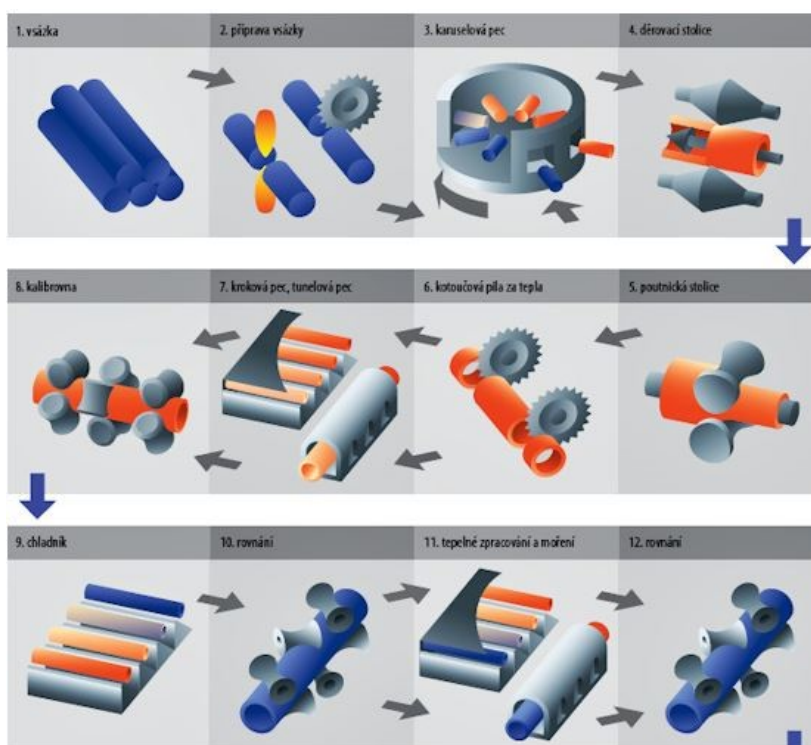
Jakmile je tváření ukončeno, je trubka dopravena na chladník, na kterém jsou na obou koncích kotouče pily, které slouží k uřezání „límců“ na koncích trubek. Po požadovaném

ochlazení je trubka postoupena do krokové pece, kde probíhá normalizace při teplotách 890°C až 950 °C. Následuje kalibrace pomocí 4-5 kalibračních „kazet“, kdy dosáhneme požadovaných rozměrů dle požadavků zákazníka. Takto zkalibrované trubky jsou dopraveny na chladník, kde chladnou pomocí vodních sprch.

Na VM je způsob výroby obdobný, liší se pouze v rozměrech kontislitků a vyráběných rozměrech trubek:

- kontislitky průměru 320 mm, 410 mm, 470mm, 525mm.
- kontislitky délka 630 mm – 2500mm.
- vyráběný průměr 168 mm – 406 mm.
- tloušťky stěny 6,3 mm – 60 mm.

Další rozdíl je v množství válcovacích stolic, kdy na MM jsou dvě válcovací stolice a na VM pouze jedna. Schéma výroby je uvedeno na **Obr. 1** [1,2].



**Obr. 1** Schéma výroby trubek na VT [1].

### Ohřev vsázky

Pro ohřev kontislitků se používají především pece karuselové, tedy s otočnou nástějí. Výkonnost této pece se odvíjí od průměru vsázkového materiálu a bývá i více než 40 T za

hodinu. U vsázkového materiálu o průměrech menších než 100 mm se pro ohřev používají převážně článkové pece, kde se jedná o rychlý ohřev sálavým teplem s dobou ohřevu 1,5 min. na 10 mm průřezu vsázky. Používají se hlavně z důvodu dohřevu předvalků před automatikem, nebo také k dohřevu trubek před jejich redukcí. Automatikem rozumíme válcovací stolicí podobnou té poutnické, která však pracuje rychleji. Předvalek je tažen na kalibrační trn, kde se trubka ztenčuje a natahuje. Při volbě teploty a postupu ohřevu materiálu se řídíme chemickým složením oceli. Obecně lze říci, že horní hranice teploty ohřevu volíme 100 – 150 °C pod teplotou solidu. Musíme ale také počítat s tím, že při operaci děrování kosým válcováním dojde vlivem velké deformace na děrovací stolicí ke zvýšení teploty uvnitř materiálu o 30 – 50 °C. V **Tab. 1** jsou uvedeny informativní teploty válcování pro výrobu dutých předvalků pro třídy oceli dle ČSN [3].

**Tab. 1** Teploty válcování ocelí na trubky

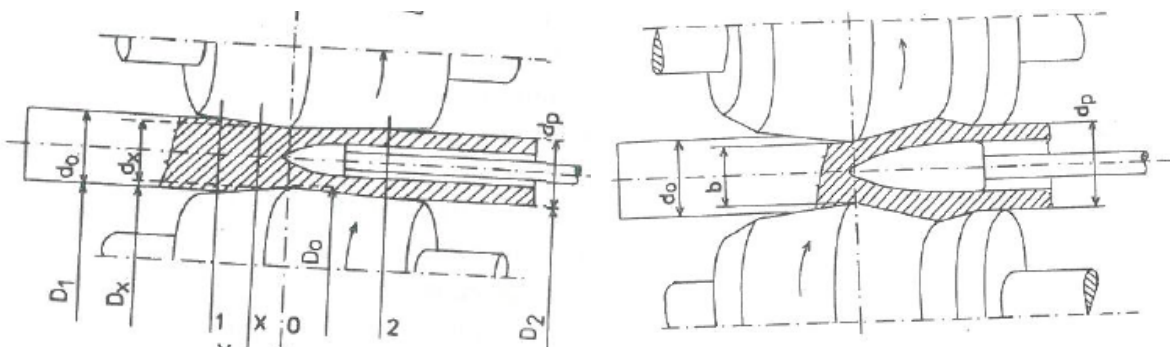
Třída oceli	Teplota válcování [°C]
<b>11</b>	1260-1330
<b>12</b>	1210-1330
<b>13</b>	1220-1310
<b>14</b>	1180-1310
<b>15</b>	1250-1280
<b>16</b>	1250-1280
<b>17</b>	1020-1310

### **Výroba dutých předvalků kosým válcováním**

Tento způsob válcování, kde výsledkem je získání dutého předvalku, se provádí na děrovacích stolicích (viz. **Obr. 2**) s různým konstrukčním řešením. Jedná se o příčné válcování, které se provádí na dvouválcových stolicích s uložením ve dvou ložiskách, nebo dvouválcových stolicích s „hřibovitými“, nebo letmo uloženými válci, ale také tříválcové stolice a stolice s příčně otáčejícími se kotouči. V tomto případě, se bude zabývat děrováním kosým válcováním na dvouválcových stolicích, kdy pracovní válce mají tvar komolých dvoukuželů, jak lze vidět na **Obr. 3 a**). Takto lze děrovat delší duté předvalky s relativně malými tloušťkami stěn. Pro výrobu silnějších stěn a kratších délek se používají válce jiného tvaru, viz **Obr. 3 b**) [3,4].



**Obr. 2** Děrovací stolice na VT.



**Obr. 3** Schéma děrování kosým válcováním, **a)** pro tenké stěny a větší délky, **b)** pro silnější stěny a kratší délky.

Tyto válce svírají podélně daný úhel sklonu, přičemž se otáčejí ve stejném směru, takže kontislitek nebo jiný vstupní materiál se mezi válci otáčí v opačném směru. Pracovní válce mají jak už bylo výše uvedeno, tvar komolých dvou-kuželů, což umožňuje mezi válci vytvoření napěťové podmínky pro tvorbu dutiny a následné rozválcování na výsledný dutý předvalek. Mezi pracovními válci v oblasti deformace je uložen děrovací hrot nasazený na děrovací tyč, která je uchycena tak, aby se její poloha v pásmu deformace při procesu děrování neměnila [3,4].

Při uchycení vstupního materiálu mezi pracovní válce dochází k samovolnému procesu děrování, při němž působí na děrovaný materiál:

- tlakové síly válců;
- síly vnějšího tření;
- tlaky děrovacího hrotu;
- tlakové síly vodících válců nebo pravítek;
- síly tření na výše uvedených elementech.

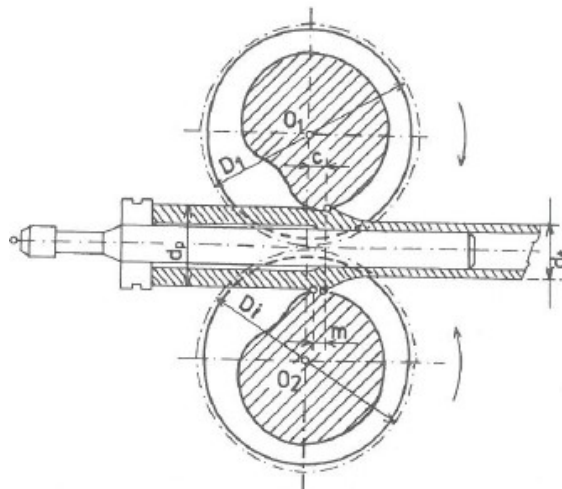
Vznik dutiny při kosém válcování souvisí především se stavem napjatosti v příčném průřezu provalku, vyvolaném bočním tlakem pracovních válců stolice, a s nerovnoměrností plastické deformace v tomto průřezu při otáčení provalku. Účinek děrovacího trnu je při tvorbě dutiny pouze doplňkový. Při tomto procesu dochází k velkému prodloužení materiálu. Plastická deformace v příčném průřezu je vyvolána ještě před špičkou děrovacího hrotu, kterou vyvolá okamžitá tlaková síla, a pronikne jen do malé hloubky. Jakmile dojde k otočení o půl otáčky, plastická deformace se na povrchu zvětší, ale uvnitř se stále nachází plasticky nezdeformované jádro. Při postupném průchodu děrovacím zařízením se zvětšuje hloubka plasticky deformované oblasti na povrchu a také se zmenšuje oblast nezdeformovaného jádra. Deformace je však v příčném průřezu nerovnoměrná a vznikají vnitřní pnutí. Rozhodující pro vznik dutiny jsou normálové složky napětí ve zvolených směrech souřadných os. Plastická deformace je vyvolána vlivem smykového napětí. Samovolný vznik dutiny musí probíhat v příčném průřezu, kam zasahuje děrovací hrot. Postranním smáčknutím materiálu mezi pracovní válce dosáhneme požadovaného stavu napjatosti v provalku [3].

### Poutnické válcování

Jedná se o periodické podélné válcování v kruhovém kalibru dvou válců za pomoci poutního trnu na válcovací stolici, viz **Obr. 4**. Vnější průměr trubky je dán průměrem kalibru a poutní trn nám pak určuje vnitřní průměr, viz **Obr. 5**.



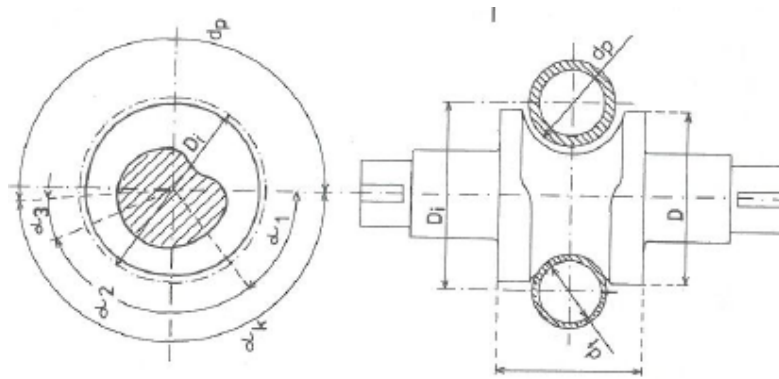
**Obr. 4** Poutní stolice na VT.



**Obr. 5** Schéma poutnického válcování.

Na **Obr. 6** můžeme vidět tvar poutních válců, kde vlevo je vyobrazen příčný řez a vpravo podélný tvar poutních válců a dutého předvalku o pr.  $d_p$  a válcované trubky o pr.  $d_t$ . Průměr  $D$  značí ideální průměr, který se rovná vzdálenosti středu válců  $O_1O_2$ . Zakótované úhly vymezují jednotlivé funkční úseky kalibru:  $\alpha_1$  záběrový úsek,  $\alpha_2$  hladicí (kalibrační) úsek

a  $\alpha_3$  výběhový úsek. Velikost těchto úhlů se volí podle zkušenosti a bývá  $\alpha_1= 60-90^\circ$ ,  $\alpha_2= 90-110^\circ$ ,  $\alpha_3= 10-20^\circ$ . Příliš malý úhel záběrového úseku  $\alpha_1$  má za následek, že záběrová část kalibru je krátká a ostrá: to je příčinou vlnitého povrchu trubky. Tyto úseky dohromady tvoří pracovní kalibr  $\alpha_k$  a zbývající úsek obvodu je tzv. prázdný kalibr  $\alpha_p$  [4].



**Obr. 6** Schéma poutnického válcování.

Do dutého předvalku vyrobeného děrováním je navlečen poutní trn, který je uchycen v podávacím zařízení a jeho odvalování probíhá proces tváření. Odvalování probíhá vlivem otáčivého pohybu válců a zpětného pohybu poutního trnu. Před započítím válcování, jsou válce natočeny proti sobě prázdným kalibrem, což umožňuje pohyb podávacího zařízení směrem do válců a posunutí předvalku do záběru. Poutní válce jsou otáčeny proti směru válcování, tedy proti výběhu výrobku ze stolice. Jakmile přijde dutý předvlek do styku se záběrovým úsekem kalibru, trn se začne posouvat nazpět a odvalováním se předvlek vyválcuje na trubku požadovaných rozměrů, daným průměrem kalibru a daným vnitřním průměrem, který zajišťuje poutní trn. Odválcovaná část trubky se přitom neustále posouvá ve směru válcování. Podávací zařízení následně otočí trn s předvalkem o  $90^\circ$  podél osy, a přitom další záběr při podání o míru „m“ začne v místě příčného obrysu předvalku. Tato místa jsou oproti předchozímu záběru otočena o  $90^\circ$ . Válce se proti sobě natočí výběhovým kalibrem a zpětný posuv trnu se zastaví. Přitom je podávací zařízení připraveno k dalšímu posuvu provlaku do záběru, když jsou válce natočeny prázdným kalibrem. Tyto podélné deformace probíhají ve šroubovici a dochází k velkému prodloužení předvalku, což umožňuje výrobu velmi dlouhých trubek.



### Délka posuvu bývá:

- u menších tratí 8- 20 mm;
- u středních 15- 35 mm.

Po odválcování jsou trubky dopraveny na chladník, kde se sníží jejich teplota pro potřeby následující normalizace v krokové peci, kde dojde k rovnoměrnému prohřátí po celé délce trubky. Provádí se z důvodu, že po odválcování trubky na poutní stolici má hlavní a patní část trubky zcela odlišné teploty. Po dostatečném ohřátí putují trubky kalibračními stojany, kde získají přesné vnější rozměry [3,4].

## **2.2 Kalení ocelí a popis kalicí soustavy**

Zušlechtnění lze vyjádřit jako tepelné zpracování ocelí kalením a následným popouštěním, přičemž cílem tohoto zpracování je zvýšení tvrdosti a pevnosti, nebo získání příznivého poměru mezi pevnostní úrovní oceli a její houževnatosti. Abychom dosáhli požadovaných vlastností, je nutné znát strukturu, konkrétně množství a vlastnosti jednotlivých fází, resp. strukturních složek, jejich tvar, velikost a rozložení.

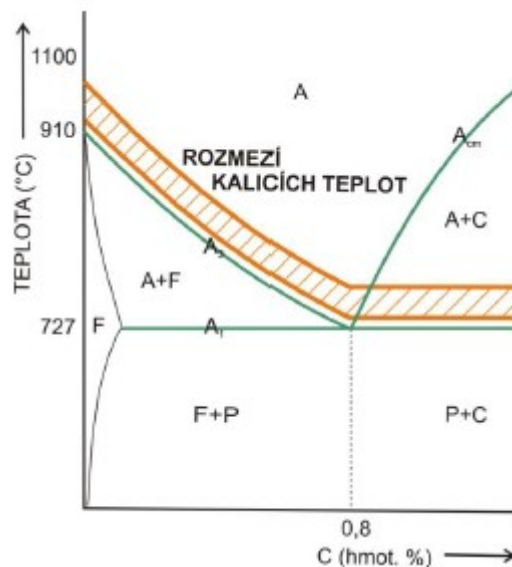
Jedná se tedy o technologický proces, při kterém vzniká nerovnovážná struktura tvořená přednostně martenzitem, nebo martenzitem a bainitem. Po následném popouštění je struktura tvořená obvykle popouštěným martenzitem nebo bainitem v povrchové vrstvě, a pod touto vrstvou může být struktura tvořena i perlitem a feritem v závislosti na tloušťce materiálu, jeho prokalitelnosti a podmínkách kalení. Může se jednat i o směs těchto fází, resp. strukturních složek. Při vysokých popouštěcích teplotách se struktura rovnovážnému stavu pouze přibližuje [5].

### **Kalení**

Procesem kalení rozumíme ohřev materiálu na teplotu  $A_{c3}$ , resp. nad  $A_{c1}$ , následovaný výdrží na této teplotě a rychlým ochlazením, kterým dosáhneme vznik nerovnovážné struktury. Tímto rychlým ochlazením dojde k přeměně austenitu na martenzit nebo bainit. Pokud dosáhneme při daném ochlazení rychlosti větší, než je kritická, mluvíme o zakalitelnosti (dosažení max. tvrdosti). Ta je zjednodušeně závislá pouze na obsahu rozpuštěného uhlíku v austenitu. Schopnost materiálu dosáhnout dané tvrdosti i v určité podpovrchové vrstvě nazýváme prokalitelnost [6,7].

## Ohřev

Podeutektoidní oceli se zpravidla ohřívají na teplotu cca 20-40 °C nad teplotu  $A_{c3}$ , kdežto u ocelí nadeutektoidních cca o 20 °C nad teplotou  $A_{c1}$ . Rozmezí kalících teplot je znázorněno na **Obr. 7**. Pro oceli nadeutektoidní slitinové, s vyšším obsahem prvků, které tvoří karbidy, se kalící teplota volí na základě rozpustnosti těchto karbidů. U rychlořezných ocelí se např. volí až teplota 1320 °C. Pokud podkročíme vhodnou kalící teplotu, dojde před vznikem martenzitu ke vzniku feritu, a tím k poklesu tvrdosti, a také dojde k nedostatečné homogenizaci austenitu. Při překročení vhodné teploty kalení, nebo delší době výdrže na této teplotě, dojde k růstu austenitického zrna, což se projeví po ochlazení vznikem hrubých martenzitických jehlic a zvýšením množství zbytkového austenitu ve struktuře, což má za následek také pokles tvrdosti. Hrubé martenzitické jehlice budou také snižovat houževnatost materiálu [6,7].



**Obr. 7** Rozmezí kalících teplot v diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C [8].

## Ochlazování

Pokud chceme dosáhnout martenzitické struktury, je nutné, abychom vhodně ohřátou ocel ochladili rychlostí větší, než je kritická rychlost ochlazování. Tím dosáhneme potlačení transformace austenitu na perlit nebo bainit. Kritická ochlazovací rychlost klesá při vyšších obsahách uhlíku a zejména slitinových prvků. Na pokles kritické ochlazovací rychlosti má vliv také velikost austenitického zrna a kalící teplota. Pokud dojde ke zvýšení ochlazovací rychlosti nad kritickou, dojde jen k malému zvýšení tvrdosti, z důvodu sníženého obsahu zbytkového austenitu [6,7].

Skutečná rychlost ochlazování pak závisí na:

- tepelné vodivosti oceli;
- měrném teple oceli;
- velikosti a tvaru kalených dílů;
- ochlazovací schopnosti kalícího prostředí [6].

### **Prokalitelnost**

Rychlost ochlazování na povrchu materiálu je vyšší než uprostřed. Pokud chceme dosáhnout prokalení i uvnitř materiálu, musíme dosáhnout překročení kritické rychlosti ochlazování i zde. Nedosáhneme-li kritické rychlosti ochlazování materiálu v jeho středu, bude martenziticky zakalená pouze povrchová vrstva a uvnitř bude bainit, event. i ferit a perlit. I tento stav je však u určitých součástí žádoucí, neboť takto např. povrch odolává otěrům se zachováním houževnatého středu. U konstrukčních ocelí je ale cílem dosažení určité tvrdosti i v jeho středu, proto musíme volit takovou ocel, která bude mít vhodnou kritickou ochlazovací rychlost, neboť zvýšení tvrdosti probíhá i při přeměně austenitu nejen na martenzit, ale i bainit. Za prokalitelný se obvykle považuje takový materiál, který má ve svém jádru min. 50 % martenzitu [6,7].

### **Druhy kalení**

Kalení můžeme rozdělit na:

#### **1) Přímé kalení**

- plynulé ochlazování materiálu po austenitizaci do kalícího prostředí- voda, olej atd.;
- je nejpoužívanější;
- u vysokolegovaných ocelí dojde k zakalení i volně na vzduchu;
- technologicky nenáročné, nižší cena;
- vzniká vysoké vnitřní pnutí- praskání.

#### povrchové kalení

- dosažení tvrdé povrchové vrstvy se zachováním houževnatého jádra;
- převážně uhlíkové oceli;
- použití např. u ozubených kol, čepů atd.;
- ohřev vyšší rychlosti- indukční, plamenem;
- ochlazení nadkritickou rychlostí;
- hloubka zakalení 0,5 – 3 mm (větší hloubky u slitinových ocelí).

**2) Přetržité kalení-** použití dvou kalících prostředí o různé intenzitě ochlazování nebo různé teplotě lázně, jehož účelem je snížení vnitřního pnutí a deformace [8,9].

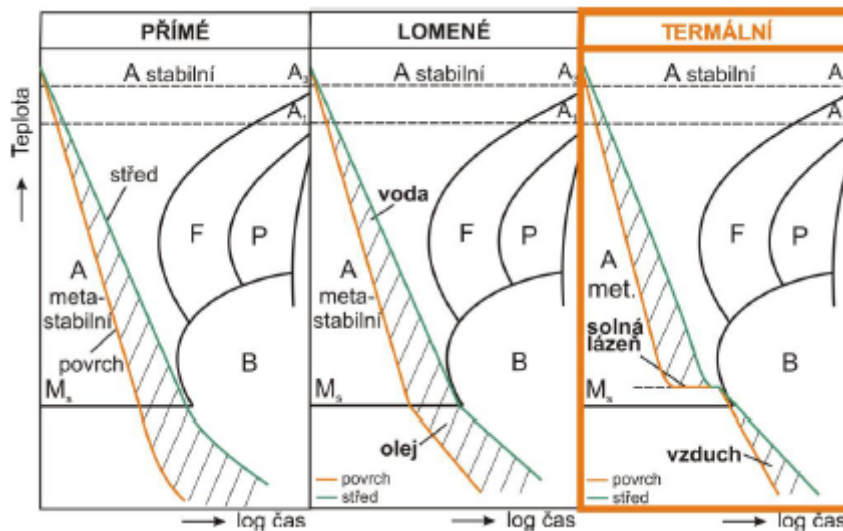
a) Lomené kalení

- ochlazení ve dvou kalících prostředích;
- rychlé ochlazení nad teplotu  $M_s$  v prvním kalícím prostředí a rychlé přenesení do druhého kalícího prostředí, kde dojde k ochlazení materiálu pod teplotu  $M_s$  dříve, než vznikne bainit;
- struktura tvořená martenzitem s nižším vnitřním pnutím ve srovnání s přímým kalením;
- u legovaných ocelí a tvarově složitějších a objemnějších součástí (např. lomené hřídele).

b) Termální kalení

- rychlé ochlazení materiálu v kalícím prostředí o teplotě vyšší než  $M_s$ ;
- výdrž na teplotě pro vyrovnání teplot mezi povrchem a středem materiálu;
- výdrž musí být kratší, než je doba počátku bainitické přeměny;
- poté se materiál vyjme z kalící lázně a chladne na vzduchu pod teplotu  $M_s$ ;
- struktura martenzitická s minimálním vnitřním pnutím;
- u legovaných ocelí s delší inkubační periodou vzniku bainitu, u tenkostěnných a tvarově složitějších součástí z uhlíkových nebo nízkolegovaných ocelí.

Na **Obr. 8** lze pozorovat rozdíly při ochlazování vybraných typů kalení [8].



**Obr. 8** Schéma vybraných typů kalení [8].

c) Izotermické kalení

- teplota termální lázně= rozmezí teplot bainitické přeměny a teplotou  $M_s$  cca 300–400 °C;
- po ukončení bainitické přeměny následuje ochlazení volně na vzduchu;
- minimální teplotní a strukturní pnutí;
- většinou se dále nepopouštějí;
- pro menší součásti nízkolegovaných ocelí;
- struktura je tvořená martenzitem, bainitem a zbytkovým austenitem.

d) Kalení se zamrazováním

- u ocelí s teplotou  $M_F$  pod bodem mrazu;
- přenesení zakaleného předmětu do prostředí s teplotou pod bodem mrazu;
- směs lihu a tuhého oxidu uhličitého pro zmrazení do – 80 °C;

- tekutý dusík pro zmrazení až do  $-196\text{ °C}$  pro vysoko legované oceli;
- cílem je snížení obsahu zbytkového austenitu= zvýšení tvrdosti a rozměrové stálosti;
- celý průřez se musí ochladit pod teplotu  $M_F$ ;
- následující výdrž na teplotě není nutná;
- měřidla, řezné a rychlořezné nástroje [8,9].

### **Kalící prostředí**

Pro dosažení požadovaných vlastností a minimalizace deformací (trhlin) zpracovávaného materiálu hraje důležitou roli volba vhodného kalícího média. Taktéž je důležitá z pohledu ekonomiky. Kalící média lze rozdělit na:

- a) při kalení nemění své skupenství.
- b) při kalení mění své skupenství [10,11].

#### Typy kalících médií:

**Voda-** jedná se o médium, které při kalení mění své skupenství a používá se nejčastěji při teplotách do  $40\text{ °C}$ . Používá se především při kalení uhlíkových podeutektoidních ocelí s malými obsahy legur. Výhodou je nízká cena a vysoká kalící intenzita, což nám umožňuje dosažení vysokých tvrdostí. Naopak její nevýhodou je vznik koroze, která se dá do určité míry ovlivnit přidávkou různých inhibitorů. Další nevýhodou je vznik vysokých vnitřních pnutí a vznik defektů a nerovnoměrná tvrdost [11,12].

**Kalící oleje-** také mění své skupenství během kalení, používá se při teplotách okolo  $40\text{--}150\text{ °C}$ . Používá se pro téměř všechny druhy ocelí, kromě vysoce legovaných ocelí, které se kalí v plynných médiích, a nízkouhlíkových nízkolegovaných ocelí, které se kalí v médiích o větší intenzitě kalení. Hlavními výhodami je nízká pravděpodobnost vzniku kalících trhlin a oproti vodě nevzniká koroze. Lze jej použít také ve vakuových pecích. Nevýhodami olejů jsou vyšší finanční náklady z důvodu možného vzniku požárů a ekologických likvidací. Taktéž vznikají olejové páry, které je nutno likvidovat pomocí odsávání a filtrace. Po vytažení materiálu se musí omýt [11,12].

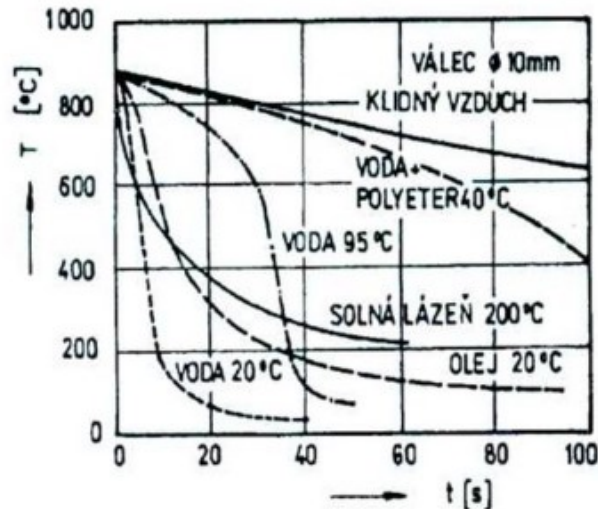
**Kalící soli-** jedná se o médium, které nemění v průběhu kalení své skupenství. Jde většinou o roztavenou směs dusitanů a dusičnanů při teplotách  $140\text{--}400\text{ °C}$ . Používají se zejména při termínlním nebo izotermickém kalení. Používají se pro speciální jakosti ocelí. Mezi výhody

lze zařadit nízké riziko vzniku defektů, provozní nenáročnost a částečnou regenerovatelnost pro další použití. Kalící soli mají nízkou kalící intenzitu. Nevýhodou je i vznik škodlivých výparů, které je nutné odvětrávat a postupná degradace nádob s tímto médiem. Taktéž jako u olejů se musí materiál po vytažení omývat. Dále je také nutné takové médium ekologicky likvidovat. Z výše uvedených důvodů vyplývá i vyšší cena [11,12].

**Kalící plyny**– kalící médium, neměnicí své skupenství během kalení. Používají se plyny jako argon, helium, a dusík především při pokojových teplotách ale i při  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Používá se převážně u nástrojových ocelí a speciálních jakostí z důvodu velmi vysokých pořizovacích i provozních nákladů. Taktéž jako u solí je nutné provádět pravidelnou výměnu nádob z důvodu jejich degradace. Kalící plyny mají velmi malou intenzitu kalení a regulovat jí lze jen použitým tlakem. Výhodami jsou nízké riziko vzniku trhlin a možnost použití ve vakuových pecích [11,12].

**Kalící polymery**– během kalení mění své skupenství. Jedná se o směs vody, polymerů, inhibitorů koroze a dalších různých aditiv při použití okolo  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Používají se pro kalení mnoha ocelí. Výjimku tvoří vysokolegované oceli v plynných médiích. Nejčastěji se používají polymery na bázi polyvinylpyrrolidon (PVP) nebo polyvalkylenglykolu (PAG). Jako výhody lze uvést nízké riziko vzniku trhlin, ekologickou nezávadnost, bez nutnosti oplachování, potlačení koroze, velký rozsah intenzity kalení a nízké pořizovací a provozní náklady. Nevýhodami jsou možné napadení vodného roztoku v důsledku anaerobních bakterií, nutná kontrola kalící křivky, musí se hlídat koncentrace z důvodu odpařování vody a musí se zajistit antikorozi ochrana. Intenzita kalení se mění dle teploty [11,12].

Na **Obr. 9** lze pozorovat ochlazovací schopnost různých médií v závislosti na teplotě.



Obr. 9 Srovnání ochlazovací schopnosti kalících médií [13].

### Popis tunelové pece a kalící soustavy na VT

Proces kalení na VT je prováděn pomocí tunelové pece (viz Obr. 10), kde se materiál ohřeje na kalící teplotu. Ohřev je prováděn za pomoci 36 ks bočních hořáků ve čtyřech zónách v atmosféře zemního plynu. Provozní teplota je v rozmezí 800 až 1060 °C. Tato pec je dlouhá 31,5 m a široká 1,2 m. Vstupní otvor má průměr 700 mm, což s ohledem na vyráběný sortiment umožňuje zušlechtit trubky od průměru 88,9 do 406 mm s tloušťkou stěny od 5 do 60 mm a v délkách 4 až 16 m. Trubky jsou přepravovány v peci za pomoci chlazených válečků rychlostí 4 až 13 mm/s. V této peci lze provádět ohřev na teplotu normalizačního žíhání a kalení. Co se týče kalení, tak používané způsoby ochlazování jsou:

- volně na vzduchu;
- chemicky upravenou vodou z uzavřeného systému za pomoci kalícího kolektoru.

Na konci tunelové pece přechází materiál přes termo-tunel, který slouží k zamezení vstříkávání vody a vodních par do tunelové pece v průběhu kalení, do kalící soustavy, která je tvořena dvěma typy kolektorů:

- č.1 pro průměry do 273 mm;
- č.2 pro průměry od 273 mm do 406 mm.

Kolektory mají tři sekce, které jsou řízeny řídicím počítačem samostatně dle tloušťky stěny a chemického složení dané oceli. Kalící soustava je tvořena uzavřeným okruhem  
Bc. et Bc. Chovanec, M. *Vývoj zušlechtění ocelí C110 a T95 dle API 5CT*. Diplomová práce. VŠB-TU Ostrava, 2019.

chladicí vody se dvěma nádržemi. Jedna odokujovací spodní nádrž a horní nádrž s čistou chladicí vodou. Součástí jsou i tři čerpadla a ventilátorová chladicí věž, zaručující dosažení max. teploty vody 37 °C s možností průběžného dopouštění vody a zajištění dostatečného tlaku max. 10 Bar, filtrací vody a možností chemického čištění. Výjezdová rychlost se pak pohybuje v sekcích 3 a 4 v rozmezí 10 až 70 mm/s. Kalicí kolektor je znázorněn na **Obr. 11** [14].



**Obr. 10** Vlevo vstup do tunelové pece, vpravo kalicí zařízení

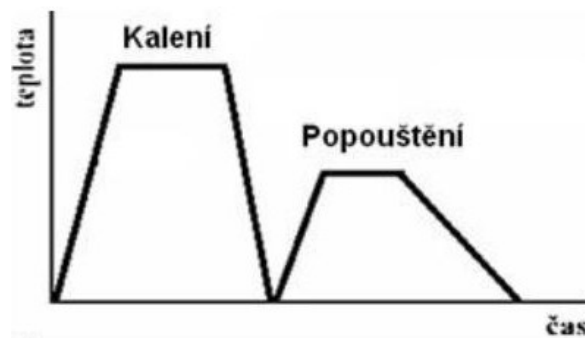


**Obr. 11** Kalicí kolektor.



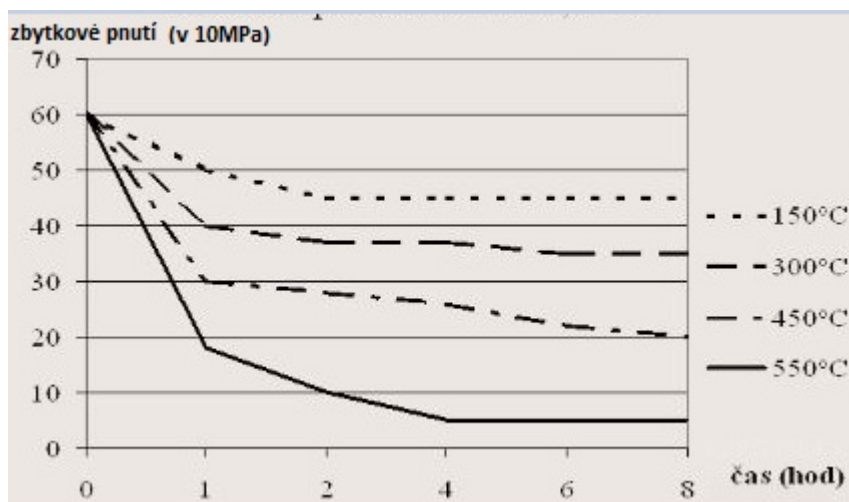
## 2.3 Popouštění ocelí a popis krokové pece.

Popouštění je proces tepelného zpracování, který spočívá v ohřevu materiálu na popouštěcí teplotu, výdrži na této teplotě a v pomalém ochlazování. Kombinaci martenzitického kalení a popouštění nazýváme zušlechťování. Obecné schéma zušlechťování je znázorněno na **Obr. 12** [15].



**Obr. 12** Obecné schéma zušlechťování [15].

Cílem popouštění je zejména odstranění vnitřního pnutí, vzniklého předchozím kalením za zvýšení houževnatosti, tedy i vhodného poměru pevnostních charakteristik oceli a její houževnatosti. Obr. 13 uvádí vliv teploty a času na vnitřní pnutí vybrané oceli [16].



**Obr. 13** Vliv teploty a času na zbytkové vnitřní pnutí u oceli s 0,3 hm. % C [16].

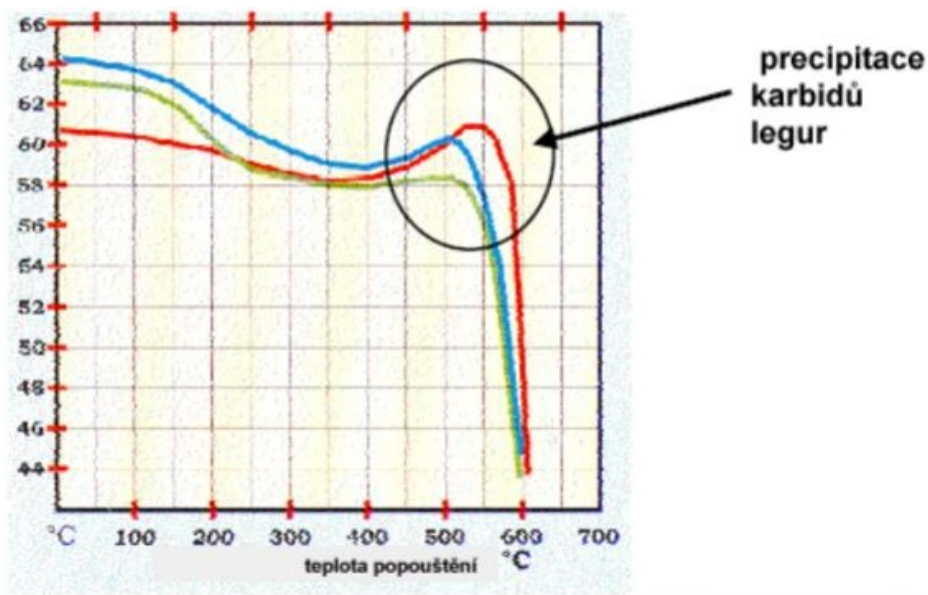
K rozpadu zbytkového austenitu dochází při teplotách 200 až 300 °C, kdy se mění na dolní bainit.

Popouštění můžeme rozdělit dle Daďourka [17] na:

- a) Stabilizační popouštění, které probíhá při teplotách 100 až 180 °C a výdrži 30 až 50 hodin;

- b) Nízké popouštění, při teplotách 120 až 250 °C po dobu výdrže 1 až 2 hodiny;
- c) Střední popouštění, při teplotách 350 až 450 °C;
- d) Vysoké popouštění, při 450 až 650 °C po několik hodin. Nižší tvrdost a pevnost (jako u feriticko-perlitické struktury) s vyšší houževnatostí.

Na průběh a výsledek popouštění mají vliv i legující prvky. Konkrétně Cr, W, Mo, V, Co, Si, které zpomalují růst karbidů až do teploty 500 °C. Nad teplotu 450 °C podporují tvorbu karbidů legur místo cementitu a vytváří nové karbidy typu např. VC, Mo<sub>2</sub>C, TiC, W<sub>2</sub>C, což jsou velmi jemnozrnné karbidy. Vznik těchto karbidů je spojen se vznikem sekundární tvrdosti, viz. **Obr. 14** [17].



**Obr. 14** Schéma sekundární tvrdosti [16].

Popouštění můžeme dále rozdělit na 4 stádia podle výše teploty:

- 1.) V prvním stádiu, které se pohybuje za teplot do 200 °C, dochází k rozpadu tetragonálního martenzitu na kubický za difúze uhlíku z přesyceného tuhého roztoku do míst s větším množstvím dislokací. Dochází k částečnému poklesu vnitřního pnutí.
- 2.) Druhé stádium probíhá při teplotách od 200–300 °C. Zbytkový austenit se rozpadá na bainit, což způsobuje zvětšení objemu popouštěného materiálu.
- 3.) Třetí stádium probíhá od 250 do 500 °C. V rozmezí teplot 250–400 °C vytváří cementit tyčové útvary. Při teplotách nad 400 °C jsou tyto útvary kruhové. Z pohledu vlastností dochází k výraznému snížení tvrdosti, objemu a vnitřnímu pnutí, za růstu tažnosti a houževnatosti. Může zde vzniknout nízkoteplotní popouštěcí křehkost.

4.) Poslední stádium se pohybuje nad teplotou 500 °C. Zrna cementitu a feritu hrubnou. U feritu může dojít k rekrystalizaci. Dochází k velkému poklesu tvrdosti a pevnosti s nárůstem houževnatosti. Kubický martenzit se při teplotách 550–700 °C rozpadá na sorbit, což je struktura, tvořená z feritické matrice a cementitu. U legovaných ocelí se při tomto stádiu může vyvinout sekundární tvrdost. Struktura je při nižších teplotách tvořena sorbitem a při vyšších teplotách se popisuje jako feriticko-karbidická směs. [18].

S rostoucí teplotou při popouštění dochází k poklesu mechanických vlastností s růstem houževnatosti. Tento jev podporuje existence nečistot jako např. P, As, Sn atd. Rozlišujeme dva typy popouštěcí křehkosti:

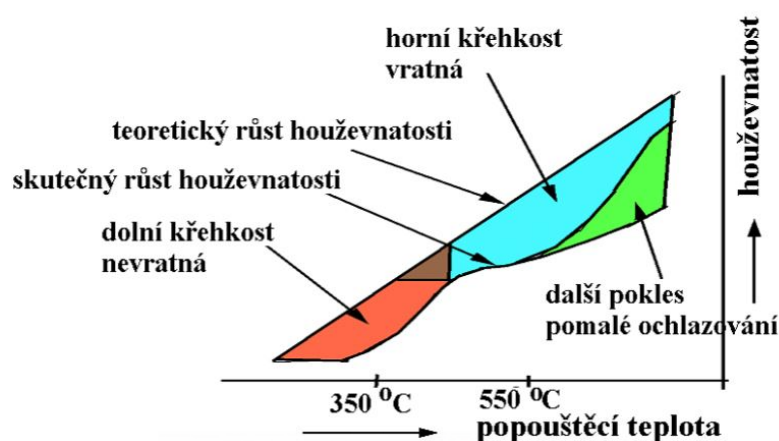
### 1.) Nízkoteplotní popouštěcí křehkost

- při teplotách 250–400 °C;
- při dosažení teploty cca 300 °C je houževnatost srovnatelná s nepopuštěnou ocelí;
- křehnutí je způsobeno vznikem tenkých lamel cementitu, vyloučené po hranicích původních austenitických zrn;
- nevratný proces;
- vzniká u nelegovaných i legovaných ocelí.

### 2.) Vysokoteplotní popouštěcí křehkost.

- při teplotách 450–600 °C;
- vzniká při popouštění nad teplotu 600 °C při pomalém ochlazení;
- je zapříčiněna segregací nečistot P, Sb, Sn, S atd. na hranicích zrn;
- křehkost podporují i prvky Ni, Mn, Cr atd.;
- přídavek 0,2–0,3 hm % Mo snižuje křehkost;
- vratný jev [18].

Na Obr. 15 je vidět schéma vzniku popouštěcí křehkosti v závislosti na teplotě.



Obr. 15 Popouštěcí teplota [17].

### **Popis krokové pece na VT**

Na této peci je možno žíhat trubky v rozměrech od průměru 60 mm do průměru 406,4 mm, s tloušťkou stěny do 60 mm včetně, v délkách 4 až 16 m. Na **Obr. 16** je znázorněná kroková pec. Na krokové peci lze použít tyto druhy TZ:

- normalizační žíhání;
- žíhání na mechanické hodnoty;
- žíhání na snížení pnutí;
- žíhání na měkko;
- žíhání na měkko k docílení globulárního perlitu se zárukou mikrostruktury;
- normalizační žíhání a popouštění;
- popouštění;
- speciální tepelné zpracování.

Ochlazování probíhá volně na vzduchu.

### **Základní technická data pece:**

#### rozměry pracovního prostoru:

- výška	2 010 mm
- šířka	16 820 mm
- délka	4 200 mm
- plocha nístěje	60 m <sup>2</sup>

#### rozměry vstupního otvoru:

- výška	600 mm
- šířka	500 mm
- palivo	zemní plyn
- provozní teplota	550 – 1 100 °C

#### hořáky

- počet	19 ks
- uspořádání	boční oboustranné
- počet zón	3

Zakalené trubky je nutno nasadit nejpozději do 24 hodin k popouštění. V závislosti na délce trubek se tyto sází v jedné nebo ve dvou řadách (v délkách do 8 m) [14].



**Obr. 16.** Kroková pec.

## 2.4 Základní jakosti ocelí dle API 5CT

Norma API 5CT specifikuje technické dodací podmínky pro ocelové trubky (pažnice, čerpací trubky a krátké spojnice), nátrubkové tyče, nátrubkový materiál a doplňkový materiál. Dále stanovuje požadavky pro 3 úrovně výrobních specifikací- PSL-1, PSL-2 a PSL-3. Požadavky pro PSL-1 jsou základem této normy. Požadavky, které definují rozdílné úrovně standardních technických požadavků pro PSL-2 a PSL-3, jsou uvedeny u všech jakostí vyjma H40, L80 9Cr a C110 [19].

Tuto normu lze aplikovat pro spojení v souladu s API 5B (Závitování, měření a kontrola závitů pažnic, čerpacích trubek a naftovodných trubek):

- pažnice s krátkým oblým závitem SC;
- pažnice s dlouhým oblým závitem LC;
- pažnice se závitem buttress BC;
- nepřechované čerpací trubky NU;
- vně přechované čerpací trubky EU;
- čerpací trubky integrál IJ.

Pro tyto druhy spojení stanovuje tato norma technické dodací podmínky pro nátrubky a ochranu závitu, případně další doplňující požadavky pro zvýšenou odolnost spojení proti propustnosti [19].

Jakosti, které tato norma zahrnuje, jsou H40, J55, K55, N80, L80, C90, T95, R95, P110, C110, Q125 [19].

Jakosti vyráběné dle této normy, musí mít jemnozrnnou strukturu, s obsahem některého z prvků, které zjemňují zrno, jako jsou např. Al, Nb, V nebo Ti. Jakosti T95 a C110 se používají především v kyselém prostředí. Dále musí být vyrobené jako bezešvé nebo elektricky svařované. Materiál pro nátrubky, nátrubkové tyče a nátrubkový materiál musí být vyroben bezešvým způsobem. V **Tab. 2** jsou uvedeny vybraná data výroby a tepelného zpracování základních jakostí dle API 5CT. Jak lze vidět, tak jakosti T95 a C110, které jsou předmětem vývoje této práce musí být vyrobené bezešvým způsobem.

U jakostí J55 a K55 není tepelné zpracování povinné. U jakosti N80 Typ1 musí být stav normalizovaný, nebo normalizovaný a dále popouštěný. Jakosti N80Q a R95 musí být kaleny a popouštěny. U jakostí L80, C90, T95 a C110 musí být potvrzeno, že popouštění zaručí dosažení minimální popouštěcí teploty na trubce [19].

**Tab. 2** Způsob výroby a tepelné zpracování ocelí dle API 5CT [19].

Jakost	Typ	Zp. výroby	Tepelné zpracování	Min. popouštěcí teplota [°C]
H40	-	S,EW	-	-
J55	-	S,EW	V,M,Q	-
K55	-	S,EW	V,M,Q	-
N80	1	S,EW	V,M	-
N80	Q	S,EW	Q	-
R95	-	S,EW	Q	538
L80	1	S,EW	Q	566
L80	9Cr	S	Q	593
L80	13Cr	S	Q	593
C90	1	S	Q	621
T95	1	S	Q	649
C110	-	S	Q	649
P110	-	S,EW	Q	-
Q125	1	S,EW	Q	-

#### Vysvětlivky:

S..... bezešvé  
 EW.... elektricky svařované  
 V..... normalizované  
 M..... normalizované a popouštěné  
 Q..... kalené a popouštěné

V **Tab. 3** jsou uvedeny maximální obsahy důležitých prvků, které musejí dané jakosti obsahovat. Jak lze vidět v tabulce, tak u jakostí H40, J55, K55, N80 a P110 je stanoven normou API 5CT pouze maximální obsah prvků fosforu a síry. U ostatních jakostí jsou stanoveny již také obsahy uhlíku, manganu, molybdenu, chromu, niklu a mědi. U jakostí L80 a R95 také křemíku.

**Tab. 3** Chemické složení jakostí ocelí dle API 5CT (údaje v hm. %) [19].

Jakost	Typ	C [max.]	Mn [max.]	Mo [max.]	Cr [max.]	Ni [max.]	Cu [max.]	P [max.]	S [max.]	Si [max.]
H40	-	-	-	-	-	-	-	0,03	0,03	-
J55	-	-	-	-	-	-	-	0,03	0,03	-
K55	-	-	-	-	-	-	-	0,03	0,03	-
N80	1	-	-	-	-	-	-	0,03	0,03	-
N80	Q	-	-	-	-	-	-	0,03	0,03	-
R95	-	0,45	1,9	-	-	-	-	0,03	0,03	0,45
L80	1	0,43	1,9	-	-	0,25	0,35	0,03	0,03	0,45
L80	9Cr	0,15	0,3-0,6	0,9-1,1	8-10	0,5	0,25	0,02	0,01	1,0
L80	13Cr	0,15-0,22	0,25-1,0	-	12-14	0,5	0,25	0,02	0,01	1,0
C90	1	0,35	1,2	0,25-0,85	1,5	0,99	-	0,02	0,01	-
T95	1	0,35	1,2	0,25-0,85	0,4-1,5	0,99	-	0,02	0,01	-
C110	-	0,35	1,2	0,25-1	0,4-1,5	0,99	-	0,02	0,005	-
P110	-	-	-	-	-	-	-	0,03	0,03	-
Q125	1	0,35	1,35	0,85	1,5	0,99	-	0,02	0,01	-

**Tab. 4** obsahuje mechanické vlastnosti dané normou API 5CT jako mez kluzu, mez pevnosti, tvrdost a celkové prodloužení pod zatížením. Hodnota tvrdosti je stanovena pouze u jakostí L80, C90, T95 a C110.

**Tab. 4** Mechanické vlastnosti jakostí ocelí dle API 5CT [19].

Jakost	Typ	Celkové prodloužení pod zatížením [%]	Mez kluzu [Mpa]	Mez pevnosti min. [Mpa]	Tvrдость	
					HRC	HBW
H40	-	0,5	276-552	414	-	-
J55	-	0,5	379-552	517	-	-
K55	-	0,5	379-552	655	-	-
N80	1	0,5	552-758	689	-	-
N80	Q	0,5	552-758	689	-	-
R95	-	0,5	655-758	724	-	-
L80	1	0,5	552-655	655	23	241
L80	9Cr	0,5	552-655	655	23	241
L80	13Cr	0,5	552-655	655	23	241
C90	1	0,5	621-724	689	25,4	255
T95	1	0,5	655-758	724	25,4	255
C110	-	0,7	758-828	793	30	286
P110	-	0,6	758-965	862	-	-
Q125	1	0,65	862-1034	931	-	-



### 3 Experimentální část.

V této části práce se věnuji postupům zušlechťení a vyhodnocení mechanických vlastností v závislosti na zvoleném režimu TZ, vedoucímu k dosažení hodnot uvedených v mezinárodní normě API 5CT, která stanovuje limity pro mechanické hodnoty a základní chemické složení zkoumané oceli C110 a následně dalším zušlechťením na ocel T95.

Pro tento výzkum byly použity bezešvé trubky o dvou rozměrech a dvou tavných. Trubky byly vyrobeny klasickým způsobem, a to ohřevem vsázky v karuselové peci s otočnou nístějí na danou teplotu s výdrží několika hodin. Po vytažení z pece byl proveden ve středu válcové vsázky důlčik pro potřeby děrování. Po vyděrování na děrovací stolicí byl do dutého předvalku nasunut poutní trn o daném průměru a takto postupuje na poutní stolicí, kde pravidelnými rázy mezi vodorovně uložené poutní válce vzniká trubka o daném průměru a dané tloušťce stěny. Následně trubka putuje na chladník, kde se ochladí na požadovanou teplotu a následuje postup do normalizační pece pro zrovnoměnění chemického složení a mikrostruktury. Po vytažení z normalizační pece prochází trubka kalibračními stojany a je vytažena na chladník, kde se chladí vodní sprchou nebo volně na vzduchu. Před daným zušlechťením postupují trubky na operace jako ražení, řezání, NDT kontrolu a revizi.

Režim tepelného zpracování byl navržen na základě simulací ve firmě Materiálový a metalurgický výzkum s.r.o. Ostrava, ve spolupráci s technologií Válcovny trub a praktických zkušeností těchto pracovníků.

#### 3.1 Popis zkoumaného materiálu a jeho chemické složení.

Tyto vyvíjené jakosti C110 a T95 jsou vyrobeny z oceli pod označením C95/110 a používají se, jak už vyplývá z normy API 5CT, v petrolejářském průmyslu, zejména pro použití v kyselém prostředí. Z této normy také vyplývá, že trubky z těchto dvou jakostí musí být vyrobeny jako bezešvé. V **Tab. 5** jsou uvedeny hodnoty mechanických vlastností dané výše uvedenou normou. Jakost C110 představuje vyšší pevnostní třídu oproti jakosti T95.

**Tab. 5** Požadavek na mechanické hodnoty jakostí C110 a T95 uvedené v API 5CT.

C110			
R <sub>m</sub> [Mpa]	R <sub>e</sub> [Mpa]	A5 [%]	HRC
min. 793	758-828	14-16	max. 30
T95			
R <sub>m</sub> [Mpa]	R <sub>e</sub> [Mpa]	A5 [%]	HRC
min. 724	655-758	15-18	max. 25,4

Z chemického složení oceli uvedeného v **Tab. 6** vyplývá, že se jedná v podstatě o středně uhlíkovou ocel, která je omezena horní hranicí u prvků jako uhlík, mangan, nikl, fosfor a síra.

**Tab. 6** Požadavek na chemické složení jakostí C110 a T95 uvedené v API 5CT v hm. %.

C110								
C	Mn	Mo	Cr	Ni	Cu	P	S	Si
max. 0,35	max. 1,20	0,25- 1,00	0,40 - 1,50	max. 0,99	-	max. 0,02	max. 0,005	-
T95								
C	Mn	Mo	Cr	Ni	Cu	P	S	Si
max. 0,35	max. 1,20	0,25 - 0,85	0,40 - 1,50	max. 0,99	-	max. 0,02	max. 0,01	-

V **tab. 7 a 8** je uvedeno chemické složení oceli, která je předmětem výzkumu ve dvou tavebách. Z tabulek vyplývá, že byla použita ocel spíše nízkouhlíková, legovaná manganem, chromem, molybdenem a mikrolegovaná vanadem, titanem a bórem. Chemické složení obou taveb plně vyhovuje normě API 5CT.

**Tab. 7** Chemické složení tavy T73128 v hm. %.

C	Mn	Mo	Cr	Ni	Cu	P	S	Si
0,238	1,05	0,269	0,76	0,07	0,04	0,010	0,005	0,226
V	Ti	B	W	Co	Al	N	Nb	Sn
0,063	0,0177	0,0019	0,03	0,004	0,034	0,0088	0,002	0,003

**Tab. 8** Chemické složení tavy T73129 v hm. %.

C	Mn	Mo	Cr	Ni	Cu	P	S	Si
0,244	1,03	0,268	0,73	0,05	0,04	0,017	0,003	0,194
V	Ti	B	W	Co	Al	N	Nb	Sn
0,060	0,0265	0,0017	0,01	0,004	0,026	0,0111	0,002	0,002

### 3.2 Postup zušlechtění jakosti C110 a výsledky mechanických zkoušek.

#### Dané zušlechtění můžeme rozdělit do tří etap:

V 1. etapě bylo zušlechtěno celkem 8ks trub. Z toho 4ks byly o průměru 244,48 x 11,05 mm, po dvou kusech z tavby T37128 a T37129 a 4ks o průměru 269,88 x 21,06 mm taktéž po dvou kusech z tavby T37128 a T37129. Režim prvního zušlechtění je uveden v **Tab. 9**. Teplota austenitizace byla zvolena pro oba rozměry stejná, a to 840-860 °C. Pojezdová rychlost v tunelové peci v zónách 1-4 byla 8 mm/s a výjezdová rychlost 50 mm/s u průměru 244,48 mm. Pro průměr 269,88 mm to bylo 6 mm/s a rychlost výjezdová 40 mm/s. Teplota 1. popouštění byla pro oba rozměry 620-630 °C, při výdrži na teplotě u stěny 11,05 mm to bylo 25 min. a u silnější stěny 21,05 mm to bylo 40 min.

**Tab. 9** Režim prvního kalení+ popouštění jakosti C110.

Průměr [mm]	Tl. stěny [mm]	Tavba	Č. trubky	Tunelová pec	Kroková pec	
				Kalení	Popouštění jak. C110	
				Teplota [°C]	Teplota [°C]	Výdrž na teplotě [min.]
				1. popouštění		
244,48	11,05	T37128	22484	840 - 860	620 - 630	25
			22486			
		T73129	22488			
			22489			
269,88	21,06	T37128	25161	840 - 860	620 - 630	40
			25162			
		T73129	25163			
			25165			

Mechanické hodnoty dosažené tímto režimem však nebyly v souladu s mezinárodní normou API 5CT, konkrétně byla překročena tvrdost HRC a rovněž mez kluzu (hodnoty označené červeně). Pevnost i tažnost byly v souladu s danou normou. Výsledky mechanických hodnot jsou uvedeny v **Tab. 10**.

**Tab. 10** Dosažené mechanické vlastnosti po prvním režimu kalení a popouštění.

Č. trubky	R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>e</sub> [MPa]	A5 [%]	Z [%]	KV [J]	HRC *
22484	1002	931	23,4	53	43	30,7 - 32,5
22486	983	928	23,2	51	48	31,8 - 32,3
22488	986	937	22,2	52	61	33,5 - 32,0
22489	956	902	22,6	50	68	30,5 - 31,8
25161	1004	937	20,7	63	80	29,2 - 32,9
25162	961	892	35,6	58	81	29,2 - 31,1
25163	958	890	20,3	68	78	29,1 - 32,6
25165	962	892	20,1	66	79	29,9 - 30,9

\* tvrdost HRC rozpětí hodnot od-do.

Z tohoto důvodu bylo přistoupeno ke druhému popouštění oceli při zvýšené teplotě oproti 1. popouštění o 10-20 °C, tedy teplotách 640–650 °C a zvýšené výdrži na teplotě o 5 min. u obou rozměrů (viz **Tab. 11**), který měl za cíl snížení tvrdosti a zvýšení meze kluzu na stanovené hodnoty dle prováděcí normy.

**Tab. 11** Režim druhého popouštění jakosti C110.

Průměr [mm]	Tl. stěny [mm]	Tavba	Č. trubky	KP	
				Popouštění jak. C110	
				Teplota [°C]	Výdrž na teplotě [min.]
2. popouštění					
244,48	11,05	T37128	22484	640 - 650	30
			22486		
		T73129	22488		
			22489		
269,88	21,06	T37128	25161	640 - 650	45
			25162		
		T73129	25163		
			25165		

Tento režim splnil svůj účel, jak lze vidět v **Tab. 12**, došlo ke snížení tvrdosti a zvýšení meze kluzu do oblastí hodnot, které stanovuje mezinárodní norma API 5CT. V rozměru 269,88 x 21,06 mm byly odebrány mechanické zkoušky pouze 1x z každé tavby.

**Tab. 12** Dosažené mechanické vlastnosti po druhém popouštění.

Č. trubky	R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>e</sub> [MPa]	A5 [%]	Z [%]	KV [J]	HRC *
22484	882	806	28	47	53	28,1 - 29,1
22486	889	826	27	54	56	28,0 - 29,3
22488	882	817	26,8	51	79	28,5 - 29,2
22489	882	822	26,4	50	75	28,2 - 29,6
25161	843	770	28,5	69	113	25,3 - 25,8
25162	X	X	X	X	X	X
25163	X	X	X	X	X	X
25165	836	767	27,8	70	151	24,5 - 25,1

\* tvrdost HRC rozpětí hodnot od-do.

X- nebylo stanoveno.

Ve druhé etapě bylo zušlechtěno s ohledem na výše dosažené výsledky dalších 6ks trub. Z průměru 244,48 mm to byly 4 ks a 2 ks průměru 269,88 mm. Jak lze vidět v **Tab. 13**, tak byla snížena teplota kalení o 40 °C. Teplota popouštění byla zvýšena o 10 °C a výdrž na teplotě byla zachována při porovnání s druhým popouštěním.

**Tab. 13** Režim TZ ve druhé etapě výzkumu jakosti C110.

Průměr [mm]	Tl. Stěny [mm]	Tavba	Č. trubky	TP	KROKOVÁ PEC	
				Kalení	Popouštění jak. C110	
				Teplota [°C]	Teplota [°C]	Výdrž na teplotě [min.]
				1. popouštění		
244,48	11,05	T37128	22485	800 - 820	650 - 660	30
			22487			
		T73129	22490			
			22491			
269,88	21,06	T37128	25164	800 - 820	650 - 660	45
		T31129	25160			

Mechanické hodnoty dosažené výše uvedeným režimem tepelného zpracování již byly v souladu s prováděcí normou, jak lze vidět v **Tab. 14**.

**Tab. 14** Dosažené mechanické vlastnosti po prvním režimu kalení a popouštění ve druhé etapě.

Č. trubky	R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>e</sub> [MPa]	A5 [%]	Z [%]	KV [J]	HRC *
22485	X	X	X	X	X	X
22487	880	805	23,2	53	55	24,5-26,7
22490	X	X	X	X	X	X
22491	829	762	29,9	48	28	23,8-26,3
25164	861	788	22,4	71	132	24,1-26,2
25160	867	781	25,8	66	102	24,8-26,8

\* tvrdost HRC rozpětí hodnot od-do.

X- nebylo stanoveno.

### 3.3 Postup zušlechtění jakosti T95 a výsledky mechanických zkoušek.

Ve třetí etapě bylo použito pro vývoj jakosti T95 8ks trub, které byly použity k vývoji v kapitole 3.2 „Postup zušlechtění jakosti C110 a výsledky mechanických zkoušek“ z první etapy. V **Tab. 15** je tedy zobrazena celá historie tepelného zpracování pro vývoj jakosti C110, včetně následujícího třetího popouštění, které bylo použito k vývoji jakosti T95. Pro tyto účely bylo těchto 8ks trub popuštěno na teploty 670–690 °C s výdrží na teplotě 40 min. pro průměr 244,48 mm a 55 min. pro průměr 269,88 mm.

**Tab. 15** Režim TZ vývoje jakosti T95.

Průměr [mm]	Tl. Stěny [mm]	Tavba	Č. trubky	TP	KP					
				Kalení	Popouštění jakosti C110				Popouštění jakosti T95	
				Teplota [°C]	Teplota [°C]	Výdrž na teplotě [min.]	Teplota [°C]	Výdrž na teplotě [min.]	Teplota [°C]	Výdrž na teplotě [min.]
					1. popouštění		2. popouštění		3. popouštění	
244,48	11,05	T37128	22484	840 - 860	620 - 630	25	640 - 650	30	670 - 690	40
			22486							
		T73129	22488							
			22489							
269,88	21,06	T37128	25161	840 - 860	620 - 630	40	640 - 650	45	670 - 690	55
			25162							
		T73129	25163							
			25165							

Tímto postupem zušlechtění bylo dosaženo vyhovujících výsledků. Došlo k poklesu meze pevnosti, meze kluzu i tvrdosti. Zkouška rázem v ohybu byla provedena u obou rozměrů trub vždy 1x z každé tavby, jak lze vidět v **Tab. 16**.

**Tab. 16** Dosažené mechanické vlastnosti po výše uvedeném režimu TZ pro vývoj jakosti T95.

Č. trubky	R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>e</sub> [MPa]	A5 [%]	Z [%]	KV [J]	HRC *
22484	772	681	28	65	71	23,5 - 24,1
22486	803	725	30,1	63	X	24,8 - 25,3
22488	787	720	29,9	64	X	23,9 - 24,0
22489	781	708	26,8	51	76	23,4 - 24,0
25161	755	667	23,6	72	136	20,3 - 20,7
25162	756	664	22,2	73	X	20,1 - 20,4
25163	758	677	22,6	70	157	20,8 - 21,1
25165	759	671	24	70	X	20,5 - 20,9

\* tvrdost HRC rozpětí hodnot od-do.

X- nebylo stanoveno.

### 3.4 Vyhodnocení mikrostruktury.

Metalografické snímky byly pořízeny z vybraných vzorků, odebraných z trub č.:

- 25162- po prvním popouštění, jakost C110;
- 25165- po prvním popouštění, jakost C110;
- 25164- po kalení;
- 25160- po kalení;
- 22487- po kalení;
- 22490- po prvním popouštění, jakost C110;
- 22489- po třetím popouštění, jakost T95;
- 22484- po třetím popouštění, jakost T95;
- 22160- po třetím popouštění, jakost T95;
- 22165- po třetím popouštění, jakost T95.

Snímky byly pořízeny na přístroji Jenavert nacházejícím se na zkušebně v Trineckých železárnách a.s. Samotné vzorky byly připraveny klasickým způsobem jako metalografický výbrus. Snímky mikrostruktury byly provedeny při zvětšení 100x a 500x pro každý vzorek. Dále byl stanoven podíl fází, resp. strukturních složek bodovou metodou a velikost zrna dle normy ASTM E112.

Jak lze vidět v **Tab. 17**, jedná se jemnozrnnou strukturu, která se svou velikostí zrna pohybuje mezi hodnotami 8- 8,5 dle výše uvedené normy. Podíl fází, resp. strukturních složek byl stanoven cca 3 mm pod povrchem.

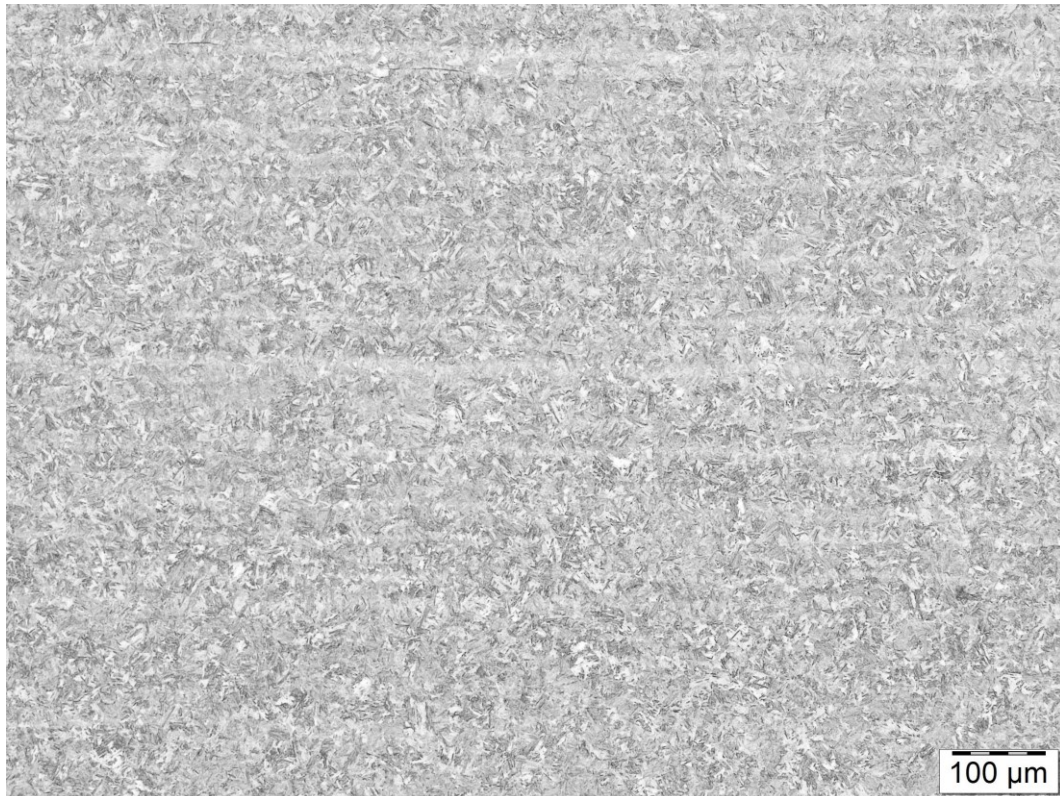
**Tab. 17** Podíl fází, resp. strukturních složek a velikost austenitického zrna jednotlivých vzorků.

Č. trubky	Podíl fází, resp. strukturních složek [%]	Velikost zrna
22487/Z*	100 martenzit	8,5
22484	100 popuštěný martenzit	8,5
22490	100 popuštěný martenzit	8,5
22489	100 popuštěný martenzit	8
25165	100 popuštěný martenzit	8,5
25165	100 popuštěný martenzit	8,5
25160/Z*	60 martenzit + 40 bainit + stopy perlitu	8,5
25160	100 popuštěný martenzit + bainit	8
25164/Z*	65 martenzit + 35 bainit + stopy perlitu	8,5
25162	100 popuštěný martenzit + bainit	8,5

\* vzorek odebraný po kalení.

Mikrostruktury všech pozorovaných vzorků velmi dobře odpovídají kalnému, resp. zušlechtěnému stavu materiálu. Na **Obr. 17. až 34.** jsou znázorněny vybrané mikrostruktury napříč provedeným tepelným zpracováním.





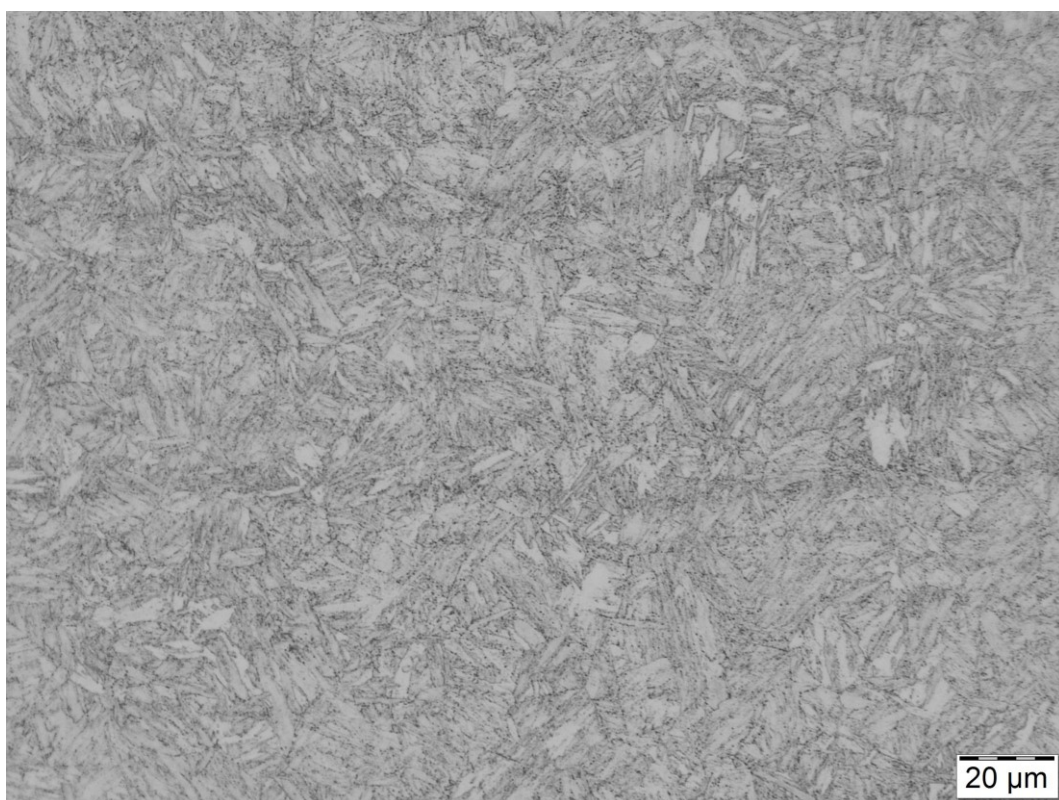
**Obr. 17.** Mikrostruktura vzorku č. 22487 (po kalení) zvětšení 100x.



**Obr. 18.** Mikrostruktura vzorku č. 22487 zvětšení 500x.



**Obr. 19.** Mikrostruktura vzorku č. 22484 zvětšení 100x.



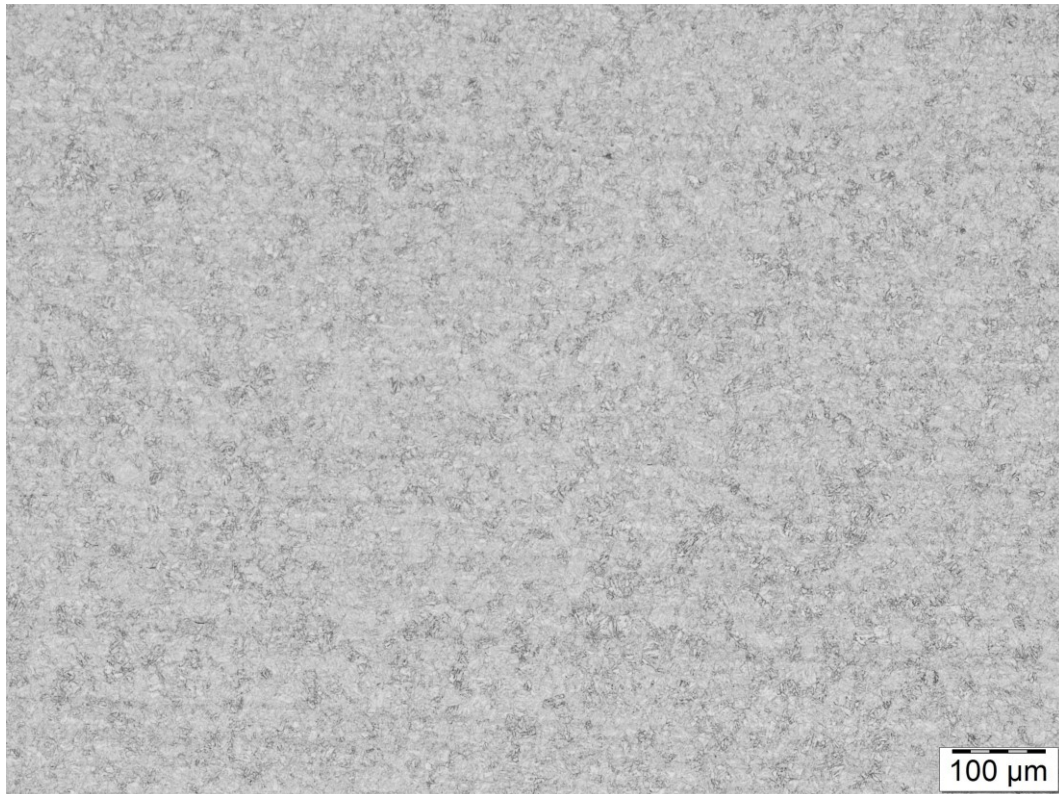
**Obr. 20.** Mikrostruktura vzorku č. 22484 zvětšení 500x.



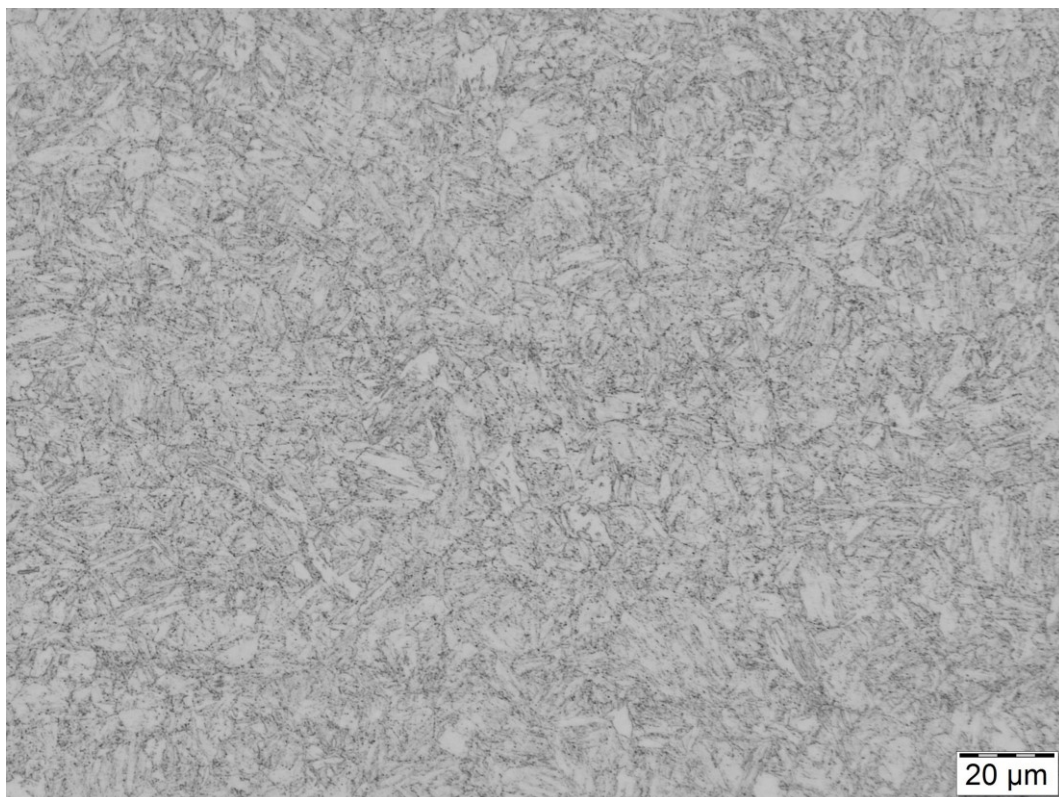
**Obr. 21.** Mikrostruktura vzorku č. 22490 zvětšení 100x.



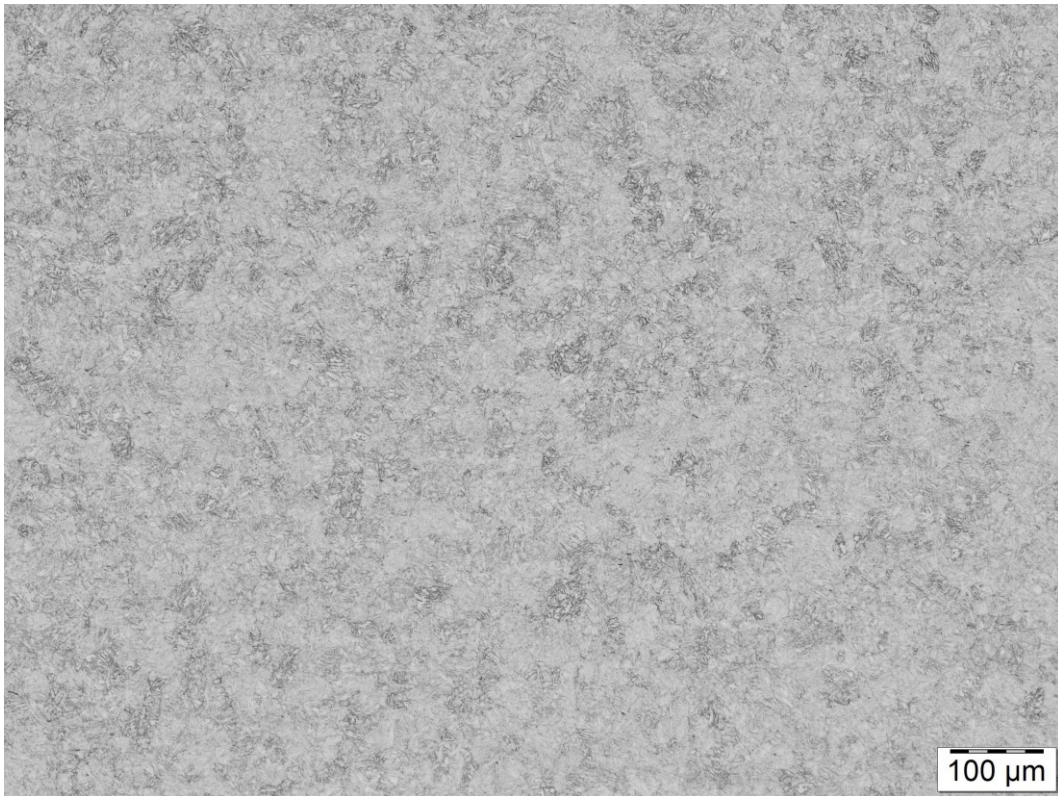
**Obr. 22.** Mikrostruktura vzorku č. 22490 zvětšení 500x.



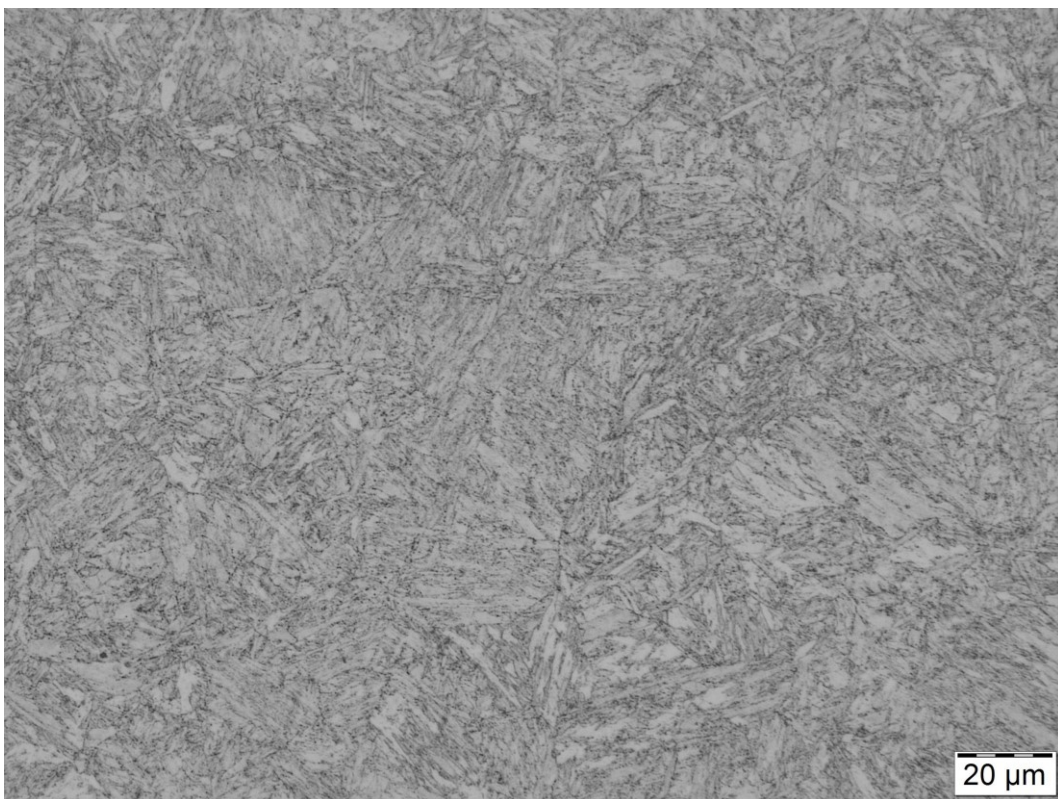
**Obr. 23.** Mikrostruktura vzorku č. 22489 zvětšení 100x.



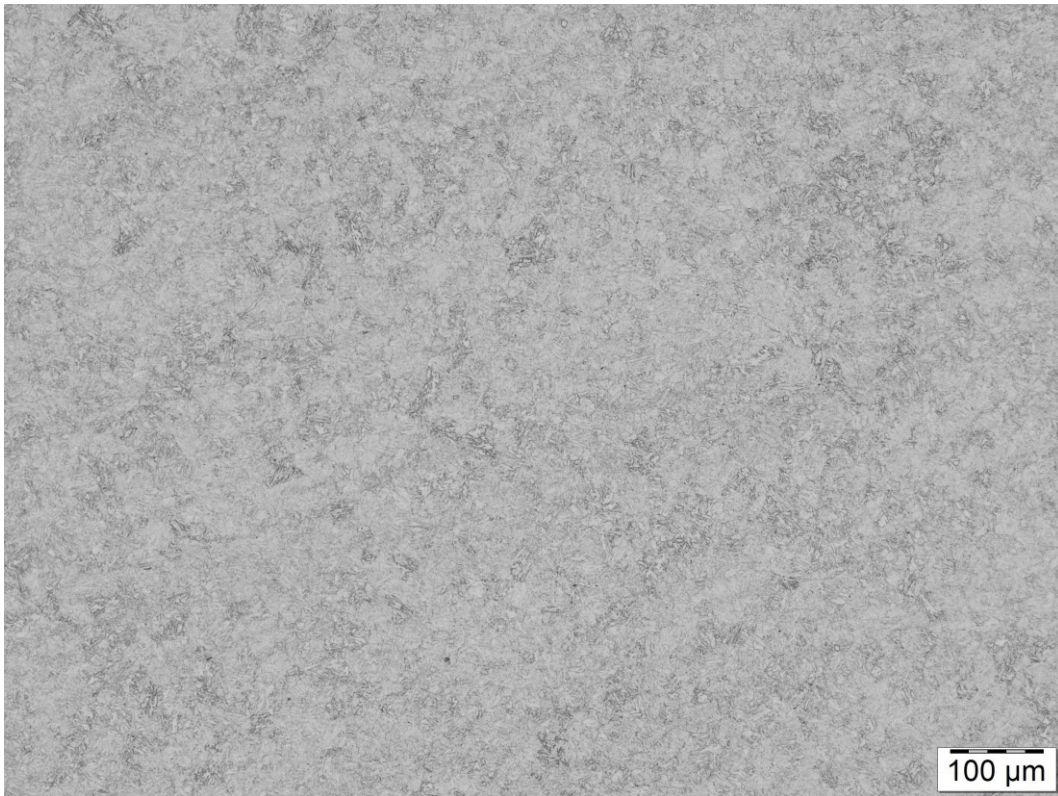
**Obr. 24.** Mikrostruktura vzorku č. 22489 zvětšení 500x.



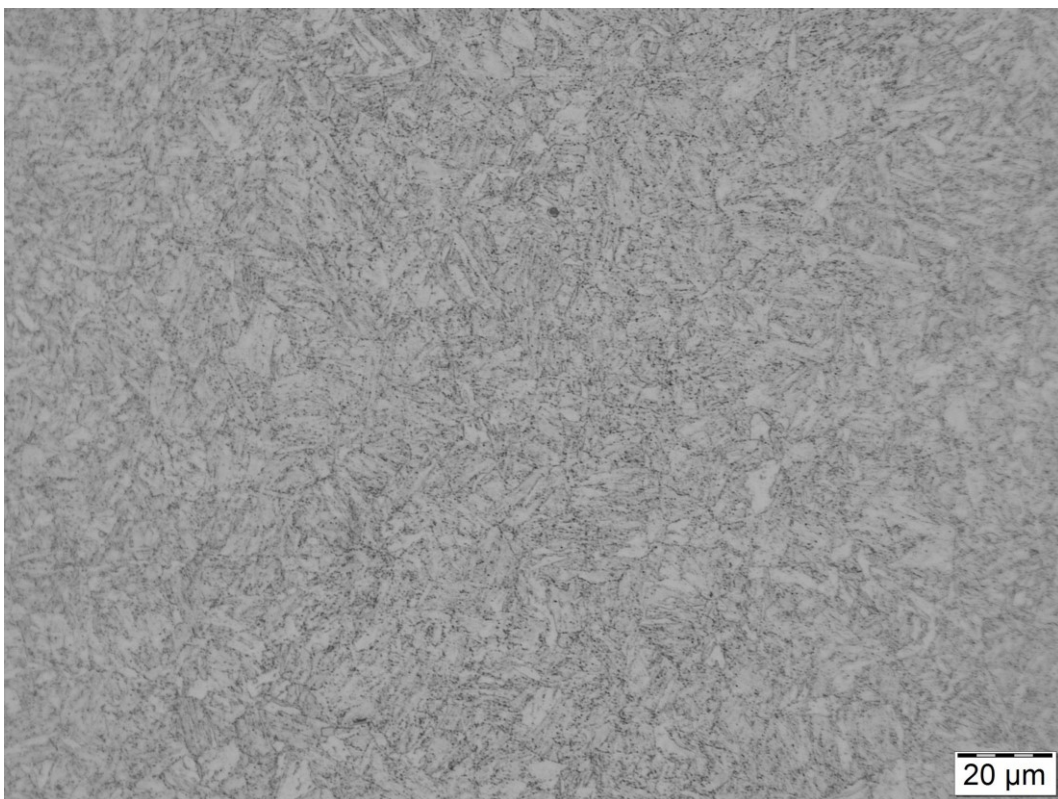
**Obr. 25.** Mikrostruktura vzorku č. 25165 zvětšení 100x



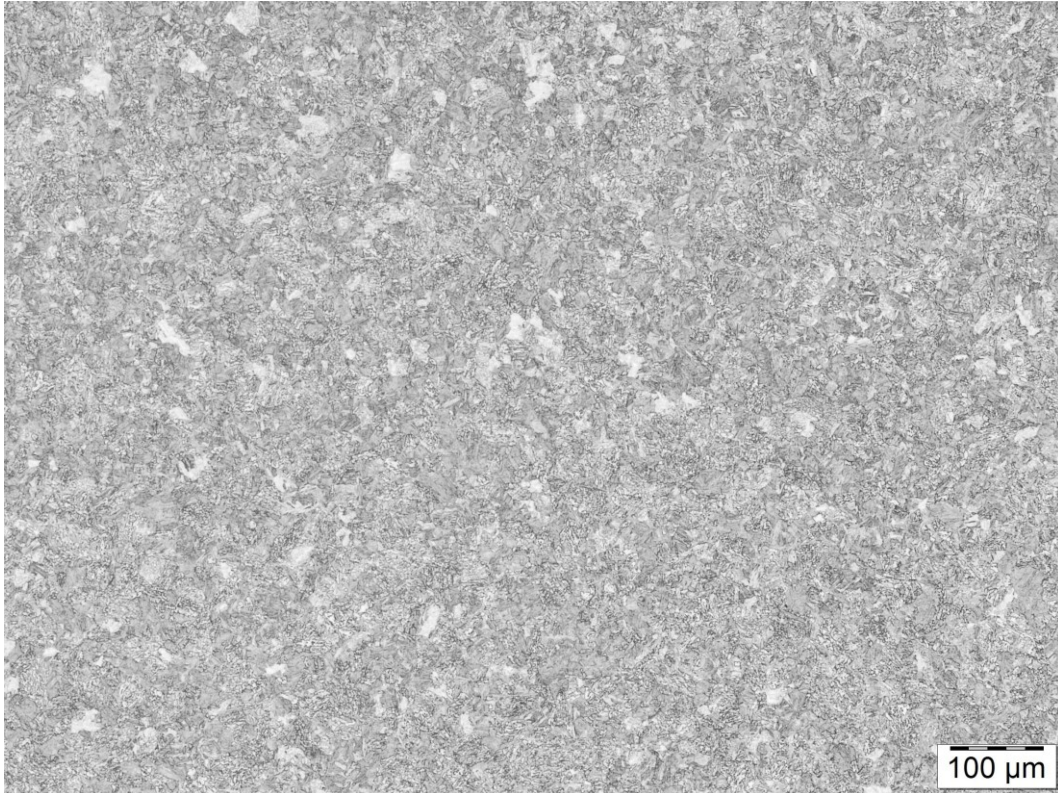
**Obr. 26.** Mikrostruktura vzorku č. 25165 zvětšení 500x



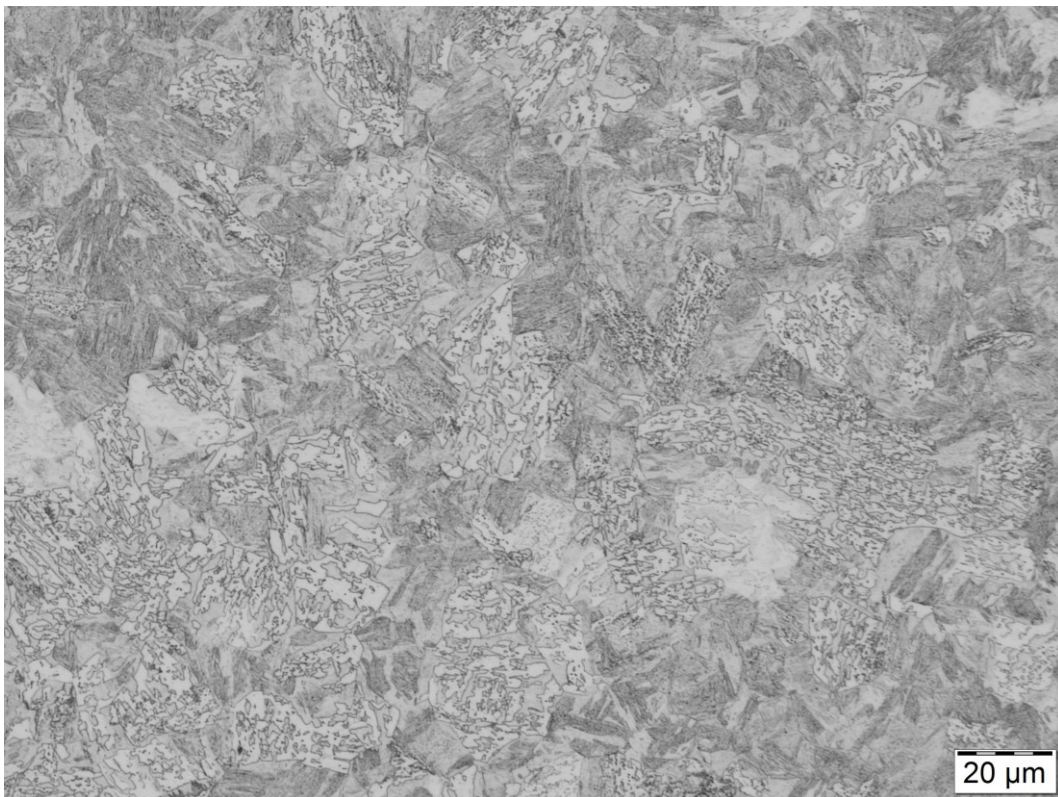
**Obr. 27.** Mikrostruktura vzorku č. 25165 zvětšení 100x



**Obr. 28.** Mikrostruktura vzorku č. 25165 zvětšení 500x



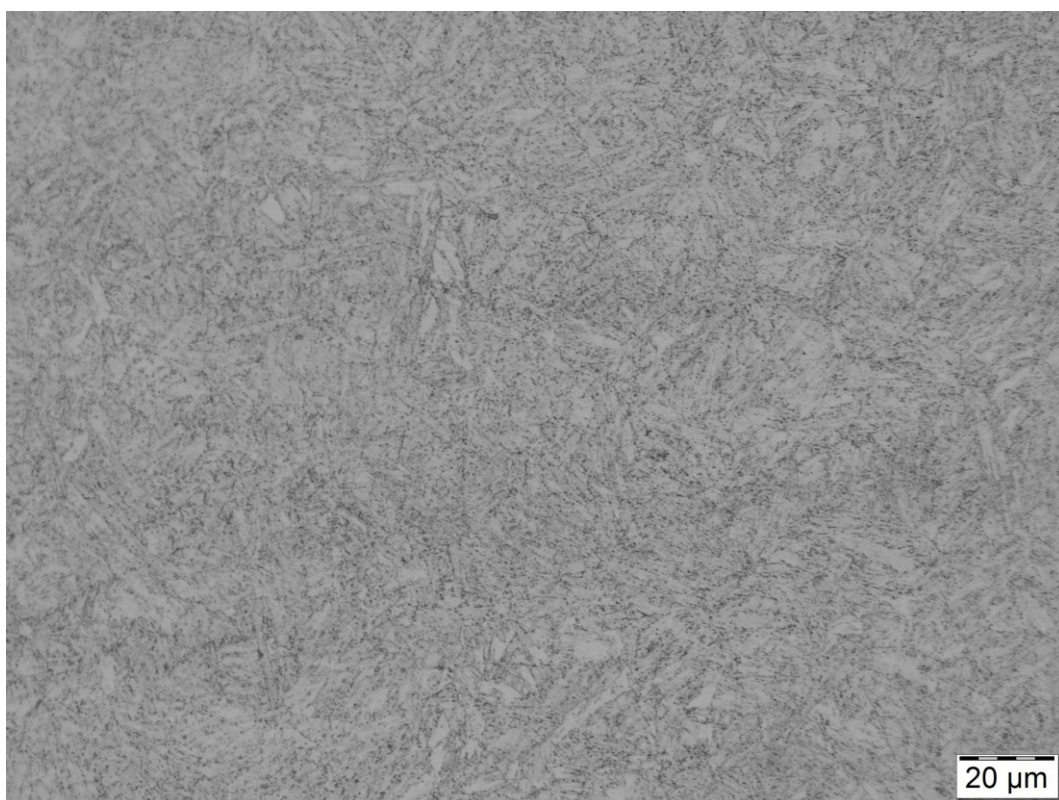
**Obr. 29.** Mikrostruktura vzorku č. 25160 (po kalení) zvětšení 100x



**Obr. 30.** Mikrostruktura vzorku č. 25160 (po kalení) zvětšení 500x

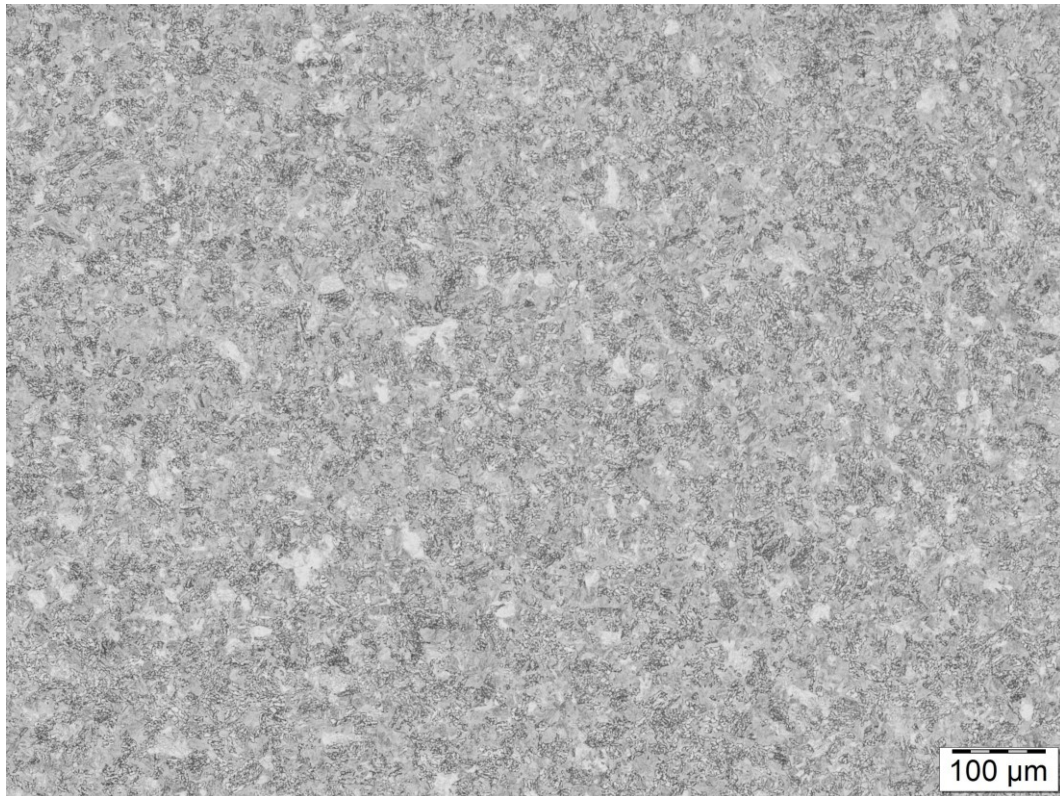


**Obr. 31.** Mikrostruktura vzorku č. 25160 zvětšení 100x

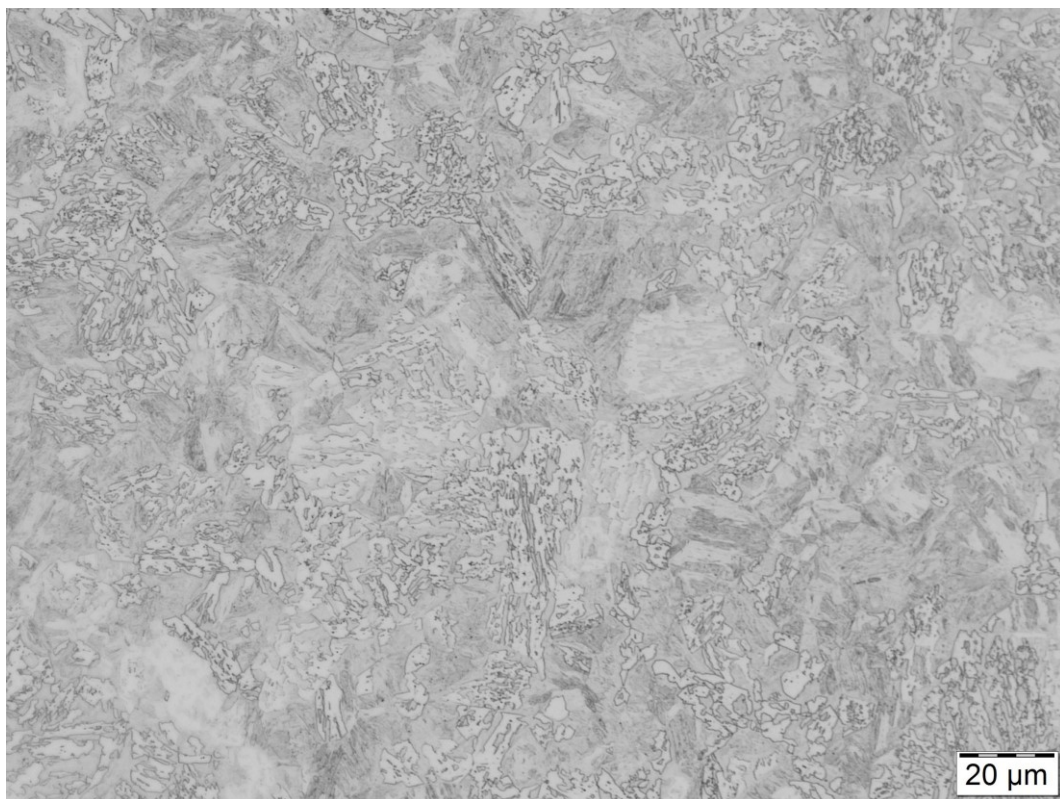


**Obr. 32.** Mikrostruktura vzorku č. 25160 zvětšení 500x

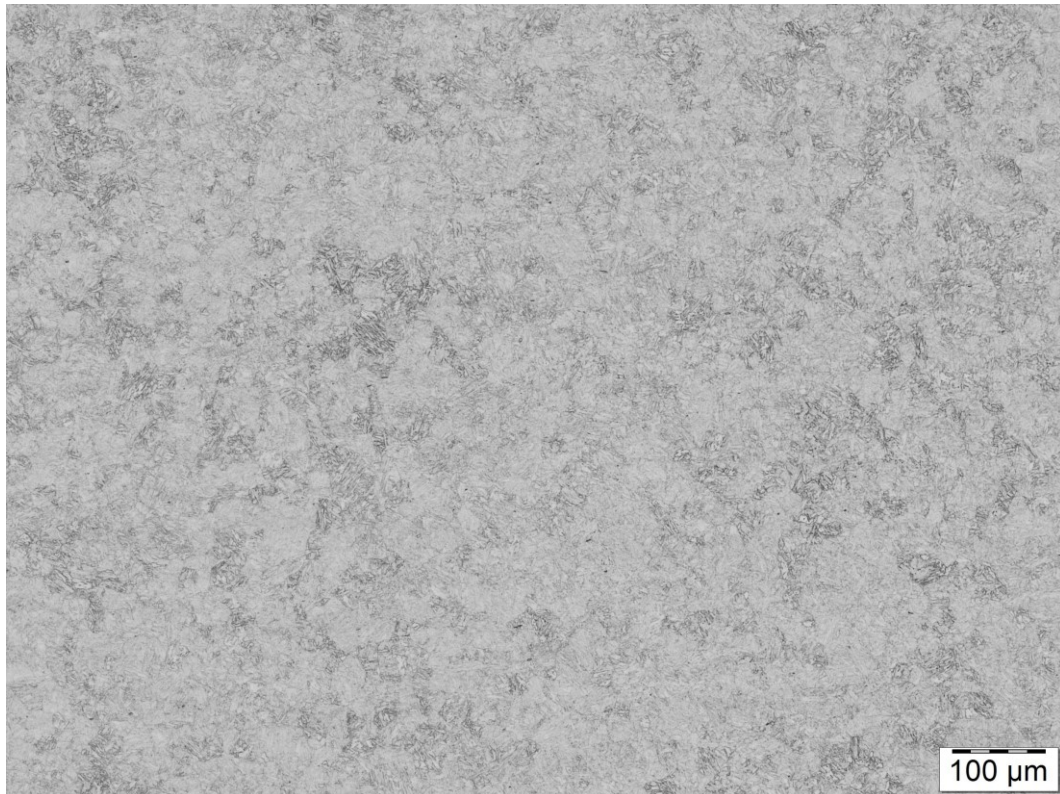




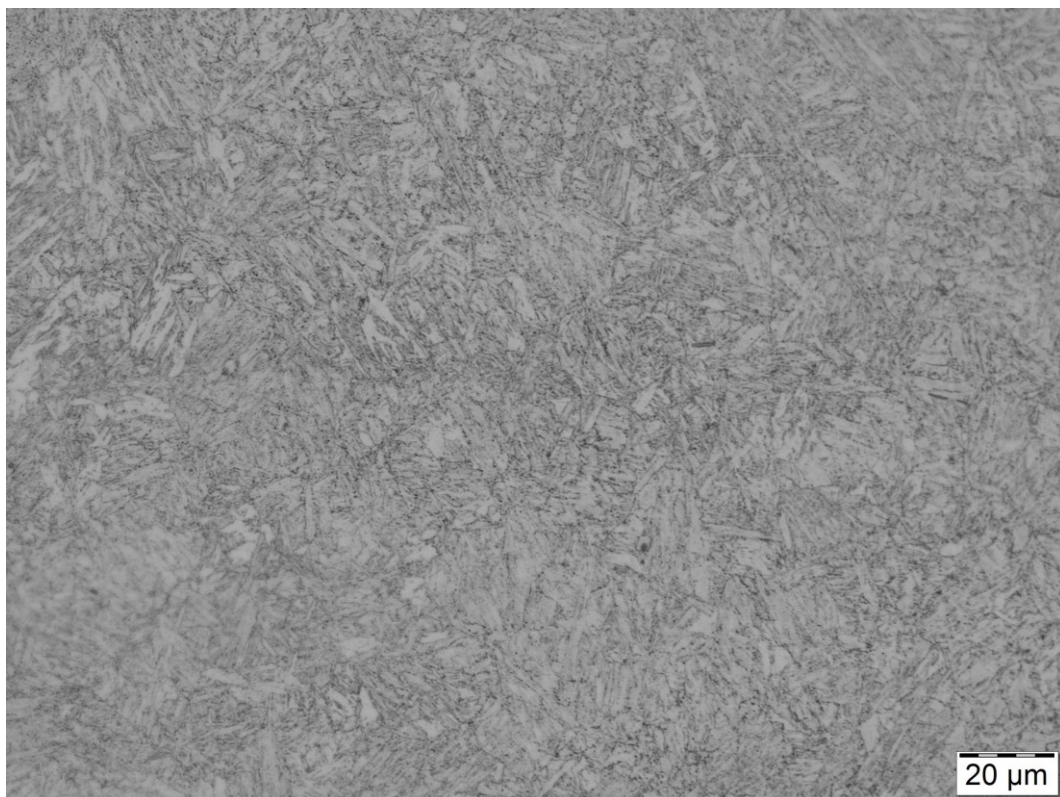
**Obr. 33.** Mikrostruktura vzorku č. 25164 (po kalení) zvětšení 100x



**Obr. 34.** Mikrostruktura vzorku č. 25164 (po kalení) zvětšení 500x



**Obr. 35.** Mikrostruktura vzorku č. 25162 zvětšení 100x



**Obr. 34.** Mikrostruktura vzorku č. 25162 zvětšení 500x

## 4. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo optimalizovat režim tepelného zpracování pro oceli jakosti C110 a následně T95 podle API 5CT. Optimalizace byla možná vzhledem k vhodnému průniku chemického složení, které je obdobné u obou jakostí, a také vzhledem k mechanickým vlastnostem, kdy jakost C110 představuje oproti jakosti T95 vyšší pevnostní třídu. Zušlechťení bylo provedeno v tunelové peci přes kalící zařízení a krokovou pec, které byly popsány na **str. 18,19** a, na **str. 23,24**.

V první etapě bylo zušlechťeno celkem 8 ks trub, z toho 4ks o rozměru 244,48 x 11,05 mm a 4ks o rozměru 269,88 x 21,06 mm. U obou rozměrů byly použity dvě tavby. Austenitizace proběhla při teplotách 840-860 °C. Poté bylo provedeno popouštění při teplotách 620-630 °C při výdrži 25 min. pro rozměr 244,48 mm a 40 min. pro rozměr 269,88 mm. Výsledky mechanických zkoušek však nebyly plně vyhovující vzhledem k hodnotám stanoveným v normě API 5CT. Překročena byla tvrdost, a to až na hodnotu 33,5 HRC oproti stanoveným max. 30 HRC. Taktéž byla překročena mez kluzu, která dosahovala hodnot v rozmezí od 890-937 MPa, oproti horní hranici stanovené na 828 MPa. Mez pevnosti je u této jakosti omezena pouze spodní hranicí, a to min. 793 MPa, což splňovaly dosažené hodnoty v rozmezí 956-1004 MPa. Z důvodu vysokých mechanických hodnot bylo tedy přistoupeno ke druhému popouštění těchto 8 ks při zvýšené teplotě 640-650 °C a také při zvýšené době výdrže u rozměru 244,48 mm po dobu 30 min. a u rozměru 269,88 mm po dobu 45 min. Tímto režimem zušlechťení bylo dosaženo snížení meze kluzu a tvrdosti do oblasti vyhovujících hodnot, kdy se mez kluzu pohybovala od 767 do 826 MPa, mez pevnosti byla v rozmezí 836-889 MPa a tvrdost dosahovala hodnot 24,5- 29,6 HRC.

Ve druhé etapě bylo zušlechťeno celkem 6 nových kusů trub ve stejných rozměrech jako v první etapě, avšak u rozměru 269,88 mm byly použity pouze 2ks. Vzhledem k režimu tepelného zpracování v první etapě byly přizpůsobeny teploty austenitizace, konkrétně byla snížena na 800-820 °C. Teplota popouštění byla naopak zvýšena na 650-660 °C při době výdrže 30 min. pro rozměr 244,48 mm a 45 min. pro rozměr 269,88 mm. V tomto případě již byly mechanické hodnoty vyhovující. Tvrdost se pohybovala v rozmezí hodnot 23,8-26,8 HRC, mez kluzu 762-805 MPa a mez pevnosti 829-880 MPa.

Ve třetí etapě probíhal vývoj jakosti T95 z 8ks trubek, které byly použity v první etapě. Tyto trubky prošly tedy jedním režimem kalení a dvěma režimy popouštění při různých

teplotách. Následovalo tedy třetí popouštění těchto trubek za zvýšených teplot 670-690 °C při dobách výdrže 40 min. pro rozměr 244,48 mm a 55 min. pro rozměr 269,88 mm. Tímto režimem bylo docíleno vyhovujících hodnot mechanických vlastností. Maximální hodnota tvrdosti, uváděná již zmiňovanou normou, je stanovena na max. 25,4 HRC a dosaženo bylo hodnot v rozmezí 20,1-25,3 HRC. Stanovená hodnota meze pevnosti je taktéž jako u jakosti C110 omezena pouze spodní hranicí, a to na min. 724 MPa, kdy dosaženo bylo hodnot 755-803 MPa. Dosažená mez kluzu byla v rozmezí 664-725 MPa, což odpovídá hodnotám stanoveným v normě, tj. 655-758 MPa.

Lze konstatovat, že diplomová práce splnila zadání, neboť se podařilo optimalizovat tepelné zpracování trub tak, aby bylo možné vyrábět obě požadované jakosti ocelí podle API 5CT, a to jak jakost C110, tak jakost T95.

## Seznam použité literatury

- [1] TRINECKÉ ŽELEZÁRNY a.s.: *Profil provozu* [online]. [cit. 2017-11-11]. Dostupné z: <http://www.trubky.cz/index.php?la=c&id=12>.
- [2] JURČA, Radek. *ZTP VT – 04: Základní technologický předpis- pro válcovací trat' VM*. Ostrava: Válcovna trub TŽ, 2018.
- [3] POČTA, Bohumil. *Ocelové trubky: jejich výroba a použití*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954.
- [4] KOLLEROVÁ, Mária. *Valcovanie*. Bratislava: Alfa, 1991. ISBN 80-05-00729-9.
- [5] SILBERNAGEL, Arnošt, GREGER Miroslav. *Zušlechťování součástí z ocelí českých značek*. Ostrava: Kovosil, 2006. ISBN 80-901572-9-7.
- [6] JECH Jaroslav. *Tepelné zpracování oceli: metalografická příručka*. Praha SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1969.
- [7] CALLISTER, W. D. *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. 7. Vyd. New York: John Wiley a Sons, 2007, 722 s. ISBN 0-471-73696-1.
- [8] VÁŇOVÁ P. *Základy tepelného zpracování*. Skriptum VŠB-TU. Ostrava 2011. 127 s.
- [9] TOTTEN G. E. *Steel heat treatment, Metallurgy and technologies*, 2. vyd. Boca Ration: CRC Press, 2007, 820 s. ISBN 0 – 8493 – 8455 – 9.
- [10] *Comprehensive Materials Processing* [online]. Elsevier Science Ltd, 2014 [cit. 2019-01-31]. ISBN 978-008-0965-321. Dostupné z: [http://books.google.cz/books?id=OV9-AgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs\\_atb#v=onepage&q&f=false](http://books.google.cz/books?id=OV9-AgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs_atb#v=onepage&q&f=false)
- [11] SKOČOVSKÝ, Petr a Ivan DURMIS. *Technológia tepelného spracovania kovov*. Bratislava: ALFA, 1984, 224 s. ISBN 63-783-84.
- [12] ASM Handbook, *Volume 4, Heat treating*, Materials Park Ohio: ASM International, 2002. ISBN 0 – 87170 – 379 – 3.
- [13] *Tepelné zpracování*, [online]. [cit. 2019-01-31]. Dostupné z: <https://en.ppt-online.org/464183>. >

- [14] JURČA, Radek, *ZTP VT – 09, Základní technologický předpis- pro tepelné zpracování trubek a tyčí*. Ostrava: Válcovna trub TŽ, 2018.
- [15] *Tepelné a chemicko-tepelné zpracování slitin Fe-C*, [online]. Slideplayer, [cit. 2019-01-31]. Dostupné z: <<https://slideplayer.cz/slide/2863743/>>
- [16] PRIKNER, Otakar, SALABOVÁ, Petra. *Popouštění ocelí v praxi*, [online]. Slideplayer, [cit. 2019-02-01]. Dostupné z: <<https://slideplayer.cz/slide/11491839/>>
- [17] DAĐOUREK, Karel, *Popouštění ocelí*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007 [online]. [cit. 2019-02-01.] Dostupné z: <<https://docplayer.cz/16939587-Popousteni-oceli-teorie-tepelneho-zpracovani-katedra-materialu-strojni-fakulty-technicka-univerzita-v-liberci-doc-ing-karel-dadourek-2007.html>>
- [18] C. SHARMA, Romesh. *Principles of heat treatment of steels* [online]. New Delhi: New Age International, 1996 [cit. 2019-02-01]. ISBN 81-224-0869-9. Dostupné z: <[http://books.google.cz/books?id=wWVgfUK0efYC&printsec=frontcover&dq=heat+treatment&hl=cs&ei=9yW9TtaTJcjHswbdqbSFAw&sa=X&oi=book\\_result&ct=result&resnum=3&ved=0CDgQ6AEwAg#v=onepage&q&f=false](http://books.google.cz/books?id=wWVgfUK0efYC&printsec=frontcover&dq=heat+treatment&hl=cs&ei=9yW9TtaTJcjHswbdqbSFAw&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=3&ved=0CDgQ6AEwAg#v=onepage&q&f=false)>
- [19] API Specification 5CT, Specification for Casing and Tubing, Ninth Edition, July 2011.