ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program:	N2301	Strojní inženýrství
Studijní obor:	3911T016	Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Možnosti zpracování kovových materiálů na zařízení HDQT-R 30-12

Autor: **Bc. Michal Peković**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Ludmila Kučerová, Ph.D.**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	**Bc. Michal PEKOVIĆ**
Osobní číslo:	**S18N0015K**
Studijní program:	**N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor:	**Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**
Téma práce:	**Možnosti zpracování kovových materiálů na zařízení HDQT-R 30-12**
Zadávající katedra:	**Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Zásady pro vypracování

1. Literární rešerše
   a) Technologie válcování rotačního průřezu
   b) Indukční ohřev
   c) Využití numerické simulace u experimentálního válcování
2. Experimentální program
   a) Popis zařízení
   b) Numerické simulace
   c) Charakterizace výchozího stavu
   d) Experimentální válcování tyče a trubky
   e) Analýza tvaru a makrostruktury vývalků
3. Diskuse výsledků
4. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50-60 stran**
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Manuál k softwaru Deform : v11.2_System_Documentation, r. 2017, součást licence

SEMIATIN S.L., *Metal Working: Bulk Forming ASM handbook*. Vol. 14A, ASM International, 2005, ISBN 978-0-87170-708-6

RUDNEV V., TOTTEN G. *Induction heating and heat treatment, ASM handbook*. Vol. 4C, ASM International, 2014, ISBN: 978-1-62708-012-5

SCHINDLER I., RUSZ S., KUBINA T., *Válcování (učební text)*, [online], Ostrava 2014, dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Opory_FMMI/633/633-Valcovani.pdf

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Ludmila Kučerová, Ph.D.**
Regionální technologický institut

Konzultant diplomové práce: **Ing. Soňa Benešová, Ph.D.**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Datum zadání diplomové práce: **5. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2020**

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta strojní
L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE
vedoucí katedry

V Plzni dne 30. října 2019

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.
Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: …….. . . . . .

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	**Příjmení** Peković	**Jméno** Michal	
STUDIJNÍ OBOR	3911T016 – Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie		
VEDOUCÍ PRÁCE	**Příjmení (včetně titulů)** Doc. Ing. Kučerová, Ph.D.	**Jméno** Ludmila	
PRACOVIŠTĚ	ZČU – FST – KMM		
DRUH PRÁCE	**DIPLOMOVÁ**	~~**BAKALÁŘSKÁ**~~	**Nehodící se škrtněte**
NÁZEV PRÁCE	Možnosti zpracování kovových materiálů na zařízení HDQT-R 30-12.		

FAKULTA	Strojní	**KATEDRA**	KMM	**ROK ODEVZD.**	2020

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	86	**TEXTOVÁ ČÁST**	86	**GRAFICKÁ ČÁST**	0

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) **ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY**	Diplomová práce se zabývá možnostmi zpracování kovových materiálů s pomocí zařízení pro kosé válcování kruhových tyčí. Experimentální program byl zacílen na vytvoření a analýzu numerických simulací tohoto způsobu válcování s využitím geometrie zařízení HDQT-R 30-12 pro tyče, trubky, a spojení tyčí a trubek. Tyto simulované procesy byly následně provedeny také v reálném experimentu na zařízení. Poslední částí této práce je analýza experimentálních vývalků z hlediska geometrie, makrostruktury a v případě válcování spojení tyče a trubky také mikrostruktury.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Kosé válcování, tříválcová stolice, numerické simulace, kruhové polotovary, ocel

SUMMARY OF DIPLOMA THESIS

AUTHOR	**Surname** Peković	**Name** Michal	
FIELD OF STUDY	3911T016 – Materials Engineering and Engineering Metallurgy		
SUPERVISOR	**Surname (Inclusive of Degrees)** Doc. Ing. Kučerová, Ph.D.	**Name** Ludmila	
INSTITUTION	ZČU – FST – KMM		
TYPE OF WORK	**DIPLOMA**	~~**BACHELOR**~~	**Delete when not applicable**
TITLE OF WORK	Possibilities of metal materials processing on HDQT-R 30-12		

FACULTY	Mechanical Engineering		**DEPARTMENT**	Material Science and Technology		**SUBMITTED IN.**	2020

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	86		**TEXT PART**	86		**GRAPHICAL PART**	0

BRIEF DESCRIPTION **TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS**	The diploma thesis deals with the possibilities of processing of metallic materials with the use of the device for round bars rolling. The experimental program was aimed at creating and analysing numerical simulations of this rolling method for bars, tubes and its connections with using the geometry of the HDQT-R 30-12 device. The simulated processes were also performed in a real experiment on the device. The last part of this work is the analysis of the rolled products in terms of geometry, macrostructure and in case of rolled connection of rod and tube also microstructure.
KEY WORDS	Skew rolling, Three high, FEM simulations, round products, steel

Poděkování

Autor děkuje doc. Ing. Ludmile Kučerové, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady při zpracování diplomové práce, Ing. Soně Benešové, Ph.D. za rady a konzultace z oblasti tváření kovů a numerických simulací. Dále pak Regionálnímu technologickému institutu za poskytnutí zařízení a materiálu pro zpracování této diplomové práce.

Diplomová práce vznikla s podporou projektu LO1502 Rozvoj Regionálního technologického institutu podpořeného programem Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy na podporu výzkumu, experimentálního vývoje a inovací Národní program udržitelnosti I („NPU I“).

Seznam použitých symbolů a zkratek

HDQT – High Deformation Quenching and Tempering

λ – Součinitel prodloužení [-]

FEM – Finite Element Method – Metoda konečných prvků

FDM – Finite Difference Method – Metoda konečných rozdílů

CAD – Computer-Aided design

ϵ – poměrná deformace [-]

Δl – změna délky [mm]

l_0 – původní délka [mm]

l_f – finální délka [mm]

ϵ_x, ϵ_y ϵ_z – skutečná deformace ve směrech x, y, z [-]

d_x, d_y, d_z – inkrementální změna rozměru ve směrech x, y, z [mm]

x_0 – počáteční rozměr ve směru X [mm]

ϵ_{yx} – skutečná smyková deformace v rovině XY [-]

$\bar{\epsilon}$ - efektivní deformace [-]

$\dot{\epsilon}$ – rychlost deformace [s^{-1}]

d_ϵ - inkrementální změna deformace [-]

d_t – inkrementální změna času [s]

$\bar{\sigma}$ - efektivní napětí [MPa]

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – hlavní napětí ve směrech x, y, z [MPa]

PLC – programovatelný logický automat – Pragrammable Logic Controler

Py1 – pyrometr 1

Rpy – ruční pyrometr

Py2 – pyrometr 2

Mv1 – moment ve válci 1

Py3 – pyrometr 3

ØL – průměr měřený laserem

Obsah

1. Úvod ... 11
2. Technologie válcování ... 12
2.1 Historie válcování ... 13
2.2 Rozdělení procesů tváření podle teploty ... 15
2.3 Speciální válcovací stolice ... 15
2.4 Kosé válcování ... 16
2.4.1 Stolice pro válcování bezešvých trubek ... 17
3. Využití numerické simulace u experimentálního válcování ... 22
3.1 Metoda konečných prvků ... 23
3.2 Počítačové modelování s použitím FEM ... 23
3.2.1 Modelování geometrie ... 24
3.2.2 Síťování (Meshing) ... 24
3.2.3 Specifikace vlastností materiálu ... 25
3.2.4 Specifikace okrajových a počátečních podmínek a podmínek zatížení ... 25
3.3 Numerické simulace ve 3D ... 25
3.4 DEFORM ... 26
3.4.1 Pre-processor ... 26
3.4.2 Simulátor ... 26
3.4.3 Post-processor ... 27
3.5 Stavové proměnné ve FEM simulacích ... 27
3.5.1 Přemístění (Displacement) ... 27
3.5.2 Deformace (Strain) ... 27
3.5.3 Rychlost deformace (Strain rate) ... 28
3.5.4 Napětí (Stress) ... 28
3.5.5 Rychlost (velocity) ... 29
4. Indukční ohřev ... 29
4.1 Historie indukčního ohřevu ... 29
4.2 Princip indukčního ohřevu ... 30
4.3 Výhody indukčního ohřevu ... 33
5. Návrh experimentálního programu ... 33
6. Popis zařízení HDQT-R 30-12 ... 34
6.1 Ohřev ... 34

6.2 Válcování ... 35
6.3 Tepelné zpracování ... 37
7. Numerické simulace procesu válcování ... 38
7.1 Objekty v simulaci ... 38
7.1.1 Válce ... 39
7.1.2 Válcovaný polotovar ... 39
7.1.3 Objímka a deska ... 40
7.2 Nastavení simulace ... 41
7.3 Vyhodnocení numerických simulací ... 44
7.3.1 Simulace válcování tyčí ... 44
7.3.2 Simulace válcování trubky ... 54
7.3.3 Simulace válcování spojení trubky a tyče ... 58
8. Charakteristika výchozího stavu ... 63
9. Experimentální válcování ... 65
9.1 Experimentální válcování tyčí ... 65
9.1.1 Vyhodnocení dat z válcovací stolice ... 66
9.2 Experimentální válcování trubek ... 67
9.2.1 Vyhodnocení dat z válcovací stolice ... 68
9.3 Experimentální válcování spojení trubky a tyče ... 68
9.3.1 Vyhodnocení dat z válcovací stolice ... 69
10. Analýza tvaru, makrostruktury a mikrostruktury výválků ... 70
10.1 Analýza tvaru a makrostruktury válcovaných tyčí ... 70
10.2 Analýzy tvaru výválků z trubek ... 74
10.3 Analýza tvaru a mikrostruktury výválků spojené trubky a tyče ... 76
11. Diskuse výsledků ... 81
12. Závěr ... 83
13. Citovaná literatura ... 84

1. Úvod

Technologie se v dnešní době neustále vyvíjejí a v odborných publikacích se každou chvíli objeví nějaká teze nebo myšlenka toho, jak by některá technologie mohla být nahrazena jinou z důvodu vyšší efektivity výroby, úspory energie, nižší náročnosti na obsluhu a v dnešní době hodně probírané ekologičnosti. Válcování je průmyslové odvětví, kde se ve většině případů vyráběné produkty vyrábějí technologiemi, jejichž principy lidstvo zná již několik desítek let. Tyto technologie jsou i nadále vylepšovány z hlediska lepších materiálů pro válce, snížení energetické náročnosti linky a také třeba zmenšení celého zařízení z důvodu úspory prostoru ve výrobní hale. V poslední době se v několika institucích na světě vědci věnují využití kosých tříválcových stolic pro válcování trubek a tyčí z různých materiálů jako například ocelí, hliníků, hořčíkových slitin atd. Jedna taková válcovací stolice je součástí experimentálního vybavení Regionálního technologického institutu. Jedná se o stolici pro kosé válcování tyčí HDQT-R 30-12 s možností redukce průměru tyče z 30 na 12 mm. Cílem této práce je zjištění možností využití této válcovací stolice pro válcování tyčí, trubek případně dalších rotačně symetrických součástí.

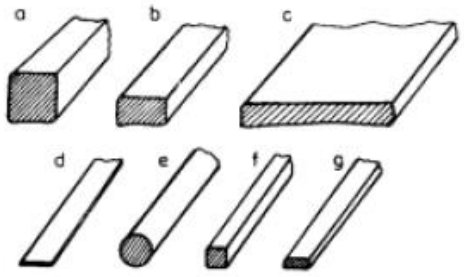
Jelikož se jedná o geometricky velmi komplikovaný systém, ve kterém dochází k deformaci válcovaného materiálu je nutno využít pokročilých numerických simulací k zjištění deformačních a teplotních profilů. Po ověření těchto nasimulovaných událostí v experimentu lze upravovat simulace, aby se co nejvíce přibližovaly realitě a případně na základě již známých informací mohou být simulace upraveny například pro válcování trubek. Software použitý pro numerické simulace v této práci bude DEFORM 2D/3D využívající pro simulace metody konečných prvků.

Další důležitou součástí tvářecích operací je ohřev, který může být v dnešní době zajištěn několika způsoby z nichž má každý své výhody i nevýhody. Jednou z možností ohřevu materiálů pro tváření je využití indukčního ohřevu, který je v dnešní době hojně využíván z důvodů vysoké efektivity, produktivity, čistoty, a hlavně úspory místa oproti velkým komorovým nebo karuselovým pecím. Bude vytvořená stručná rešerše na téma indukčního ohřevu z důvodu jeho využití v experimentální části této práce.

2. Technologie válcování

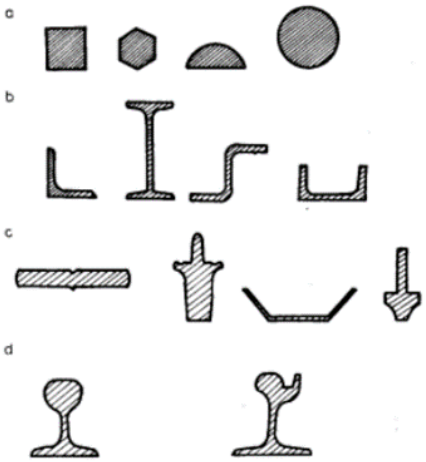
Válcování kovů je pravděpodobně jedním z nejdůležitějších tvářecích procesů. Více než 90 % produkce oceli, hliníku a mědi projde během svojí výroby alespoň jednou procesem válcování. Válcované výrobky tedy představují významnou část výroby. Ocelové trámy a sloupy v budovách jsou vyráběny válcováním. Kolejnice v železniční dopravě jsou produkty válcování. Automobilový průmysl by se bez válcování plechových polotovarů neobešel, a části letadel ze slitin hliníku a titanu jsou také během výroby válcovány. Dále jsou vývalky používány pro výrobu drobných spotřebičů, plechovek od nápojů atp. [1].

Válcování je kontinuální proces, při kterém je tvářený materiál deformován otáčejícími se pracovními válci. Mezera mezi těmito válci je vždy menší než rozměr válcovaného materiálu. Válcování jako takové je děleno podle směru, kterým válcovaný materiál prochází pracovními válci a podle uložení os válců vzhledem k válcovanému materiálu na podélné, příčné a kosé [2]. Hlavní výhodou této technologie je schopnost vyrábět požadované tvary z relativně velkých kusů a při vysokých rychlostech. Válcovat je v dnešní době možné mnoho kovů používaných ve strojírenství, ale i dalších oborech, jako je hliník, slitiny mědi, titanové slitiny a samozřejmě oceli. Oproti klasickému kování, při válcování jsou z velkých ingotů válcovány různé bloky, brama, ploštiny a sochory (obr. 1). Tyto první produkty válcování, které budou dále tvářeny jsou nazývány předvalky. Předvalky typu bloků, bram, ploštin a sochorů jsou většinou válcovány při teplotách nad teplotou rekrystalizace, tj. v oblasti tváření za tepla, kde je možné velké zmenšení průřezu válcovaného materiálu při použití nižších tlaků. Plechy a pásy jsou většinou válcovány za studena, protože je potřeba dodržet požadovanou tloušťku v toleranci [1; 3].



Obr. 1 Základní tvary předvalků – a) čtvercový blok, b) obdélníkový blok, c) brama, d) ploština, e) kruhový sochor, f) čtvercový sochor, g) plochý sochor [2].

Výsledným produktem válcování jsou poté vývalky. Pro vytvoření vývalků jako finálního produktu procesu válcování je třeba využití předvalků, samotných ingotů, nebo kontinuálního lití. Oproti předvalkům se vývalky vyznačují menší plochou průřezu, přesným tvarem a rozměrem, užšími tolerancemi, a především vyšší kvalitou povrchu a užitnými vlastnostmi. Podle tvaru vývalku jsou následně děleny na tyčové, tvarové, ploché, speciální, trubky a kolejnice (obr. 2) [2].



Obr. 2 Základní typy vývalků: a) tyčové, b) tvarové, c) tvarové na speciální účely, d) kolejnice [2].

Hlavním znakem tyčových vývalků je jejich vcelku jednoduchý geometrický tvar příčného průřezu. Kruhové tyče jsou válcovány v širokém spektru rozměrů od 5,5 mm až do 210 mm. Speciálním případem kruhové tyče jsou výztuže do betonů, které mají podélné žebrové výstupky. Dále jsou válcovaný tyče s průřezy ve tvaru čtverce, šestihranu, osmihranu, trojhranu, půlkruhu a další. Nejrozmanitější skupina válcovaných výrobků jsou speciální tvarové vývalky. Další velmi významnou skupinou vývalků v dnešní době představují ploché vývalky, jejichž charakteristickým znakem je jejich tloušťka a šířka. Jsou rozdělovány na tlusté a tenké plechy, tlusté a tenké pásy válcované za tepla, za studena a folie. Do skupiny speciálních vývalků jsou dále řazeny železniční dvoukolí a periodické profily. Speciální skupinu vývalků pak tvoří trubky a podle technologie válcování jsou děleny na bezešvé a svařované [2].

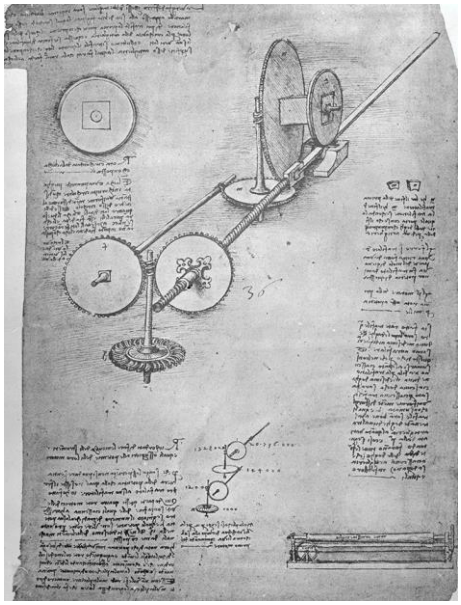
2.1 Historie válcování

Pro strojírenství a technologii je charakteristické, že vývoj a inovace v různých oblastech nelze často připsat jediné osobě, konkrétnímu datu, nebo dokonce jedinému místu, či zemi. Inženýrský a technologický vývoj je většinou vyvolán sociálními potřebami a je často výsledkem bádání mnoha průkopníků v určitém časovém období a v různých místech světa. Historie a vývoj válcování se od této charakteristiky neliší [3].

Válcování měkkých kovů, jako je zlato, stříbro a olovo, poprvé prováděli zlatníci a vyráběli šperky. Během čtrnáctého století se používaly ručně poháněné kotouče o průměru přibližně 12,5 mm. Koncept skutečné válcovací stolice byl nejprve nalezen jako skica ve skicáři Leonarda da Vinciho (obr. 3), ale neexistuje důkaz, že by takováto stolice byla někdy postavena [3].

Před koncem 16. století byly známy alespoň dvě válcovací stolice, které splňovaly základní myšlenkový princip válcování. V roce 1553 Francouz jménem Brulier využíval válcování pro výrobu plechů o jednotné tloušťce ze zlata a stříbra pro výrobu mincí. V roce 1578 obdržel muž jménem Bevis Bulmer patent na provoz dvou vřetenové řezací stolice na řezání užších proužků z plechů. Podle dalších dostupných záznamů bylo poprvé prováděno válcování tenkých plechů ze železa v Bristolu ve Velké Británii v roce 1666. Tyče čtvercového, nebo obdélníkového průřezu byly vyráběny v roce 1682 v Newcastelu rozřezáním tlustších plechů vyválcovaných na velkých válcovacích stolicích. Nejvíce se válcování železných plechů věnovali v Německu, dokud major Hanbury kolem roku 1720 nezavedl výrobu v závodech Pontypool ve Velké Británii [3].

Dalším průkopníkem v oboru válcování byl John Payn, kterému byl v Anglii v roce 1728 udělen patent na válcování různých tvarů vývalků pomocí drážkovaného válce. Stejně jako v případě Leonarda Da Vinciho neexistuje důkaz o tom, že by byl někdy takovýto stroj tímto mužem zprovozněn. V roce 1766 získal brit Jon Purnell patent na drážkované válce, které byly díky konstrukčnímu řešení poháněny stejnou rychlostí. Do této doby byl vždy každý válec poháněn zvlášť vodním kolem.



Obr. 3 Skica válcovací stolice od Leonarda da Vinciho [4].

V průběhu 18. století došlo k vytvoření prvních válcovacích tratí o více stojanech. První z nich byla tandemová válcovací stolice Richarda Forda z roku 1766, která byla vytvořena pro výrobu drátů. Dále byla poblíž Scheffieldu ve Velké Británii asi v roce 1790 postavena Jamesem Cockshuttem a Richardem Crawshayem čtyř-tandemová válcovací stolice s kapacitou 1–2 tuny denně. První záznam o opravdové kontinuální válcovací trati pochází z roku 1892 z Teplic v Československu, kde byla postavena válcovací trať skládající se z dvou hrubovacích stolic a pěti dokončovacích stolic. Každá z těchto stolic byla poháněna parním strojem o výkonu 1000 koní. Tato válcovací trať byla schopna vyrábět plechy o tloušťce 2 až 3 mm a šířka těchto plechů přesahovala 1200 mm a délka 18 m [3].

Kromě Evropy byly válcovací stolice konstruovány kolonisty v USA, kde byla první válcovací stolice postavena v roce 1751. V roce 1819 byla v USA válcována první ocel, a to v Union válcovnách v Pittsburgu. Do roku 1825 bylo v tomto městě spuštěno pět dalších válcovacích tratí a Pittsburg se tak stal v USA ohniskem kovozpracujícího průmyslu. Po skončení občanské války v roce 1865 proběhlo velké rozšiřování železnic, a tak dostal průmysl velký impuls pro další rozšiřování výroby železa a oceli válcováním [3].

Základní design dnešních válcovacích stolic případně i celých tratí není příliš odlišný od raných návrhů, zvláště když se jedná o základní stolici typu duo. Dnešní válcovací stolice se mohou klidně skládat i z více než dvaceti válců. Toto ukazuje, že v moderní stolice jsou schopny válcovat široké spektrum materiálů pro rozsáhlé aplikace koncových uživatelů s daleko vyšší kvalitou než v dřívějších dobách [5].

Tato práce se bude v experimentální části věnovat kosému válcování, proto bude rešerše zaměřena především na tento typ technologií válcování.

2.2 Rozdělení procesů tváření podle teploty

Během plastické deformace je část deformační energie uložena v materiálu ve formě nahromaděných dislokací na hranicích deformovaných zrn. Pokud bude následně deformovaný materiál ohřát na dostatečně vysokou teplotu, bude se snažit snížit svoji energii. Začne nukleace a růst nových nedeformovaných zrn, která nahrazují původní deformovaná zrna. Tento proces, při němž dochází ke snižování vnitřní energie kovových materiálů, je nazýván rekrystalizace. Teplota rekrystalizace je u každého kovu jiná a je též závislá na velikosti předchozí deformace. Čím větší je deformace, tím více je uložené energie v materiálu, a tím nižší je samotná teplota rekrystalizace. Rekrystalizace probíhá vždy, ale existuje teplota, při které se rekrystalizace urychluje a ta je stanovena jako 0,4 násobek teploty tavení daného kovu v kelvinech [6; 7].

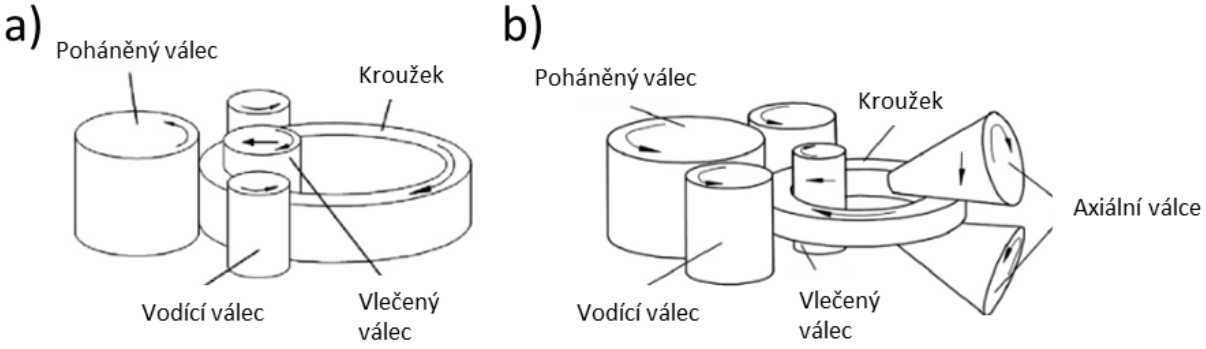
Experiment bude prováděn při teplotě vyšší, než je teplota rekrystalizace a bude tedy docházek k tváření za tepla. Rekrystalizace v tomto případě začíná, jakmile se vytvoření dostatečné množství hnací energie, tj. k deformaci a k rekrystalizaci dochází současně a tento způsob tváření umožňuje extrémně velké deformace. Protože dochází k neustále tvorbě nových rekrystalizovaných zrn, nebude vytvořená struktura vykazovat známky deformačního zpevnění. Rekrystalizačního pochodu je využíváno především k vytvoření jemnozrnné struktury z původní hrubozrnné licí struktury. Při dostatečné plastické deformaci materiálu dochází k uložení dostatečné energie pro zajištění hnací síly rekrystalizace a následná kontrola kvality rekrystalizačního procesu je vyhodnocována finální velikostí zrn materiálu. Při válcování za tepla, jako i u dalších procesů tváření, je velmi důležité dosažení stejné teploty v celém objemu materiálu. Pokud není teplota materiálu všude stejná může docházet k nerovnoměrné deformaci v objemu materiálu. Rozdíl teplot mezi jádrem a povrchem provalku může mít za následek tvorbu trhlin v různých jeho vrstvách [6; 7].

2.3 Speciální válcovací stolice

Technologie kosého válcování je řazena mezi speciální technologie válcování, do kterých také spadají takové, které válcují kroužky, závity šroubů, ozubená kola, mlecí koule a vzhledem ke konstrukční podobnosti k experimentálnímu zařízení především stolice pro válcování bezešvých trubek.

Stolice pro válcování kroužků

Válcování kroužků je pokročilá technologie tváření používaná především pro výrobu bezešvých kroužků a je rozdělena na dva typy. Jedním je čistě radiální válcování, kde jsou pomocí válců měněny pouze průměry a šířka takového kroužku zůstává nezměněna pomocí válců. Druhým typem válcování kroužků je takzvané radiálně-axiální válcování, kde jsou válcováním upravovány jak průměry, tak šířka kroužku (obr. 4). Takováto válcovací stolice je složena z hlavního poháněného válce, který upravuje vnější průměr kroužku, vlečeného válce, který se posouvá směrem k hlavnímu válci a upravuje vnitřní průměr kroužku, dvou axiálních válců, které udávají kroužku jeho šířku a dvou vodících válců [8].



Obr. 4 Schéma válcování kroužků: a) čistě radiální válcování, b) radiálně-axiální válcování [8].

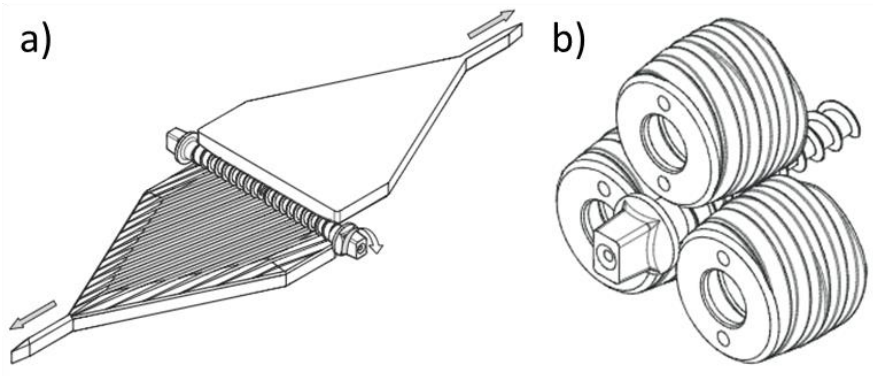
2.4 Kosé válcování

Tato kapitola navazuje na speciální technologie válcovacích stolic s tím, že v této kapitole jsou již popisovány válcovací stolice využívající nějakým způsobem technologie kosého válcování.

Stolice pro válcování závitů

Jedná se o metodu povrchového tváření. Tímto způsobem válcování lze vyrábět lichoběžníkové a kruhové závity, pilové zuby a další speciální typy závitů. Pro výrobu těchto závitů lze použít jak rovné, tak kruhové nástroje. Pro výrobu dlouhých závitů je však výhodnější použití válcových kalibrů, protože je zde možno posouvat provalkem. Technologie válcování závitů je používána především díky zpevnění, kterého je vlivem tváření za studena dosaženo. Tvrdost může v tomto případě dosahovat až dvojnásobných hodnot, než je ve stavu před válcováním [9].

V případě válcování závitů s rovnými nástroji je provalek umístěn mezi dvěma deskami, z nichž je jedna pevně fixována a druhá se pohybuje. Desky jsou vytvořeny tak, aby při jednom pohybu pohyblivé desky v plném rozsahu vytvoří kompletní závit (obr. 5a) [9]. Pokud bude závit válcován pomocí válcových nástrojů, může se jednat o válcování pomocí dvou nebo tří válců, které mohou mít rovnoběžnou osu s provalkem (obr. 5b), nebo mohou být osy válců mimoběžné [9; 10].

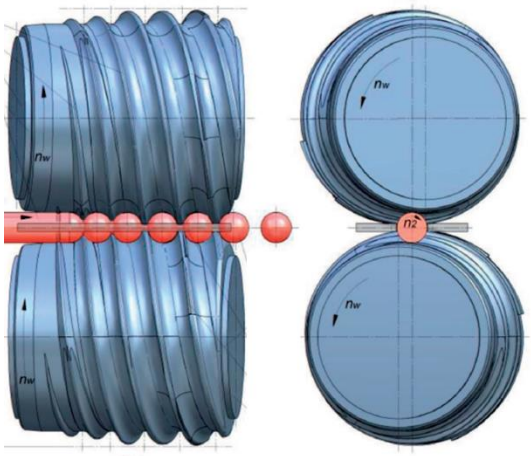


Obr. 5 Schéma válcování závitů: a) pomocí rovných kalibrů, b) pomocí válcových kalibrů [10].

Stolice pro válcování kuličkových polotovarů

Kuličkové polotovary jsou v dnešní době používány jako mlecí koule v mlýnech na drcení surovin, nebo jako valivé elementy kuličkových ložisek. Výroba těchto polotovarů obráběním, litím a zápustkovým kováním je ekonomicky velice náročná, a proto byla vynalezena

technologie válcování kuličkových polotovarů. Jedná se o technologii kosého válcování, která je v dnešní době brána jako jedna z nejefektivnějších metod výroby produktů z polotovarů typu tyč. Jednou z věcí, která přispívá k vysoké efektivitě je odstranění procesu oddělení jednotlivých výrobků od sebe, protože jsou odděleny po tváření pomocí válců. Koule jsou tedy válcovány přímo z tyčového polotovaru pomocí dvou identických válců, v nichž jsou vyříznuty spirálovité drážky (obr. 6). Tyto drážky jsou odděleny přírubami, které postupně zvyšují svoje rozměry. Na konci válců jsou umístěny nože, které oddělí vyválcovanou kuličku od můstku. Oba pracovní válce v případě tohoto typů válcování rotují stejným směrem a dávají tak válcované tyči opačný rotační pohyb [11].



Obr. 6 Schéma válcování kuličkových polotovarů [11].

2.4.1 Stolice pro válcování bezešvých trubek

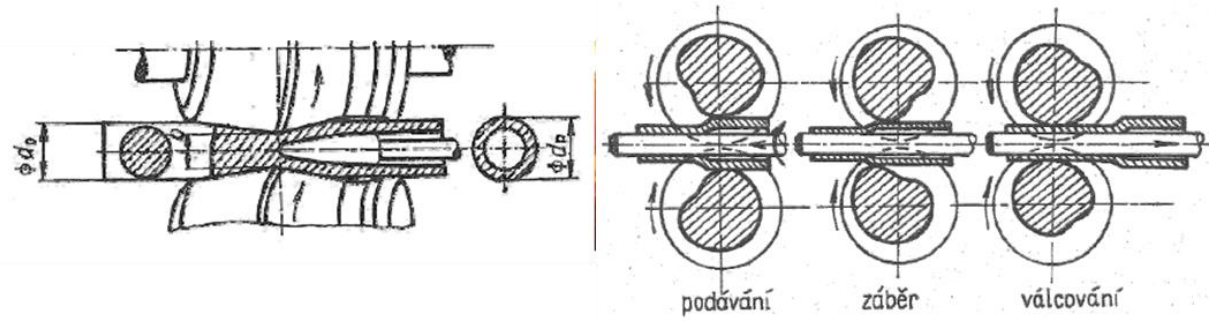
Výroba bezešvých trubek je v dnešní době zajišťována válcovacími procesy. Tyto válcovací procesy lze opět dělit podle toho, zda probíhají za tepla, za studena, či zda jsou výsledné vývalky hladké, závitové, s tvarovými konci atd. Jako výchozí polotovar pro tuto technologii je vybrán kruhový sochor. Princip této technologie spočívá v nutnosti vytvoření dutého předvalku děrováním a z něho následné vytvoření trubky redukcí tloušťky stěny, případně průměru na požadovaný rozměr. Výroba bezešvých trubek je tedy dělena na dva procesy. Prvním z nich je výroba dutého předvalku nebo výlisku a druhou vlastní výroba slabostěnné trubky. Podle procesu výroby trubky je poté následně daná metoda výroby pojmenována [12].

Válcování na tratích s poutnickými stolicemi – Mannesmannův způsob

Děrování je v tomto případě prováděno kosým válcováním. Rovnoměrné zahřátý vstupní materiál je vystředěn a následně vsunut mezi souhlasně otáčející se válce děrovací stolice (obr. 7 vlevo). Tyto válce jsou tvořeny kuželovitými částmi pro středění, děrování, samotné válcování, kalibraci a hlazení. Z důvodu působení příčného tlaku válců se v rotujícím provalku vyvolají napětí, která následně vedou k porušení soudržnosti v jeho středové části. Provalek se pohybuje ve šroubovici, což je dáno mimoběžností os pracovních válců a jejich úhlem sklonu k ose děrování, jenž je od tří do šesti stupňů. Dutý předvalek vytvořený tímto děrováním pomocí kosého válcování má přibližně stejný průměr jako výchozí ingot, nebo sochor, ale dojde k jeho prodloužení z důvodu vytvoření vnitřní dutiny. Součinitel prodloužení λ bývá v případě děrování tímto způsobem od 1,5 do 2,5 [6].

Dalším krokem tvorby trubky je válcování předvalku na poutnické stolici (pilger mill). Do dutého předvalku je vsunut dlouhý trn a následně dochází k válcování. Poutnické válce se otáčejí proti sobě. Metoda válcování trubek poutnickými válci má dva hlavní kroky (obr. 7 vpravo). První krok nastává, když jsou proti sobě prázdné části kalibrů a během tohoto

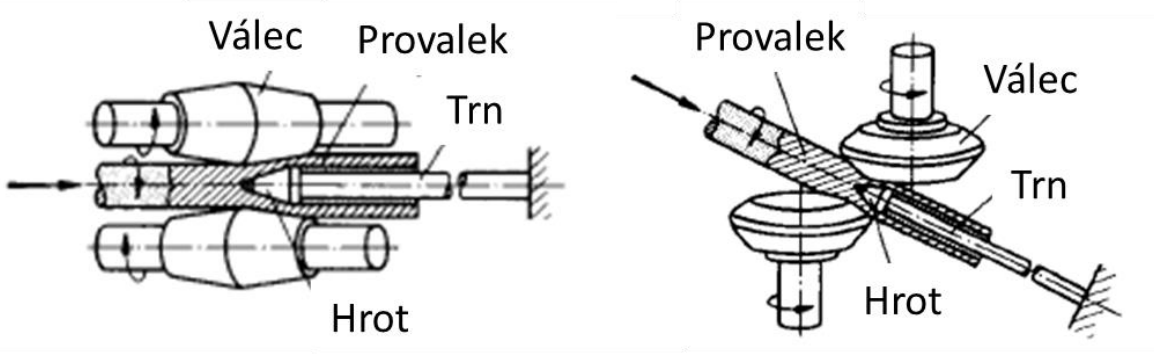
kroku dochází k posunutí provalku dopředu a k jeho natočení o 90°. Druhým krokem je válcování provalku pomocí kalibrů na požadovaný rozměr. Tento postup je neustále periodicky opakován, až do doby, kdy dojde k vyválcování celé trubky. Součinitel prodloužení v případě poutnické stolice dosahuje až hodnoty λ = 18 [6].



Obr. 7 Schéma Mannesmannova způsobu válcování bezešvých trubek: Děrování pomocí kosého válcování (vlevo), válcování na poutnické stolici (vpravo) [6].

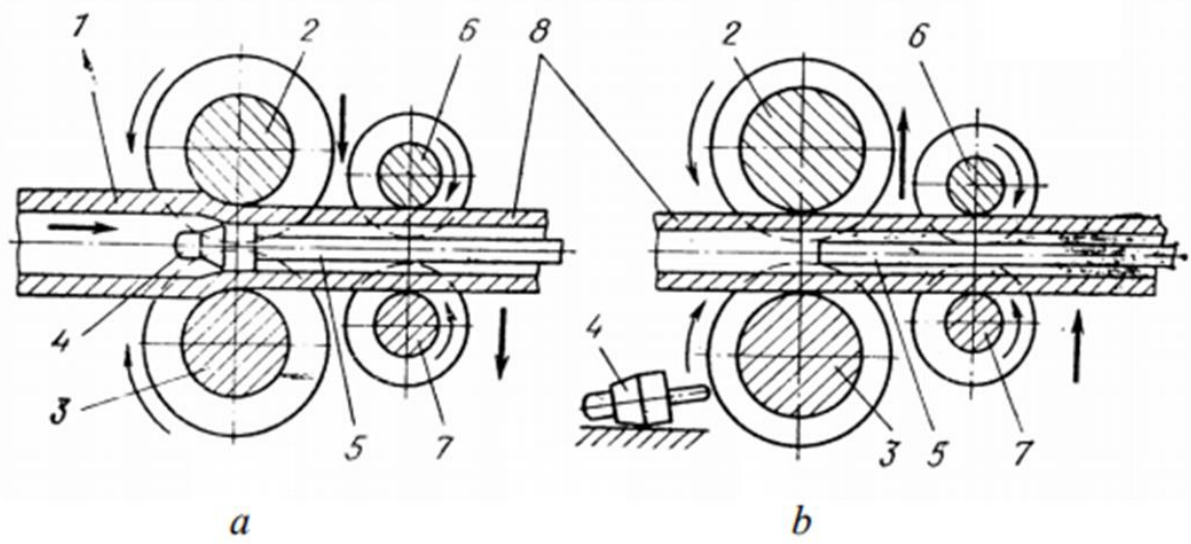
Válcování na tratích s automatikem – Stiefelův způsob

Jednou z možností děrování na tomto typu tratí je použití kosého válcování s mimoběžnými osami jako v předešlém případě. Je zde ale rozdíl v tom, že válce mají velmi jednoduchý tvar dvou komolých kuželů a nenacházejí se zde hladící a kalibrační části a samotný úhel sklonu bývá od 6 do 12 °(obr. 8 vlevo). Druhou možností děrování u válcovacích tratí s automatikem je využití kotoučových děrovacích stolic, kde jsou osy válců rovnoběžné. Vtahující síla provalku a šroubovitý pohyb je dán excentricitou osy provalku a os kotoučů (obr. 8 vpravo). U tratí s automatikem je velmi často využíváno dvou děrovacích stolic a děruje se tedy na dvakrát. Součinitel prodloužení provalku λ může v tomto případě dosahovat hodnot 5 a více [6].



Obr. 8 Schéma děrování na tratích s automatikem: Děrování kosým válcováním (vlevo), děrování kotouči (vpravo) [9].

Válcování na automatiku je klasickým způsobem podélného válcování v kalibru na trnu. Pro zjednodušení popisu tohoto způsobu válcování bude popsán obr. 9. Válcování kruhových trubek na automatiku je prováděno dvěma kalibrovanými pracovními válci (2, 3) na hrotu (4). Po prvním průchodu pracovními válci je vyměněn hrot na trnu (5) za o 1 až 2 mm větší a pomocí reverzních válců (6, 7) je provalek vrácen do startovní polohy. Provalek je ještě pootočen o 90 ° a proces je opakován znovu. Maximální součinitel prodloužení λ nesmí mezi jednotlivými dvěma úběry překročit velikost 2, aby nedošlo k poškození trubky. Nejdelší trubky válcované automatikem jsou 10–15 metrů dlouhé [13].



Obr. 9 Schéma válcování na automatiku: 1) děrovaný předvalek, 2) horní pracovní válec, 3) spodní pracovní válec, 4) hrot, 5) trn, 6) horní vratný válec, 7) spodní vratný válec, 8) trubka [13].

Trubky po válcování na automatiku mají určitou oválnost, která je nazývána odchylkou tloušťky stěny. Takto vyválcovaná trubka je proto tedy dále válcována v dokončovacích válcovacích stolicích, jejichž konstrukce je velmi podobná děrovacím stolicím pro kosé válcování. V těchto typech válcovacích stolice dochází k redukci stěny trubky o 5 až 10 procent [13].

Válcování na tříválcových stolicích – Asselův způsob

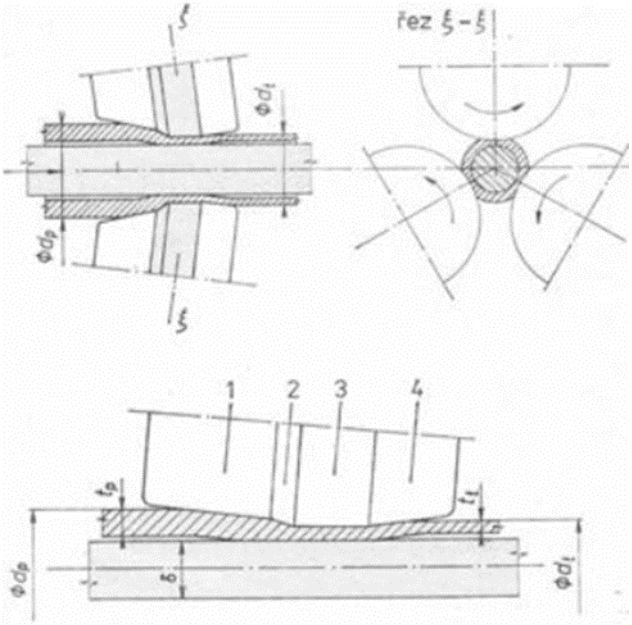
Již hojně používanou technologií válcování trubek pomocí tříválcových stolic je Asselova technologie válcování. Tato technologie je založena na principu kosého válcování, kterou lze realizovat přesnějších výrobky a je tedy snížen odpad materiálu při následném třískovém obrábění. Tato technologie se skládá z děrování předvalků na děrovacích tří, nebo dvou-válcových stolicích a následné kalibrování na tříválcové stolici tzv. elongátoru. Tento typ válcovací stolice je tvořen třemi vzájemně mimoběžnými šikmo uloženými válci. Osy těchto válců svírají s osou válcování úhel mezi 10 ° a 15 °. Rychlost rotace válců lze rozložit na tečnou složku, která způsobuje rotaci provalku a složku působící ve směru osy válcování, která vtahuje provalek do pásma deformace [14].

Předností kosého válcování v děrovacím procesu je, že v jádru materiálu je vytvořen stav napjatosti s tlakovými napětími, který je příznivý pro děrování i těžko tvařitelné oceli. Tímto způsobem se děrují poměrně tlustostěnné předvalky, takže je nutno při následném válcování na elongátoru dosahovat vysokých stupňů deformace, a to technologie tříválcového válcování umožňuje [14].

Princip této technologie je zobrazen na obr. 10. Válcování zde probíhá na dlouhém trn, který je na jednom konci opatřen hlavou k uchycení a na druhém krátkým kuželem, aby bylo možno trn snáze zasunout do dutého předvalku. Ve spodní části obr. 15 je znázorněno několik pracovních pásem válců [14]:

1) Záběrový kužel – zavádí předvalek do pásma deformace a mírně redukuje průměr a tloušťku stěny trubky.
2) Válcovací kužel – zde probíhá podstatná část deformace průměru a tloušťky stěny trubky na požadovaný rozměr.

3) Rozválcovací kužel – vyhlazuje vnější povrch provalku a dochází zde ke kalibraci vnějšího průměru
4) Výstupní kužel – zde dochází k dalšímu rozválcování spojené s mírným nárůstem průměru trubky, ale beze změny její tloušťky, což má za následek uvolnění trubky od trnu a její snadné sejmutí.



Obr. 10 Schéma válcování trubek na tříválcové stolici [14].

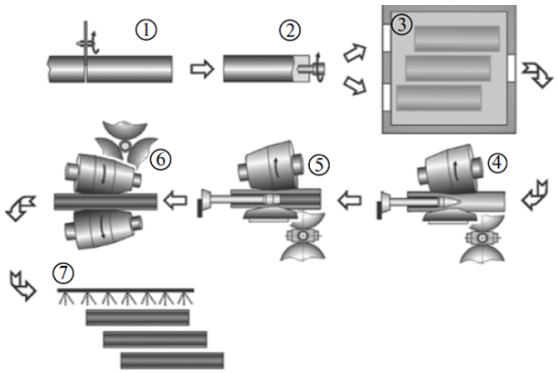
Výše uvedené metody válcování jako je válcování na poutnických stolicích nebo automatiku, které jsou v dnešní době pro výrobu tohoto polotovaru brány jako konvenční, vyžadují velkou vstupní investici pro výrobu produkční linky a také se potýkají s problémy délky této výrobní linky, kdy je potřeba materiál dohřívat. Je tedy velmi obtížné válcovat trubky z ocelí, které je třeba tvářet v úzkém rozsahu teplot nebo z oceli, která je spatně tvářitelná [15].

Další stolice pro válcování trubek případně tyčí

V posledních třiceti letech bylo vytvořeno mnoho experimentálních návrhů tříválcových stolic pro válcování bezešvých trubek nebo tyčí z různých materiálů. Dále bylo vědci po celém světě zkoumáno, jaký vliv má tento typ technologie válcování a různé geometrie válců na vnitřní strukturu provalku. Velmi často se v případě této technologie diskutuje o tvorbě vnitřních axiálních trhlin v provalcích během kosého válcování. Je zde mnoho různých pohledů na to, jakou roli nebo efekt mají radiální tangenciální, axiální případně smyková napětí na provalek. [16] Podle dostupných pramenů mohou být na kosých válcovacích stolicích s třemi pracovními válci válcovány hlinkové materiály pro letecký nebo automobilový průmysl a dále jsou prováděny testy i na hořčíkových slitinách používaných taktéž v leteckém a automobilovém průmyslu ale i v elektrotechnice [17; 18].

A. M. Gałkin a kolektiv v roce 2007 zahájili návrh válcovací stolice osazené třemi pracovními válci vzájemně přesazenými o 120 °. Tato válcovací stolice byla navržena pro válcování tyčí a trubek do průměru 30 mm. Článek udává, že by díky této technologii válcování mělo být dosaženo mnohem vyšší produkce válcovaných bezešvých trubek než dosud, a to při snížení nákladů na výrobu nových strojů a jejich následného použití [19]. Na návrhu této válcovací stolice bylo také testováno válcování kompozitních materiálů nebo bimetalických tyčí. Na základě různých numerických simulací autor udává teoretické možnosti spojování různých materiálů pomocí tříválcového kosého válcování [20].

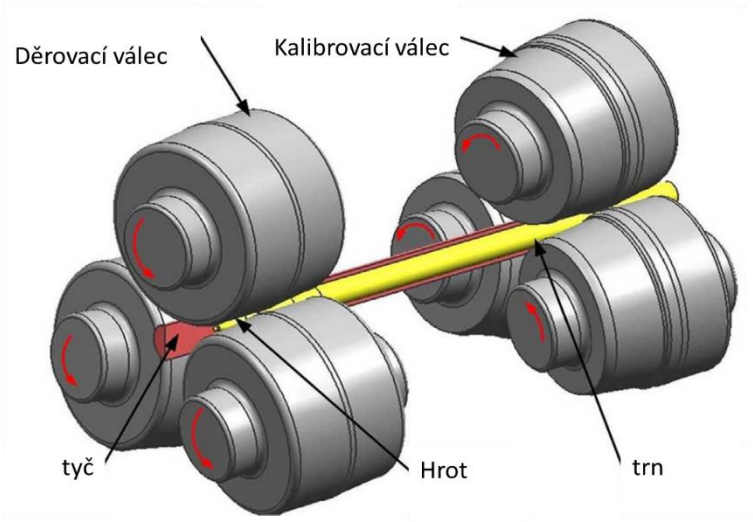
Další návrh válcovací trati pro kosé válcování pomocí tří válců byl proveden Romantsevem. Tato válcovací stolice byla na vržena pro vstupní průměry od 80 do 260 mm. Válcováním na této stolici lze vytvářet trubky o průměru od 73 do 250 mm s tloušťkou stěny od 11 do 28 mm (obr. 11) [21].



Obr. 11 Schéma postupu výroby trubek na válcovací trati dle návrhu Romantseva [21].

Tato válcovací trať využívá kombinace děrování a válcování na dvouválcových kosých stolicích a rovnání a finální kalibrace na tříválcové stolici. Dále byla z důvodu zvýšení poptávky trhu po přesných trubkách o průměrech 40–70 mm navržena druhá válcovací stolice TPA 40–80. Jedná se o velmi podobný typ válcovací trati, pouze zde došlo k prohození typu válcovací stolice v kroku 5 a 6 a bylo zde z důvodu menšího objemu materiálu zařazeno více ohřevů. Ohřevy v tomto případě jsou indukční, což dokáže ve velké míře spořit čas i prostor. Válcování trubky je prováděno pomocí tříválcové stolice na trnu a kalibrace jejích rozměrů je prováděn dvouválcovou stolicí s bočními přidržovači. Článek se ve velké míře zaobíral nevýhodou vysokého opotřebení a nutností častého měnění bočních přidržovačů, což je další z výhod tříválcových stolic, které žádné boční přidržovače nepotřebují [21].

Dále je v literatuře zmiňována tandemová kosá válcovací stolice pro produkci bezešvých trubek různých rozměrů. Jedná se o válcovací stolici, která je tvořena dvěma sadami tří kosých válců, kde první sada zajišťuje děrování tyče a druhá sada následně kalibruje rozměry válcované trubky na požadované (obr. 12). Výhodou této válcovací stolice je zajisté blízkost obou kroků tváření, která je prakticky zanedbatelná. Toto má za následek velmi nízký rozdíl teplot mezi děrováním a finálním kalibrováním rozměrů, což umožňuje válcovat na tomto typu válcovací stolice mnohé obtížně tvařitelné materiály, případně materiály s úzkým pásmem teplot pro deformaci [15].

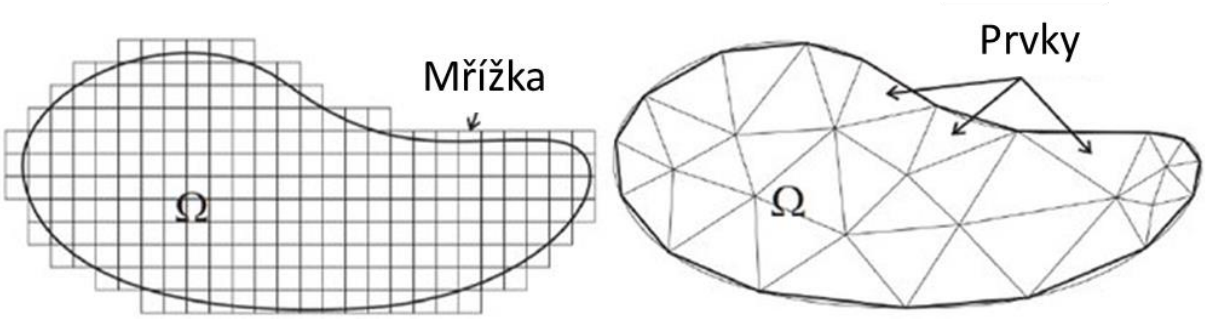


Obr. 12 Schéma uspořádání tandemové tříválcové stolice [15].

Jelikož je válcování pomocí tříválcových stolic geometricky velmi složité není jednoduché upravit známé rovnice pro podélné válcování pro tento případ a zjistit stupeň deformace, rychlost deformace a další deformační charakteristiky. Z tohoto důvodu je nutno využití numerických simulací s pomocí počítačových softwarů, protože rovnice pro výpočet těchto hodnot by byly v reálném světě velmi těžko řešitelné. Na tuto problematiku navazuje další kapitola zabývající se numerickými simulacemi a informacemi, které je nutno pro správné vytvoření a vyřešení a vyhodnocení těchto simulací znát.

3. Využití numerické simulace u experimentálního válcování

V 21. století se staly numerické simulace standartním nástrojem v oblasti vývoje a výzkumu technologických procesů. Matematické modelování je věda zabývající se interpretací nebo transformací fyzické reality do abstraktního modelu, který je následně snáze dosažitelný co se týče analýz a výpočtů. Numerické simulace jsou proces, který následně umožňuje vypočítat různá řešení těchto matematických modelů na počítači a simulovat tak jejich reálné chování ve fyzickém světě. Existuje mnoho metod numerických simulací, z nichž jsou nejpoužívanější metoda konečných prvků (FEM – Finite Element Method) a metoda konečných rozdílů (FDM – Finite Diference Method). Obr. 13 ukazuje hlavní rozdíly mezi těmito metodami numerické simulace, kdy každá z těchto metod vyžaduje pro výpočet nějakou mřížku tzv. „Mesh“. [22].



Obr. 13 Schématické znázornění prvků nestrukturované mřížky FEM (vpravo) a strukturované mřížky FDM (vlevo) [23].

Metoda konečných rozdílů poskytuje bodovou aproximaci problému s řadou bodů v mřížce, které rozdělují geometrii podél každé souřadné osy, zatímco model metody konečných prvků

poskytuje kusovou aproximaci problému a jeho prvky rozdělují geometrii podél jejích hranic a vytváří takzvané prvky a uzlové body. FDM je velmi rychlou výpočetní metodou, protože řeší rovnice přímou diferenciací podél každé osy souřadnic. FEM řeší rovnice diskretizací domény s prvky vybraného tvaru a jejich sestavením do celého systému a běží ve většině případů pomaleji. Další rozdíl a dá se říci, že pro řešení našeho problému hlavní je ten, že FDM není schopno řešit problémy s velkými napětími nebo deformacemi a je využíváno především pro simulování problémů mechaniky tekutin, přenosu tepla atd. Oproti tomu je metoda konečných prvků schopna řešení problémů deformací, napěťových stavů a může být použita téměř pro všechny druhy technických problémů, kdy se vyskytuje složitá geometrie nebo kombinace různých druhů materiálů [22; 24].

3.1 Metoda konečných prvků

Historicky první využití metody konečných prvků proběhlo ve čtyřicátých letech minulého století a bylo navrženo matematikem Richardem Courantem. Strojní inženýři v padesátých letech minulého století vyvinuli, popularizovali a prokázali účinnost této metody, kterou následně nazvali metoda konečných prvků. Po těchto úspěších bylo nutno do procesu zapojit i matematiky, aby vylepšili tuto metodu. Numerické simulace jsou od té doby příkladem multidisciplinární kooperace, která díky spojení dosáhla velkého pokroku v této technické oblasti, který byl ještě následně podpořen zvyšujícím se výkonem výpočetních stanic a v dnešní době i klasických počítačů. Pro vytvoření pokročilých simulací je potřeba mnohdy kooperace matematiků, technologů a programátorů [22].

V celém světě je velké množství problémů, které je nutno řešit numerickými simulacemi. Jak již bylo zmíněno dříve, FEM simulace byly zpravidla využívány pro analýzy napěťových stavů a dalších fyzikálních nebo technologických problémů. Pro metodu konečných prvků je definováno mnoho matematických modelů. Které lze využít také k řešení [25]:

- Mechaniky pevných látek a struktur
- Přenosu tepla
- Akustiky
- Mechaniky tekutin

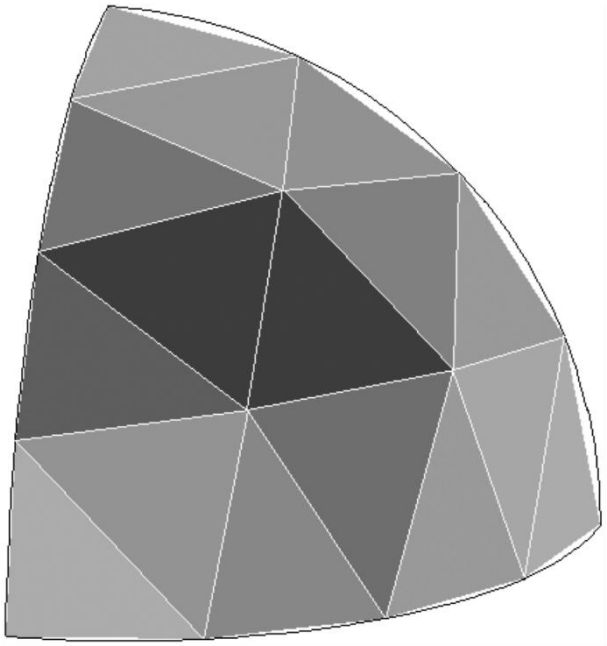
3.2 Počítačové modelování s použitím FEM

Chování každé věci nebo systému je závislé na tom, zda je v rovině (2D), nebo v prostoru (3D), z čeho je vyroben, jaký má tvar, co mu v systému dovolíme atd. Na základě těchto všech vlastností je potřeba nastavit takzvané okrajové podmínky tak, aby simulace přesně věděla, jaké vlastnosti má jaká část modelu, co vykonává za pohyb, jakých dalších částí modelu se dotýká atd. Postup výpočtového modelování pomocí metody konečných prvků obecně sestává ze čtyř kroku [25]:

- Modelování geometrie
- Síťování (diskretizace)
- Specifikace vlastností materiálu
- Specifikace okrajových podmínek, počátečních podmínek a podmínek zatížení

3.2.1 Modelování geometrie

Reálné struktury a komponenty jsou ve většině případů velmi složité a je třeba je upravit do geometrií, se kterými je možno v počítači pracovat. Zakřivené části geometrie a její hranice lze modelovat pomocí křivek a zakřivených ploch. Je ale potřeba vědět, že geometrie je nakonec představována souborem prvků a křivky a zakřivené plochy jsou aproximovány rovnými čárami a plochými plochami (obr. 14). Přesnost zobrazení zakřivených částí je poté definována počtem použitých prvků. Je jasné, že čím více prvků a uzlových bodů bude použito, tím přesnějšího tvaru bude dosaženo, ale pro výpočetní systém bude náročnější s tímto vysokým množstvím prvků pracovat a počítat. Z důvodu časové náročnosti výpočtu je proto někdy nutné omezovat počet prvků v geometrii a vytváří se tak mírné odchylky od reálného procesu. Úkolem analytiků je poté kvalitní interpretace výsledků simulace s ohledem na geometrické úpravy z hlediska úspory času výpočtu [25].

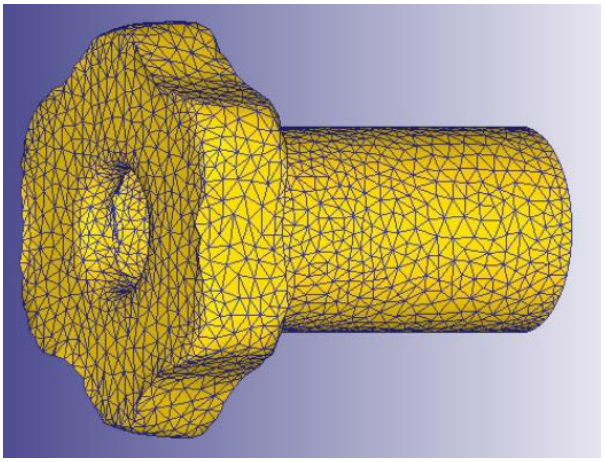


Obr. 14 Zobrazení zjednodušení zakřiveného povrchu [25].

Pro vytvoření složitějších geometrií nejsou simulační softwary většinou vytvořeny, a proto je potřeba importovat geometrii z externího CAD systému.

3.2.2 Síťování (Meshing)

Síťování je prováděno za účelem zjednodušení předpokládaného velmi složitého řešení technického problému, který, když je rozdělen na malé prvky propojené sítí a uzlovými body, může být následně aproximací pomocí polynomických funkcí spojen v jeden celek. Vytváření sítí je velmi důležitý přípravný úkol pro analytika a hlavně velmi zkušení analytici jsou teprve schopni vytvořit odpovídající síť pro řešený problém. Tato síť musí být správně zapletena do prvků specifických tvarů, jako jsou tetraedry nebo hranoly v případě 3D objektů a trojúhelníky, nebo čtverce v případě 2D objektů. Většina simulačních softwarů v dnešní době poskytuje poloautomatické generátory sítí a nejčastějším způsobem síťování je metoda triangulace, která je součástí většiny pre-procesorů. Na obr. 15 je uveden příklad vytvořené sítě na zkoumané součásti. Je jasně viditelné, že počet prvků a uzlových bodů u hran součásti narůstá, protože přesně v těchto místech jsou očekávány nejprudší změny vlastností [25].



Obr. 15 Příklad síťování na součásti v softwaru DEFORM 3D [26].

3.2.3 Specifikace vlastností materiálu

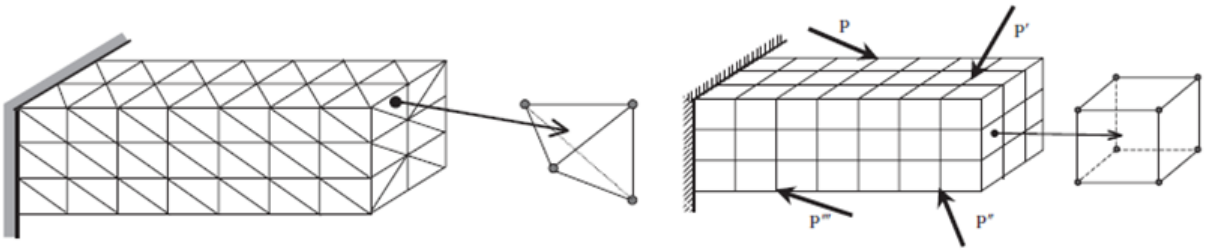
Většina technických systémů sestává z více než jednoho materiálu. Vlastnosti těchto materiálu lze v případě potřeby v simulačních systémech definovat pro skupinu prvků, nebo pro každý jednotlivý prvek zvlášť. Pro různé výpočty napětí a deformací, jakožto proměnných, které jsou simulovány například při tváření, je potřeba znát modul pružnosti v tahu a ve smyku pro analýzu pružné deformace. Pro analýzu plastické deformace je nutné znát deformační charakteristiky materiálu (flow stress), což je napětí potřebné pro udržení plastické deformace materiálu při určitém napětí. Pro vyhodnocování teploty je nutné znát koeficient tepelné vodivosti zkoumaného materiálu, emisivitu atp. Zadávání těchto hodnot je v simulačních programech většinou velmi jednoduché, ale občas může být problém získat tyto informace pokud nejsou přímo uvedeny v materiálových listech apod. Většina těchto programů obsahuje vlastní knihovny materiálů, u kterých jsou všechny tyto hodnoty předem nadefinovány, nebo je potřeba provést různé experimenty pro zjištění těchto konstant či proměnných a dodání je k informacím o materiálu [25].

3.2.4 Specifikace okrajových a počátečních podmínek a podmínek zatížení

Okrajové, počáteční a zatěžovací podmínky hrají velmi důležitou úlohu ve finálním řešení simulace. Zadávání těchto podmínek se obvykle provádí velmi snadno pomocí pre-procesorů a velmi často je to prováděno graficky. Tyto okrajové podmínky mohou být uživatelem voleny podle geometrických identit (bodů, čar, křivek, povrchů a těles), nebo podle prvků a mřížek [25].

3.3 Numerické simulace ve 3D

Trojrozměrný prvek lze považovat za nejobecnější ze všech konečných prvků, protože všechny proměnné jsou závislé na x, y a z. U 3D těles existuje celkem šest možných složek napětí, tři tečné a tři normálové. Jak již bylo zmiňováno výše vzhledem k síťování může být základní buňka tvořena trojúhelníky a vznikne tetraedr neboli čtyřstěn, (obr. 16 vlevo) nebo čtverci a vznikne hexaedr neboli krychle (obr. 16 vpravo) [25].



Obr. 16 Elementární buňka sítě ve 3D: Tetraedr – čtyřstěn (vlevo), hexaedr – krychle (vpravo) [25].

3.4 DEFORM

K tvorbě numerických simulací procesu válcování tyčí a trubek bude v této práci použit simulační software DEFORM 2D/3D Ver. 11.2 od firmy Scientific Forming Technologies Corporation. Jedná se o inženýrský software založený na takzvané metodě konečných prvků, který umožňuje analyzovat procesy tváření kovů, tepelného zpracování, obrábění nebo mechanického spojování součástí s pomocí počítače. V posledních dvou dekádách se ukazuje, že jeho výpočty jsou velmi přesné. DEFORM je otevřený systém, který poskytuje velkou flexibilitu konstruktérům a analytikům, pracujícím v řadě technický odvětví, nebo ve vědě a výzkumu. Simulační software je schopen vypočítat velké deformace a chování materiálu při tepelném zpracování s výbornou přesností a je v dnešní době jedním z nejrozšířenějších softwarů tohoto typu na světě. Tento software lze rozdělit do několika dílčích podprogramů nebo komponent, jako jsou Pre-processor, Simulator, Post-processor [26].

3.4.1 Pre-processor

Pre-processor je komponenta programu, ve které dochází k tvorbě, skládání, případné modifikaci dat potřebných pro analýzu simulace a vygenerování potřebné databáze. Pre-processor programu DEFORM používá grafického rozhraní k vytvoření dat potřebných pro simulaci:

- Popis objektů – geometrie, síťování, teplota, materiál atd.
- Materiálová data – popis chování daného materiálu v podmínkách deformace
- Vazby mezi objekty – popis interakce mezi objekty včetně tření, kontaktu a tepelného toku
- Nastavení simulace – popis metody řešení daného problému, jaký fyzikální děj má být modelován, kolik diskrétních časových kroků má být modelováno atd.
- Vnitřní materiálová data – popis fyzikálních procesů transformace jedné fáze materiálu na druhou během tepelného zpracování jako například rozpad austenitu na perlit, bainit a martenzit.
- DEFORM Multiple Operation – Zde dochází k nastavení několika po sobě jdoucích operací, jejichž simulaci následně software provede bez interakce s uživatelem. Díky tomuto je umožněno uživateli snadněji přenášet objekt napříč operacemi.

3.4.2 Simulátor

Simulační nástroj provádí numerický výpočet požadovaný pro analýzu procesu a zapisuje výsledky do databáze. Dále simulační nástroj čte výsledky z databáze a dále provádí aktuální kalkulaci výsledků, které opět přikládá k databázi. Simulační nástroj dále spolupracuje se systémem automatického generování sítě a generuje tak novou síť na součásti, kdykoliv je to

potřeba. Veškeré informace o stavu simulace včetně chybových hlášení ukládá do souboru zpráv a do protokolu [26].

3.4.3 Post-processor

Post-processor je nástroj, s jehož pomocí lze číst vytvořenou databázi výsledků ze simulátoru a zobrazit tak výsledky graficky, dokáže extrahovat číselná data. Post-processor je vybaven grafickým uživatelským rozhraním pro prohlížení a měření geometrie zpracovávané součásti a proměnných, jako je napětí, teplota, zatížení nástrojů a dalších dat potřebných pro kvalitní vyhodnocení návrhu zpracování . Tato data lze pomocí post-procesoru extrahovat a využít v dalších aplikacích [26].

3.5 Stavové proměnné ve FEM simulacích

V systému DEFORM 2D/3D lze získávat informace o průběhu hodnot různých stavových proměnných v různých bodech zkoumaného objektu a v různých časech, nebo pozicích dle nastavení simulace. Tyto stavové proměnné nám dávají informaci o tom, jak je zkoumaný díl namáhán, k jakým v něm dochází deformacím, jak se pohybuje v souřadném systému atd. V této kapitole budou podrobněji popsány hlavní stavové proměnné, které budou následně sledovány v experimentálních simulacích. Mezi nepopisované hodnoty možné zjistit ze simulace patří například teplota, kterou není třeba více vysvětlovat, dále velikost zrna, objem, tvrdost, síla, normálový tlak atd. [26].

3.5.1 Přemístění (Displacement)

Jedná se o stavovou proměnou používanou pro úlohy s malou deformací, při kterých tato stavová proměnná udává hodnotu posunu uzlového bodu. Pro velké deformace bude tato proměnná udávat posun od posledního překreslení. Jedná se o proměnnou určenou primárně pro analýzu deformace matrice [26].

3.5.2 Deformace (Strain)

Míra deformace použitá při analýze velkých deformací v systému DEFORM je skutečná deformace, která se liší od známé poměrné deformace, prezentované v typických inženýrských aplikacích. Poměrná deformace je definovaná dle vzorce (1) [26].

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \, [-] \tag{1}$$

Kde ϵ je poměrná deformace, Δl je změna délky a l_0 je původní délka.

Toto vyjádření je vhodné pro malé deformace materiálu. Ve chvíli, kdy dochází k velkým deformacím, tak tato rovnice přestane platit. Pro analýzu velkých deformací je lepší použít skutečnou neboli logaritmickou deformaci, která je definována jako součet velké řady libovolně malých přírůstků deformace po celé délce (2).

$$\epsilon = ln\frac{l_f}{l_0} \, [-] \tag{2}$$

Kde ϵ je skutečná deformace, l_f je finální délka a l_0 je počáteční délka. Při rozdělení této deformace do směrů os souřadného systému lze složky deformace definovat rovnicemi, které jsou stejné pro každý směr a je nutné pouze měnit jejich indexy a složky dle směru, proto bude uvedena pouze pro směr x (3).

$$\epsilon_x = \frac{dx}{x_0} [-] \quad (3)$$

Kde ϵ_x je skutečná deformace ve směru x, dx je inkrementální změna rozměru ve směru x a x_0 je počáteční rozměr součásti ve směru x. Deformace smyková je následně definována opět pomocí tří rovnic pro tři roviny souřadného systému, z nichž bude uvedena pouze ta pro roviny xy (4).

$$\epsilon_{xy} = \frac{dy}{x_0} [-] \quad (4)$$

Kde ϵ_{xy} je smyková deformace v rovině xy, d_y je inkrementální rozměru ve směru y a x_0 je počáteční rozměr součásti ve směru x [6; 26]. Prostřednictvím různých složitých matematických operací je možné definovat takzvané hlavní osy deformace na nichž jsou všechny složky smykových napětí nulové. Napětí na těchto osách je nazýváno hlavním napětím. Je užitečné mít jednu charakteristickou hodnotu deformace pro popis stupně deformace. DEFORM používá hodnotu pro analýzu tváření kovů známou jako efektivní napětí, nebo napětí Von-Mises (5) [26].

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_x)^2} [-] \quad (5)$$

Kde $\epsilon_x\ \epsilon_y\ a\ \epsilon_z$ jsou hlavní deformace a $\bar{\epsilon}$ je efektivní deformace [26].

3.5.3 Rychlost deformace (Strain rate)

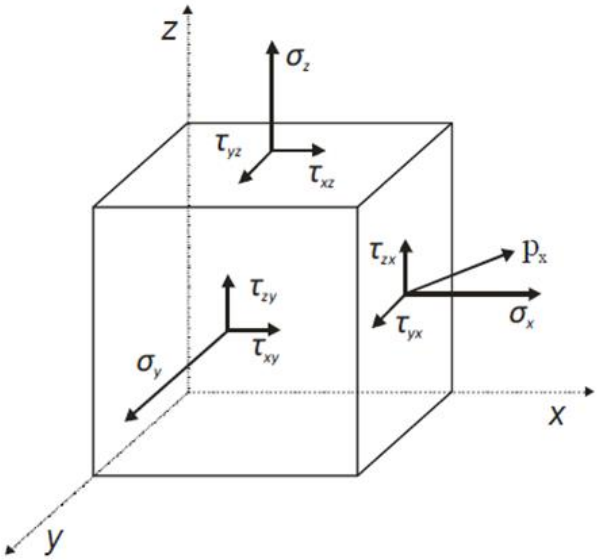
Rychlost deformace je veličina, která udává rychlost při které dochází k deformaci objektu z jeho původního tvaru. Jednotkou rychlosti deformace je deformace za sekundu (6). Deformace může nastávat v různých směrech v závislosti na způsobu působení sil a napětí. Rychlost deformace je rozdílná pro různé materiály a často se mění při změnách teploty a použitých silách. Rychlost deformace testovaných materiálů může být vypočtena na základě zkušebního měření materiálově testovacími stoji typu Instron apod., které dokážou aplikovat velmi přesné zatížení danou rychlostí při měření deformace [26; 27].

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} [s^{-1}] \quad (6)$$

Kde $\dot{\varepsilon}$ je rychlost deformace, $d\epsilon$ je malá změna deformace a dt je malá změna času.

3.5.4 Napětí (Stress)

Napětí je definováno jako síla působící na jednotku plochy. Napětí může být stejně jako deformace rozkládáno v pravoúhlém souřadnicovém systému. Napětí vyvolané silami působícími kolmo na zkoumanou plochu je nazýváno normálovým napětím a je označováno σ. Druhým typem napětí je to, které je vyvoláno silou, která je rovnoběžná se sledovanou plochou a takové napětí je smykové neboli tangenciální a je označováno symbolem τ. V prostorové úloze tedy máme tři normálové složky napětí a celkem šest tečných složek napětí. Tato napětí se zjednodušeně zobrazují pomocí elementární krychle (obr. 17) [6; 26].



Obr. 17 Krychle s rozložením tečných a normálových napětí [28].

Z momentové rovnováhy sil vyplývá, že tečné složky sil působící ve stejné rovině se sami sobě rovnají. Stejně jako u deformace lze matematickou úlohu výpočtu orientovat tak, že smyková napětí budou nulová a výsledná normálová napětí budou tedy hlavní napětí. DEFORM používá napětí dle Von Misese k určení efektivního napětí (7).

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2}\ [MPa] \qquad (7)$$

Kde $\bar{\sigma}$ je efektivní napětí, a σ_x, σ_y a σ_z jsou hlavní napětí.

3.5.5 Rychlost (velocity)

Další stavovou proměnnou je rychlost. Tato stavová veličina ukazuje uzlovou rychlost v každém kroku simulace. Vektorovými grafy je možno zobrazit velikost této rychlosti a její směr [26].

4. Indukční ohřev

V dnešní době je možno materiály zejména tedy oceli před tvářením ohřívat mnoha způsoby. Nejčastěji používanou metodou je stále ohřev pomocí pecí, ať už komorových, vozových, šachtových, průběžných nebo karuselových pecí s otočnou kruhovou nístějí. Všechny tyto pece využívají k ohřevu materiálu přenos tepla pomocí sálání a teplo je v těchto pecích vytvářeno nepřímým elektrickým odporovým ohřevem. Jednou z možných alternativ odporového elektrického ohřevu je v dnešní době využití ohřevu indukčního.

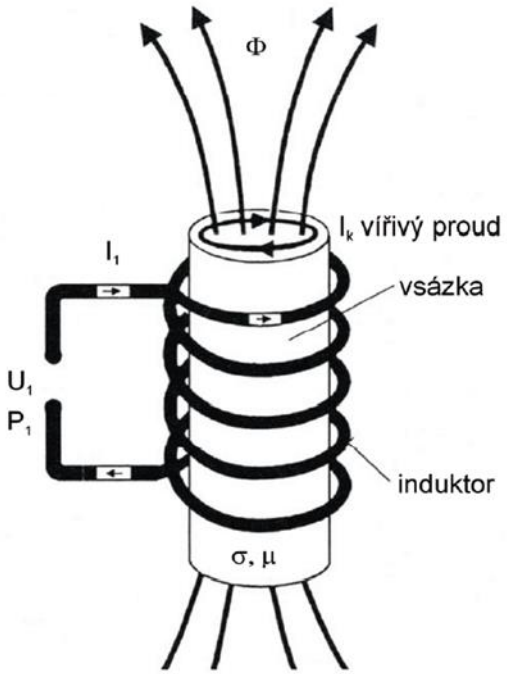
4.1 Historie indukčního ohřevu

Technologie využití indukčního ohřevu vychází ze zákona elektromagnetické indukce, který byl objeven Michaelem Faradayem v roce 1831. Zákon popisuje vznik elektrického proudu ve vodiči, který se pohybuje v elektromagnetickém poli. Využití má především u elektromotorů, kde bylo ohřívání transformátoru a vinutí považováno za nežádoucí. První pece, kde bylo indukčního fenoménu využito záměrně k ohřevu, byla vytvořena v roce 1916 a byla použita pro tavení kovů. Technologie tepelného zpracování pomocí indukčního ohřevu byla poté realizována v 30. letech minulého století, kdy byly technologií indukčního kalení

zpracovávány ložiska a klikové hřídele. Lze říci, že indukční ohřev je v dnešní době používán pro technologii tzv. indukčního kalení, kdy je povrchu oceli ohříván a následně prudce ochlazen za účelem vytvoření zákalných struktur, a tím dosažení vysoké tvrdosti povrchu. Dále je technologie indukčního ohřevu dnes využívána například na válcovacích linkách pro kruhové polotovary, kde je trať dlouhá a je nutno ocel dohřívat. Někdy je indukční ohřev řazen i jako hlavní technologie ohřevu samotného materiálu a nahrazuje tak komorové pece [29].

4.2 Princip indukčního ohřevu

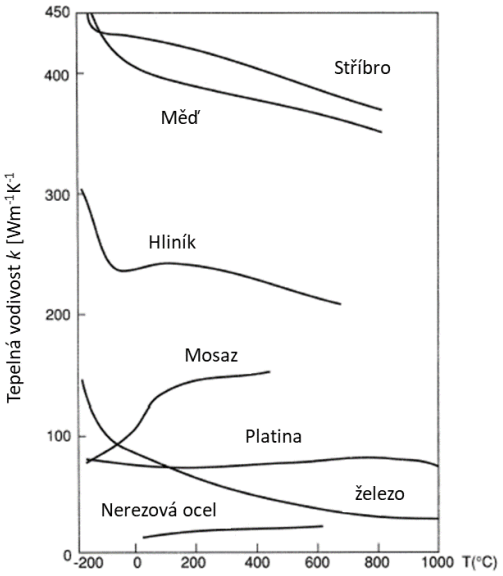
Indukční ohřev je ohřev elektrický, který využívá principu elektromagnetické indukce. K ohřátí materiálu dojde, pokud vložíme předmět z elektricky vodivého materiálu do cívky, jejíž vinutí je připojeno na střídavý proud. V takovémto případě dojde vlivem střídavého magnetického pole v dutině cívky k indukci vířivých proudů v ohřívaném materiálu (obr. 18). Tyto vířivé proudy následně předmět ohřívají. V principu se jedná o transformátor, jehož primární vinutí je připojeno na střídavý elektrický proud a je nazýváno indukční cívkou, a sekundární vinutí je daný ohřívaný materiál a je takzvaně zapojeno na krátko [30]. Ohřev materiálu pomocí indukce je komplexní funkcí fyzikálních, tepelných a elektrických vlastností součásti, které jsou zároveň závislé na aktuální teplotě materiálu. Tyto vlastnosti jsou například tepelná konduktivita, specifické teplo, elektrická rezistivita a konduktivita, relativní magnetická permeabilita a frekvence induktoru [29].



Obr. 18 Princip indukčního zařízení [31].

Tepelná konduktivita (*k*)

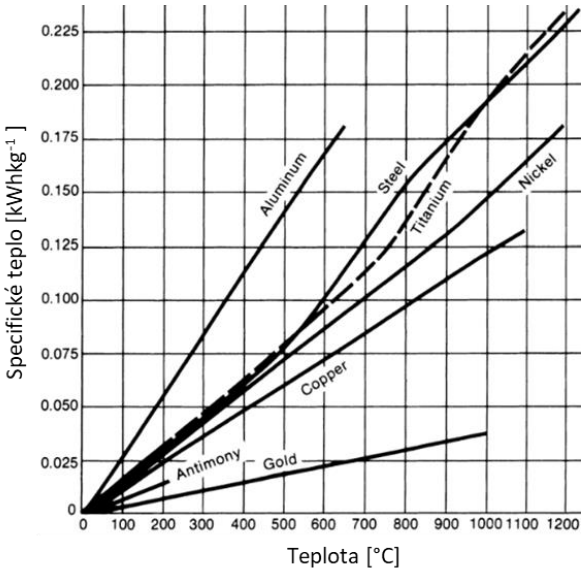
Tepelná konduktivita neboli vodivost udává, jakou rychlostí prochází tepelně vodivým tělesem teplo. Vysoká tepelná vodivost je tedy značnou výhodou u materiálů, které chceme prohřát až na jádro, jako v případě tvářecích, žíhacích nebo popouštěcích procesů, naopak může být značnou nevýhodou, pokud je potřeba indukcí ohřívat pouze určitá místa nebo například jen povrch materiálu při indukčním kalení. Tepelná vodivost je veličina vztažená k chemickému složení materiálu a zároveň se mění s jeho teplotou (obr. 19).



Obr. 19 Změna tepelné vodivosti v závislosti na teplotě pro různé kovy a slitiny [32].

Specifické teplo (*c*)

Specifické teplot neboli měrná tepelná kapacita je další z veličin zasahujících do efektivity indukčního ohřevu. Tato veličina udává, jaké množství energie musí být materiálu dodáno, aby byl kilogram tohoto materiálu ohřát o jeden Kelvin. Z tohoto plyne, že čím větší je hodnota této veličiny, tím větší množství energie je potřeba na zahřátí materiálu, kterému tato hodnota odpovídá. Stejně jako v předchozím případě jsou hodnoty měrné tepelné kapacity ovlivněny přítomností legujících a znečišťujících prvků, velikostí zrna, předchozí plastickou deformací, tepelným zpracováním a dalšími faktory (obr. 20) [30].



Obr. 20 Změna specifického tepla v závislosti na teplotě pro různé kovy [29].

Elektrická rezistivita (*ρ*), elektrická konduktivita (σ)

Schopnost materiálu vést elektrický proud je dána veličinou zvanou elektrická konduktivita. Reciprokou veličinou ke konduktivitě je rezistivita, která je také nazývána jako specifický elektrický odpor a reprezentuje odpor krychle z daného materiálu o hraně 1 metr . V případě kdy elektrický odpor materiálu brání průchodu elektrického proudu nastávají energetické ztráty,

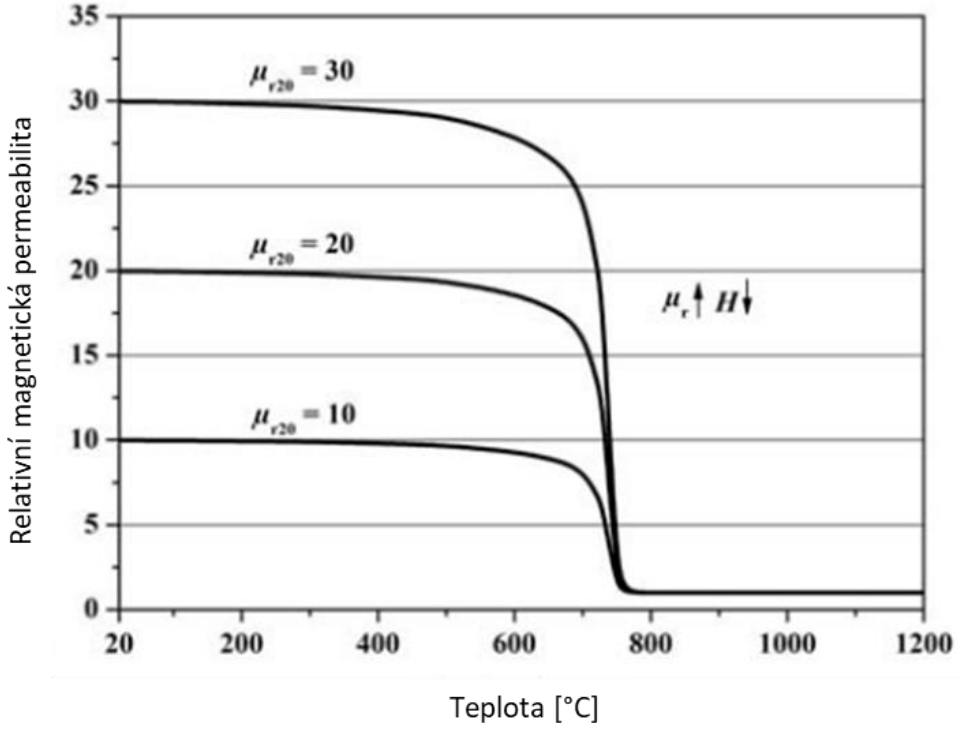
ve formě tepla. Nedojde tedy ke ztrátě energie, ale pouze ke změně její formy. Ztráty energie vyprodukované odporem materiálu za jednotku času jsou spočítatelné na základě rovnice (8), kde i je proud a R je odpor [29].

$$P = i^2 R \tag{8}$$

Jelikož ztráty ve formě tepla jsou dány druhou mocninou proudu, dojde při zvýšení jeho hodnoty k signifikantnímu nárůstu ztrát. Některé kovy jako například měď nebo stříbro jsou velmi dobrými vodiči, protože mají hodnotu odporu velmi nízkou. Oproti tomu má například ocel velmi vysokou hodnotu odporu, a proto je relativně snadné dosáhnout jejího ohřátí. Jak rezistivita, tak konduktivita materiálu je dána teplotou materiálu, chemickým složením, mikrostrukturou a velikostí zrn. Pro většinu kovů narůstá rezistivita s rostoucí teplotou [29; 30].

Relativní magnetická permeabilita (μ_r)

Relativní magnetická permeabilita udává schopnost materiálu vést magnetický tok lépe než vakuum nebo vzduch. Je to komplexní funkce struktury, chemického složení, předchozího tepelného zpracování, velikosti zrna, frekvence, intenzity magnetického pole a teploty. Jak lze pozorovat z obr. 21, stejná ocel v tomto případě ocel EN C45 může mít různou relativní magnetickou permeabilitu při stejné frekvenci a teplotě. Je to dáno rozdílem v intenzitě magnetického pole neboli výkonem cívky. Dále při stejných podmínkách frekvence a vyšší teplotě materiál při použití různých výkonů indukčních cívek klesá k hodnotě magnetické permeability na hodnotu 1. Tento pokles na stejnou hodnotu permeability pro všechny křivky je dán Curieho teplotou, při které ocel ztrácí svoje feromagnetické vlastnosti a stává se paramagnetickou. Všechny materiály, které jsou paramagnetické mají hodnotu relativní magnetické permeability blížící se jedné [30; 33].



Obr. 21 Relativní magnetická permeabilita oceli EN C45 v závislosti na teplotě [33].

Frekvence (*f*)

Frekvence ovlivňuje v největší míře hloubku, do které indukované elektromagnetické vlnění vytvořené primární cívkou vnikne. Hloubka vniku lze vyjádřit ze vztahu (9), kde f je frekvence, μ je permeabilita a σ_r je konduktivita [31].

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma_r}} \tag{9}$$

Závislost hloubky vniku elektromagnetického vlnění se tedy mění podle frekvence induktoru. Dále jsou v rovnici ale další proměnné jako konduktivita a magnetická permeabilita, které jsou, jak je psáno výše s teplotou proměnné a hloubku vniku elektromagnetické vlnění tedy ovlivňuje i teplota. Tabulka 1. udává příklady hloubky vniku tohoto vlnění v závislosti na frekvenci, teplotě a materiálu [29; 31].

Tab. 1 Závislost hloubky vniku elektromagnetického vlnění na kmitočtu induktoru [31].

Frekvence [Hz]	**Hloubka vniku [mm]**					
	Měď		**Hliník**		**Ocel**	
	20 °C	**1100 °C**	**20 °C**	**660 °C**	**20 °C**	**800 °C**
50	9,5	31,8	12,2	31,5	8	71,2
1000	2,1	7,1	2,7	7	1,8	15,9
10000	0,67	2,25	0,86	2,2	0,56	5
1000000	0,067	0,22	0,086	0,22	0,056	0,5

4.3 Výhody indukčního ohřevu

Indukční ohřev má schopnost ohřívat materiál vysokou rychlostí s velmi přesnou regulací této rychlosti a v případě požadavku také na specifických místech, jako jsou například zuby ozubených kol, a ne v celém objemu jako v případě komorové pece. Díky tomu je možno dosáhnout velmi kvalitní kombinace mechanických vlastností na součásti jako například zachování houževnatého jádra při velmi vysoké tvrdosti povrchu [29; 34].

Další výhody plynou z ekonomické stránky věci. Materiál nemusí být ohříván celý z čehož plyne úspora energie. Nemusí být vyhřáta celá pec kvůli menší vsázce a další výhodou je, že induktory zpravidla zabírají mnohem méně místa ve výrobní hale než samotné komorové nebo karuselové pece. Ohříván indukčně je vždy kus po kusu, takže z kontrolního hlediska lze daleko lépe kontrolovat, kde nastal problém. Díky vysoké rychlosti ohřevu nedochází k tak velké oxidaci a oduhličení povrchu a je tedy pro následnou úpravu do finálního tvaru potřeba méně obrábět [29; 34].

5. Návrh experimentálního programu

Experimentální program této práce bude zaměřen na zjištění možností zařízení HDQT-R 30-12, které je dle údajů výrobce určeno pro redukci průměrů kruhových tyčí z maximálních 30 mm na 12 mm. Zkoušeny budou tři uhlíkové nelegované oceli, kdy první z nich EN S235JR je konstrukční uhlíková ocel a oceli EN C45 a EN C60 jsou uhlíkové oceli vhodné k zušlechťování, dále bude testována nerezová ocel GOST 0CH18N10T.

Prvním krokem této práce bude vytvoření numerických simulací pro válcování kruhových tyčí, trubek a případně i spojení trubky a tyče. Z těchto vytvořených simulací bude

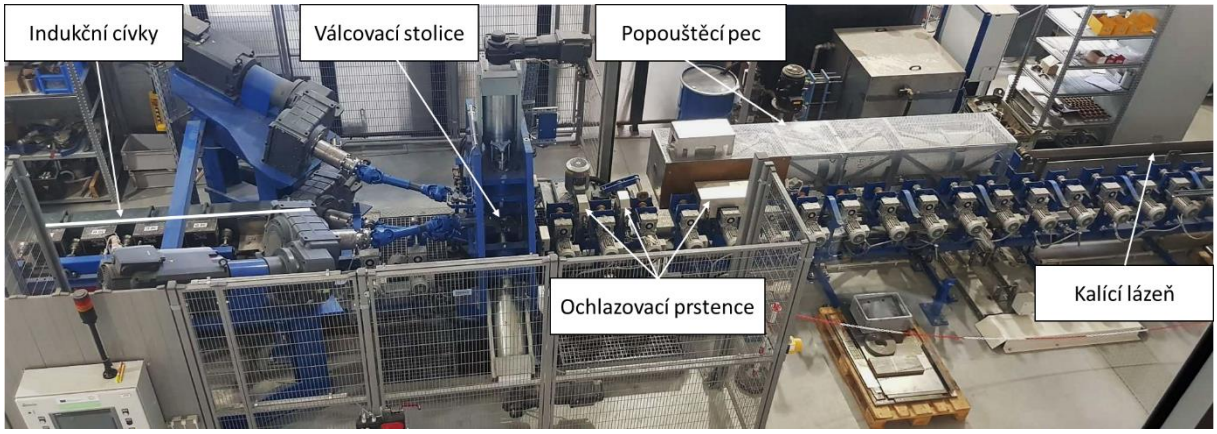
vyhodnoceno, jak se tvářený materiál chová v průběhu válcování, jaká je vložena deformace, jaké jsou napětí v tvářecí oblasti atd.

Na přístroji HDQT-R 30-12 bude testováno válcování tyčí z různých materiálů při různých rychlostech otáčení válců. Dále bude testováno válcování trubky z materiálu EN S235JR a bude zkoumáno, zda dojde během válcování k jejímu poškození. Posledním experimentem na válcovací stolici HDQT-R 30-12 bude válcování spojené trubky z materiálu EN S235JR do níž byla vložena plná tyč z materiálu EN C60.

Na všech vývalcích budou kontrolovány jejich rozměry, co se týče průměrů a v případě trubek i kruhovitost uvnitř trubky. Posledním krokem této práce bude zkoumání makrostruktur vývalků.

6. Popis zařízení HDQT-R 30-12

Zařízení HDQT-R 30-12 (**H**igh **D**eformation **Q**uenching and **T**empering) je primárně určeno pro redukci průměru kulatého tyčového materiálu technologií kosého válcování. Alternativně lze vývalek po tvářecím kroku, a také před ním ochlazovat či ohřívat a realizovat tak různé varianty tepelně-mechanického zpracování tyčové oceli. Jako výchozí materiál lze zpracovávat široké spektrum jakostí oceli od uhlíkové konstrukční oceli přes ušlechtilé konstrukční oceli, korozivzdorné oceli, až po další kovové materiály. Toto zařízení je určeno pro provoz výhradně s jednou tyčí. Jelikož by zařízení mělo být přednostně využíváno k provádění výzkumných a vývojových prací v oboru tváření a tepelně-mechanického zpracování, bylo ze strojně technologického ohledu cíleně navrženo tak, aby poskytovalo široké možnosti řízení teploty válcovaného materiálu a jeho tepelného zpracování po válcování. Technologická (obr. 22) [35].



Obr. 22 Zařízení HDQT-R 30-12 [36].

6.1 Ohřev

Protože je stroj vytvořen především pro tváření za tepla, je nutné tvářený nebo tepelně zpracovávaný materiál nějakým způsobem ohřát. Tohoto lze docílit pomocí komorové pece pro dlouhé tyče nebo pomocí indukčních ohřívačů.

Indukční ohřívač

Speciální středofrekvenční indukční ohřívač SOT 200+40/20 byl vytvořen firmou Robotem Chotěboř s. r. o. Tento indukční ohřívač je tvořen pěticí krátkých induktorů pro ohřev tyčí o průměru od 12 do 30 mm (obr. 23). Ohřev je v tomto případě realizován dvěma oscilačními obvody, které mají každý svůj vlastní zdroj a frekvenční měniče, které zajišťují výstupní

hodnoty frekvence 10 - 20 kHz. První z těchto obvodů je tvořen čtyřmi cívkami a je určen pro rovnoměrný ohřev materiálu a druhý je tvořen jednou poslední cívkou, která může zajišťovat nerovnoměrný dohřev materiálu, kterého dokážou ohřát až 400 kilogramů za hodinu na teplotu 1250 °C. Minimální délka ohřívaného materiálu je 800 mm, což zajišťuje to, aby ohřívaný materiál nespadl z válečkové dráhy a maximální délka je 1500 mm, což je vzdálenost od válců k výstupu z posledního induktoru [37].

Obr. 23 Speciální středofrekvenční indukční ohřívač SOT 200+40/20.

Komorová pec pro dlouhé tyče BVD

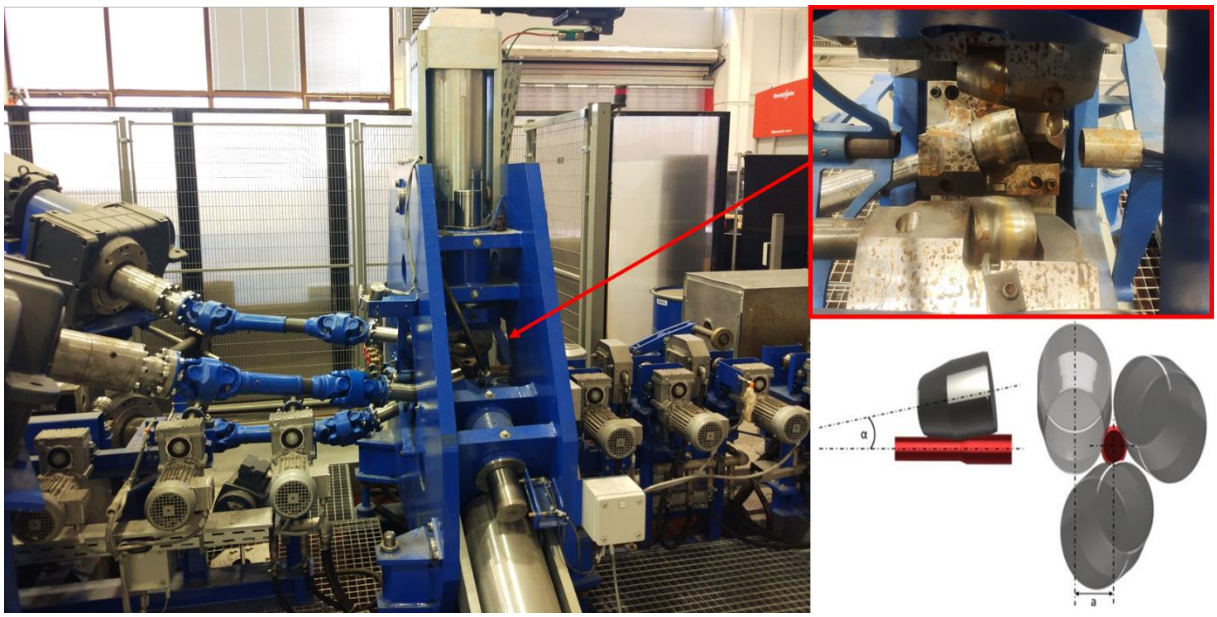
Druhou možností ohřevu je komorová pec od Firmy BVD. Tato pec pojme tyče o délce až tři metry a dosahuje maximální teploty ohřevu 1300 °C. V případě potřeby je možnost připojení argonové ochranné atmosféry (obr. 24).

Obr. 24 Komorová pec pro dlouhé tyče BVD.

6.2 Válcování

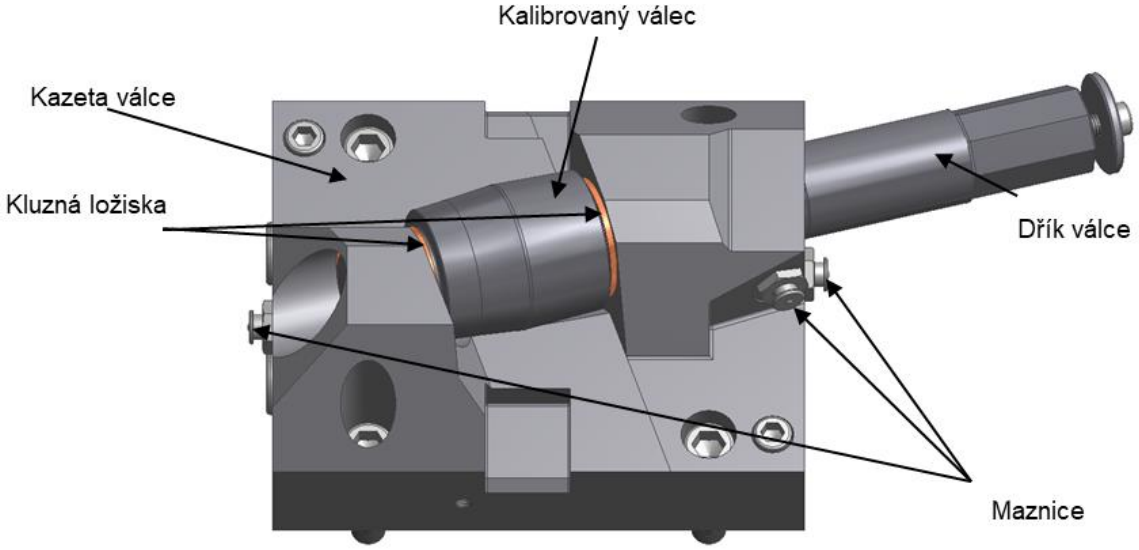
Srdcem celého zařízení je válcovací stolice HDCR (**H**igh **D**eformation **C**ross **R**olling). Jedná se o stolici pro kosé válcování specializovanou na vysoce účinné tváření plného

materiálu. Tato válcovací stolice je tvořena trojicí kuželovitých válců, které jsou vzájemně přesazeny o 120 ° (obr. 25) [35].



Obr. 25 Válcovací stolice HDCR s detailem válcovacího prostoru a schématickým zobrazením uložení válců.

Každý z válců je osazen pomocí tří kluzných ložisek z materiálu Albromet 300 do takzvaných „kazet“, přes kterou je tento válec připevněn pomocí čtyř šroubů utažených momentem 250 Nm k polohovacím motorům (obr. 26). Dva díly kazety jsou pomocí dvou šroubů utažených na moment 500 Nm staženy k sobě. Na každé kazetě jsou umístěny tři maznice, které slouží k mazání kluzných ložisek. Každý z těchto válců je vybaven samostatným pohonem a otáčky těchto pohonů jsou v průběhu procesu tváření synchronizovány pomocí PLC řídícího zařízení. Charakteristickým rysem tohoto tvářecího procesu je vlastní rotace válcovaného materiálu. Během procesu válcování dochází vlivem rotace provalku k několika zatížením a odlehčením, čímž dojde postupně k redukci průřezu válcovaného materiálu na požadovaný průřez nastavený mezerou mezi válci [35].



Obr. 26 Model válce vsazeného v kazetě [35].

Další parametry válcovací stolice

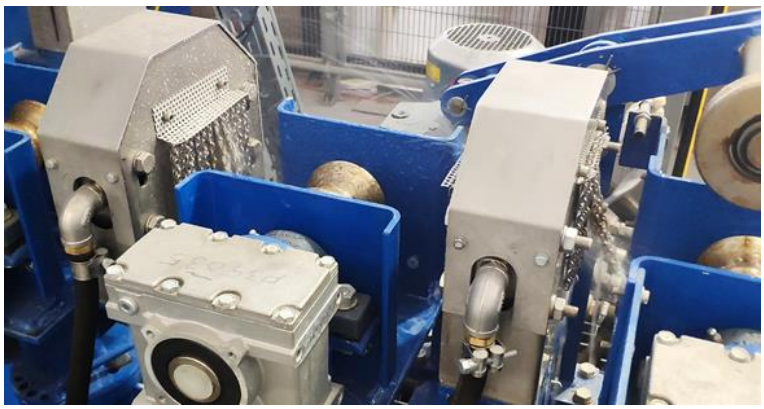
- Maximální průměr - vstup 30 mm
- Minimální průměr - výstup 12 mm
- Maximální délka tyče – vstup (induktor) 1500 mm
- Maximální délka tyče – vstup (pec) 3000 mm
- Minimální délka tyče – vstup 800 mm
- Minimální stupeň prodloužení 1,3
- Přípustné otáčky hlavních pohonů 300 ot./ min
- Přípustné kroutící momenty hlavních pohonů 1500 Nm
- Přípustná válcovací síla 100 kN

6.3 Tepelné zpracování

Zařízení je dále osazeno několika dalšími moduly, které mají zajišťovat tepelné zpracování válcovaného polotovaru před válcováním, nebo po válcování. Jedním z modulů, o němž již bylo psáno, je komorová pec na dlouhé tyče BVD, kterou je taktéž možno použít pro další tepelné zpracování po válcování, pokud jsou pro prvotní ohřev před válcováním použity indukční ohřívače.

Chladící prstence

Na zařízení lze umístit celkem 5 chladících prstenců s regulovatelným průtokem. První z nich může být umístěn před samotnou válcovací stolici, kde zajišťuje ochlazení válcovaného materiálu na požadovanou teplotu válcování. Další dva jsou umístěny bezprostředně za válcovací stolicí a jejich pomocí může být válcovaný materiál ochlazován před vstupem do dalších dvou chladících prstenců, nebo před vjezdem do popouštěcí pece (obr. 27) [35].



Obr. 27 Chladící prstence bezprostředně za válcovací stolicí [38].

Popouštěcí pec

Alternativou posledních dvou chladících prstenců může být popouštěcí trubková pec pro tyče do průměrů 80 mm s maximální délkou 3000 mm (obr. 28). Tato popouštěcí pec dokáže materiál ohřát až na teplotu 600 °C. Válečková dráha dopraví zpracovávanou tyč do útrob trubkové pece, ale uvnitř již žádné pohony nejsou a tato pec je tedy sklopná, aby bylo možno zpracovávaný materiál dostat ven [35].

Obr. 28 Trubková popouštěcí pec.

Kalící lázeň

Posledním modulem tohoto zařízení je kalící lázeň, které je naplněna sto litry studené vody s neustálým průtokem (obr. 29). Tato kalící lázeň může být na zařízení umístěna, jak za chladící prstence, tak za trubkovou popouštěcí pec a vejdou se do ní tyče o délce až 3000 mm [35].

Obr. 29 Kalící lázeň s vodou [38].

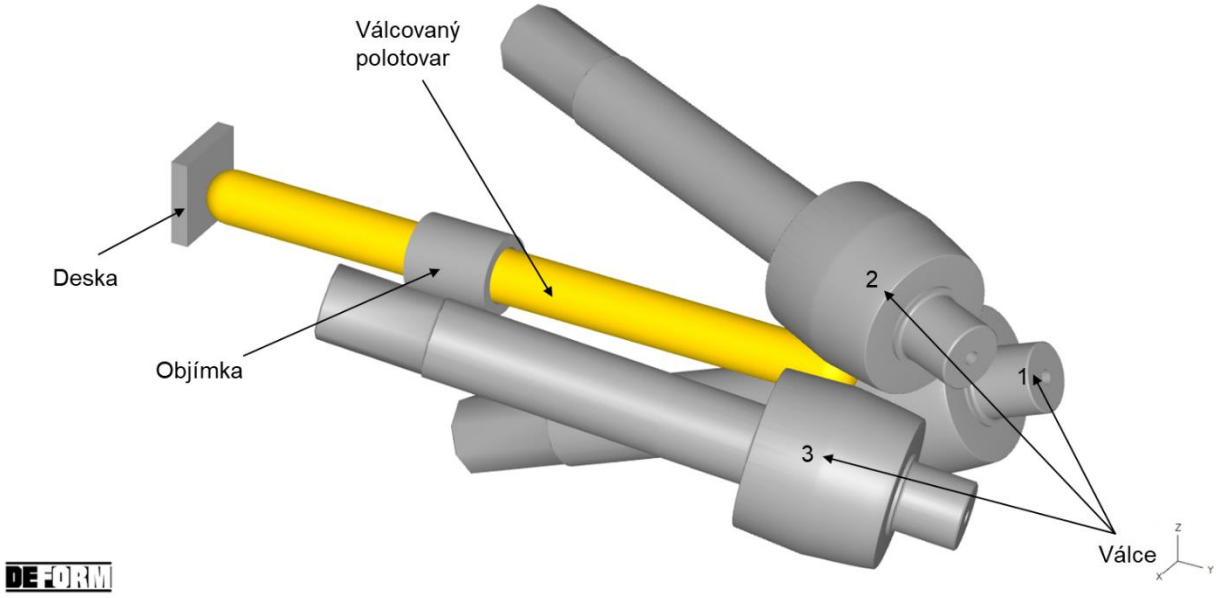
7. Numerické simulace procesu válcování

Numerické simulace procesu válcování byly provedeny s pomocí softwaru DEFORM 2D/3D Ver. 11.2 od společnosti Scientific Forming Technologies Corporation, který je určen k simulování různých procesů, mezi které patří i tváření s pomocí takzvané metody konečných prvků. Simulace byla vytvořena pomocí pre-procesoru ve 3D prostředí s využitím jednotek soustavy SI.

7.1 Objekty v simulaci

Pro vytvoření simulace je třeba vytvoření modelů, které mají tvary reálných kovadel, válců, forem, polotovarů a dalších objektů, které jsou ve skutečnosti používány pro tváření nebo jiný způsob zpracování, kterému se snažíme simulací přiblížit. Dalším důležitým krokem přípravy simulace je správné pozicování objektů vůči sobě tak, aby jejich pozice kopírovaly jejich skutečnou pozici, samozřejmě bez chyb, které jsou v realitě vytvořeny nepřesností posuvů apod.

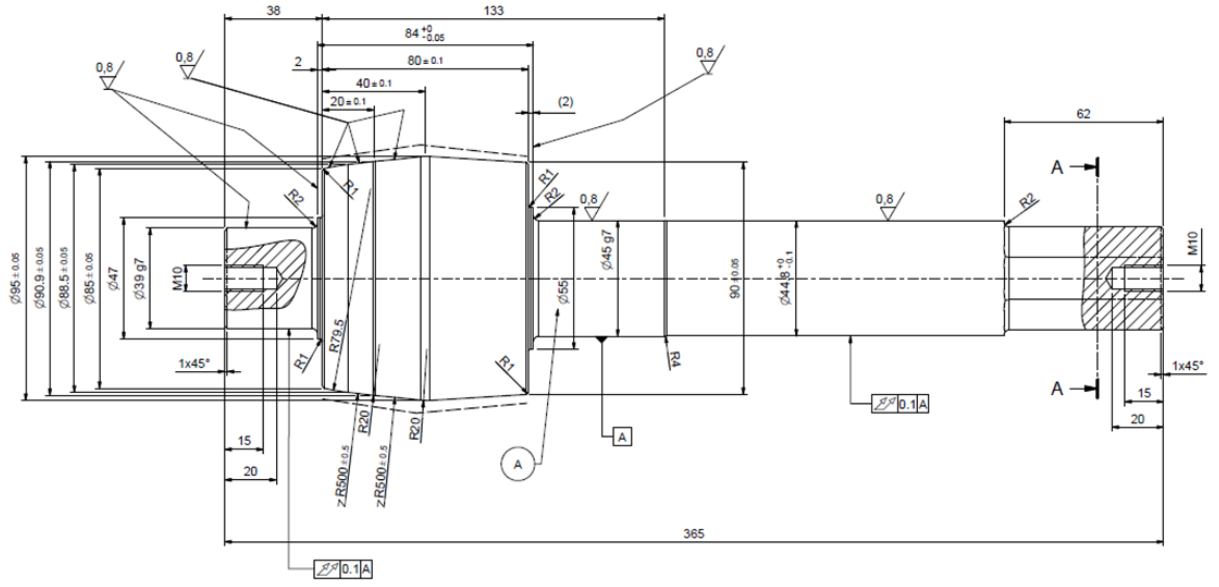
Simulace byla vytvořena tak, že obsahuje čtyři hlavní objekty, mezi které patří trojice válců, použitá pro válcování kruhového materiálu a polotovar, který je válcovaný. Dále jsou v simulaci vloženy objekty, které jsou takzvaně pomocné a pomáhají simulovat okrajové podmínky polotovaru, který je vtlačován mezi válce válečkovou dráhou a zároveň je udržován ve vodorovné poloze (obr. 30).



Obr. 30 Základní sestava vytvořená pro simulaci procesu kosého válcování.

7.1.1 Válce

Základním objektem celé simulace jsou válce, jedná se o trojici kosých válců, jejichž osy jsou vzájemně pootočeny o 120 °. Tyto válce jsou v simulaci nastaveny jako tuhé a mají teplotu 150 °C. Válce použité pro válcování v realitě i v těchto numerických simulacích jsou rozměrově stejné a vytvořené dle výkresu dodaného výrobcem stroje (obr. 31). Materiál použitý pro výrobu válců je EN 42CrMoS4. Jedná se o středně-uhlíkovou nízkolegovanou chrom-molybdenovou oceli vhodnou k zušlechťování, která byla povrchově kalená na tvrdost 45 HRC do hloubky 5 mm [39]. Válce v simulaci jsou ustaveny tak, že průměr provalku po válcování by měl být 22 mm.

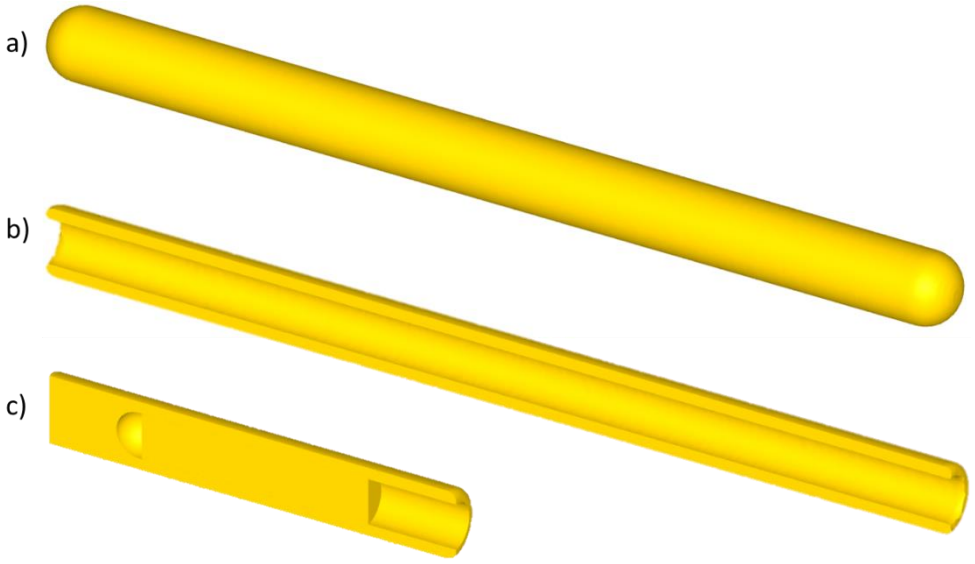


Obr. 31 Výkres válců použitých pro simulaci válcování

7.1.2 Válcovaný polotovar

Válcovaným polotovarem, pro který byly prováděny simulace mohla být tyč trubka, nebo jejich spojení. V případě tyčí se jednalo o tyče se vstupním průměrem 30 mm z uhlíkových

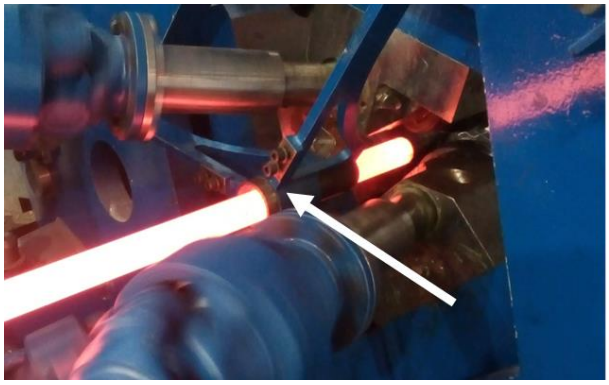
konstrukčních ocelí dle EN S235JR, C45 a C60, dále byla použita nerezová austenitická ocel dle GOST 0CH18N10T (obr. 32a). Výchozí tyč pro simulaci válcování byla dlouhá 400 mm, i když mohla být ještě zkrácena pro usnadnění výpočtů. Zaoblení na koncích tyče bylo provedeno z důvodu zvýšení stykové plochy tyče a válců při jejím vtažení. Výchozí trubkový polotovar pro simulace válcování byla trubka z oceli EN S235JR o vnějším průměru 30 mm a tloušťce stěny 5 mm (obr. 32b). Délka této trubky byla stejně jako v případě tyče 400 mm. Opět bylo vytvořeno největší možné zaoblení na koncích, aby byla zvýšena styková plocha. V případě spojení tyčového materiálu s trubkou byla použita trubka o vnějším průměru 30 mm s tloušťkou stěny 5 mm z oceli EN S235JR a do ní byla vložena tyč z materiálu EN C60 o průměru 20 mm (obr.32c). Zvláštní způsob sestavení trubky a tyče bude později vysvětlen v kapitole týkající se simulace tohoto spojení. Všechny polotovary, pro něž byla prováděna simulace válcování, měly nastavenou jednotnou teplotu 1100 °C a samozřejmě okrajovou podmínku výměny tepla s okolím, které mělo pokojovou teplotu.



Obr. 32 Základní tvary válcovaných polotovarů: a) tyč, b) trubka v řezu, c) spojení obojího v řezu.

7.1.3 Objímka a deska

Objímka s deskou patří v simulaci mezi takzvané pomocné objekty, které zajišťují, aby simulace vůbec proběhla. Objímka má význam zejména na začátku simulace, kdy navádí tyč mezi válce a zamezuje jejímu vyosení. Toto těleso má simulovat objímku, která je v reálném procesu před válci a udržuje tyč ve vodorovné poloze (obr. 33). Takováto objímka je i na výjezdu z válcovací stolice. Obě tyto objímky tlumí kmitání tyče během válcování, kdy je vysokou rychlostí roztočena kolem své osy. Dále jsou pomocí tohoto tělesa definovány okrajové podmínky pro výpočet. Kdyby bylo třeba nasimulovat proválcování celé tyče bylo by pravděpodobně potřeba přidat druhou objímku i za válce, aby tyč udržela směr, ve kterém se ve skutečnosti pohybuje pomocí válečkového dopravníku. V simulaci není počítáno s vlivem gravitační síly.



Obr. 33 Objímka pro přesné vedení tyče před válci.

Dalším pomocným objektem v simulaci válcování je deska, která je přiložena ke konci válcovaného objektu a má nastavenou rychlost posuvu 5 mm/s ve směru osy Y. Tato deska nahrazuje válečkový dopravník a udává tyči pohyb směrem k válcům. Rychlost této desky je nastavena tak, že je pomalejší, než by měl být předpokládaný pohyb tyče po vtažení a lze tedy během několika kroků simulace poznat, zda došlo ke vtažení úspěšně, protože se tyč začne vzdalovat od této pomocné desky.

7.2 Nastavení simulace

V této kapitole je popsáno základní nastavení simulací, které je pro všechny provedené simulace stejné, nebo je zde popsán rozdíl v nastavení jednotlivých simulací v závislosti na tom, o jakou simulaci se jedná.

Materiály

Simulace válcování byly prováděny na celkem na čtyřech různých materiálech, které bylo nutné nalézt v knihovně materiálů DEFORM, případně použít jejich ekvivalenty, které tato knihovna obsahuje (tab. 2).

Tab. 2 Výběr materiálů pro simulaci v softwaru DEFORM 2D/3D.

Reálně použitý materiál	Materiál či ekvivalent z knihovny
EN S235JR	DIN C15
EN C45	DIN C45
EN C60	DIN C60
GOST 0CH18N10T	AISI 321

V případě oceli EN S235JR byla jako ekvivalent vybrána ocel DIN C15. Nejedná se o zcela přesný ekvivalent, ale ocel DIN-C15 je chemickým složením velmi blízko oceli S235JR, kterou bohužel v knihovně DEFORM nelze vyhledat. V tabulce 3 je uvedeno chemické složení ocelí použitých v simulacích a červeně chemické složení EN S235JR pro porovnání s DIN C15.

Tab. 3 Chemické složení ocelí použitých v simulacích v hmotnostních procentech [40; 41; 42; 43].

Hm. %	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Ti
DIN C15	0,12-0,18	max 0,4	0,3-0,8	max 0,045	max 0,045				
EN S235JR	max 0,17		max 1,4	max 0,035	max 0,035				
DIN C45	0,43-0,5	max 0,4	0,5-0,8	max 0,045	max 0,045	max 0,4	max 0,4	max 0,1	
DIN C60	0,57-0,65	max 0,4	0,6-0,9	max 0,045	max 0,045	max 0,4	max 0,4	max 0,1	
AISI 321	max 0,08	0,25-0,1	max 0,2			9-12	17-19	max 0,75	0,7

Výběr typu simulace a módu

V závislosti na typu úlohy, kterou je simulace tváření technologií kosého válcování je dle literatury vhodné vybrat typ řešitele Lagrangian incremental. Tento typ řešitele může být použit pro všechny konvenční metody tváření, přenosu tepla a tepelného zpracování. Jedná se o obecný typ řešitele, pomocí kterého lze modelovat také procesy válcování [26; 44].

Po simulaci bylo žádáno, aby modelovala tepelné a deformační chování materiálu. Módy jako zrno, ohřev, difúze a transformace nejsou spuštěny, protože nejsou cílem experimentu a jejich sledování je tedy vypnuto z důvodu snížení náročnosti výpočtů.

Kroky a jejich velikost

Každá simulace je složena z nastaveného počtu kroků, které se nějakým způsobem vážou k takzvanému hlavnímu nástroji, kterým byl pro tyto simulace zvolen válec 1. První možností vazby kroku k primárnímu nástroji je posuvný pohyb tohoto nástroje. Tato metoda definice kroku je nevhodná, protože válec se nikam nepohybuje. Dále je zde možnost udělat vazbu mezi kroky a teplotou hlavního nástroje. Tato metoda opět není výhodná, protože je používána pro procesy, kde se očekává rychlá změna teploty simulovaného tělesa, jako je například pří kalení. Poslední metodou definice kroku je metoda časová, kdy je nastaven čas pro jeden krok. Tato metoda je asi nejvýhodnější, i přesto, že je těžké odhadnout velikost takového kroku. Správný výběr časového kroku je velmi důležitý. Příliš velký časový krok může způsobit nepřesnosti v řešení, rychlé zkreslení sítě nebo problémy s konvergencí. Příliš malý krok může naopak vést k dlouhým časům řešení. Maximální posunutí pro jakýkoliv uzel v síti by nemělo překročit jednu třetinu délky hrany prvku v jednom kroku [26]. Simulace byly nastaveny tak, že počet simulovaných kroků byl deset tisíc, i když nebylo nutné celý tento objem počítat. Byl ukládán každý desátý krok a velikost jednoho kroku pro simulaci válcování tyče a trubky byla nastavena po několika testovacích simulacích na 0,05 s/krok. V případě kombinované simulace, kdy bylo požadováno válcování trubky a tyče společně, byla velikost kroku vzhledem k náročnosti výpočtu nastavena 50 krát menší na 0,001 s/krok.

Síť a kritéria pro přesíťování

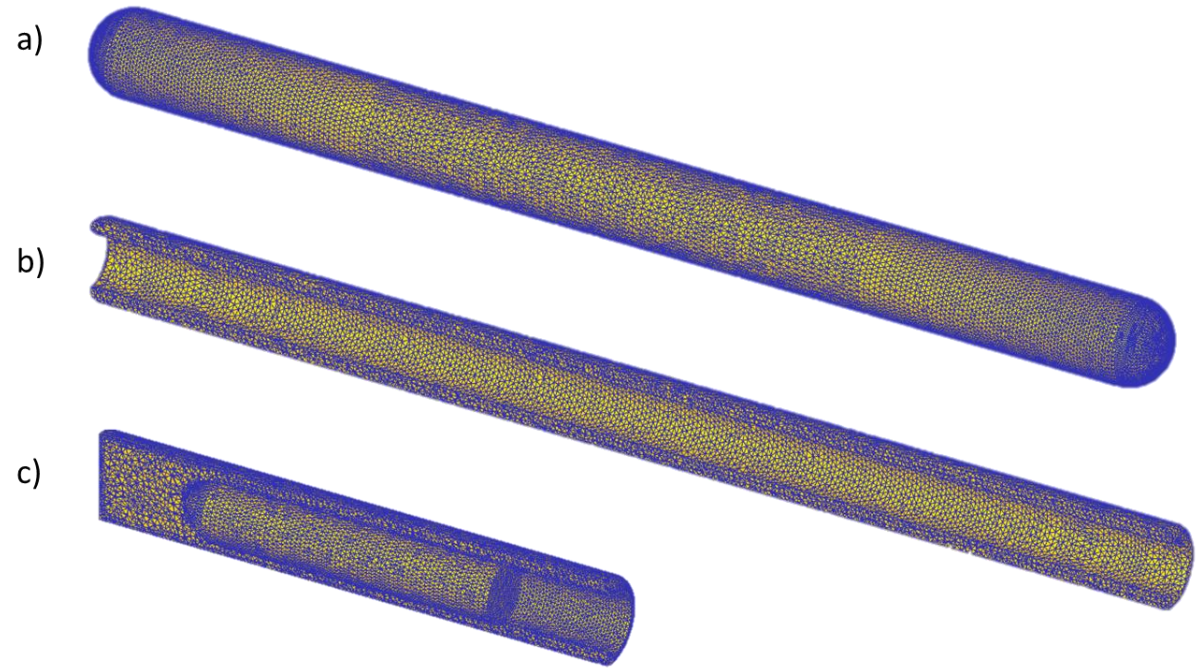
Aby bylo možné řešit jakoukoliv úlohu pomocí tohoto systému, je nutné na tvářeném objektu vytvoří síť. Tato síť musí být dostatečně jemná, aby nedošlo k výrazné změně tvaru sítě vlivem velké deformace v jednom kroku a možnosti vyhodnocení v post-procesoru byly dostatečné. Na druhou stranu je ale problém s tím, že čím jemnější síť bude definovat tvářené

těleso, tím složitější a náročnější simulace vznikne. V tabulce 4 jsou uvedeny parametry sítě nastavené pro tvářené objekty.

Tab. 4 Parametry sítě jednotlivých objektů.

Objekt	Počet elementů	Počet uzlových bodů	Min délka hrany elementu [mm]	Max délka hrany elementu [mm]
Tyč	193630	42037	0,73	2,22
Trubka	172758	39260	1,71	1,71
Tyč pro spojení	40361	42290	1,12	1,12
Trubka pro spojení	193318	8843	1,12	1,12

Jak lze pozorovat v tabulce 4, tak byla pro tyč nastavena nerovnoměrná síť, kdy mohl být největší element 3x větší než ten nejmenší, Postupem času bylo ale zjištěno, že pro tento typ úlohy je vhodnější využití rovnoměrné sítě, protože nedochází po délce tyče ke změně velikosti elementů a proto byly pro trubku a následné spojení již využívány rovnoměrné sítě (obr. 34). V případě tyčí byly simulaci již provedeny s nerovnoměrnou sítí jak uvádí tabulka 4.



Obr. 34 Základní tvary válcovaných polotovarů s vygenerovanou sítí: a) tyč, b) trubka v řezu, c) spojení obojího v řezu.

Dalším nastavením jsou takzvaná remeshing criteria, tedy podmínky, při kterých dojde k vytvoření nové sítě a jakou příčinou. Při vygenerování nové sítě na základě nastavení nebo z důvodu nutnosti, protože došlo k selhání staré sítě, jsou interpolovány výsledky ze staré sítě před selháním a na základě nich je vygenerována nová. Pro tyto simulace byla jako spouštěč přesíťování použita hloubka interference a její relativní nastavení o hodnotě 0,7 pro tyče, což je přibližně třetina maximální délky hrany elementu a 0,5 pro trubky a následné spojení obojího [26].

Nastavení řešiče a iterace

Pro řešení dané úlohy byl ve všech případech vybrán řešitel Conjugate-gradient, který se pokouší řešit úlohu FEM iterativně aproximací k řešení. Dle dostupné literatury je tento řešitel vhodný k řešení problémů s velkým množstvím kontaktních míst a pro rotačně symetrické plastické objekty, kdy je třeba sledovat, zda dochází k výpočtu řešení pomocí tohoto řešitele v reálném čase, nebo zda v prvních krocích dlouze iteruje, než dojde k nějakému výsledku.

Ovládací prvky iterace určují kritéria, která FEM používá k nalezení řešení v každém kroku simulace problému. Pro iteraci byla vybrána metoda přímá, která sice vyžaduje více iterací než metoda Newton-Raphson, ale častěji dojde k řešení. Pro teplotu i deformaci bylo nastaveno maximum dvou set iterací pro nalezení řešení a případné zastavení simulace.

Nastavení tření a přenosu tepla na stykových plochách

Pro všechny simulace bylo použito stejné nastavení třecího modelu a velikosti součinitele tření a také přenosu tepla na stykových plochách. Vybraným modelem pro tření mezi válci a válcovaným polotovarem byl střihový model (shear) se součinitelem tření o konstantní hodnotě 10, protože při použití jiného modelu tření, jako je například Coulomb nebo Hybridní model nedošlo k vtažení polotovaru mezi válce. Co se týče nastavení přenosu tepla mezi válci a polotovarem byla nastavena hodnota 5, která odpovídá hodnotě doporučené pro tváření. Na rozhraní objímka - polotovar a deska – polotovar bylo nastaveno tření o minimální hodnotě, aby nedocházelo k zasekávání polotovaru v objímce apod. a přenos tepla byl nastaven na hodnotu 0,1, což je přibližně desetina hodnoty používané pro přenos tepla mezi podložkou a volně položeným objektem [26].

Přidaná nastavení mimo možnosti samotného SW

Během simulací kosého válcování tyčí a trubek pomoci SW DEFORM 2D/3D docházelo k problémům se změnou objemu tvářeného polotovaru, k čemuž by docházet nemělo. Tento problém byl řešen s technickou podporou společnosti, která tento simulační software vydává. Při konzultaci s technickou podporou bylo zjištěno, že tento SW má občas problém se zvládáním výpočtů pro rotující objekty. Pro tento problém bylo nalezeno řešení, které je v případě tohoto SW zatím v testování a nebylo oficiálně přidáno do nastavení. Tuto funkci lze aktivovat pomocí vytvoření souboru AXIS.DAT v pracovním adresáři simulace. Jakmile je tento soubor přidán, tak jej SW při každém spuštění simulace najde a po jeho přečtení upraví nastavení simulace. Do tohoto souboru je vepsán kód pomocí čísel a mezer v celkové možnosti využití sedmi řádků, ale vzniklý problém byl vyřešen pomocí čtyř řádků, které popisují, o jaký objekt se jedná, jaký mód má být zvolen, pozici bodu, který leží na fixované ose a samotnou fixovanou osu [26].

7.3 Vyhodnocení numerických simulací

Vyhodnocení výsledků numerických simulací se zaměřuje na rozložení efektivní deformace, napětí, teploty a dalších stavových proměnných v rámci průřezu válcovaného materiálu.

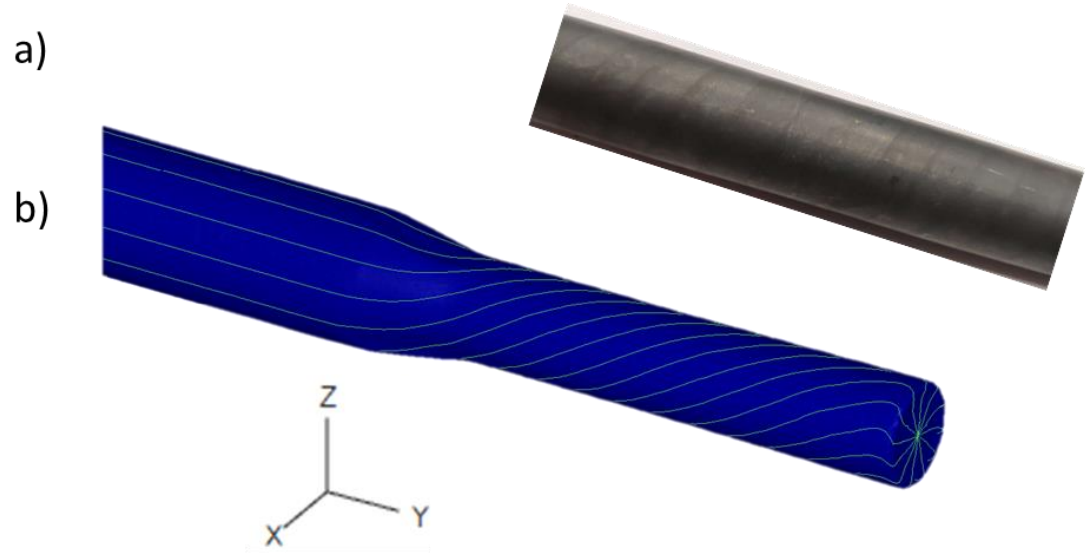
7.3.1 Simulace válcování tyčí

Jak již bylo zmíněno dříve byly provedeny simulace válcování tyčových polotovarů o vstupním průměru 30 mm z uhlíkových konstrukčních ocelí DIN C15, DIN C45, DIN C60 a z nerezové oceli AISI 321. Pro všechny tyto materiály byly provedeny simulace válcování na rozměr 22 mm, s tím, že pro ocel AISI 321 byly tyto simulace provedeny při třech různých rychlostech otáčení pracovních válců (tab. 5).

Tab. 5 Parametry simulace válcování různých materiálů.

Materiál	Vstupní průměr [mm]	Výstupní průměr [mm]	Teplota [°C]	Rychlost válců [ot/min]
DIN C15	30	22	1100	100
DIN C45	30	22	1100	100
DIN C60	30	22	1100	100
AISI 321	30	22	1100	50 100 200

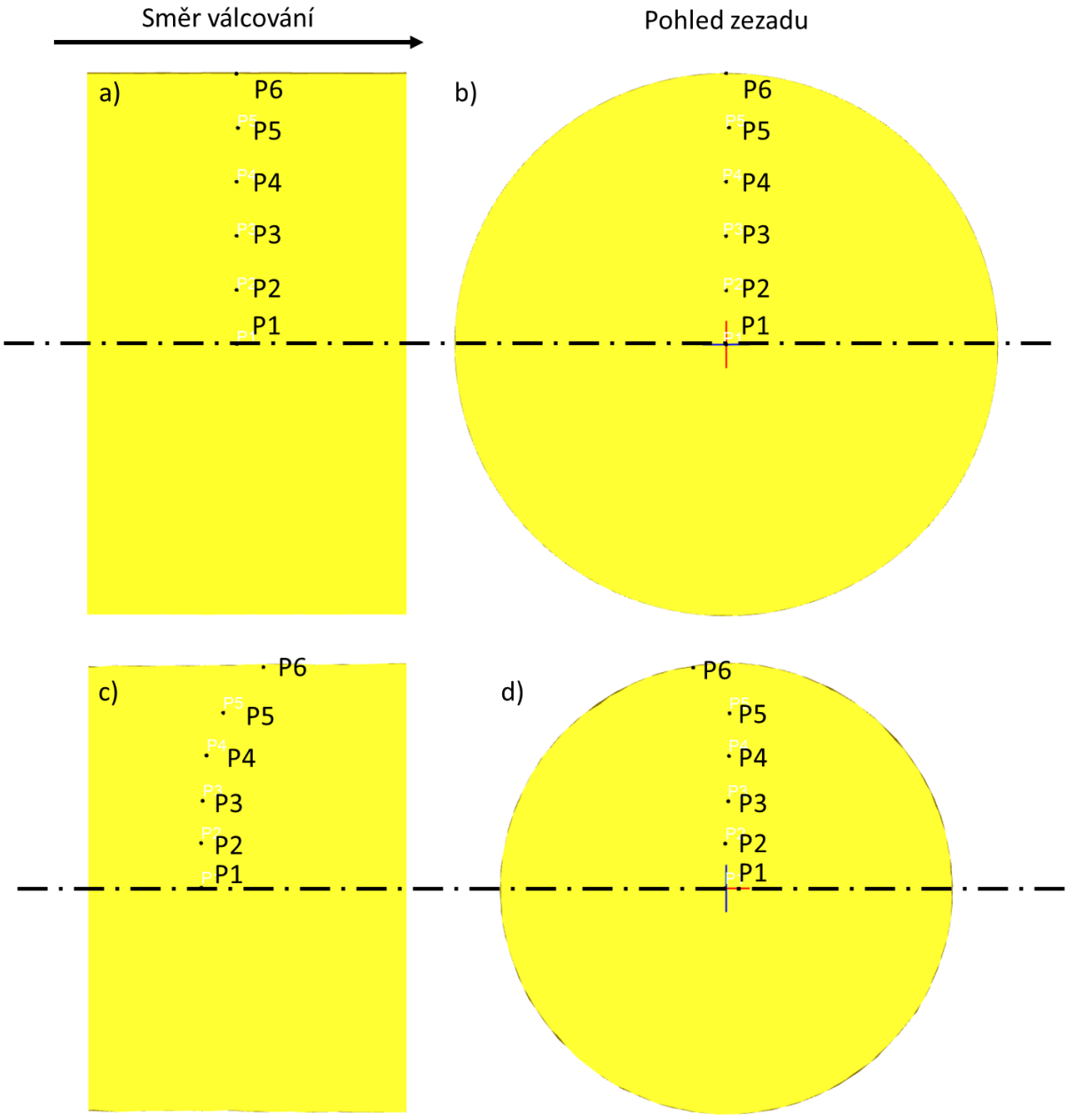
Informace, kterou je možno získat na první pohled v případě pozorování reálného procesu je vytvoření jistého spirálovitého tvaru na povrchu provalku (obr. 35a). Tato spirálovitost je v reálném procesu velmi pravděpodobně vytvořena nepřesností pozic pracovních válců. Podobnou spirálovitost lze pozorovat i v případě simulace tohoto procesu válcování s pomocí funkce sledování toku materiálu pomocí sítě (flownet tracking). Touto funkcí lze vytvořit různý typ sítě v celém průřezu materiálu, ale pro tento případ bude k demonstraci spirálovitého pohybu vrchních vrstev tvářeného materiálu stačit povrchová síť (obr. 35b). Na snímku je velmi dobře vidět, jak je v levé části zachována rovná sít vygenerovaná povrchová síť, která se v tvářecí oblasti začne stáčet směrem proti směru hodinových ručiček při pohledu od nedeformované části tyče.



Obr. 35 Spirálovitost povrchu tyče: a) reálný výrobek, b) simulace válcování.

Tato spirálovitost udává, jaký je tok materiálu při tváření v povrchové vrstvě tvářeného dílu. Protože lze předpokládat, že k takovéto deformaci nedochází pouze na povrchu materiálu, byl vytvořeny body, jejichž poloha byla sledována. Bylo vytvořeno celkem 6 bodů. První z nich ležel na ose Y, tedy v ose válcované tyče a ostatní byly vždy ve vzdálenosti 3 mm od předchozího bodu ve směru osy X, z čehož vyplývá, že poslední bod č. 6 byl opět na povrchu zkoumaného dílu (obr.36a, b). Když bylo provedeno tváření tyče a bylo opět sledováno v jaké poloze se vůči sobě nalézají dané body, bylo zjištěno z podélného řezu (obr. 36c), že vlivem válcování došlo k viditelnému posuvu bodů 4, 5 a 6 směrem k přední části vývalku. Z příčného řezu (obr. 36d) lze pozorovat, že došlo k posuvu bodu 6 proti směru hodinových ručiček. Na základě těchto informací lze říci, že vlivem tváření dochází k toku materiálu v povrchových

vrstvách ve směru válcování. Tato analýza ukazuje, že vlivem válcování s využitím kosých válců dochází k rozdílnému toku materiálu v povrchových vrstvách a v objemu válcované tyče. Na povrchu a v jeho blízkosti dochází jak k rotačnímu posuvu částic, tak k podélnému posunu částic, který je větší než v objemu tyče. Částice materiálu pod povrchem na základě zjištění ze simulace, se pohybují pouze lineárně ve směru válcování (obr. 36 d) a nepodléhají rotaci. Jak je vidět z obr. 41c, oblast, kde se body, a tedy částice materiálu posunují stejně, je značně široká a odpovídá cca polovině průřezu tyče.

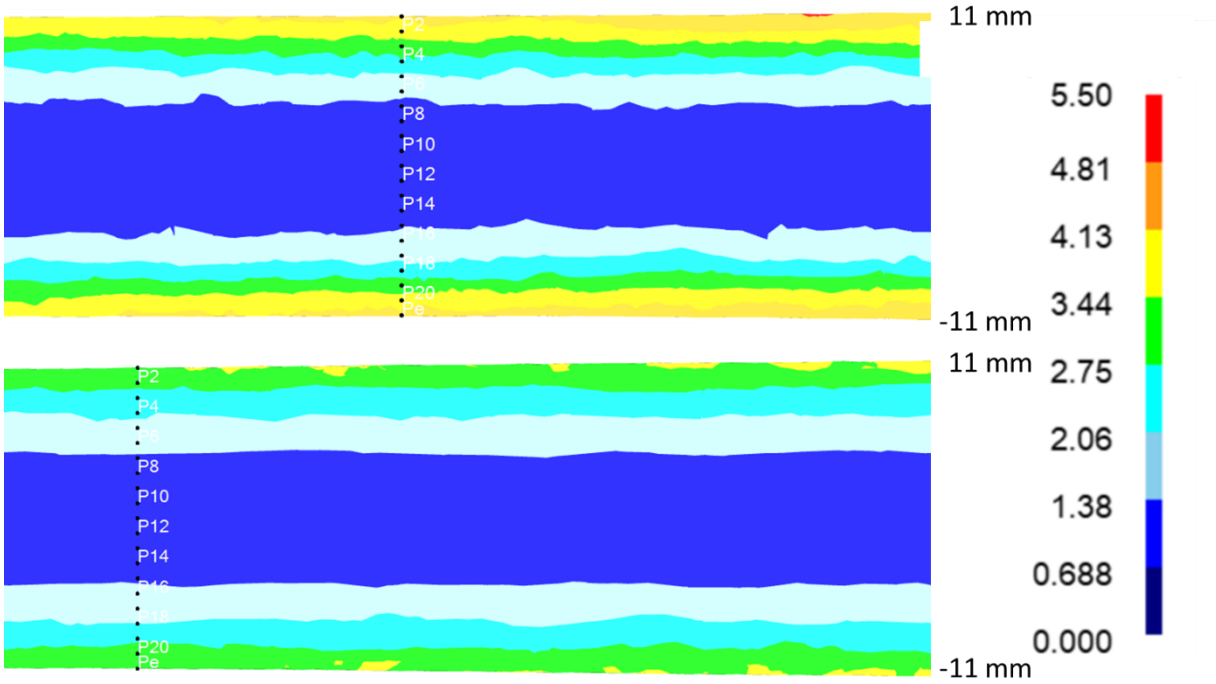


Obr. 36 Změna polohy bodů pro ocel DIN C15: a) původní poloha - podélný řez, b) původní poloha - příčný řez, c) poloha po válcování - podélný řez, d) poloha po válcování - příční řez.

Analýza efektivní deformace válcované tyče

Na základě předchozích informací ohledně pohybu vrchních vrstev tvářeného materiálu lze předpokládat, že deformace při válcování bude největší v povrchových vrstvách. DEFORM umí zobrazit graf závislosti maximální a minimální efektivní deformace na čase. Tento graf,

ale neposkytuje dostatečnou informaci o efektivní deformaci, protože minimální hodnota efektivní deformace na tvářeném dílu je v celém průběhu rovna 0, což je i před vstupem do válců v celém objemu a maximální dosahuje vysokých hodnot, jejichž umístění je na čele tvářeného dílu. Pro vyhodnocení rozložení efektivní deformace v průřezu tvářeného materiálu je výhodnější využít funkci vyhodnocení této stavové proměnné mezi dvěma body. Touto funkcí lze ohraničit počátečním a konečným bodem sledovanou oblast a určit celkový počet bodů, které následně vytvoří graf. Pro toto vyhodnocení byl vytvořen počáteční bod tohoto sledování v bodě vzdáleném 11 mm od podélné osy ve směru osy Z a konečný bod taktéž ve směru osy Z, ale s hodnotou -11 mm (obr. 37). Jedná se tedy o body ležící na povrchu válcovaného polotovaru. Mezi těmito body se poté nacházelo 19 dalších bodů. Z obrázku je vidět, že u oceli DIN C60 bylo dosaženo hodnot efektivní deformace převyšujících hodnotu 4,13 mm/mm v povrchových vrstvách, zatímco v případě nerezové oceli AISI 321 je deformace v povrchových vrstvách pouze okolo hodnot 3,44 mm/mm. V případě jádra tvářeného materiálu je ve všech případech hodnota v porovnání s povrchovými oblastmi nízká a velmi se neliší.

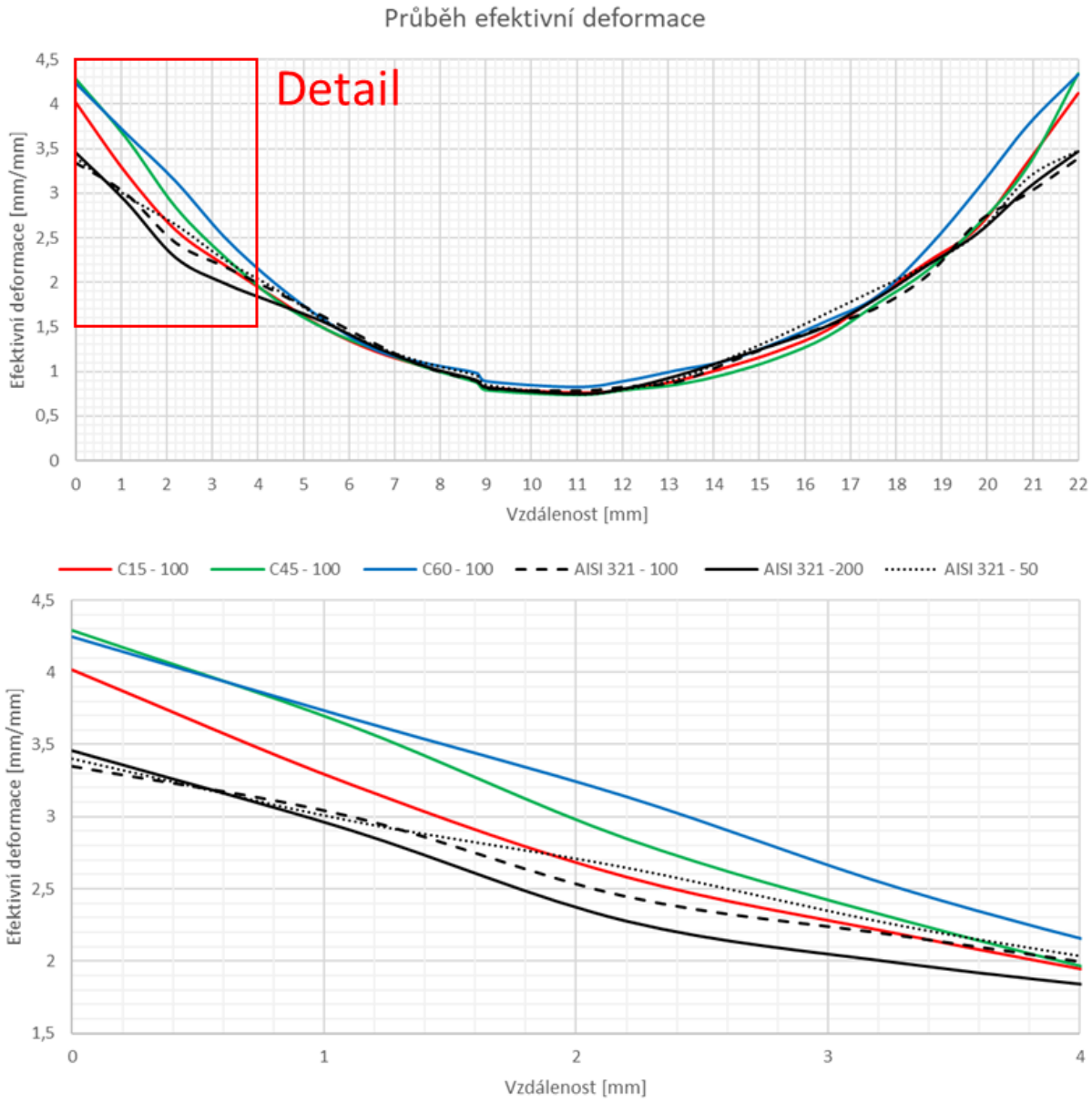


Obr. 37 Rozložení efektivní deformace [mm/mm] v průřezu válcované tyče: DIN C60 (nahoře), AISI 321 (dole).

Pro názornější ukázku rozložení deformace v průřezu zkoumaných materiálů byly vytvořeny pomocí bodů v řezu součásti grafy, s jejichž pomocí lze zjistit, že efektivní deformace u všech tvářených materiálů dosahovala v jádru hodnot okolo 0,75 mm/mm (obr. 38). Hodnoty efektivní deformace ve všech případech rostly směrem k povrchu tvářených tyčí, a přibližně ve vzdálenosti 5 mm od jádra materiálu se začaly pro jednotlivé materiály výrazněji lišit. Nejnižších hodnot efektivní deformace po válcování dosahovala ocel AISI 321 válcovaná rychlostí válců 200 ot/min, jejíž křivka ukazovala po celém průměru nižší hodnoty v porovnání s ostatními materiály. Hodnota maximální efektivní deformace byla mezi 3,3 a 3,5 mm/mm, a co se týče efektivní deformace v dalších částech průřezu tyče, tak detail ukazuje jistou rozdílnost, která je ale pouze na jedné straně grafu a na druhé není tak výrazná a jedná se tedy pravděpodobně jen o numerickou nepřesnost.

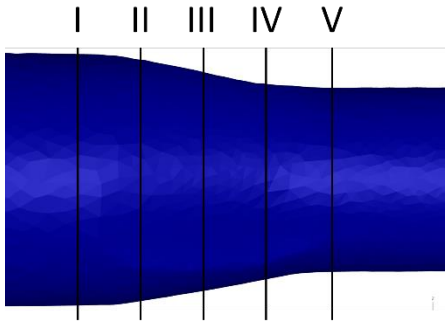
V případě uhlíkových ocelí bylo dosaženo nejnižších hodnot efektivní deformace u oceli DIN C15, která byla dle grafu po celém průřezu níže, než oceli DIN C45 a DIN C60 a maximální hodnota efektivní deformace byla 4 mm/mm. V případě zkoumané oceli DIN C45

bylo dosahováno taktéž nižších hodnot efektivní deformace než u oceli DIN C60, ale s blížícím se povrchem se blížily i hodnoty efektivní deformace těchto dvou ocelí, které následně dosáhly maximální hodnoty 4,3 mm/mm.



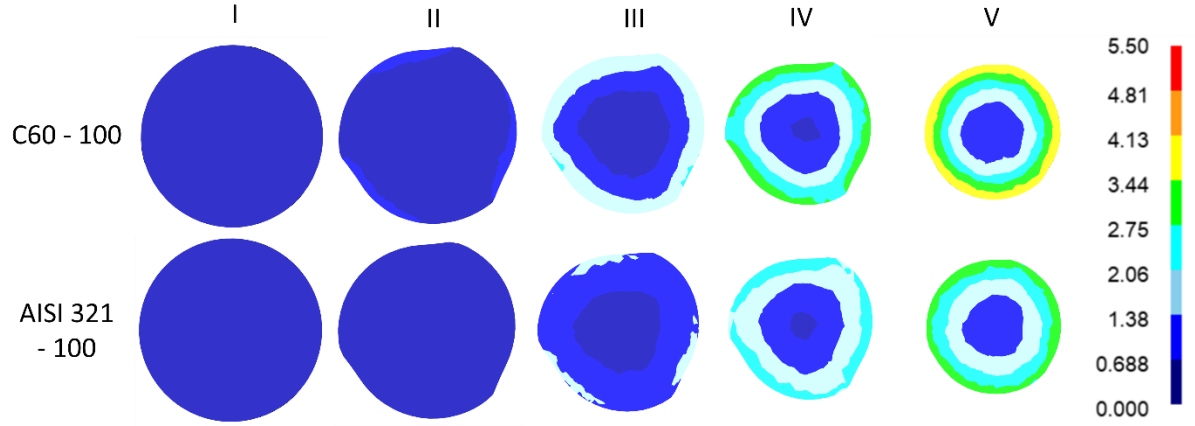
Obr. 38 Rozložení efektivní deformace v průřezu zkoumaných tyčí: Celý průběh (nahoře), Detail (dole).

Dále je vhodné se podívat na to, jak vypadá rozložení efektivní deformace v deformační oblasti, a tedy jak narůstá tato hodnota s postupným vstupováním tělesa do válcovací mezery. Bylo vytvořeno celkem pět příčných řezů zkoumaným tělesem, kdy první byl hned na počátku deformační zóny, a další vždy 7,5 mm od sebe (obr. 39).



Obr. 39 Naznačení řezů válcovaným tělesem.

Celková délka deformační zóny je přibližně 35–40 mm podle měření vzdáleností krajních kontaktních bodů při válcování, ale v posledních několika milimetrech hladící části válců, již nedochází k velkým změnám efektivní deformace, a proto byly řezy provedeny pouze na vzdálenosti 30 mm (obr. 40).



Obr. 40 Změna efektivní deformace v závislosti na vzdálenosti od počátku deformační oblasti pro oceli DIN C60 a AISI 321.

Z výše uvedeného obrázku je stejně jako z předchozích vyhodnoceních jasně patrné, že u oceli AISI 321 došlo vlivem tváření k vložení přibližně stejného množství efektivní deformace v jádru materiálu, ale na jeho povrchu byla efektivní deformace menší. Dále lze pozorovat na řezech II, III a IV, že během snižování rozměrů kosým válcováním není po celou dobu tohoto procesu tyč kruhová, ale její průřez je pomocí válců deformován. K vytvoření kruhového průřezu finálního tvaru vývalku dochází až v poslední oblasti mezi řezem IV a V.

Analýza napětí ve válcované tyči

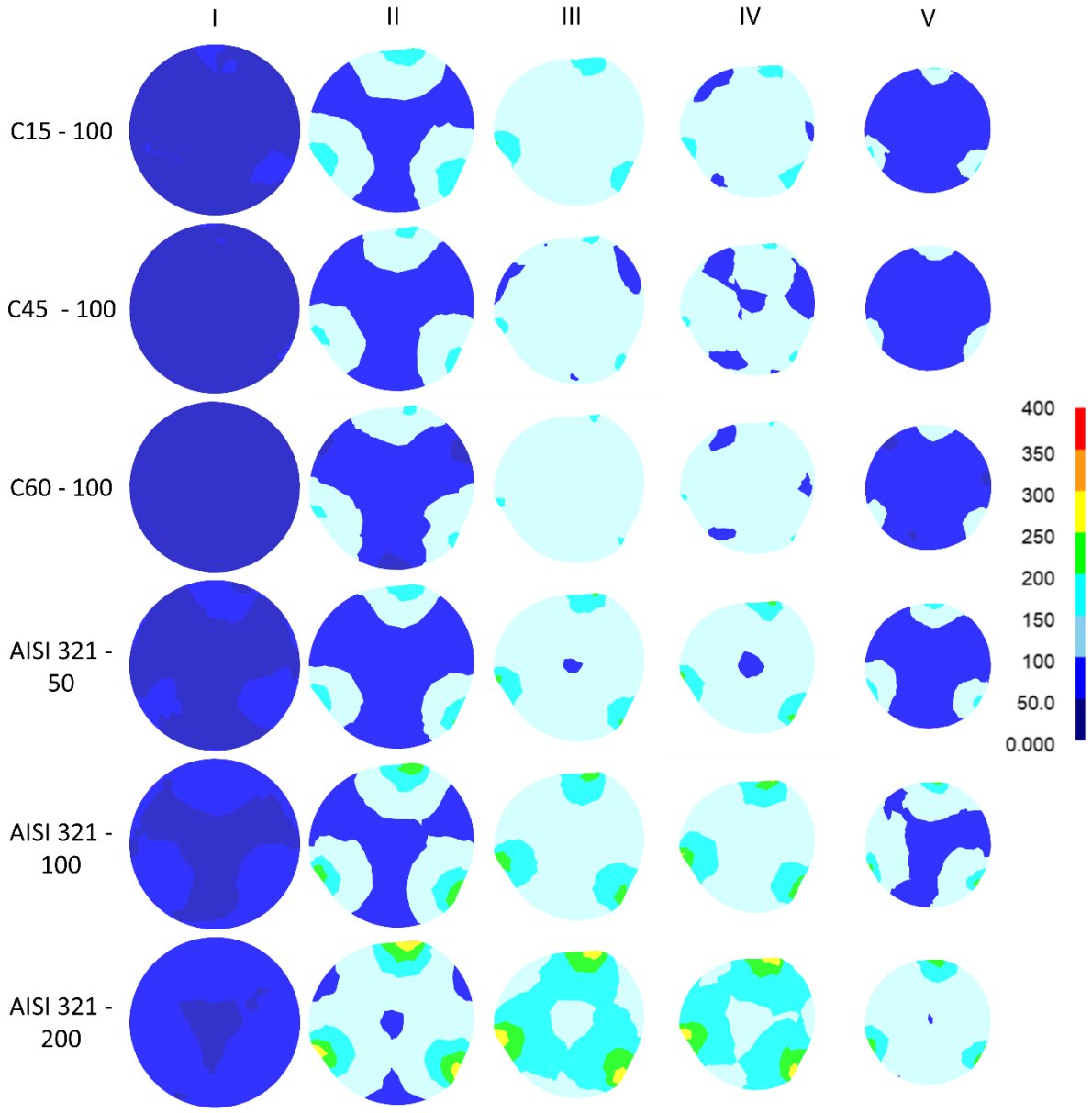
Pro analýzu napětí v deformační oblasti válcované tyče bylo využito stejného postupu jako v případě sledování efektivní deformace. Bylo opět provedeno pět řezů ve stejných místech jako v předchozím případě a byly vytvořeny snímky pro všechny válcované materiály a také rychlosti otáček válců použité pro válcování (obr. 41). Z těchto snímků vyplývá, že největší efektivní napětí dle očekávání vznikalo v blízkosti stykových ploch válců a tyče. Ze snímků to vypadá, že u stykové plochy uhlíkové oceli DIN C15 vznikalo vyšší napětí než u ocelí DIN C45 a DIN C60. Bylo proto provedeno kontrolní měření a bylo zjištěno, že u uhlíkové oceli DIN C15 bylo napětí u stykové plochy okolo 210 MPa (tab. 6). U zbylých dvou uhlíkových ocelí se hodnoty napětí na stykové ploše pohybovaly kolem od 165 MPa pro DIN C60 po 185 MPa pro DIN C45.

Pro ocel AISI 321 bylo zjištěno, že s rostoucí rychlostí deformace dochází k zvyšování napětí v blízkosti stykových ploch, ale také je napětí vyšší i směrem ke středu materiálu.

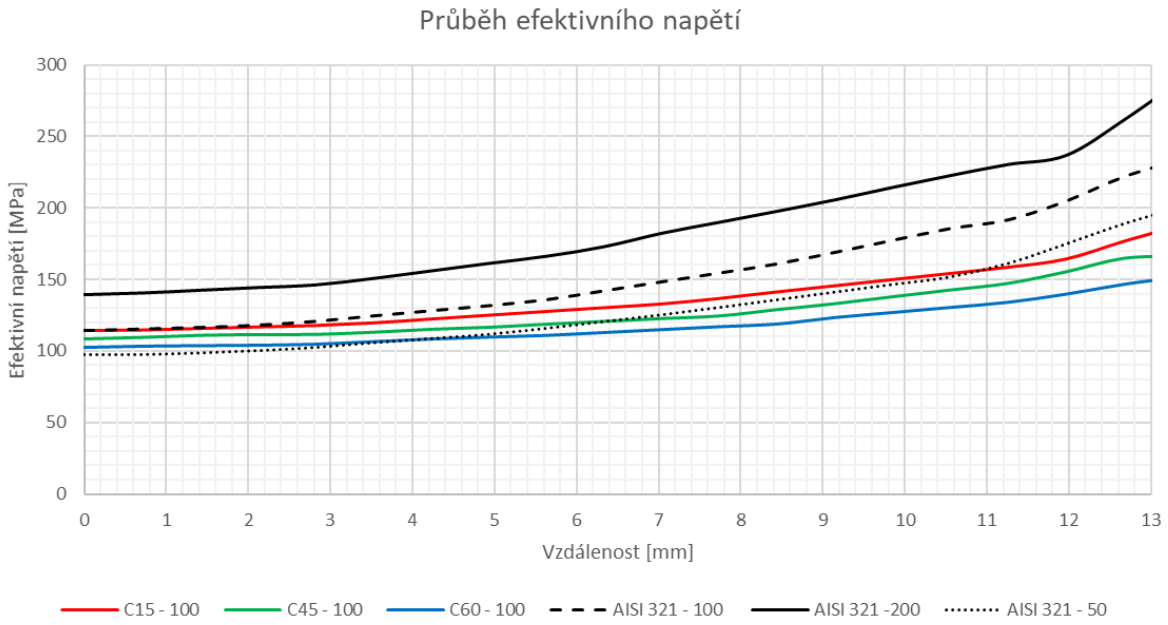
V případě rychlosti otáčení válců 50 ot/min dokonce hodnota napětí v jádru materiálu nepřesáhla hodnotu 100 MPa, zatímco v případě čtyřnásobné rychlosti otáčení válců se hodnota napětí blížila 150 MPa. Toto potvrzuje, že vyšší rychlost deformace vede ke zvýšení napětí a sil potřebných pro dosažení plastické deformace materiálu. Při porovnání s uhlíkovými ocelemi je v této korozivzdorné austenitické oceli dosažené vyšší napětí v oblastech vzdálených od středu více než 3 mm až k povrchu, ale v jádru materiálu se hodnoty napětí pohybuji přibližně ve stejných hodnotách jako u oceli DIN C15 (obr. 42).

Tab. 6 Hodnoty maximálního napětí na stykových plochách.

Materiál	**DIN C15 - 100**	**DIN C45 - 100**	**DIN C60 - 100**	**AISI 321 - 50**	**AISI 321 - 100**	**AISI 321 – 200**
Ef. Napětí [MPa]	~210	~185	~165	~220	~255	~320

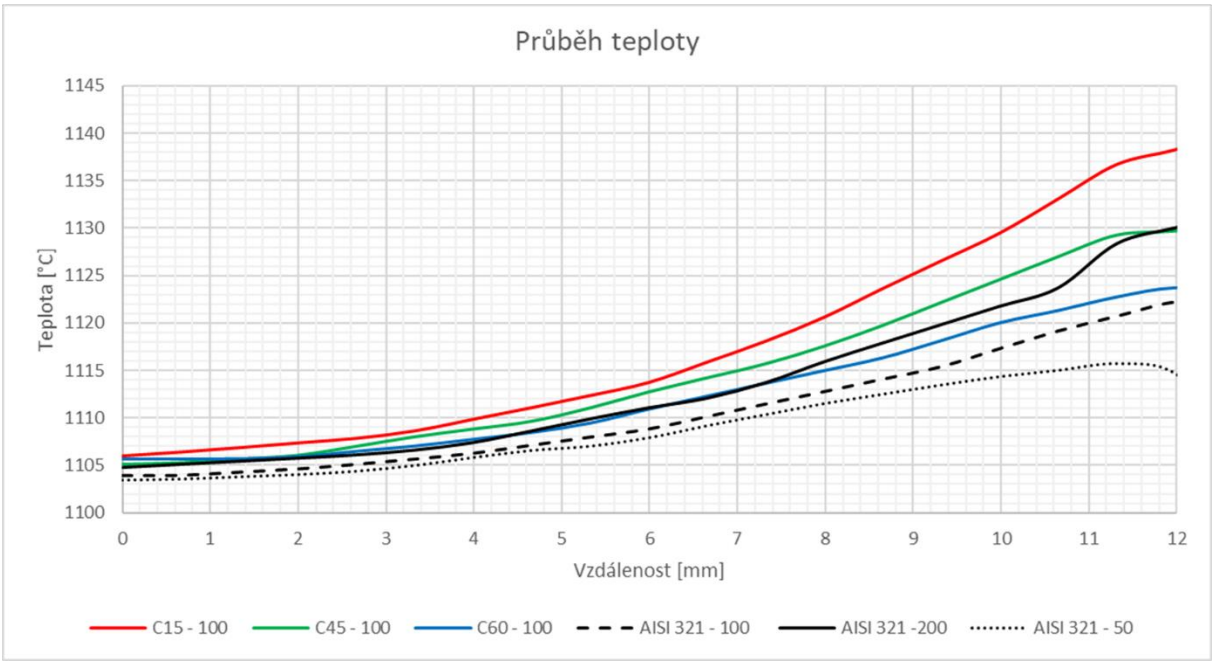


Obr. 41 Změna efektivního napětí [MPa] se vzdáleností od počátku deformační oblasti.



Obr. 42 Graf průběhu efektivního napětí v závislosti na vzdálenosti od jádra materiálu.

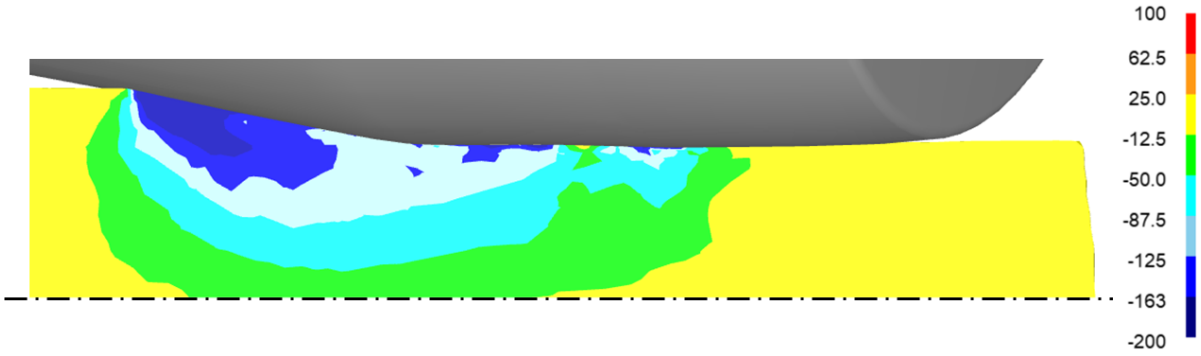
Jak bylo zmíněno dříve, u uhlíkových ocelí DIN C15, C45 a C60 byly naměřeny různé hodnoty napětí v povrchových vrstvách během tváření. Jelikož napětí je ovlivňováno také teplotou, byla dále analyzována teplota pro oceli ve stejných bodech, a ukazuje se, že v případě oceli DIN C15 bylo v těchto místech dosahováno vyšších hodnot než v případě ostatních materiálů a vyšší hodnoty napětí tedy nejsou způsobeny nižší teplotou tvářeného polotovaru (obr. 43). Ukazuje se, že podle modelů uvedených pro tyto materiály v simulačním softwaru je opravdu při těchto teplotách tváření ocel DIN C15 méně tvařitelná než ostatní uhlíkové oceli použité v této práci.



Obr. 43 Graf průběhu teploty v závislosti na vzdálenosti od jádra materiálu.

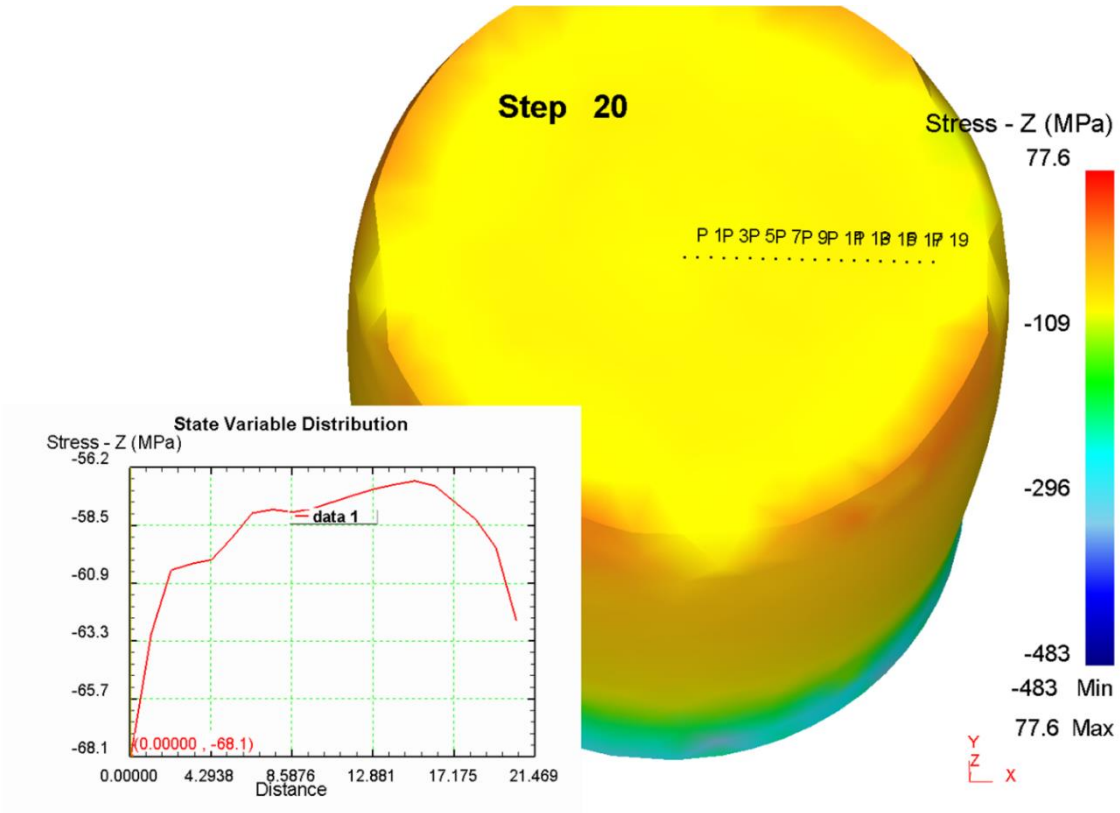
Pro další zkoumání, zejména týkající se spojení materiálů pomocí válcování je nutné zjistit ještě jednu hodnotu týkající se napětí. Touto hodnotou je napětí ve směru osy Z. Tato hodnota

byla zjišťována pouze pro ocel DIN C15, protože tento materiál bude pravděpodobně využit jako vrchní materiál při válcování trubky s vloženou tyčí z jiného materiálu (obr. 44). Je patrné, že v oblasti, kde dochází k tváření materiálu je jasně viditelné vzniklé tlakové napětí. Z výsledků analýzy dat je patrné, že toto napětí v ose tyče dosahuje hodnot okolo 20 MPa v tlaku a postupně stoupá až na hodnoty kolem 255 MPa v tlaku.



Obr. 44 Napětí ve směru osy Z [MPa] při válcování tyče.

Analýza hodnot napětí ve směru osy Z byla prováděna pro porovnání těchto hodnot s výpočtem, který byl proveden doktorkou Benešovou pro spojování technologií kovářského navařování pomocí hydraulického lisu za vysokých teplot. Výpočet doktorky Benešové je proveden tak, že silové zatěžování odpovídá reálnému zatěžování spojovaných dílů pomocí hydraulického lisu, který je součástí vybavení halových laboratoří. Obr. 45 ukazuje rozložení napětí v požadovaném směru při simulaci reálného procesu kovářského navařování. Simulace ukazuje, že hodnoty na stykových plochách spojovaných materiálů se pohybují v rozmezí 55 – 70 MPa v tlaku. Tyto hodnoty jsou nižší než ve výše simulovaném případě válcování pomocí zařízení HDQT-R 30 – 12.



Obr. 45 Rozložení napětí na stykové ploše mezi dvěma spojovanými válečky.

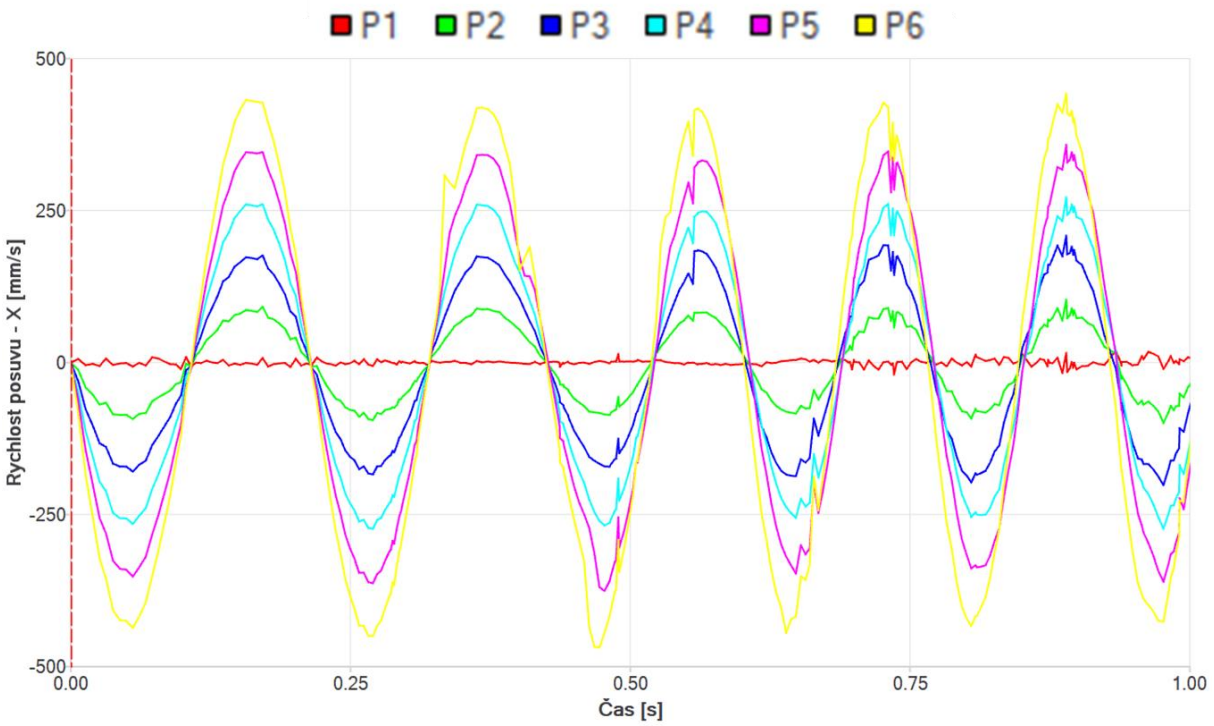
Rychlost pohybu tyče

Další zjišťovanou hodnotou ze stavových proměnných byla rychlost tyče ve směru osy Y, což je zároveň směr, kterým se tyč během válcování pohybuje. Pro zjištění této hodnoty byla opět použita funkce point tracking, kdy byl sledován primárně bod ležící přímo na ose Y, protože u tohoto bodu docházelo vlivem tváření k nejmenším posuvům. Byla sledována ustálená rychlost bodu po průchodu válci (tab. 7). Hodnoty v této tabulce jsou zatíženy chybou v odečtu, protože vlivem výpočtů hodnoty této rychlosti kmitají okolo nějaké hodnoty a odečtení bylo provedeno z grafu a lze tedy soudit, že rychlosti posuvu ve směru osy Y by měly být pro materiály válcované stejnou rychlostí stejné.

Tab. 7 Rychlosti posuvu provalku ve směru osy Y.

Rychlost posuvu tyče [mm/s]	DIN C15 -100	DIN C45 - 100	DIN C60 - 100	AISI 321 - 50	AISI 321 - 100	AISI 321 – 200
Před válci	~80	~81	~79	~43	~84	~167
Za válci	~155	~153	~151	~80	~159	~323

Z výsledků této analýzy bylo zjištěno, že rychlost posuvu tyče ve směru osy Y po průchodu válci je 80 mm/s v případě rychlosti otáčení válců 50 ot/min. V případě dvojnásobné rychlosti otáčení válců se ve všech případech pohybovaly hodnoty rychlosti posuvu ve směru osy Y kolem 155 mm/s a v případě nejvyšší rychlosti otáček válců byla dosažená rychlost v ustáleném stavu válcování kolem 323 mm/s. Co se týče rychlosti pohybu ve směru osy X a Z jsou díky rotaci tyto rychlosti stejné, pouze posunuté o 90 °. Rychlosti samozřejmě rostou směrem k povrchu materiálu, což bylo sledováno opět pomocí šestice bodů, kdy P1 byl v ose tyče a P6 na jejím povrchu (obr. 46).

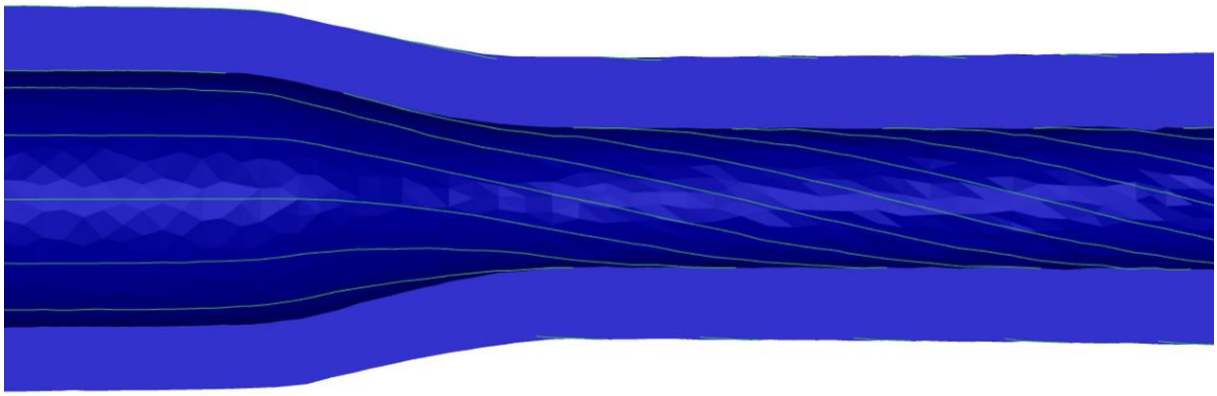


Obr. 46 Rychlost posuvu bodů ve směru osy X v závislosti na čase při válcování tyče.

7.3.2 Simulace válcování trubky

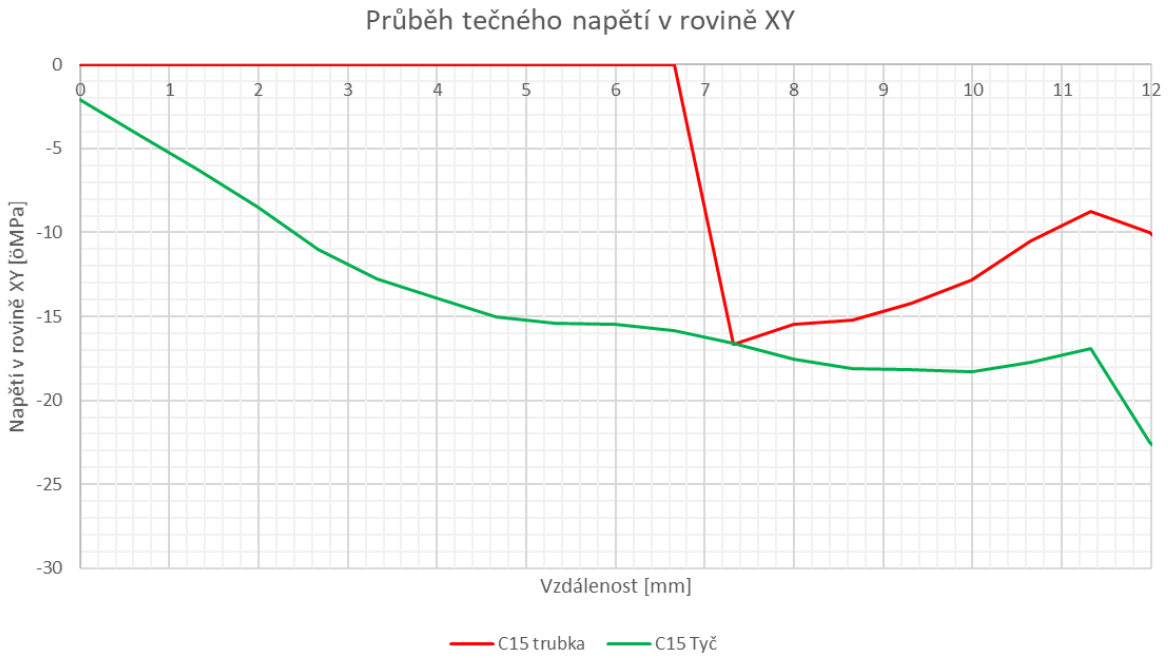
Simulace válcování trubky bude provedena na materiálu DIN C15. Informace rozložení efektivní deformace zjištěné na tyči ukazuje, že k velké efektivní deformaci dochází zejména u povrchu materiálu a v jeho jádru tak vysoké hodnoty efektivní deformace nejsou patrné. Z tohoto důvodu je předpokládáno, že by mohla být válcována pomocí tohoto zařízení i trubka kruhového průřezu, aniž by došlo k jejímu zavalení případně výraznému poškození. Byla tedy provedena simulace válcování tohoto vstupního polotovaru o vnějším průměru 30 mm s tloušťkou stěny 5 mm, a to rychlostí otáčení válců 100 ot/min.

Stejně jako v případě tváření tyče dochází vlivem deformace při válcování k spirálovitému toku materiálu v povrchových vrstvách. Dochází zde opět k posunům zkoumaných bodů v blízkosti povrchu ve směru válcování a proti směru otáčení hodinových ručiček (obr. 47). Jelikož funkce flownet tracking vytváří tuto síť na všech površích, je při válcování trubky patrné, že dochází k posunu bodů i na vnitřním povrchu a vytváří se zde také ona spirálovitost.



Obr. 47 Spirálovitost vnitřního povrchu válcované trubky v řezu.

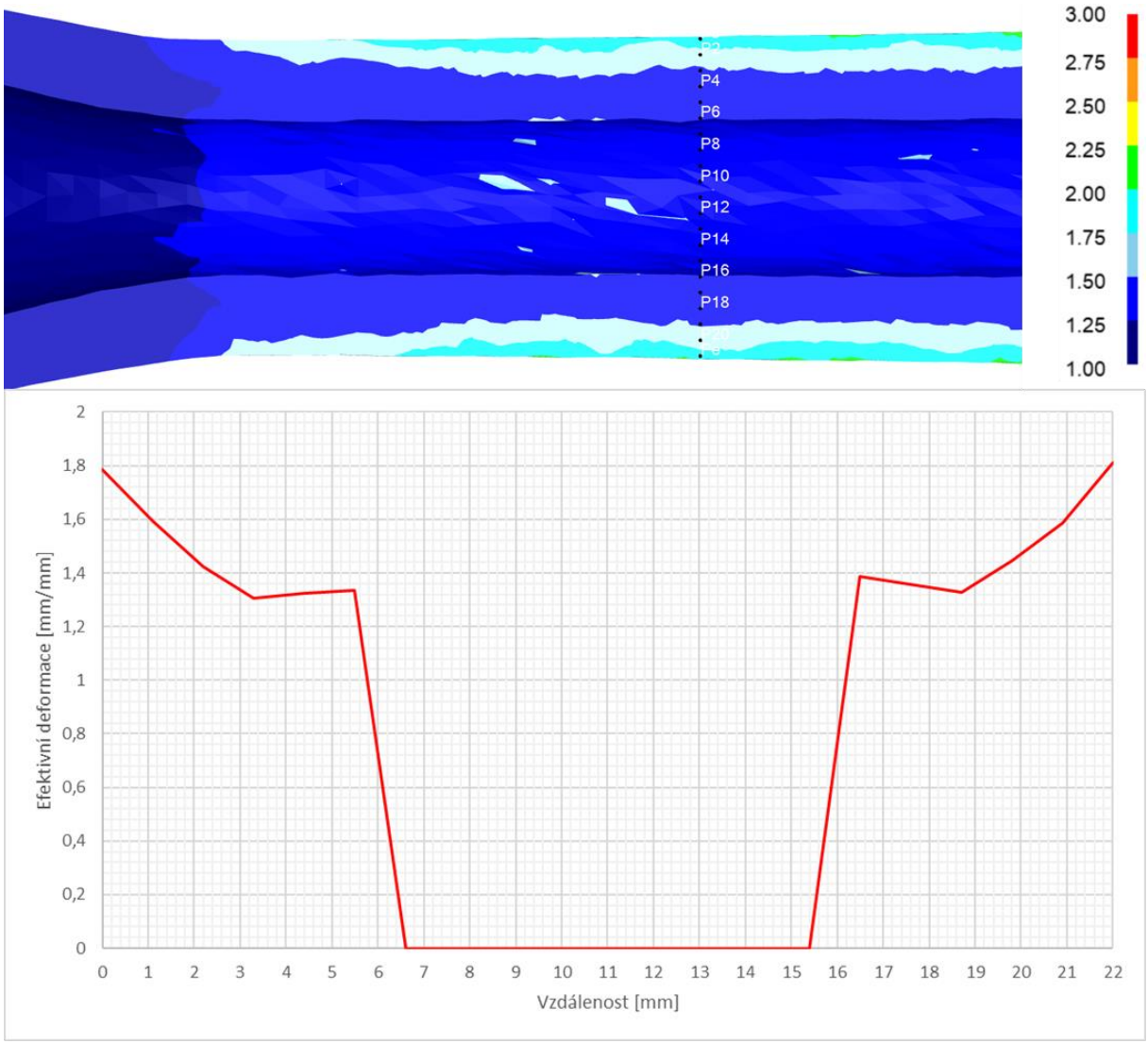
Z důvodu toho, že dochází k tvorbě spirálovitosti i na vnitřním povrchu trubky lze soudit, že v tomto případě dochází k rotaci celého průřezu kolem osy Y, zatímco v případě plných tyčí dochází k rotaci pouze v povrchových vrstvách průřezu. Toto tvrzení je potvrzeno analýzou smykového napětí v ose XY, protože pokud dochází v případě trubky k rotaci celého průřezu mělo by napětí v rovině XY být menší než v případě tyče (obr. 48). Na grafu je pozorovatelný bod, kde mají oba polotovary stejnou hodnotu tlakového napětí. V případě trubky tato hodnota s rostoucí vzdáleností od středu hodnoty klesají, zatímco v případě tyče hodnoty dále rostou.



Obr. 48 Průběh napětí v rovině XY pro tyč a trubku z materiálu DIN C15.

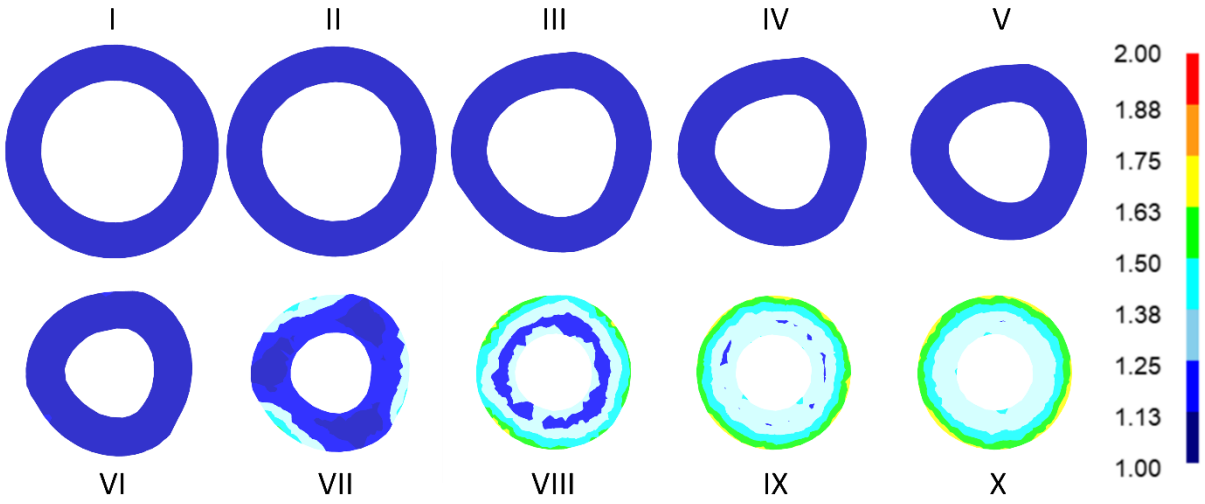
Analýza efektivní deformace válcované trubky

Stejně jako u analýzy efektivní deformace po válcování tyčí bylo u trubky vytvořeno pole tvořené jednadvaceti body, kdy bod č. 1 je na horním povrchu trubky a bod č. 21 je na spodním povrchu trubky (obr. 49). Ze snímku je patrné, že maximální efektivní deformace je opět dosaženo na vnějším povrchu tvářeného dílu, a hodnoty této efektivní deformace jsou okolo 1,8 mm/mm. S rostoucí vzdáleností od okraje materiálu klesá i vložená efektivní deformace na minimální hodnotu 1.3 mm/mm ve vzdálenosti přibližně 3,3 mm od povrchu materiálu. Poté hodnota efektivní deformace opět mírně vzrůstá směrem k vnitřnímu povrchu válcované trubky.



Obr. 49 Rozložení efektivní deformace [mm/mm] v průřezu válcované trubky z materiálu C15.

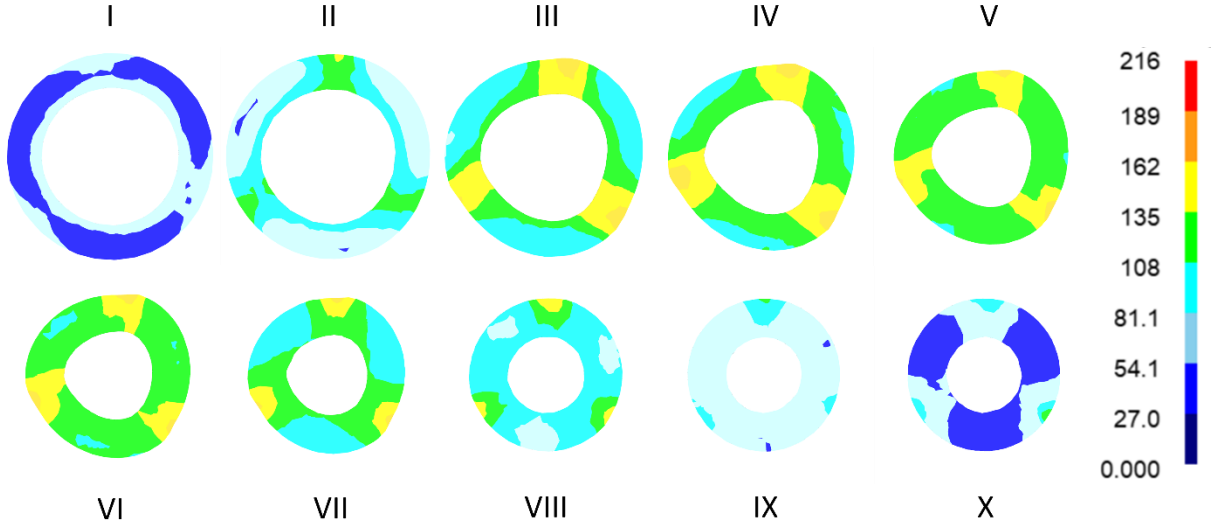
Stejně jako v případě tyčí byla zde deformační zóna dlouhá přibližně 35 až 40 mm. V tomto případě bylo provedeno 10 řezů tělesem v deformační oblasti po 4 mm od sebe a bylo sledováno rozložení efektivní deformace (obr. 50). Na prvních šesti řezech není viditelná žádná výraznější deformace a začíná se objevovat na řezu VII. Na těchto snímcích v řezu je velmi dobře viditelné to, jak dochází k porušení kruhovitosti trubky, jak na vnějším, tak vnitřním povrchu. Z kruhového výchozího průřezu na počátku deformační oblasti přechází trubka přes neurčitý průřez s jistou symetrií po 120 °, což odpovídá přesazení pracovních válců. Na řezu VIII se již průřez začíná podobat kruhovému a je dále dohlazován hladící částí pracovních válců.



Obr. 50 Změna efektivní deformace v závislosti na vzdálenosti od počátku deformační oblasti pro trubku z oceli DIN C15.

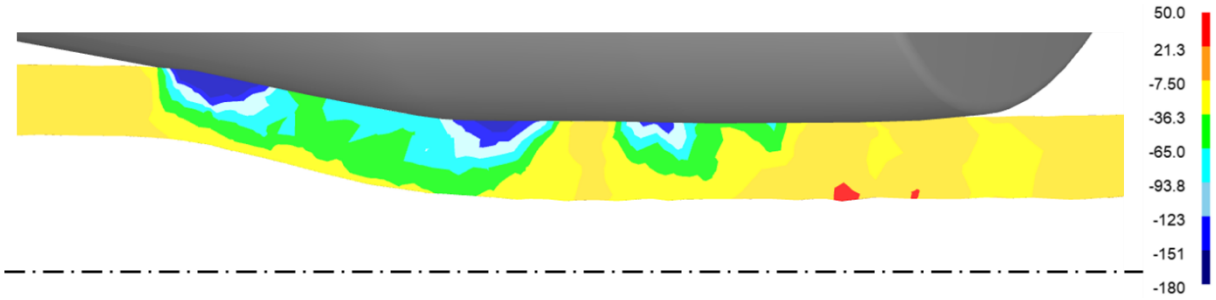
Analýza napětí ve válcované trubce

Pro analýzu napětí v deformační oblasti válcované trubky bylo využito stejného postupu jako v případě sledování rozložení efektivní deformace a bylo tedy provedeno opět 10 řezů v tvářecí oblasti po 4 mm od sebe (obr.51) . Ze snímků je zřejmé, že největší napětí vzniká opět v místě stykových ploch a toto maximální napětí dosahuje hodnot okolo 185 MPa. Je patrné, že v celém průřezu materiálu byla během válcování dosaženo efektivního napětí minimálně 135 MPa, což je hodnota, kterou na snímcích ohraničuje žlutá barva.



Obr. 51 Změna efektivního napětí [MPa] se vzdáleností od počátku deformační oblasti.

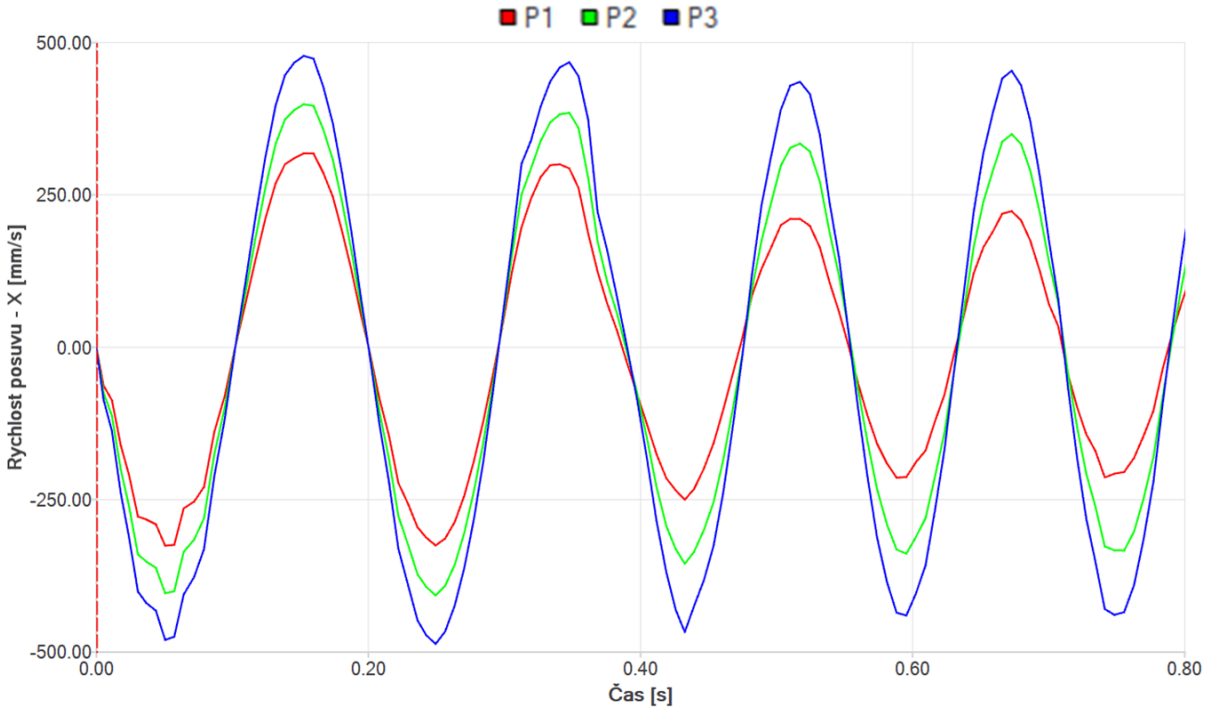
Dále bylo opět zjišťováno napětí ve směru osy Z (obr. 52). Z tohoto obrázku je patrné, že největší napětí ve směru osy Z je opět v oblasti stykových ploch trubky – válec, a dosahuje dle měřených výsledků v těchto místech hodnot okolo 180 MPa v tlaku. Postupně toto tlakové napětí klesá směrem k ose trubky. Dále bylo v řezu trubkou pozorováno tahové napětí před a za válci dosahující hodnot od 0 do 10 MPa v tahu.



Obr. 52 Napětí ve směru osy Z [MPa] při válcováni trubky.

Rychlost pohybu trubky

Hodnota rychlosti pohybu trubky je opět zajímavá z hlediska toho, zda se bude rovnat rychlosti pohybu plné tyče při stejné rychlosti válcování. Toto vyhodnocení bylo opět provedeno pomocí funkce sledování bodů fixovaných k síti tělesa. Hodnota rychlosti posuvu ve směru osy Y byla pro rychlost otáčení pracovních válců 100 ot/min opět okolo 160 mm/s. Co se týče rychlosti ve směru osy X a Z jsou opět stejné, pouze posunuté o 90 ° (obr. 53). Je zajímavé, že rychlosti posuvu bodů na povrchu trubky jsou přibližně o 60 mm/s vyšší než maximální rychlosti posuvů krajních bodů při válcování plné tyče ze stejného materiálu stejnou rychlostí otáčení pracovních válců. Toto zvýšení rychlosti v povrchových vrstvách může být dáno například jevem, který byl vysvětlován na začátku této kapitoly a týkal se rotace celého průřezu trubky vlivem válcování. Vlivem vznikajících smykových sil v povrchových vrstvách tyče dochází k brždění toku materiálu a rychlost bodů blíže k povrchu je nižší, zatímco díky rotaci celého průřezu trubky je tato rychlost v povrchových vrstvách vyšší.



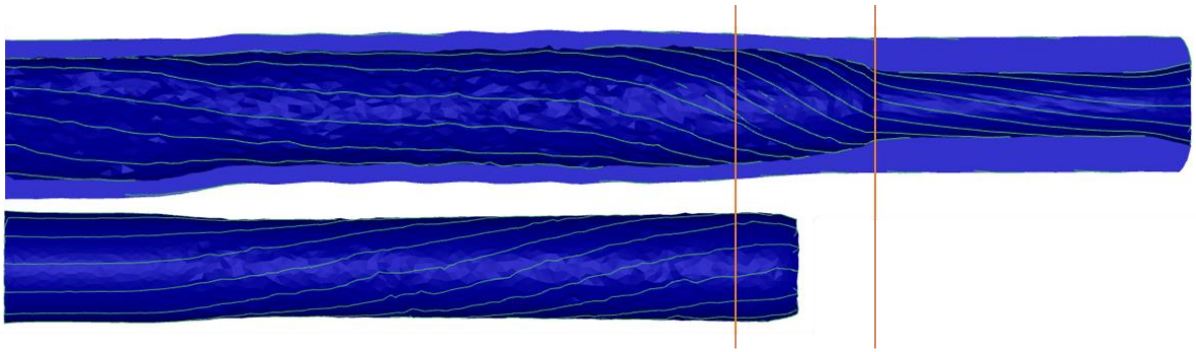
Obr. 53 Rychlost posuvu bodů ve směru osy X v závislosti na čase při válcování trubky.

7.3.3 Simulace válcování spojení trubky a tyče

Simulace válcování spojení trubky z materiálu DIN C15 s tyčí z oceli DIN C60 byla provedena opět pomocí simulačního programu DEFORM 2D/3D. Informace o rozložení efektivní deformace a napětí z předchozích simulací ukazují, že je efektivní deformace

v případě válcování trubky největší v povrchových oblastech, a že vlivem tváření dochází kromě prodlužování válcovaného polotovaru také k zvětšování tloušťky stěny vlivem toho, že při válcování není použit kalibrační trn, který by zaručoval rozměry vnitřního průměru válcované trubky. Na základě těchto informací byla provedena simulace válcování spojení, ve které bude pozorováno, k jaké interakci dochází na rozhraní trubky a tyče během válcování a zda by bylo možné pomocí válcování dosáhnout nějakého spojení těchto dvou materiálů s rozdílným obsahem uhlíku. Tato simulace je oproti předchozím na trubkách a tyčích pro výpočet mnohem složitější vlivem velkého množství stykových bodů mezi trubkou a tyčí.

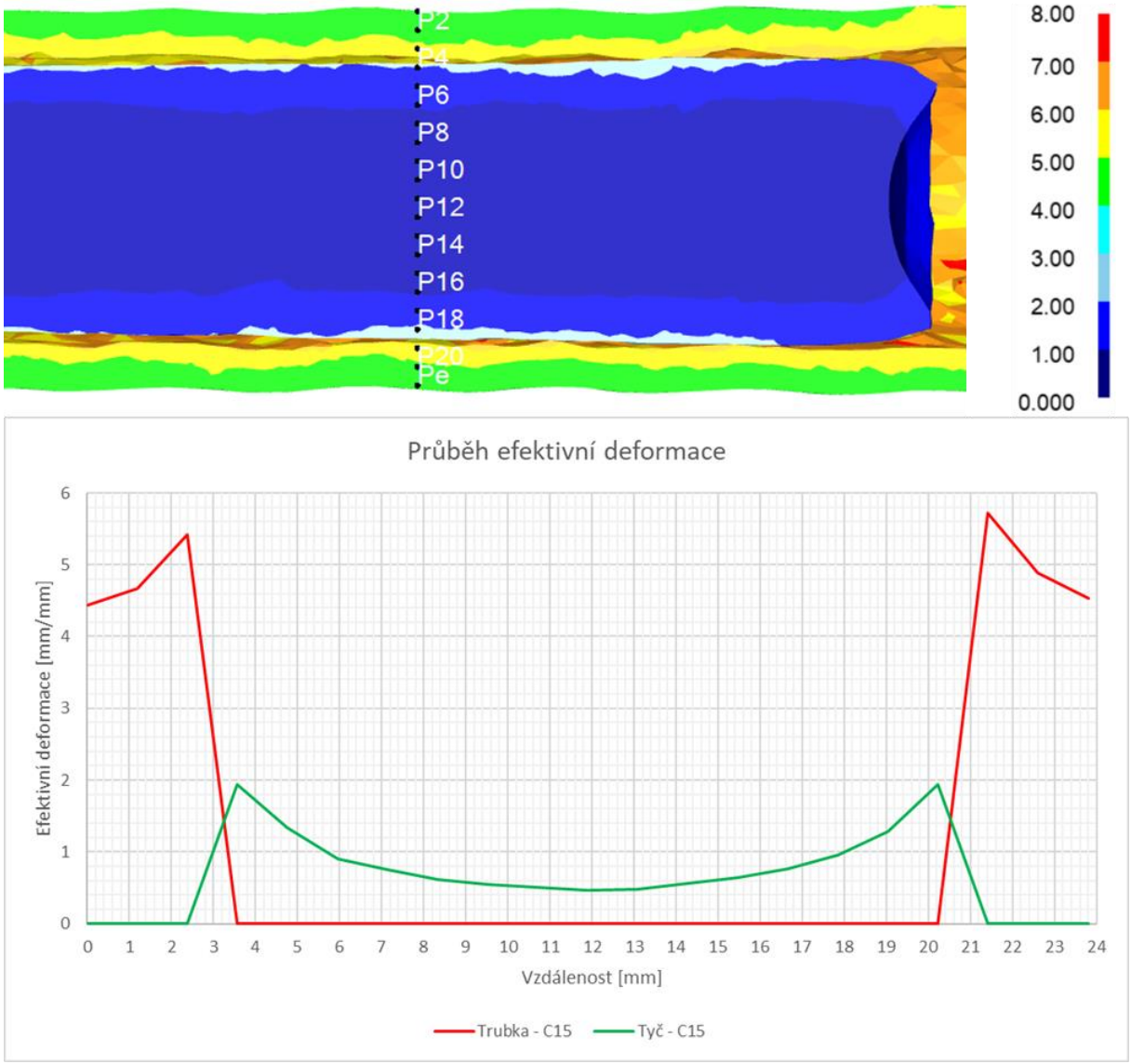
Stejně jako v předchozích případech bylo pomocí funkce flownet tracking analyzováno, za a jak dochází k rotaci válcovaného materiálu (obr. 54). V horní části tohoto snímku lze dobře pozorovat, jak stejně jako v případě válcování samotné trubky dochází k rotaci jejího průřezu vlivem válcování. Trubku lze pomyslně rozdělit na tři části. První z nich je zaváděcí část, kde byla pouze trubka a válcování probíhalo naprosto stejně jako v případě trubky. Druhou částí je přechodová, kde již při válcování docházelo k namáhání i tyče vložené uvnitř trubky, ale tato tyč ještě nebyla zcela vtažena mezi válce. V tomto případě docházelo k rozvalování trubky na tyči, tedy výraznému snížení průřezu a rotace trubky v tomto úseku byla největší. V poslední části docházelo již k válcování obou polotovarů najednou a lze dobře pozorovat, jak vlivem dotyku obou polotovarů došlo ke zpomalení otáčení bodů na vnitřní ploše trubky.



Obr. 54 Spirálovitost vnitřního povrchu válcované trubky (nahoře) a vnějšího povrchu válcované tyče (dole).

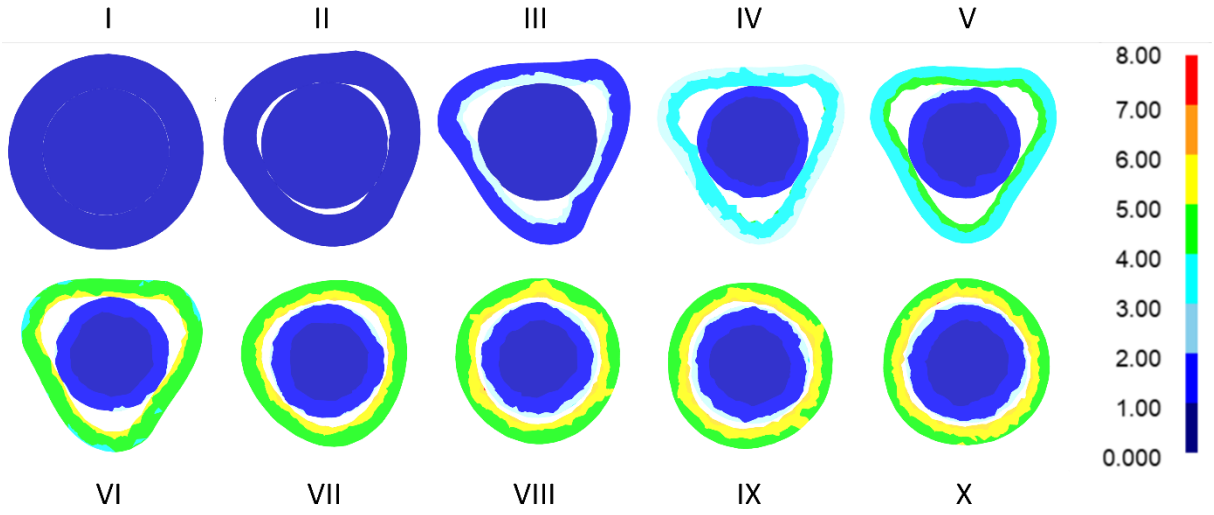
Analýza efektivní deformace válcovaného spojení trubky a tyče

Stejně jako v předchozích případech bylo vytvořeno pole tvořené jednadvaceti body, kdy bod č. 1 byl umístěn na horním povrchu válcovaného polotovaru a bod č. 21 byl umístěn na spodní povrchu válcovaného polotovaru (obr. 55). Z grafu je velmi dobře patrné, že vyšších hodnot efektivní deformace bylo dosahováno v případě trubky, kde bylo dosahováno hodnot mezi 4,5 a 5,5 mm/mm, ale oproti válcování trubky samostatné zde bylo vyšších hodnot dosaženu u vnitřního povrchu trubky, tedy na rozhraní trubka-tyč. Co se týče rozložení efektivní deformace u tyče vložené uvnitř trubky nejvyšších hodnot bylo dosaženo opět na rozhraní trubka-tyč a tyto hodnoty směrem k ose klesaly na hodnotu efektivní deformace 0,46 mm/mm.



Obr. 55 Rozložení efektivní deformace [mm/mm] v průřezu válcovaného spojení trubky a tyče.

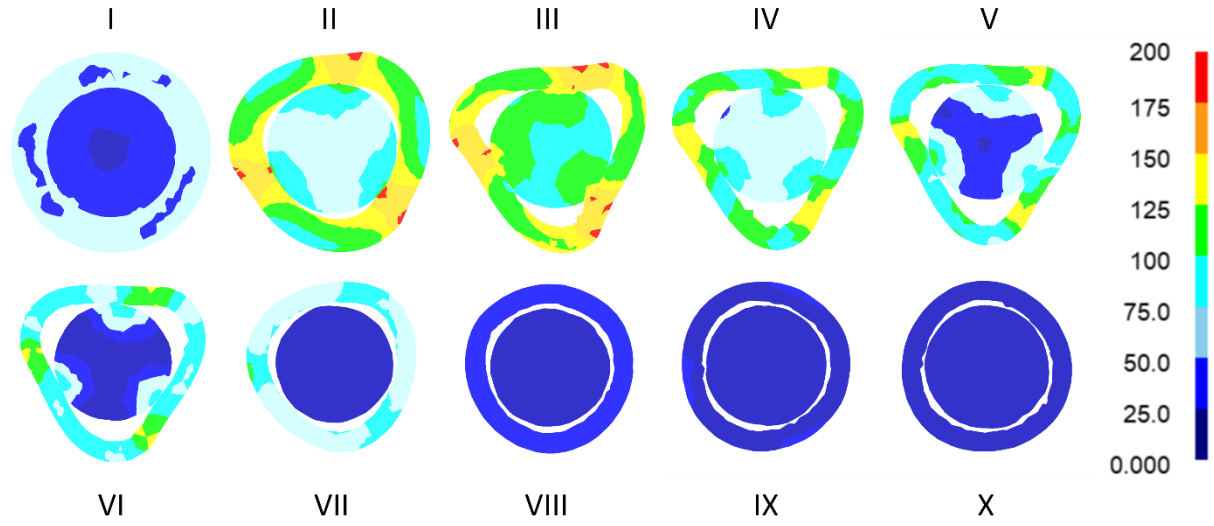
Stejně jako v případě analýzy efektivního napětí u trubky byla deformační zóna dlouhá přibližně 35 až 40 mm. Bylo opět provedeno 10 řezů tělesy a tyto řezy byly v tomto případě vzdáleny 10 mm, aby bylo možné pozorovat, jak se dotýkají vnitřní stěna trubky s povrchem tyče (obr. 56). Z prvního snímku je pozorovatelné, jak vypadá samotné spojení předtím, než dojde k objemovému tváření obou polotovarů. V případě snímků II – V lze pozorovat, že došlo vlivem tváření k rozválcování trubky na tyči. Vlivem válcování bylo docíleno snížení tloušťky stěny trubky a vnitřní povrch trubky byl v místech, kde se nenacházejí válce velmi výrazně odchýlen od povrchu tyče. Jak bylo již zmíněno v předchozím odstavci, tak v případě válcování spojení trubky s tyčí bylo dosaženo nejvyšších hodnot efektivní deformace na trubce, ale na její vnitřní stěně. Na snímcích VI – X se pomalu pomocí části válců začíná tvar trubky opět podobat kroužku, ale stále hodnoty efektivní deformace narůstají, až k hodnotám 7 mm/mm.



Obr. 56 Změna efektivní deformace v závislosti na vzdálenosti od počátku deformační oblasti pro spojení tyče z oceli DIN C60 a trubky z oceli DIN C15.

Analýza napětí ve válcovaném spojení trubky a tyče

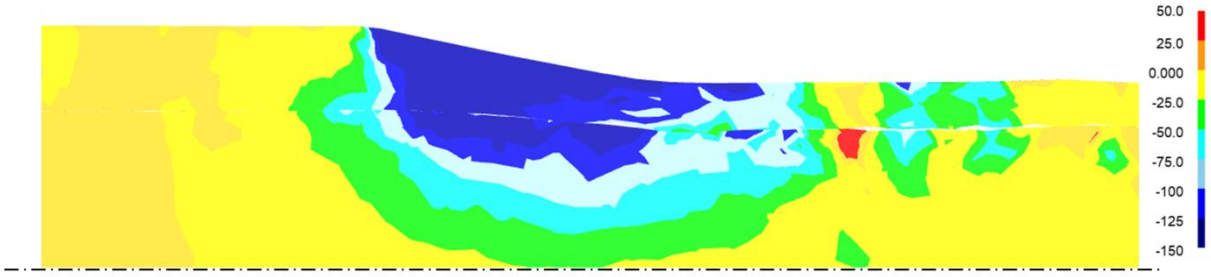
Pro analýzu napětí v deformační oblasti a zároveň v hladící oblasti válců byl použit stejný postup a byly tedy vytvořeny řezy se vzájemnou vzdáleností 10 mm (obr. 57). Ze snímků je dobře patrné, že již před válcovací mezerou je v materiálech napětí okolo 50 MPa. Po vtažení válcovaného polotovaru mezi válce postupně napětí roste, a především ve stykových bodech trubky a válce dosahuje hodnot okolo 200 MPa, zatímco v tyči se maximální hodnoty napětí po celou dobu procesu válcování pohybují v hodnotách do 125 MPa. Konec oblasti, kde dochází k redukci průměru je přibližně mezi snímky III a IV. V těchto místech začíná pomalu napětí v provalku klesat. Ve snímku VII již dosahuje napětí v tyče minima a v trubce stále klesá a dosahuje minima až v posledním snímku.



Obr. 57 Změna efektivního napětí [MPa] se vzdáleností od počátku deformační oblasti při válcování spojení trubky a tyče.

Dále bylo stejně jako v předchozích případech sledováno, jakého napětí ve směru osy Z bylo v průřezu válcovaného polotovaru dosaženo (obr. 58). Ze snímku je patrné, že největší tlakové napětí bylo vytvořeno v místě, kde dochází k válcování. Hodnoty v těchto místech převyšovaly 150 MPa v tlaku. Tlakové napětí v tomto případě dosáhlo i osy samotného

provalku, kde bylo dosaženo napětí okolo 25 MPa v tlaku a na stykových plochách trubky a tyče bylo vytvořeno tlakové napětí mezi 125 a 150 MPa.

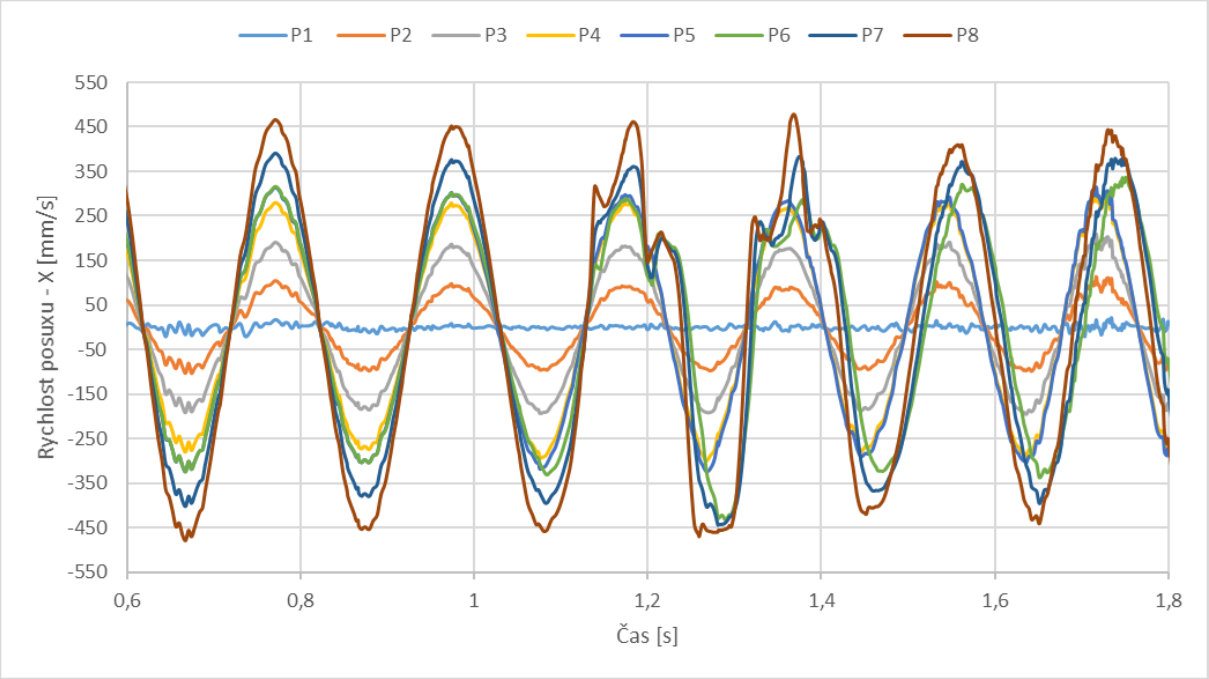


Obr. 58 Napětí ve směru osy Z [MPa] při spojení trubky a tyče.

Rychlost pohybu provalku

Rychlost provalku byla zkoumána pomocí bodů fixovaných k síti objektů v simulaci. Prvních 5 bodů je fixováno k tyči, kdy první je v ose tyče a další jsou postupně 2,5 mm vzdálené od sebe. Poslední bod je tedy na povrchu tyče. Další tři zkoumané body jsou již na trubce, z nichž první je ve stejném místě jako poslední bod tyče a další dva jsou opět po 2,5 mm od sebe, tedy poslední bod č. 8 je na povrchu válcované trubky. Co se týče rychlosti ve směru osy Y, to znamená ve směru pohybu tyče vlivem válcování bylo před válci u všech bodů dosahováno rychlosti okolo 85 mm/s. Ve chvíli, kdy se začala rozvalovat trubka na tyči vlivem válcování došlo k urychlení bodů ležících na této trubce až k rychlostem okolo 175 mm/s, zatímco body tyče byly posouvány rychlostí pouze 125 mm/s. Po průchodu sledovaných bodů válci došlo k ustálení na rychlosti okolo 160 mm/s jako v případech válcování tyčí či trubky rychlostí otáčení válců 100 ot/ min. Body trubky tedy pro průchodu válci měly vyšší hodnotu koordinátu ve směru osy Y.

Dále byla opět zkoumána posuvová rychlost bodů ve směru osy X, která je stejná jako pro směr Z pouze pootočená o 90 ° (obr. 59). Analýzou bylo zjištěno, že v první části do času přibližně 1,1 s jsou hodnoty nejvyšších výkmitů pro jednotlivé body přesně nad sebou. Z tohoto plyne, že jsou opravdu sledované body přesně nad sebou. Mezi časy 1,1 s a 1,5 s dochází k válcování části polotovaru, kde jsou umístěny sledované body. Jak bylo zmíněno v předchozím odstavci, body umístěné na trubce vlivem válcování a prodlužování trubky zrychlí ve směru osy Y. Z tohoto snímku lze ale také pozorovat, že vlivem válcování došlo ke zpomalení bodů ležících na trubce, protože svých maxim po průchodu válci dosahují později, než body ležící na tyči. Nejvíce byl zpomalen bod č 6, který leží na vnitřním povrchu trubky a tok materiálu v tomto místě je pravděpodobně zpomalen více vlivem tření mezi trubkou a tyčí. Ke zpomalení bodů 6, 7 a 8 pravděpodobně došlo vlivem rozvalení trubky na tyči a následným přitlačením této trubky zpět k tyči dalším válcem, pouze v jiném místě. Dále lze pozorovat, že vlivem válcování byly deformovány křivky rychlostí pouze pro body 6, 7, 8, které leží na trubce, zatímco křivky pro prvních 5 bodů, které leží na tyči jsou stále velmi podobné po celou dobu procesu a pouze trochu klesá jejich maximum, protože dochází k redukci poloměru otáčení.



Obr. 59 Rychlost posuvu bodů ve směru osy X v závislosti na čase při válcování spojení trubky a tyče.

8. Charakteristika výchozího stavu

Před samotným experimentálním válcováním je nutné charakterizovat výchozí stav válcovaných materiálů. Pro experimenty byly vybrány celkem čtyři oceli. První z nich je konstrukční uhlíková ocel EN S235JRC, která byla použita v polotovaru tyč a trubka. Další dvě jsou uhlíkové ušlechtilé oceli EN C45 a EN C60, které byly použity jako tyče pro experimenty na tyčích a dále ocel EN C60 byla použita jako tyč v případě pokusu o spojení tyče a trubky z ocelí o různém chemickém složení. Poslední testovanou ocelí je korozivzdorná austenitická ocel GOST 0CH18N10T, která byla válcována jako tyčový polotovar. Chemické složení těchto materiálů je uvedeno v tabulce 8.

Tab. 8 Chemické složení ocelí použitých v experimentu.

Hm. %	**C**	**Si**	**Mn**	**P**	**S**	**Ni**	**Cr**	**Mo**	**Ti**
EN S235JRC	0,17	0,2	0,8	0,013	0,018	0,02	0,05	0,008	
EN C45E	0,45	0,21	0,73	0,013	0,015	0,08	0,07	0,018	
EN C60	0,57-0,65	max 0,4	0,6-0,9	max 0,045	max 0,045	max 0,4	max 0,4	max 0,1	
GOST 0CH18N10T	max 0,08	0,25-0,1	max 0,2			9-12	17-19	max 0,75	0,7

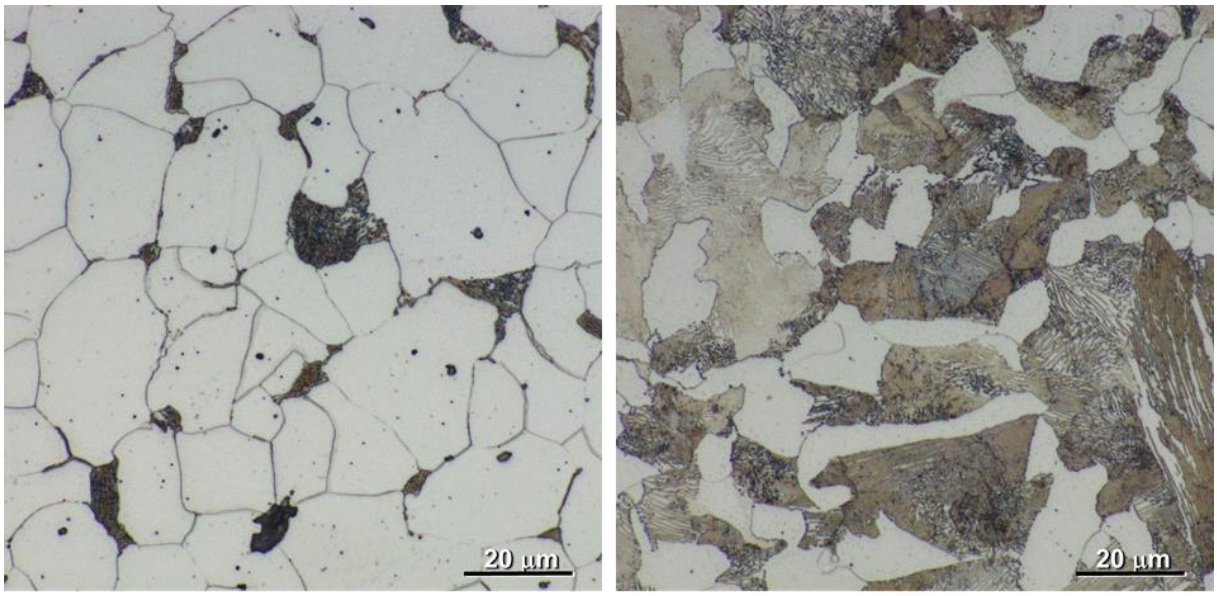
Rozměry použitých materiálů v experimentu byly ve všech případech stejné. Průměr vstupních polotovarů byl 30 mm. Pro válcování byly ve všech případech použity tyče o délce přibližně 1000 mm.

Ocel ENS235JRC

Ocel S235JRC je neušlechtilou konstrukční ocelí obvyklé jakosti, která je vhodná ke svařování. V průmyslu je používána pro staticky i dynamicky namáhané součásti jako jsou spirální skříně vodních turbín, vrata plavidlových komor a další. Výchozí mikrostruktura tohoto materiálu byla feriticko-perlitická, a její rovnoměrnost naznačuje, že byla dodána ve stavu normalizačně žíhaném (obr. 60 vlevo) [45].

Ocel EN C45E

Jedná se o nelegovanou uhlíkovou ocel vhodnou k zušlechťování. Tato ocel je často používána pro výrobu méně namáhaných strojních dílů ve stavu zušlechtěném nebo normalizačně žíhaném. Optimálních vlastností se u této oceli dosahuje kalením a následným popouštěním. Dále je této ušlechtilá ocel vhodná ke kalení plamenem nebo indukci. Výchozí mikrostruktura dodané oceli EN C45 byla perliticko-feritická a oproti oceli EN S235JRC je zde mnohem vyšší podíl perlitu. (obr. 60 vpravo) [45].



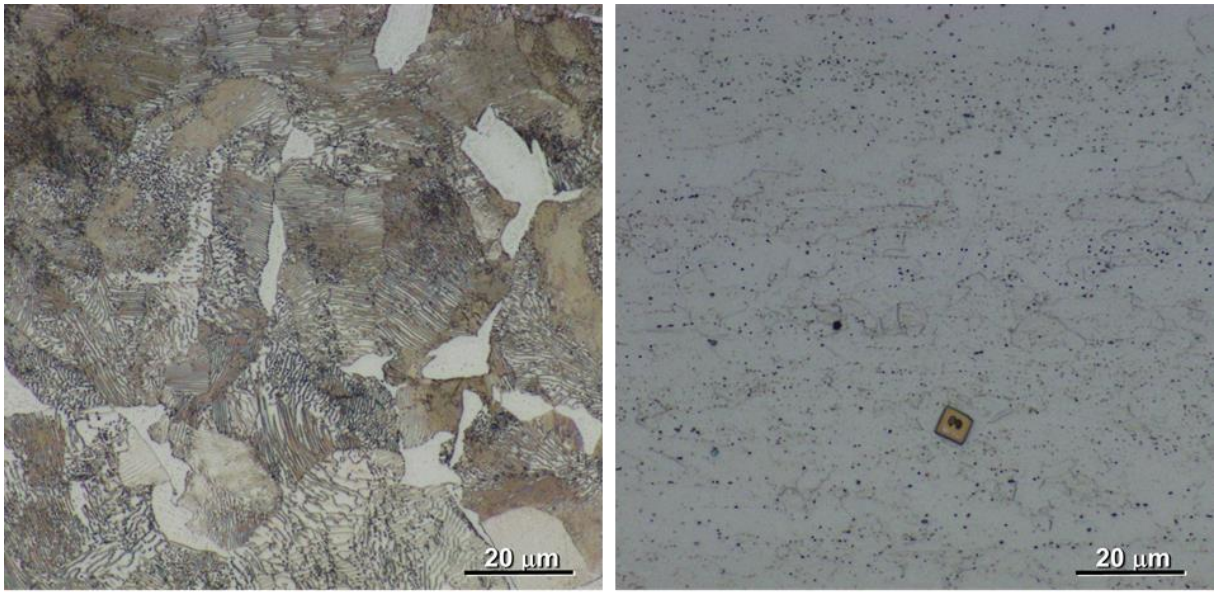
Obr. 60 Výchozí mikrostruktury pro ocel EN S235JRC (vlevo) a ocel EN C45 (vpravo).

Ocel EN C60

Tato ocel je jakostní konstrukční nelegovaná ocel vhodná k zušlechťování. Je vhodná pro výrobu lomených hřídelí, karuselů, ozubených kol a věnců. Stejně jako předchozí oceli EN C45E dosahuje nejlepších vlastností po kombinaci tepelného zpracování kalením a popouštěním. Mikrostruktura této oceli byla perliticko-feritická. Opět zde převažovala perlitická složka, které zde bylo opět více než v případě oceli EN C45E (obr. 61 vlevo) [45].

Ocel GOST 0CH18N10T

Jedná se o austenitickou, korozivzdornou, chrom-niklovou ocel, která je stabilizována titanem. Je velmi odolná proti korozi v průmyslových atmosférách alkáliích a slabších kyselinách včetně kyseliny dusičné. Díky přítomnosti titanu jako legujícího prvku nevznikají chromové karbidy. Tato ocel je svařitelná a i hlubšími průvary. Je využívána v papírenství, v méně zatížených zařízeních chemického průmyslu a v potravinářství, kde je použitelná pouze do teploty 650 °C z důvodu hraničního obsahu niklu. Mikrostruktura této oceli v dodaném stavu kovaném je tvořena deformovanými austenitickými zrny. Ve struktuře jsou dála patrné karbonitridy titanu (obr. 61 vpravo).



Obr. 61 Výchozí mikrostruktury pro ocel EN C60 (vlevo) a ocel GOST 0CH18N10T (vpravo).

9. Experimentální válcování

Tato kapitola popisuje nastavení válcovací stolice pro jednotlivé experimenty, průběh ohřevu a ochlazování válcovaného polotovaru a další informace, které lze vyčíst z dat, které válcovací stolice odesílá a mohou být dále analyzovány.

9.1 Experimentální válcování tyčí

Jak je již psáno výše, válcovací stolice je určena k redukci průměru plných tyčí. Bylo tedy provedeno experimentální válcování všech zmiňovaných ocelí s pomocí této válcovací stolice. V případě uhlíkových oceli EN S235JRC, EN C45 a EN C60 byla provedena redukce průměru z původních 30 mm na požadovaných 22 mm, protože i simulace byly vytvářeny pro válcovaní z průměru 30 mm na průměr 22 mm. Ve všech případech bylo stejně jako v simulacích válcováno rychlostí otáčení válců 100 ot/min. Z oceli EN C60 byla také válcována tyč, u které bylo provedeno válcování jen částečně a následně byla válcovací stolice zastavena, aby bylo možno pozorovat deformační oblast.

V případě oceli GOST 0CH18N10T bylo prováděno válcování z 30 mm na dva průchody na 25 mm a následně 20 mm. Tato odlišnost v případě nerezové oceli byla z důvodu toho, že tato ocel byla použita v rámci experimentu, který nebyl přednostně určen pro tuto práci a bylo požadavkem rozdělit deformaci do dvou kroků. Stejně jako v simulacích bylo u těchto experimentů použito válcování různými rychlostmi otáčení pracovních válců. Ale stejně jako v simulacích bylo dodrženo válcování třemi různými rychlostmi otáčení válců. Jedna tyč z této oceli byla válcována na 20 mm na jeden průchod

Pro ohřev válcovaných polotovarů bylo využito indukčního ohřevu instalovaného na zařízení. Pro uhlíkové oceli byl nastaven výkon induktorů na 92% a v případě nerezové oceli byl nastaven výkon induktorů na 90%, jak při prvním průchodu, tak i při druhém. Ve všech případech byly provalky kaleny do vodní lázně.

Byly provedeny celkem dva typy zpracování T1, kdy byly všechny oceli válcovány na jeden průchod rychlostí otáčení válců 100 ot/min a druhý T2, kde byla testována různá rychlost

otáčení válců na oceli AISI 321. Pro přehlednější značení režimů experimentálního válcování bylo vytvořena tabulka s označením daných režimů (tab. 9).

Tab. 9 Režimy pro experimentální válcování tyčí.

Režim	Materiál	Výkon Induktorů [%]	Ot. Válců [ot/min]	Øpoč./Økon.	Chlazení
T1-S235	EN S235JRC	92/92	100	30/22	Voda
T1-C45	EN C45E	92/92	100	30/22	Voda
T1-C60	EN C60	92/92	100	30/22	Voda
T1-AISI321	GOST 0CH18N10T	90/90	100	30/20	Voda
T2-50	GOST 0CH18N10T	90/90	50	30/25+25/20	Voda
T2-100	GOST 0CH18N10T	90/90	100	30/25+25/20	Voda
T2-200	GOST 0CH18N10T	90/90	200	30/25+25/20	Voda

9.1.1 Vyhodnocení dat z válcovací stolice

Válcovací stolice poskytuje po celou dobu jejího provozu záznam o všem, co dokáží různá čidla, senzory nebo termokamery zaznamenat. Díky tomuto záznamu lze zjistit spoustu informací o tom, jak probíhal celý proces tepelného, či tepelně-mechanického zpracování provalku. Byla vytvořena tabulka s průměrnými hodnotami, které byly vypočteny pomocí programu pro analýzu záznamu ze stroje ibaAnalyzer 7.1.4 (tab. 10). Tento program umožňuje zjistit jakoukoliv hodnotu zaznamenanou strojem v závislosti na reálném čase, ve kterém byla tato hodnota zaznamenána. Pomocí analytických funkcí je poté možno vytvořit průměrnou hodnotu po celé délce válcovaného polotovaru. Protože pro vytvoření tabulky byla použita data z různých pyrometrů a další informace je zde uvedena legenda, která bude následně platit i pro další tabulky s výpisem hodnot zaznamenaných strojem:

- Py1 – Barevný pyrometr, bez nutnosti nastavení emisivity (800 – 1300 °C)
  - Umístěný u výstupu z induktorů
- RPy – Ruční barevný pyrometr, bez nutnosti nastavení emisivity (450 – 1300 °C)
  - Umístěný u vstupu do válců
- Py2 – Pyrometr, emisivita 0,85 (650 – 1800 °C)
  - Umístěný u vstupu do válců

- M_{v1} – Moment ze senzorů válce číslo 1
- Py3 – Pyrometr, emisivita 0,85 (485 – 1050 °C)
  - Umístěný u výstupu z válců
- ØL – laserový senzor na měření průměru provalku
  - Umístěný u výstupu z válců

Hodnoty v tab. 10 psané červeně jsou hodnoty na hranici kterou dokáží pyrometry zaznamenávat, takže reálné hodnoty mohou být vyšší.

Tab. 10 Tabulka zaznamenaných průměrných hodnot při experimentálním válcování tyčí.

Režim	Py1 [°C]	RPy [°C]	Py2 [°C]	M_{v1} [Nm]	Py3 [°C]	ØL [mm]
T1-S235	1027	~1000	1050	111	1050	22,24
T1-C45	982	~980	1027	103	1045	22,14
T1-C60	978	~980	1024	100	1043	22.13
T1-AISI 321	922	~930	976	215	1018	20,67
T2-50/25	926	~920	976	169	942	25,70
T2-50/20	911	~930	967	140	924	20,53
T2-100/25	904	~900	948	181	953	25,94
T2-100/20	906	~920	965	119	967	20,62
T2-200/25	925	~940	977	179	1008	25,91
T2-200/20	911	~980	968	141	1021	20,63

Co se týče režimů T1 lze jasně pozorovat, že s rostoucím obsahem uhlíku a dalších legujících prvků v oceli dochází k nižším teplotám ohřevu pozorovaného materiálu. Ocel EN C15, která má nejnižší obsah uhlíku a prakticky žádné další legující prvky dosáhla nejvyšší teploty ohřevu.

Ze záznamu momentového zatížení válce č. 1 dále plyne, že i přesto, že ocel EN C15 dosahuje při válcování vyšších teplot, než ostatní uhlíkové oceli vytváří se při jejím válcování vyšší moment v pracovním válci. V případe nerezové oceli je poté dosahováno mnohem vyšších hodnot než v případě uhlíkových ocelí.

9.2 Experimentální válcování trubek

Jelikož simulace válcování trubky z oceli ENC15 ukazuje, že dojde k redukcí průměru válcovaného polotovaru aniž by došlo k zavalení trubky, bylo provedeno experimentální válcování takového polotovaru. Stejně jako v simulaci byla jako výchozí polotovar vybrána trubka o vnějším průměru 30 mm s tloušťkou stěny 5 mm. Tato trubky byla z materiálu S235JRC. Toto válcování bylo provedeno celkem ve čtyřech režimech, které se lišili pouze výstupním průměrem válcované trubky (tab. 11). Výkon induktorů byl nastaven na 60% pro obě sady induktorů, otáčky válců na 100 ot/ min a trubky byly chlazeny volně na vzduchu. Výkon induktorů byl zde o třetinu nižší, než u plných tyčí, což je dáno menším objemem trubky, kterou je třeba ohřát a tato hodnoty byla zvolena na základě zkušeností.

Tab. 11 Režimy pro experimentální válcování trubek.

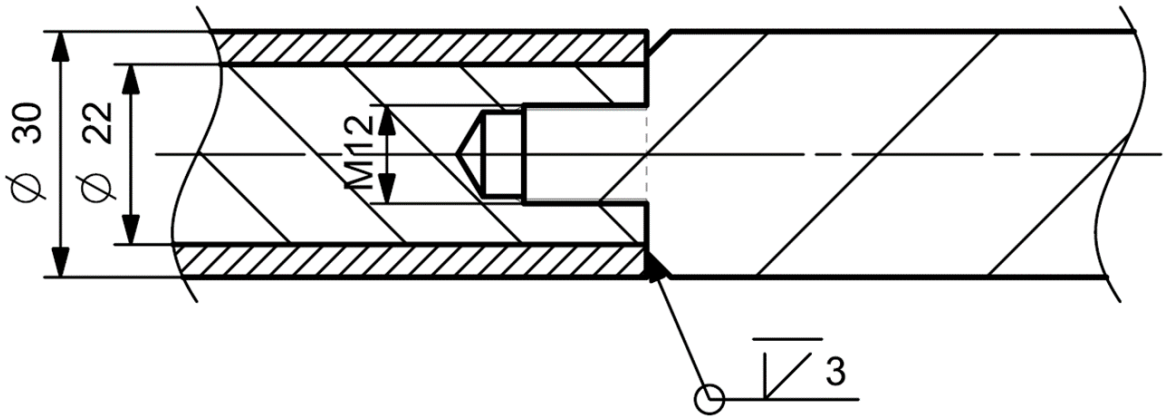
Režim	Materiál	Výkon Induktorů [%]	Ot. Válců [ot/min]	Øpoč./Økon.	Chlazení
Tr1 - 28	EN S235JRC	60/60	100	30/28	Vzduch
Tr2 – 26	EN S235JRC	60/60	100	30/26	Vzduch
Tr3 – 24	EN S235JRC	60/60	100	30/24	Vzduch
Tr4 - 22	EN S235JRC	60/60	100	30/22	Vzduch

9.2.1 Vyhodnocení dat z válcovací stolice

V tomto případě je bohužel vyhodnocení dat z válcovací stolice nemožné, protože se občas stává, že nedojde k uložení souboru s daty v celé jeho délce a uloží se jen velmi malý úsek, který mnohdy neobsahuje potřebná data. Z tohoto důvodu je možné uvést pouze přibližné teploty, jakých dosahovaly trubky v různých místech. Hodnoty teploty byly odečítány z řídícího panelu stroje během jeho provozu. Vzhledem k tomu, že na řídícím panelu dochází ke změně měřených hodnot s frekvencí 1 Hz jsou tyto odečtené hodnoty silně zatíženy chybou pozorování a jsou pouze informativní. Teplota na výstupu z induktorů se pohybovala okolo 1030 °C, před válci byla okolo 990 °C. Další hodnoty při experimentálním válcování trubek není možné analyzovat.

9.3 Experimentální válcování spojení trubky a tyče

Experimentální válcování spojení trubky a tyče z ocelí o jiném chemickém složení bylo prováděno, z důvodu zjištění toho, zda dojde k pevnému spojení těchto materiálů působením teploty a tlaku vytvořeného válcováním. V těchto experimentech byla spojována tyč z oceli EN C60 s ocelí EN S235JRC. Z důvodu toho, že není jednoduché vyrobit polotovar pro válcování o minimální délce 800 mm bylo navrženo spojení pomocí závitu a svaru, tyčemi z materiálu EN S235JRC, které poté zajistí minimální požadovanou délku polotovaru pro válcování. Obr. 62 znázorňuje jednu stranu tohoto spojení. Na levé straně je vidět trubka, s vloženou tyčí, na které je vnitřní závit M12, do kterého je našroubována tyč, která má sraženou hranu připravenou pro půl V svar. Závit zajišťuje to, že vlivem válcování a prodlužování polotovaru nedojde k jeho roztržení a svar zabraňuje rozšroubování závitu vlivem rotace mezi válci. Tato navržená metoda spojení byla již úspěšně testována dříve při spojování tyčí pro válcování z důvodu úspory drahého materiálu.



Obr. 62 Výkres spojení tyče a trubky s prodlužující tyčí.

Celkem byly navrženy čtyři režimy válcování tohoto spojení trubky s tyčí, u kterých byl opět ohřev prováděn pomocí indukčního ohřevu se stejnou rychlostí válcování a režimy se lišily především způsobem chlazení finálního provalku a také jeho průměrem (tab. 12).

Tab. 12 Režimy pro experimentální válcování spojení tyče a trubky.

Režim	Materiál	Výkon Induktorů [%]	Ot. Válců [ot/min]	Øpoč./Økon.	Chlazení
TrT1-22-A (Air-vzduch)	EN S235JRC / EN C60	93/93	100	30/22	Vzduch
TrT2-22-W (Water-voda)	EN S235JRC / EN C60	93/93	100	30/22	Voda
TrT3-22-A	EN S235JRC / EN C60	93/93	100	30/20	Vzduch
TrT4-22-W	EN S235JRC / EN C60	93/93	100	30/20	Voda

9.3.1 Vyhodnocení dat z válcovací stolice

Stejně jako v případě válcování tyčí byl v případě válcování spojení trubky a tyče úspěšně uložen záznam z válcovací stolice. Vyhodnocení bylo provedeno stejným způsobem a opět byla vytvořena tabulka průměrných hodnot po celé délce tvářeného polotovaru (tab. 13). V tomto případě byly vyhodnocovány průměrné hodnoty v celé délce tyče a za lomítko byly následně dopsány vyhodnocené hodnoty přibližně z jejího středu, kde se nacházelo ono spojení trubky s tyčí.

- Py1 – Barevný pyrometr, bez nutnosti nastavení emisivity (800 – 1300 °C)
  - Umístěný u výstupu z induktorů
- Py2 – Pyrometr, emisivita 0,85 (650 – 1800 °C)
  - Umístěný u vstupu do válců
- M_{v1} – Moment ze senzorů válce číslo 1

- Py3 – Pyrometr, emisivita 0,85 (485 – 1050 °C)
  - Umístěný u výstupu z válců
- ØL – laserový senzor na měření průměru provalku
  - Umístěný u výstupu z válců

Hodnoty v tab. 13 psané červeně jsou hodnoty na hranici kterou dokáží pyrometry zaznamenávat, takže reálné hodnoty mohou být vyšší. Před lomítkem jsou hodnoty průměrovány z celé délky tyče a za lomítkem jsou uvedeny hodnoty průměrovány z části, kde se nachází sledované spojení.

Tab. 13 Tabulka zaznamenaných průměrných hodnot při experimentálním válcování spojení trubky s tyčí.

Režim	Py1 [°C]	Py2 [°C]	M_{v1} [Nm]	Py3 [°C]	ØL [mm]
TrT1-22-A	1023/1075	1051/1029	104/121	1050/1013	22,46
TrT2-22-W	1019/1065	1068/1032	101/108	1050/1029	22,16
TrT3-22-A	1018/1065	1071/1007	110/126	1050/1013	20,17
TrT4-22-W	1021/1069	1080/1017	112/128	1050/1009	20,26

Jak je možné pozorovat z tab. 13, tak teploty i momenty se měnili v závislosti na tom, jestli byly hodnoty průměrované z celé délky tyče, nebo jen z úseku, kde bylo spojení mezi trubkou a tyčí. Prvotní ohřev pro celou délku tyče se ve všech případech pohybuje okolo 1020 °C, ale v místě spojení je povrchová teplota okolo 1070 °C. Toto je způsobeno tím, že v místě spojení se zahřívala primárně trubka nasazená na tyči a teplo následně přecházelo do tyče, což potvrzuje i další záznam, kde se již teploty v celé délce tyče pohybují ve vyšších hodnotách, než v místě spojení. Co se týče zatížení válců, tak je samozřejmé, že s větším úběrem narostl i moment ve válcích, ale z dat je též patrné, že v místě, kde se nachází spojení trubky s tyčí opět došlo k výkyvu hodnot směrem vzhůru. Pyrometr za válcovací stolicí poté zaznamenal, že v místě spojení byla teplota opět nižší než v případě zbytku tyče.

10. Analýza tvaru, makrostruktury a mikrostruktury výválků

Před válcováním byla měřena délka vstupních polotovarů pro válcování. Dále byla měřena délka a průměr provalků a v případě válcovaných trubek byla měřena vnitřní kruhovitost. Poté byla u vzorků tyčí sledována makrostruktura a u vzorků spojení tyčí a trubek mikrostruktura. Délky výchozích polotovarů a provalků byly měřeny pomocí svinovacího metru a průměry provalků pomocí posuvného měřítka. V případě měření kruhovitosti byl použit kruhoměr TaylorHobson 585 Lt. Rozřez vzorků pro další analýzy byl proveden pomocí řezání vodním paprskem případně metalografické pily. K přípravě vzorků pro vyhodnocování makrostruktur a mikrostruktur bylo použito standartního metalografického vybavení, mezi které patří lis pro zalévání vzorků, metalografická bruska, metalografická leštička leptadla, fotoaparát s makro objektivem a světelný mikroskop od firmy Olympus.

10.1 Analýza tvaru a makrostruktury válcovaných tyčí

Vyhodnocení rozměrů je uvedeno v tabulce 14. Tato tabulka obsahuje informace o počáteční délce a konečné délce provalku, dále hodnotu součinitele prodloužení vypočtenou dle vzorce 1.

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} \quad (10)$$

Kde : λ je součinitel prodloužení provalku, a l_x je délka na počátku a na konci procesu.

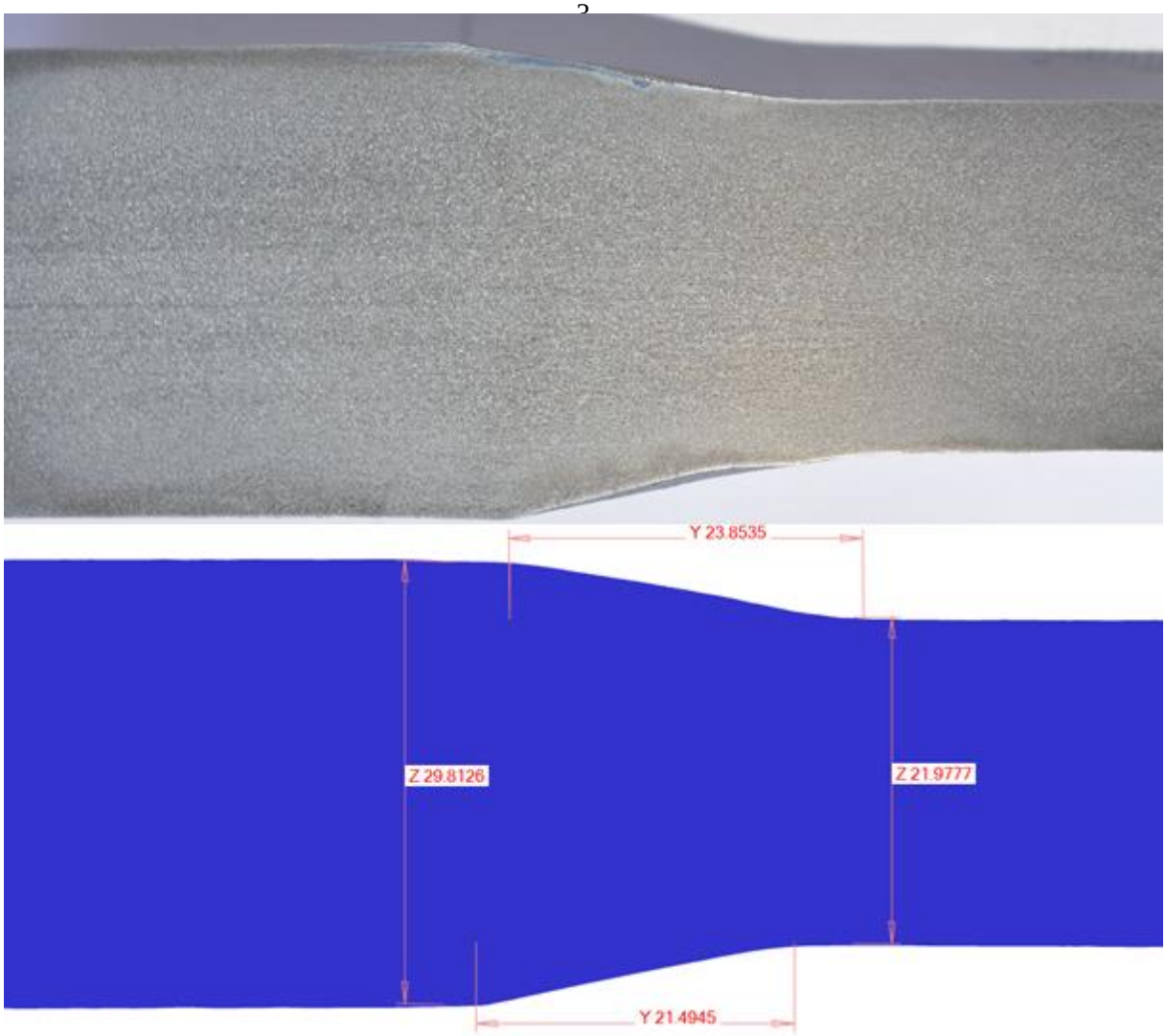
Dále je v tabulce uveden konečný průměr měřený posuvným měřítkem a laserem na válcovací stolici, který měřil průměr ihned po válcování a rozdíl těchto hodnot průměrů.

Tab. 14 Výsledky měření délky a průměru tyčí po válcování.

Režim	**T1 - S235**	**T1 – C45**	**T1 – C60**	**T1 – AISI 321**	**T2 – 50**	**T2 - 100**	**T2 - 200**
Poč. délka [mm]	982	1002	1004	950	952	923	950
Kon. Délka [mm]	1860	1910	1910	2160	2182	2083	2163
λ [-]	1,89	1,91	1,90	2,27	2,29	2,26	2,28
Kon. Ø měřený [mm]	21,88 ± 0,12	21,79 ± 0,04	21,76 ± 0,06	20,26 ± 0,04	20,18 ± 0,05	20,26 ± 0,09	20,23 ± 0,06
Kon. Ø laser [mm]	22,24	22,14	22,13	20,67	20,53	20,62	20,63
Rozdíl Ø [mm]	0,36	0,35	0,37	0,41	0,35	0,36	0,40

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot ukazuje, že součinitel prodloužení při válcování na průměr 22 mm je přibližně 1,9 a v případě válcování na 20 mm je přibližně 2,28. Dále je pozorovatelné, že výsledné hodnoty průměrů pro uhlíkové oceli dosahují nižších než požadovaných hodnot a v případě oceli AISI 321 ve všech případech vyšších hodnot, než bylo požadováno. Vyšší hodnoty v případě provalků z oceli AISI 321 mohou být způsobeny odpružením materiálu, nebo nedokonalou tuhostí konstrukce válcovací stolice, která byla tímto materiálem více namáhána.

Po měření byly provalky rozřezány pomocí vodního paprsku a standartní metalografickou přípravou připraveny pro focení makrosnímků. Leptání v případě uhlíkových ocelí probíhalo pomocí 3% Nitalu. První makrostruktura byla zaznamenána na tyči válcované režimem T3 a jedná se tedy o tyč, která byla válcována jen do svojí půlky a poté byl stroj zastaven (Obr. 63 nahoře). Ze snímku této makrostruktury je velmi dobře pozorovatelné, že geometrie deformační oblasti ze simulace (obr. 63 dole) velmi dobře kopíruje geometrii reálné deformační oblasti. Na nasnímané makrostruktuře je pozorovatelné její změna hrubosti před a po válcování, kdy na levé straně, na které nedošlo k válcování je struktura hrubší, než v případě pravé strany, kde již došlo k válcování provalku. V samotné deformační oblasti je pozorovatelný tok materiálu směrem k ose válcované tyče.

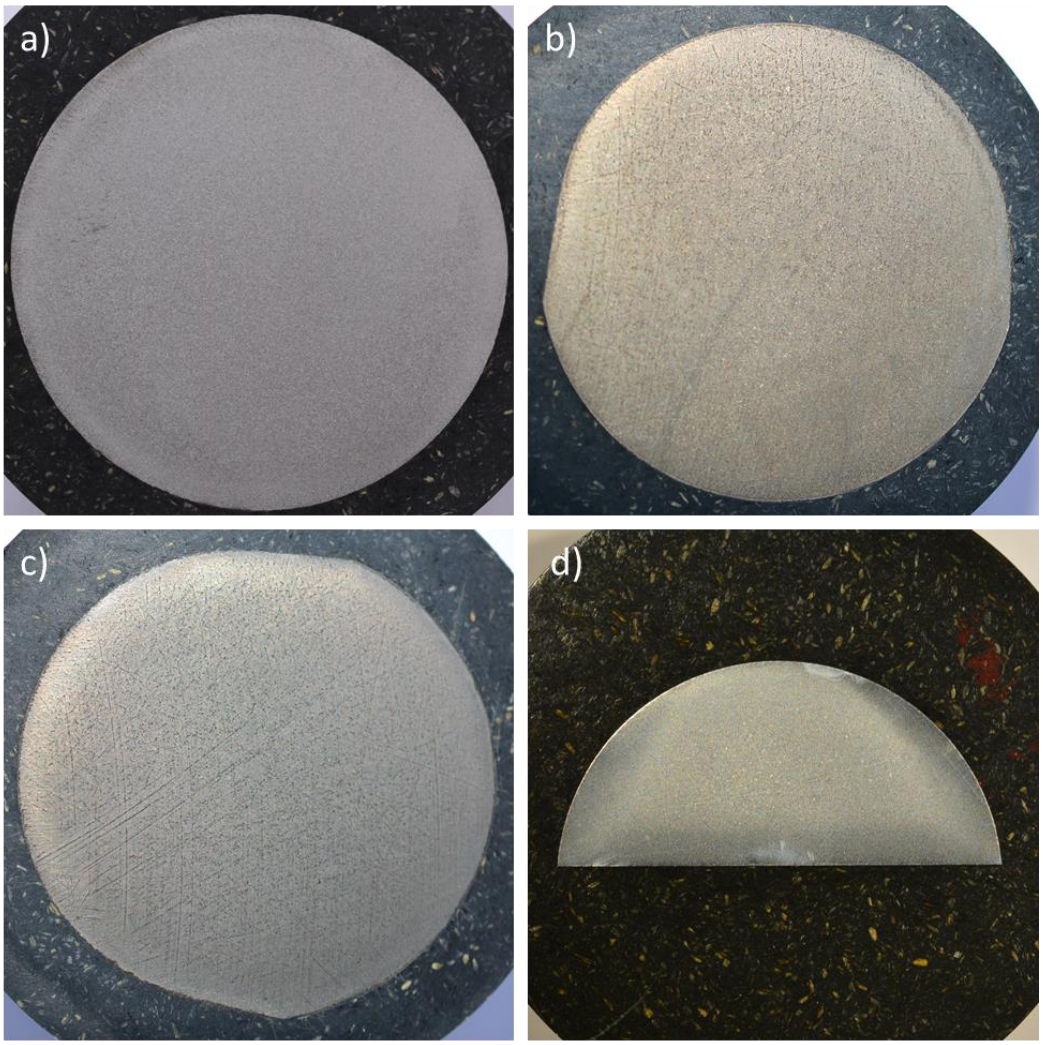


Obr. 63 Makrostruktura řezu tyče zpracované dle režimu T3 v deformační oblasti (nahoře), řez deformační oblastí ze simulace (dole).

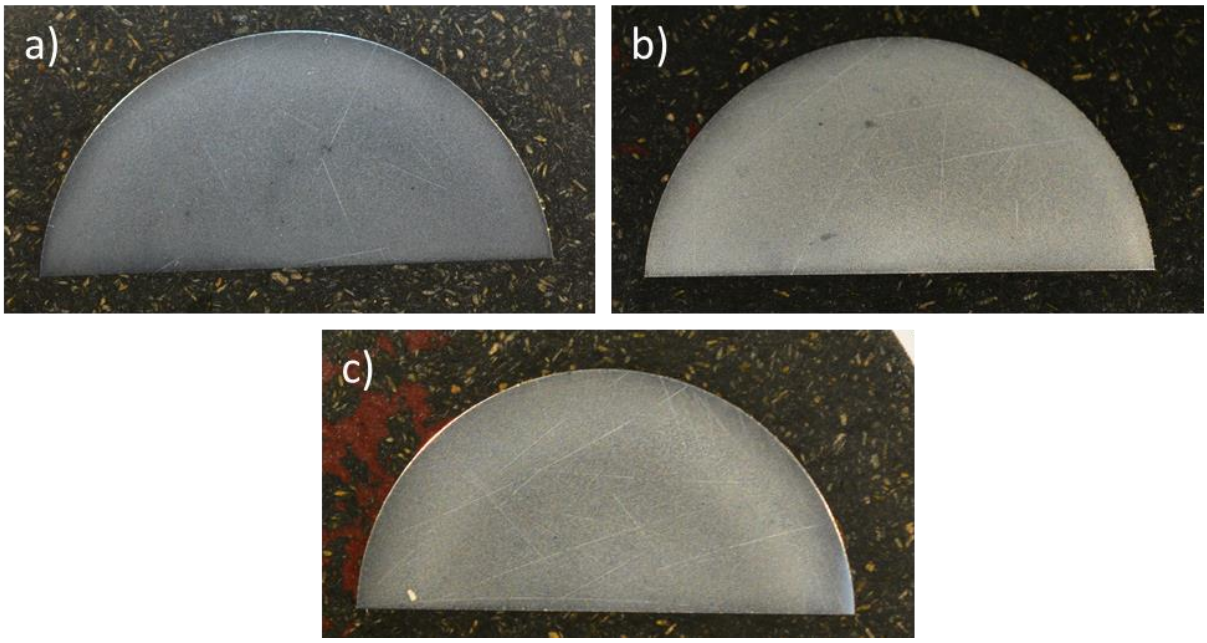
Dále byla pozorována makrostruktura řezu provalku z oceli EN C60 v jeho přední části, kde během válcování dochází k mírnému zavalení přední plochy tyče (obr. 69). Tato přední plocha byla před válcováním kolmá na osu tyče a vlivem toku materiálu v povrchových vrstvách směrem vpřed došlo k zavalení této přední části. Jedná se pouze o ukázku toho, jak dochází k zavalování přední části tyče. K tomto jevu dochází vždy a je zde uveden pouze příklad na oceli EN C60.

Obr. 64 Makrostruktura řezu z počátku válcované tyče po válcování.

Další makrostruktury byly pozorovány na příčných řezech válcovanými tyčemi. V případě oceli EN S235JRC se makrostruktura jeví velmi homogenně a pouze u kraje válcované tyče dochází k viditelné změně makrostruktury (obr. 65a). V případě ocelí EN C45 a C60 se makrostruktura jeví hrubší a u povrchu je patrná oduhličená vrstva (obr. 65b,c). V případě nerezové oceli GOST 0CH18N10T nebyla pomocí analýzy makrostruktur pozorovatelná žádná změna v závislosti na rychlosti, jakou probíhalo válcování (obr. 66a,b,c).



Obr. 65 Makrostruktura příčného řezu tyčemi z různých materiálu válcovaných rychlostí otáčení válců 100 ot./min: a) EN S235, b) EN C45, c) EN C60, d) AISI 321.



Obr. 66 Makrostruktura příčného řezu tyčemi z oceli AISI 321 válcovaných různou rychlostí otáčení válců: a) 50 ot./min, b) 100 ot./min, c) 200 ot./min.

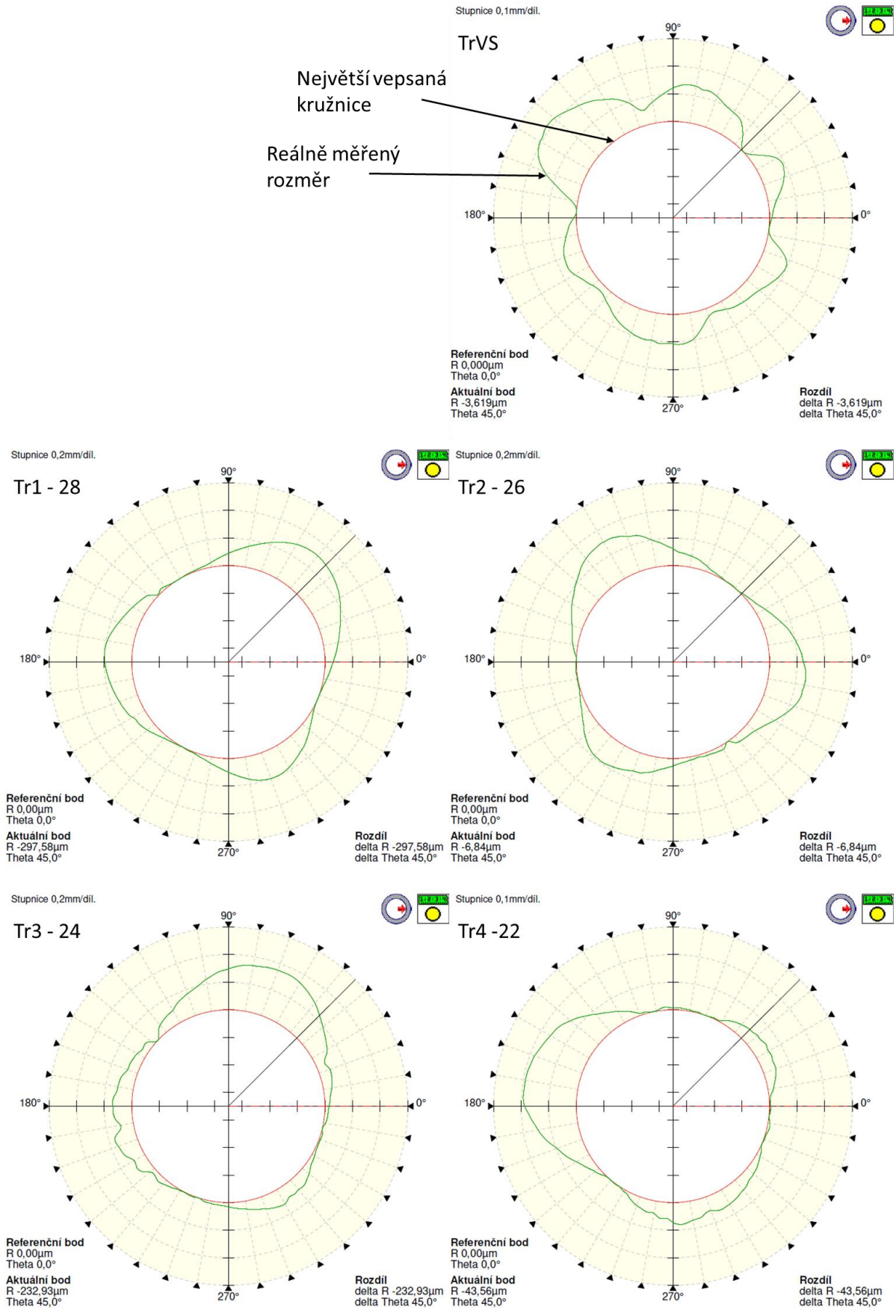
10.2 Analýzy tvaru vývalků z trubek

Jak již bylo zmíněno na začátku této kapitoly, bylo provedeno měření vnějších průměrů trubkových provalků s použitím posuvného měřítka. Vnitřní průměry byly v tomto případě měřeny pomocí přesného kruhoměru, který určil průměr největší vepsané kružnice a graficky znázornil odchylky od nich (obr. 71). Z rozdílů mezi vnějším průměrem měřeným a průměrem největší vepsané kružnice byla vypočtena tloušťka stěny výsledných provalků (tab. 15).

Tab. 15 Výsledky měření vnitřních a vnějších průměrů válcovaných trubek.

Režim	**TrVS**	**Tr1 - 28**	**Tr2 - 26**	**Tr3 - 24**	**Tr4 – 22**
Kon. Ø měřený [mm]	30,01 ± 0,02	26,80 ± 0,18	25,01 ± 0,08	23,34 ± 0,19	21,32 ± 0,10
vnitřní Ø [mm]	19,53	15,18	12,63	10,37	7,89
Tloušťka stěny [mm]	5,24	5,81	6,19	6,49	6,72

Přesná bezešvá trubka dodaná pro válcování v tomto experimentu byla rozměrově velmi přesná na svém vnějším průměru, kde dosahovala 30,01 ± 0,02 mm. Největší vepsaná kružnice ve výchozím stavu měla rozměr 19,53 mm a tloušťka stěny trubky použité pro válcování byla tedy 5,24 mm. Ze záznamu z kruhoměru lze pozorovat, že se vnitřní rozměry trubky od největší vepsané kružnice odchylují do šesti směrů a dosahují hodnot mezi 0 a 0,2 mm. Z tohoto měření lze soudit, že výchozí trubka nebyla vyráběna s použitím tří válcové stolice, protože u takovéto technologie jdou odchylky do tří směrů, jak ukazují výsledky trubek válcovaných během experimentu (obr. 67).



Obr. 67 Záznam z měření vnitřní kruhovitosti výchozího stavu a trubek válcovaných v experimentu.

Po vychladnutí provalků na vzduchu bylo ovšem zjištěno, že výsledné hodnoty vnějších průměru trubek dosahují nižších než požadovaných hodnot. Během válcovaní docházelo vlivem deformace k zvětšování tloušťky trubky až na maximálních 6,72 mm při redukci vnějšího průměru z 30 na 22 mm. Při měření kruhovitosti vnitřní stěny trubky bylo zjištěno, že odchylky od největší vepsané kružnice dosahují hodnot od 0 do 0,4 mm, z čehož plyne, že dosahují tyto provalky větších hodnot odchylek kruhovitosti vnitřní stěny než výchozí stav.

10.3 Analýza tvaru a mikrostruktury výválků spojené trubky a tyče

Stejně jako v případě válcování trubek byla pro tento experiment měřena počáteční a konečná délka provalku a vypočten součinitel prodloužení. Dále byl opět měřen průměr pomocí posuvného měřítka na vychlazeném provalku a byl zjištěn rozdíl měřené hodnoty od hodnoty získané z laserového snímače na válcovací stolici (tab. 16).

Tab. 16 Výsledky měření délky a průměru spojení trubek a tyčí po válcování.

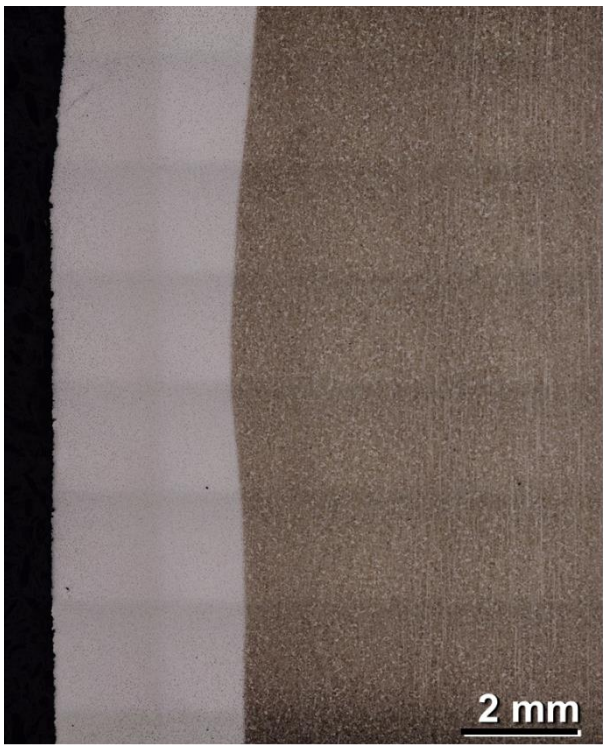
Režim	**TrT1 – 22 -A**	**TrT2 – 22 - W**	**TrT3 – 20 -A**	**TrT4 – 20 – W**
Poč. délka [mm]	968	976	968	975
Kon. Délka [mm]	1863	1865	2242	2253
λ [-]	1,92	1,91	2,32	2,31
Kon. Ø měřený [mm]	21,83 ± 0,07	21,84 ± 0,06	20,00 ± 0,08	19,98 ± 0,06
Kon. Ø laser [mm]	22,46	22,16	20,17	20,26
Rozdíl Ø [mm]	0,63	0,32	0,17	0,28

Součinitel prodloužení vypočtený pro válcování spojené trubky a tyče odpovídá podle finálního průměru válcování přibližně hodnotám 1,91 pro průměr 22 mm a 2,31 pro průměr 20 mm. Lze si povšimnout že součinitel prodloužení pro provalky o průměru 20 mm je mírně vyšší, než v případě válcování tyčí z oceli AISI 321 v předchozích kapitolách. Na druhou stranu, je ale patrné, že průměr provalků spojení trubek a tyčí je přibližně o 0,2 mm nižší.

Po proměření všech požadovaných rozměrů byly opět provalky rozřezány vodním paprskem a dále přesnou metalografickou pilou na vzorky použité pro analýzu mikrostruktury. Na obr. 68 lze pozorovat podélný řez provalky provedený vodní tryskou, ne němž je velmi dobře vidět, jak došlo vlivem válcování k deformaci závitů sloužících ke spojení sledovaných úseků s prodlužujícími tyčemi a zároveň nejsou pouhým okem pozorovány žádné trhliny na rozhraní trubka-tyč.

Obr. 68 Podélný řez provalky.

Po dalším rozřezání vzorků pomocí metalografické pily byly vzorky opět zalisovány do hmoty a standartním postupem byly vytvořeny metalografické výbrusy pro pozorování na světelném mikroskopu. Leptání probíhalo opět pomocí 3% roztoku Nitalu. Pomocí světelného mikroskopu byly vytvořeny složené obrazy spojení trubky a tyče, jejichž příklad je uveden na obr. 69, a na těchto snímcích byla s využitím softwaru obrazové analýzy měřena tloušťka stěny trubky.



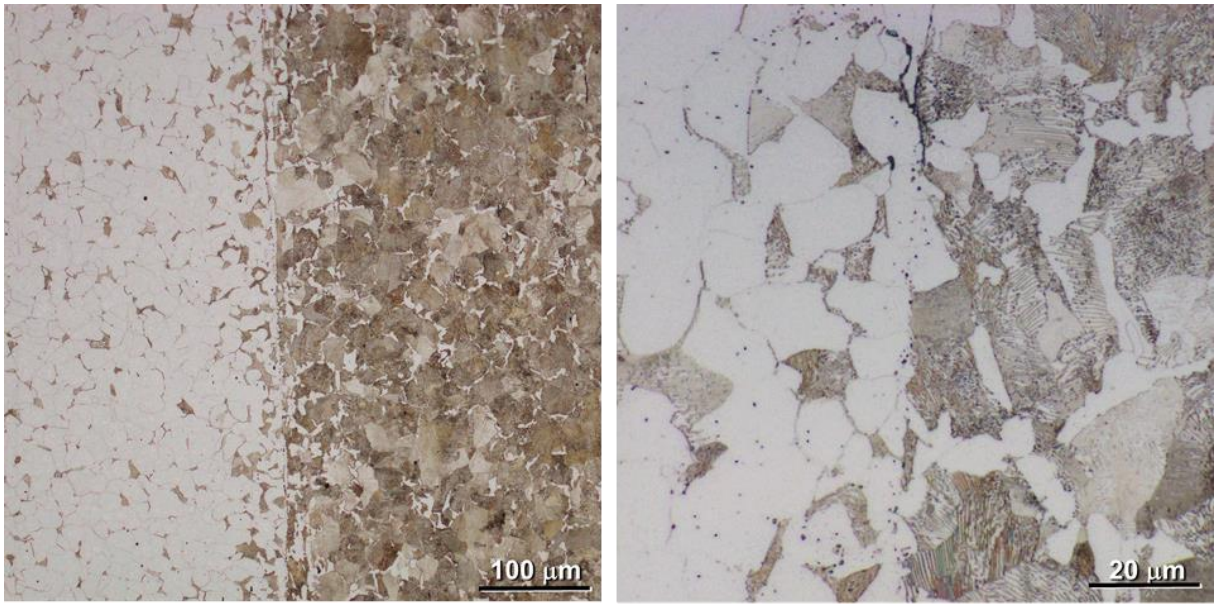
Obr. 69 Složený obrázek vytvořený pomocí světelného mikroskopu.

Po proměření tloušťky stěny trubky pomocí analýzy snímků ze světelného mikroskopu byla trubka odečtena od celkového měřeného průměru a byla vyčíslena hodnota průměru tyče, která je umístěna uvnitř tohoto spojení (tab. 17). Z této tabulky vyplývá, že došlo k snížení průměrů jak trubky, tak tyče uvnitř.

Tab. 17 Tabulka rozměrů získaných analýzou pomocí světelného mikroskopu.

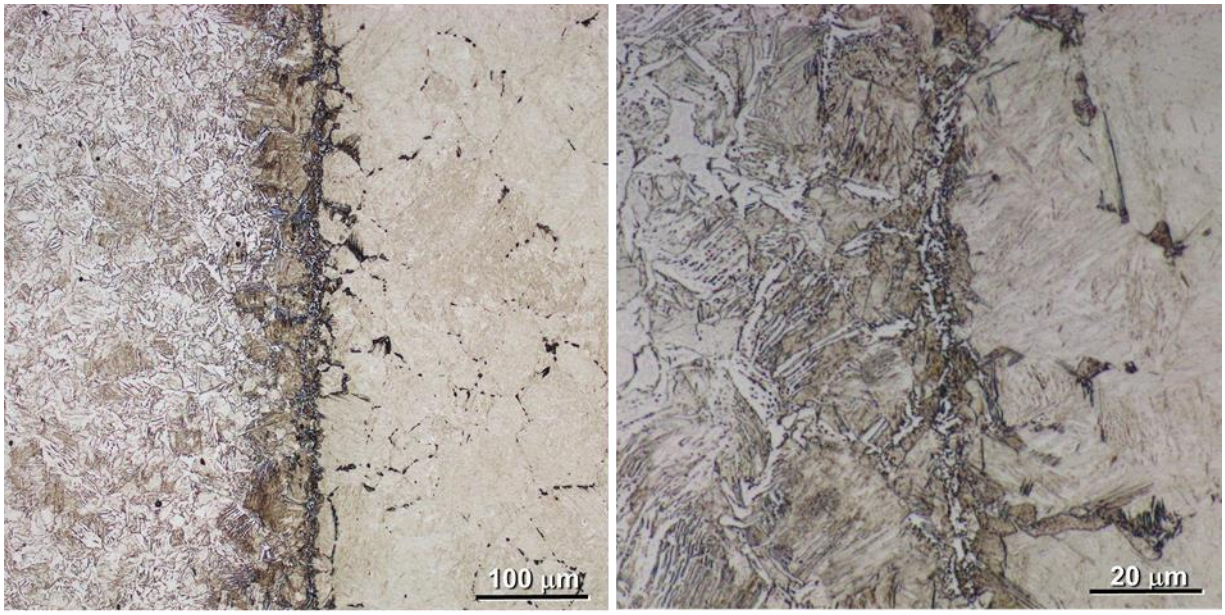
Režim	TrT1 – 22 -A	TrT2 – 22 - W	TrT3 – 20 -A	TrT4 – 20 – W
Tl. Stěny trubky [mm]	3,22 ± 0,08	2,93 ± 0,03	2,78 ± 0,08	2,75 ± 0,02
Kon. Ø měřený [mm]	21,83	21,84	20,00	19,98
Ø tyče [mm]	15,38	15,98	14,43	14,48

Po zkoumání rozměrů byla pomocí světelného mikroskopu pozorována struktura ocelí v okolí rozhraní trubka-tyč. V případě válcování na finální rozměr 22 mm a následném ochlazování volně na vzduchu byla vytvořena struktura tvořená feritem a perlitem, kdy v oblasti trubky výrazně převládal podíl feritu a v oblasti tyče, která obsahuje větší množství uhlíku převládal podíl perlitu (obr. 70). Dále je možné pozorovat, jak vlivem difúze mezi oběma spojovanými materiály došlo na jejich rozhraní k nárůstu podílu perlitu v trubce a feritu v tyči. Na základě těchto snímků lze tvrdit, že došlo k vytvoření difúzního spoje, ve kterém není pozorovatelná trhlina nebo oblast, kde nedošlo ke spojení a jeho další vlastnosti zatím nejsou prozkoumány.



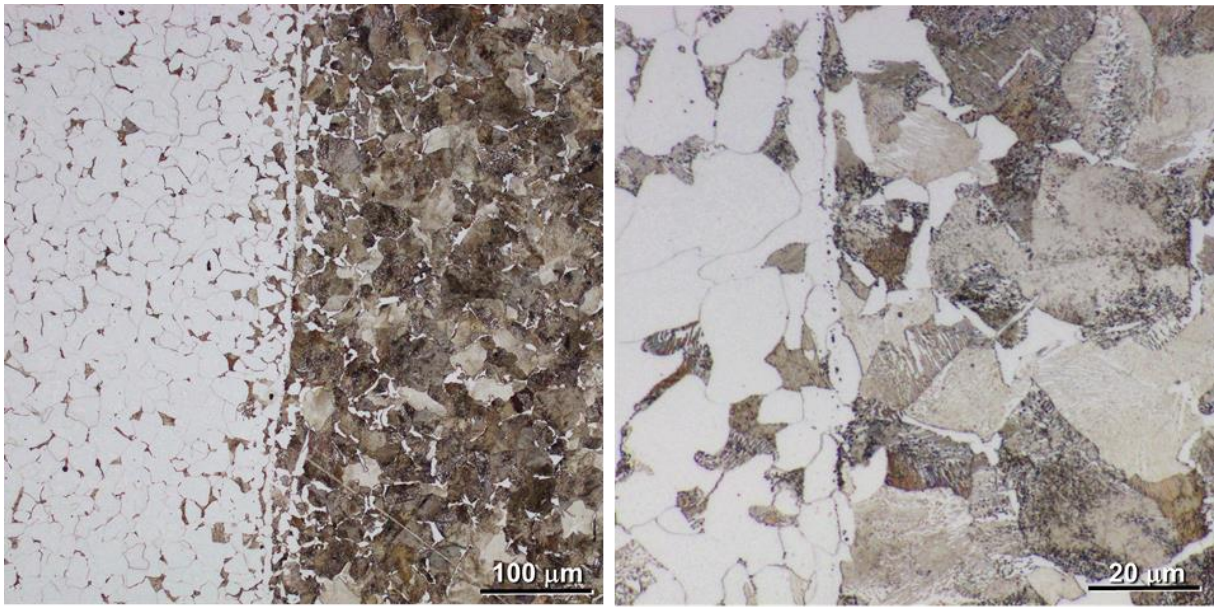
Obr. 70 Mikrostruktura rozhraní trubka-tyč vytvořená válcováním na 22 mm a chlazením na vzduchu.

V případě zpracování dle režimu TrT2, kde bylo válcováno na stejný konečný průměr a provalek byl kalen do vodní lázně došlo k vytvoření martenzitické struktury v tyči z oceli EN C60 a v případě oceli EN S235JRC, ze které je trubka byla struktura tvořena směsí feritu bainitu a martenzitu, a v oblasti okolo rozhraní s tyčí přibývalo množství martenzitu a ubývalo bainitu (obr. 71). Opět zde došlo k vytvoření difúzního spojení mezi tyčí a trubkou a není zde pomocí světelného mikroskopu pozorovatelná žádná trhlina. Rozhraní mezi trubkou a tyčí je zde oproti režimu, kdy byl provalek pozvolna ochlazován na vzduchu velmi výrazné.

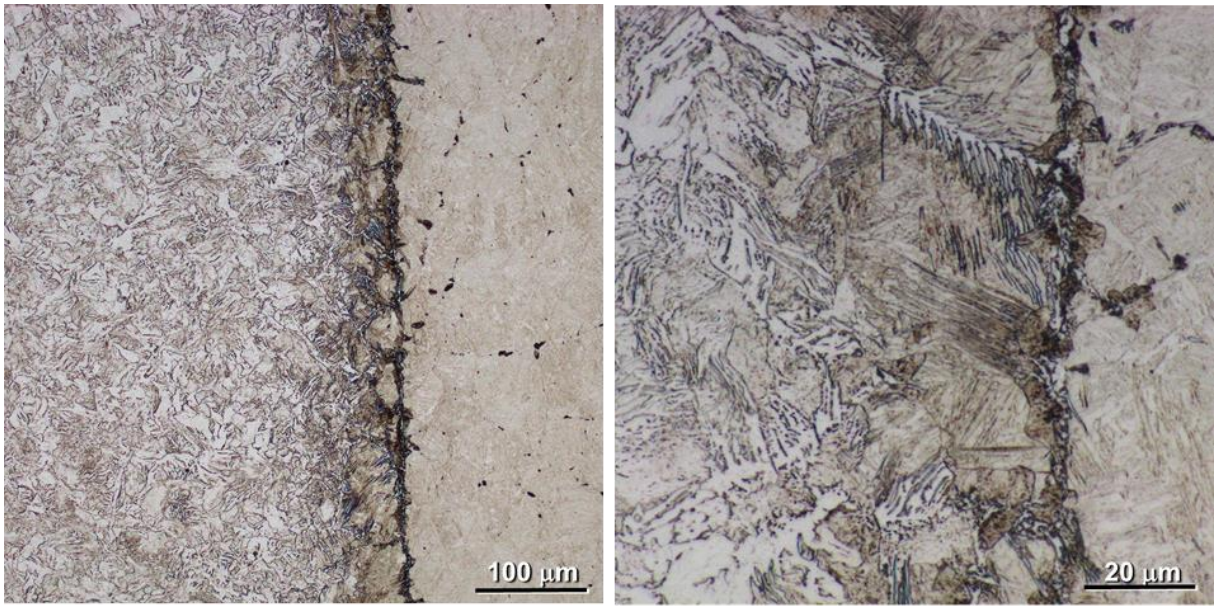


Obr. 71 Mikrostruktura rozhraní trubka-tyč vytvořená válcováním na 22 mm a chlazením ve vodě.

V případě válcování tohoto spojení dle režimů TrT3 a TrT4 byly v závislosti na režimu vytvořeny opět stejné mikrostruktury, jako v předchozích případech (obr. 72,73). Z důvodu velké podobnosti mezi těmito mikrostrukturami je není nutné znovu popisovat.



Obr. 72 Mikrostruktura rozhraní trubka-tyč vytvořená válcováním na 20 mm a chlazením na vzduchu.



Obr. 73 Mikrostruktura rozhraní trubka-tyč vytvořená válcováním na 22 mm a chlazením ve vodě.

11. Diskuse výsledků

Cílem této práce bylo vytvoření a analýza simulací válcování s využitím geometrie zařízení HDQT-R 30-12 v simulačním softwaru DEFORM 2D/3D. Tyto simulace byly provedeny pro celkem čtyři různé oceli v polotovaru kruhových tyčí, kde byl sledován vliv chemického složení materiálu na průběh procesu válcování a v případě oceli AISI 321 byl sledován vliv rychlostí otáčení pracovních válců na výsledky simulací. Dále byla vytvořena a analyzována simulace válcování trubky z oceli DIN C15 a spojení trubky z oceli DIN C15 a tyče z oceli DIN C60. Poté byly provedeny reálné experimenty na tomto zařízení a vyhodnoceny rozměry, makrostruktury a mikrostruktury provalků tří různých typů polotovarů stejně jako v případě simulací.

Simulace válcování

V simulačním softwaru DEFORM 2D/3D byl jako první pozorován tok materiálu pro ocel DIN C15, která byla použita ve všech třech typech polotovarů. Výsledky této analýzy ukazují, že v případě kruhové tyče dochází k vzájemnému posunu bodů v povrchových vrstvách materiálu směrem ve směru válcování, ale také ve směru otáčení provalku vlivem válcování. Směrem k jádru je tato rotace brzděna materiálem v jádru polotovaru. K tomuto brzdění ale nedochází v případě polotovaru trubky, která má vstupní tloušťku stěny 5 mm. Analýza sledování povrchových vrstev jak na vnitřní tak na vnější ploše trubky ukazuje, že dochází k rotaci ve směru otáčení v celém jejím průřezu. V případě simulace spojení trubky a tyče dochází opět k vzájemnému posuvu bodů, ze kterého je patrné, že trubka je na tyči rozvalována a body trubky se oproti bodům tyče posouvají ve směru rotace provalku, i ve směru válcování, mnohem rychleji.

Dalším typem analýzy byla analýza rozložení efektivní deformace v průřezu materiálu po válcování. Tato analýza ukázala, že v případě tyčí jsou ve všech případech nehledě na rychlosti deformace, či chemické složení materiálu hodnoty efektivní deformace od osy až přibližně 5 mm pod povrchu provalku stejné. Hodnoty se v závislosti na materiálu a rychlostech deformace začínají lišit až přibližně 5 mm pod povrchem, kde nejvyšších hodnot dosahují uhlíkové oceli a s rostoucím obsahem uhlíku roste i hodnota efektivní deformace. Co se týče změny efektivní deformace vlivem rozdílných rychlostí válcování, lze říci, že nedochází k výrazným rozdílům. V případě válcování trubky z oceli DIN C15 je efektivní deformace v povrchových vrstvách podstatně nižší než v případě tyčí. Hodnoty efektivní deformace pro trubku se pohybují od 1,3 do 1,8. Výsledky této analýzy ukazují, že nedojde k zavalení trubky vlivem válcování a proto byl tento experiment proveden i v reálně. Oproti oběma předchozím polotovarům se v případě simulace válcování spojené tyče a trubky rozložení efektivní deformace v průřezu polotovaru podstatně změnilo. V tomto případě bylo nejvyšších hodnot dosahováno na rozhraní trubky a tyče. Směrem k povrchu trubky a k jádru tyče hodnoty efektivní deformace klesaly k hodnotám 4,5 pro trubku respektive 0,5 pro tyč.

Pomocí numerických simulací bylo zkoumáno rozložení napětí v polotovarech během válcování. Z výsledků vyplývá, že nejvyšších hodnot napětí v celém průřezu válcových tyčí dosahuje ocel AISI 321 s tím, že čím vyšší rychlost otáčení pracovních válců, tím vyšší hodnoty napětí. Co se uhlíkových ocelí týče, tak nejvyšších hodnot efektivního napětí dosahuje ocel DIN C15 a nejnižších ocel DIN C60. Tento výsledek byl z počátku překvapivý, protože z něj vyplývá, že s nižším obsahem uhlíku v oceli je ocel méně tvárná. Bylo tedy zkoumáno, zda v materiálu DIN C15 není během válcování nižší teplota, která by měla za následek zvýšení napětí během tváření. Z modelů flow-stress pro tyto materiály vyplývá, že při zvýšených teplotách jsou tyto výsledky správné, a hodnoty napětí pro ocel DIN C15 by měli být vyšší než pro další dvě zkoumané uhlíkové oceli. V případě trubkového polotovaru bylo dosahováno

hodnot napětí do 170 MPa a nejvyšší hodnoty byly dosaženy na stykových plochách s válci, stejně jako v případě válcování tyčí. V případě válcování spojení trubky a tyče byly trendy rozložení napětí velmi podobné.

Poslední velmi důležitou informací, která byla analyzována bylo napětí ve směru osy Z. Tato hodnoty byla důležitá v ohledu na plánované spojování tyče a trubky vlivem teploty a tlaku při válcování. Hodnoty při simulaci válcování spojení tyče a trubky dosahovali na rozhraní těchto dvou materiálů hodnot převyšujících 125 MPa v tlaku, což je ještě více, než bylo nutné pro vytvoření kovářského svaru pomocí hydraulického lisu. Výsledek této analýzy tedy naznačil, že by mohlo dojít k vytvoření spojení mezi trubkou a tyčí vlivem tlakového napětí na rozhraní. Bohužel simulace ukazuje, že vlivem válcování dojde k rozvalování trubky po tyči a ne k jejich spojení, co se naštěstí v reálné experimentu neděje.

Experimentální válcování

Tato část práce byla zaměřena na analýzu dat z válcovací stolice v průběhu reálných experimentů. Při válcování tyčí byly použity čtyři různé oceli, které byly ekvivalenty ocelí pro které byly vytvořeny simulace. Pouze v případě oceli DIN C15 použité v simulaci byla v experimentu použita ocel S235JRC. Výsledky analýzy dat z válcovací stolice ukazují, že s použitím indukčního ohřevu bylo dosaženo vyšších teplot při stejném nastavení induktorů u ocelí s nižším obsahem uhlíku. Momenty zjištěné z čidel stroje potvrzují trend napětí vytvořeného vlivem válcování ze simulace a nejvyšších hodnot momentu bylo dosaženo v případě oceli AISI 321 při nejvyšší rychlostí válcování. Co se uhlíkových ocelí týče bylo nejvyššího momentu dosaženo v případě oceli S235JRC a hodnoty klesaly s přibývajícím množstvím uhlíku v dalších dvou experimentálních ocelích.

Analýza tvaru a mikrostruktury výválků

Tvar byl analyzován zejména v případě provalků z trubek, kdy byla zkoumána vnitřní kruhovitost trubky. Bylo zjištěno, že dodaný stav trubky dosahoval maximálních odchylek od největší vepsané kružnice přibližně 0,2 mm. Tato odchylka se pohybovala celkem do šesti směrů, což naznačuje, že dodaná trubka nebyla válcována tříválcovou technologií válcování. Po válcování na všechny čtyři testované rozměry bylo dosaženo kruhovitosti s maximální odchylkou od největší vepsané kružnice přibližně okolo 0,2 mm. Tato odchylka je velmi podobná jako v případě dodaného stavu, ale směry odchylky jsou pouze tři. Dále stejně jako v simulaci vlivem válcování dochází k nárůstu tloušťky stěny válcované trubky.

V případě válcování spojení trubky a tyče se nenaplnili výsledky simulací a nedošlo k rozvalení trubky na tyči. Z mikrostrukturní analýzy je velmi dobře pozorovatelné, že došlo k vytvoření difúzního spojení mezi dvěma ocelemi s různým obsahem uhlíku vlivem vysoké teploty a tlaku. V závislosti na způsobu ochlazování provalku byly poté vytvořeny různé mikrostruktury. Na rozhraní trubky a tyče lze pozorovat, že došlo k difúzi uhlíku do trubky a vzniklá mikrostruktura okolo tohoto rozhraní byla rozdílná oproti mikrostruktuře ve vzdálenějších místech od tohoto rozhraní.

12. Závěr

Z výsledků této práce vyplývá, že zařízení HDQT-R 30-12 je vhodné pro válcování tyčí, pro které bylo vytvořeno. Simulace ale ukazují, že vlivem rozložení efektivní deformace v průřezu válcované tyče, kdy je dosahováno vysokých hodnot efektivní deformace pouze v povrchových vrstvách je možno válcovat kromě tyčí také polotovary, které nejsou plné v osové části, jakou jsou trubky, aniž by došlo k jejich zavalení. Dále lze na základě simulací předpokládat, že stroj umožňuje válcovat širokou škálu materiálů o různém chemickém složení s využitím různých rychlostí válcování. Z analýzy napětí ve směru kolmém k ose provalku bylo zjištěno, že zde dochází k tlakovému namáhání s hodnotou napětí v tlaku přesahující hodnoty 70 MPa, což by mohlo pomoci k vytvoření difúzního spojení dvou materiálu.

V reálném experimentu bylo provedeno válcování tyčí ze stejných materiálů jako v případě simulace, a jejich chování zaznamenané pomocí zařízení HDQT-R 30-12 kopírovalo chování těchto materiálů v simulaci, což může být jedním z důkazů, že simulace byla vytvořena správně. Simulace válcování trubky ukázala že vlivem válcování nedochází pouze k prodlužování provalku a redukci jeho vnějšího průměru, ale zároveň narůstá tloušťka stěny tohoto provalku.

Výsledky experimentálního válcování ukazují, že v případě válcování tyčí se hodnoty průměrů měřené na výsledných provalcích odchylují od požadované hodnoty v rámci dvou až tří desetin milimetru v případě uhlíkových ocelí směrem dolů a v případě nerezové oceli směrem nahoru. V případě experimentálního válcování trubek byla potvrzena informace získaná analýzou simulace tohoto procesu a tedy ta, že vlivem válcování narůstá tloušťka stěny výsledného provalku. Válcováním spojení trubky z materiálu EN S235JRC a tyče z materiálu EN C60, které se liší především v obsahu uhlíku byly vytvořeny difúzní spoje s různou mikrostrukturou v závislosti na způsobu ochlazování provalku. V případě ochlazování na vzduchu byla mikrostruktura feriticko-perlitická s různými podíly feritu a perlitu v trubce, tyči a na rozhraní těchto spojovaných materiálů. Hranice mezi materiály nejevila žádné známky nespojitosti. V případě ochlazování kalením do vodní lázně se hranice mezi oběma spojovanými materiály po leptání jevila velice výrazně, ale stejně jako v předchozím případě nebyla patrná žádná trhlina nebo poškození. Mikrostruktura tyče byla martenzitická s malým podílem bainitu v oblasti okolo spoje a bainiticko-feritická s malým podílem martenzitu v oblasti spoje pro trubku. Pro zjištění více o mechanických vlastnostech difúzních spojů vytvořených válcování bude dále probíhat jejich analýza.

Výhledem do budoucna je samozřejmě experimentování se spojováním materiálů, které by dohromady dávaly větší smysl a jejichž kombinaci vlastností by bylo možné využít v praxi. Příkladem může být prohození ocelí použitých v experimentu, kdy by byla ocel EN C60, která je více prokalitelná na povrchu a EN S235JRC uvnitř. Touto kombinací by mohla být vytvořena tyč s vysokou pevností a tvrdostí na povrchu při zachování houževnatého jádra. Dále mohou být kombinovány klasické konstrukční oceli s korozivzdornými nebo vysoce otěruvzdornými ocelemi.

13. Citovaná literatura

[1] **Semiatin, S. L. .** *ASM Handbook: Forming and Forging.* Novelty : ASM International, 1988. ISBN 0-87170-007-7.

[2] **Schindler, I., Rusz, S. a Kubina, T.** Válcování. Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2014.

[3] **Siddhartha, R.** *Principles and Applications of Metal Rolling.* Cambridge : Cambridge university Press, 2016. ISBN: 978-1-107-07609-9.

[4] **Touch of modern.** *Sketch of a rolling mill.* [Online] [Citace: 3. 11 2019.] https://www.touchofmodern.com/sales/leonardo-da-vinci/sketch-of-a-rolling-mill-circa-1500-1510.

[5] **Rewaj, M.** Innovaltec.com. *A brief history of metal rolling for sheet and plate products.* [Online] [Citace: 3. 11 2019.] https://www.innovaltec.com/history-metal-rolling-blog/.

[6] **Fabík, R.** Tváření kovů. Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012.

[7] **Black, J. T. a Kohser, R. A.** *DeGarmo´s Materials and Processes in Manufacturing.* 11. Kendallville : John Wiley & Sons, Inc., 2012. ISBN-13 978-0-470-92467-9.

[8] **Xinghui, H., a další.** A new cylindrical ring rolling technology for manufacturing thin-walled cylindrical ring. *Internation Journal of Mechanical Science.* 2014, 81, stránky 95-108.

[9] **Raghupatchi, R. S.** *Handbook of metal forming.* [editor] K. Lange. Dearborn : Society of Manufacturing Engineers, 1985. ISSN: 0-87263-457-4.

[10] **Pater, Z., Gontarz, A. a Weroński, W.** New method of thread rolling. *Journal of Material Processing Technology.* 2004, 153-154, stránky 722-728.

[11] **Tomczak, J., Pater, Z. a Bartnicki, J.** Skew rolling of balls in multiple helical impressions. *Archives of Metalurgy and Materials.* 2013, Sv. 4, 58.

[12] **Němec, M., Suchánek, J. a Šanovec, J.** *Základy strojírenské technologie I.* Praha : České vysoké učení technické, 2016. ISBN - 978-80-01-06056-8.

[13] **Danchenko, V. N.** *Metal Forming.* Dněpropetrovsk : National Metallurgical Academy Of Ukraine, 2007. ISBN - 996-525-716-1 .

[14] **Žídek, M., Dědek, V. a Sommer, B.** *Tváření oceli.* [editor] V Pešl. Praha : Nakladatelství technické literatury, 1988.

[15] **Wang, F., a další.** Explorative study of tandem skew rolling process for producing seamless steel tubes. *Journal of Materials Processing Technology.* 2014, 214, stránky 1597-1604.

[16] **Panov, E. I.** Shear Stresses and their dependence on different process parameters in the helical rolling of solid semifinished products. *Metallurgist.* 2005, 49, stránky 280 - 292.

[17] **Stefanik, A., a další.** Theoretical and experimental analysis of aluminium bars rolling process in three-high skew rolling mill. *Archives of metallurgy and material.* 2015, Sv. 2, 60.

[18] **Gryc, A., Bajor, T. a Dyja, H.** The analysis of influence the parameters of rolling process in three high skew rolling mill of AZ31 magnesium alloy bars on the temperature distribution. *Metalurgija.* 2016, Sv. 4, 55.

[19] **Galkin, A. M., Rzasowska-Przala, A. a Górniak A.** A new method of manufacturing small-diameter bars and tubes from hardly deformable steels in skew rolling. *Metalurgija.* 2007, 46, stránky 281-284.

[20] **Sawicki, S., Szota, P. a Dyja, H.** Analysis of the bimetallic bars rolling during a skew rolling. *Archives of materials science and engineering.* 2008, Sv. 1, 32, stránky 53-56.

[21] **Romantsev, B. A.** New Technology for Pipe Rolling on Mini Mills. *Steel in Translation.* 2011, Sv. 12, 41, stránky 1019-1024.

[22] **Allaire, G.** *Numerical Analysis and Optimization - An Introduction to Mathematical Modelling and Numerical Simulation.* [překl.] A. Craig. New York : Oxford University Press, 2007. ISBN: 978-0-19-920521-9.

[23] **Ferreira, L. A., a další.** Graphical Interface for Elecromagnetic Problem Solving Using Meshless Methods. *Journal of Microwave, Optoelecronics and Elecromagnetic Apllications.* 2015, 14, stránky 54-66.

[24] **Swantec.** Swantec. *Numerical simulation.* [Online] [Citace: 8. 12 2019.] https://www.swantec.com/technology/numerical-simulation/.

[25] **Liu, G. R. a Quek, S. S.** *The Finite Element Method: A Practical Course.* Boston : Butterworth - Heinemann, 2003. ISBN: 0-7506-5866-5.

[26] **Scientific Forming Technologies Corporation.** v11.0.2 System Documentation. 2017.

[27] **Coswell, Angel.** Sciencing. *How to Calculate Strain Rate.* [Online] [Citace: 28. 3 2020.] https://sciencing.com/calculate-strain-rate-6744241.html.

[28] **Kliber, Jiří.** Teorie tváření. 1. [editor] Petr Kawulok. Ostrava, Česká republika : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2013.

[29] **Haimbaugh, R. E.** *Practical Induction Heat Treating.* Second edition. Novelty : ASM International, 2015. ISBN: 978-1-62708-089-7.

[30] **Rudnev, V.** Induction Heating and Heat Treating: Computer Modeling. [autor knihy] R. Colás a G. E. Totten. *Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys.* Boca Raton : CRC Press Taylor & Francis Group, 2016, Sv. III, stránky 1835-1852.

[31] **Hradílek, Z., Lázničková, I. a Král, V.** *Elektrotepelná technika.* Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04938-9.

[32] **Davies, T. W.** Thermal conductivity values. *Thermopedia.* [Online] [Citace: 7. 12 2019.] http://www.thermopedia.com/content/1187/.

[33] *International Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic Processing.* **Zedler, T., Nikanorov, A. a Nacke, B.** Hannover : Inst. für Elektroprozesstechnik, Leibniz University of Hannover, 2008. Proceedings of the International Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic Processing. stránky 119-126. ISBN: 9783000260032.

[34] **Rudnev, V.** Induction Hardening. [autor knihy] R. Colás a G. E. Totten. *Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys.* Boca Raton : CRC Press Taylor & Francis Group, 2016, Sv. III, stránky 1807-1835.

[35] **GMT mbG.** Provozní manuál k zařízení HDQT-R 30-12. 2015.

[36] **Peković, M., a další.** Induction hardening of steels with use of the device for incremental forming of round bars HDQT-R 30-12. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020, 723.

[37] **ROBOTERM spol. s r.o.** Speciální středofrekvenční ohřívač tyčí pro experimentální tváření SOT 200+40/20. *Roboterm Chotěboř.* [Online] [Citace: 7. 3 2020.] https://www.roboterm.cz/reference/indukcni-ohrivace/ohrivace-tyci/specialni-stredofrekvencni-ohrivac-tyci-sot-20040/20.

[38] **Peković, M., a další.** Termomechanické zpracování ocelí s použitím zařízení pro inkrementální tváření tyčí HDQT-R 30-12. *Kovárenství.* Říjen 2018, 65, stránky 26-29.

[39] **Bolzano.** Bolzano. [Online] [Citace: 3. 10 2019.] https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10083/MOP_vlastnosti_42CrMo4.pdf.

[40] **Steelnumber.** European Steel and Alloy Grades/Numbers - SteelNumber. *C15 (1.0401).* [Online] Steelnumber. [Citace: 28. 4 2020.] http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=148.

[41] —. European Steel and Alloy Grades/Numbers - SteelNumber. *C45 (1.0503).* [Online] Steelnumber. [Citace: 28. 4 2020.] http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=152.

[42] —. European Steel and Alloy Grades/Numbers - SteelNumber. *C60 (1.0601).* [Online] Steelnumber. [Citace: 28. 4 2020.] http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=154.

[43] **NationWide Stainless.** NationWide Stainless - Stainless Steel Stockholders & Processors. *321 Stainless Steel (1.4541).* [Online] NationWide Stainles. [Citace: 28. 4 2020.] https://www.nationwidestainless.co.uk/materials/321_stainless_steel/.

[44] **Rout, M., Pal, S. K. a Singh, S. B.** Finite element simulation of a cross rolling process. *Journal of Manufacturing Processes.* October, 2016, Sv. 1, 24, stránky 283-292.

[45] **Ferona.** Ferona online. *Materiálové normy.* [Online] [Citace: 13. 5 2020.] https://online.ferona.cz/materialove-normy/.