

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

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

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Simulace procesů záпустkového kování pomocí materiálově-  
technologického modelování

Autor: **Bc. Jana Čubrová**  
Vedoucí práce: **Dr. Ing. Hana Jirková, Ph.D.**

Akademický rok: 2016/2017

(ZDE BUDE VLOŽENO OFICIÁLNÍ ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE)

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou/diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské/diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Bc. Čubrová	<b>Jméno</b> Jana			
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	3911T016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“				
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Dr.- Ing. Jirková, Ph.D.	<b>Jméno</b> Hana			
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KMM				
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del><b>BAKALÁŘSKÁ</b></del>		<b>Nehodící se škrtněte</b>	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Simulace procesů záпустkového kování pomocí materiálově-technologického modelování.				
<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KMM	<b>ROK ODEVZD.</b>	2017

**POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)**

<b>CELKEM</b>	97	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	97	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Diplomová práce je zaměřena na využití materiálově-technologického modelování procesu záпустkového kování. Cílem práce byla analýza reálného procesu kování včetně následného tepelného zpracování, vytvoření funkčního optimalizovaného modelu a následné porovnání reálného výkovku s modelem. Po ověření funkčnosti modelu bylo přistoupeno k návrhu materiálových náhrad s technologií řízeného ochlazování, tedy bez nutnosti tepelného zpracování.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>Materiálově-technologické modelování, záпустkové kování, FEM simulace, mikrolegované oceli, řízené ochlazování</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Bc. Čubrová	<b>Name</b> Jana	
<b>FIELD OF STUDY</b>	3911T016 Materials Engineering and Engineering Metallurgy		
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Dr.-Ing. Jirková, Ph.D	<b>Name</b> Hana	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Simulation of die forging processes using material-technological modelling.		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KMM	<b>SUBMITTED IN</b>	2017
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	97	<b>TEXT PART</b>	97	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>  <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The diploma thesis deals with the possibility of using of the method of material-technological modelling for simulation and optimization in the field of closed die forgings production. The aim of the thesis was to analyse the real production process of forgings including the subsequent heat treatment, to create a functionally optimized model and to compare the real forged part with the model. After verification of the functionality of the model, the possibility of using of controlled cooling associated with the use of selected micro-alloyed steels as a substitution to the normalization annealing was verified.
<b>KEY WORDS</b>	Material-technological modelling, closed-die forging, FEM simulation, microalloyed steels, controlled cooling

## Poděkování

Autorka děkuje Dr. Ing. Haně Jirkové, PhDr., za odborné vedení a pomoc při zpracování diplomové práce, Ing. Ivanovi Vorlovi za odbornou pomoc a konzultaci v oblasti řešené problematiky materiálově – technologického modelování procesů. Firmě Kovárna VIVA, a.s. za poskytnutí výkovek a dat o zápusťkovém kování a firmě COMTES FHT, a.s. (Dobřany) za vytvoření FEM simulací. Dále pak Výzkumnému centru tvářecích technologií za poskytnutí zařízení, výrobu vzorků a pomoc při provádění zkoušek.

Tato diplomová práce byla podpořena projekty LO1502 - Rozvoj Regionálního technologického institutu a SGS-2015-028. Projekty jsou podporovány z účelových prostředků státního rozpočtu na výzkum a vývoj prostřednictvím Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy.

## Obsah

Použité zkratky a jednotky .....	8
Úvod .....	9
1. Charakteristika procesu kování .....	11
1.1 Historie kování .....	11
1.2 Vývoj techniky využívané v kovárenském průmyslu .....	13
1.3 Současné postavení českého kovárenského průmyslu .....	14
1.3.1 Zmapování kováren zaměřených na výrobu zápusťkových výkovků .....	15
1.4 Deformace kovů .....	19
1.4.1 Elastická deformace .....	20
1.4.2 Plastická deformace.....	20
1.5 Technologie tváření a její rozdělení .....	21
1.5.1 Tváření za studena.....	22
1.5.2 Tváření za tepla .....	22
1.5.3 Objemové tváření za tepla – zápusťkové kování .....	23
1.6 Fázové přeměny austenitu při ochlazování výkovků .....	26
1.6.1 Izotermické ochlazování .....	26
1.6.2 Anizotermické ochlazování.....	27
1.6.3 Typy fázových přeměn.....	28
2. Úvod do materiálově-technologického modelování .....	32
2.1 Modelování.....	33
2.2 Simulace .....	34
2.2.1 Použití FEM simulace na proces tváření.....	34
2.3 Fyzikální modelování.....	37
3. Tvorba materiálově-technologického modelu a jeho odzkoušení.....	38
3.1 Analýza technologického procesu.....	38
3.2 Abstrakce.....	39
3.3 Pořízení dat.....	39
3.4 Stanovení efektivního rozsahu materiálově-technologického modelu.....	39
3.5 Transformace dat do modelu .....	40
3.6 Tvorba programu simulátoru.....	40
3.7 Odladění programu simulátoru.....	40

3.8	Evaluace přesnosti modelu.....	40
4.	Experimentální část.....	41
4.1	Použitá zařízení .....	42
4.2	Charakteristika vybraného výkovku.....	43
4.3	Materiálově- technologický model brzdového bubnu.....	45
4.3.1	Analýza reálného procesu - zápusťkové kování výkovku a tepelné zpracování ..	46
4.3.2	Pořízení dat parametrů procesu – průběh teplot a deformací.....	47
4.3.3	FEM simulace zápusťkového kování brzdového bubnu.....	51
4.3.4	Transformace dat a vytvoření programu pro termomechanický simulátor .....	55
4.3.5	Vyhodnocení a porovnání shody modelu a reálného výkovku .....	58
4.4	Návrh materiálových ekvivalentů bez nutnosti následného tepelného zpracování ..	64
4.4.1	Charakteristika zvolených ocelí .....	65
4.4.2	Návrh řízeného ochlazování pro zvolené materiálové náhrady .....	70
5.	Diskuze výsledků .....	87
	Závěr.....	93
	Použitá literatura .....	94



## Použité zkratky a jednotky

A	Tažnost [%]
ARA	Anizotermický rozpad austenitu
FEM	Finite Element Method, (Metoda konečných prvků)
HSLA	High-Strength Low-Alloy Steels, (Vysokopevné mikrolegované oceli)
HV	Tvrdost dle Vickerse [-]
IRA	Izotermický rozpad austenitu
KCV	Vrubová houževnatost [J/cm <sup>2</sup> ]
m	Metr
min	Minuta
např.	Například
Obr.	Obrázek
Re	Mez kluzu v tahu [MPa]
Rm	Mez pevnosti v tahu [MPa]
s	Sekunda
Tab.	Tabulka
Z	Kontrakce [%]

## Úvod

Trendem současné doby je neustálá snaha zavádět nové, nebo inovovat již stávající procesy. Je tomu tak i v oblasti kovárenství, kde je neustálý tlak na hledání nových prostředků umožňujících zvyšování kvality a produktivity, které později vedou ke snižování výrobních nákladů. Tato práce je zaměřena především na zápusťkové kování. Zápusťkové výkovky jsou využívány v mnoha oblastech průmyslu, jako části strojů nebo zařízení. Hlavním odběratelem zápusťkových výkovků je převážně automobilový průmysl. V tomto rychle se rozvíjejícím odvětví jsou nepřetržitě zvyšovány nároky na hledání nových cest ke snižování energetických i materiálových nákladů, ke zjednodušení výrobních procesů a rovněž také i ke snižování hmotnosti výkovků. Často tyto firmy přenášejí zodpovědnost za vývoj tvářených dílů na samotné kovářny. Ty jsou donuceny k tvorbě nových konceptů a inovačních řešení.

Zavádění inovací je poměrně komplexní a rizikový proces zvláště pokud se jedná o podstatné změny ve výrobním procesu. Pro provedení takovýchto změn je vhodné mít k dispozici co nejlepší informace o tom, jak lze nový výrobní proces navrhnout a postupnou optimalizací dosáhnout co nejlepších výsledků. Vzhledem k tomu, že často využívaná metoda pokus-omyl, vede k cíli zpravidla velmi pomalu, je nutné využít veškerých dostupných prostředků pro pochopení problematiky procesu zápusťkového kování. Vedle klasických výpočtů, měření technologických vlastností, nebo použití FEM simulací je nutno hledat i další moderní nástroje, které mají vysokou vypovídací schopnost a zároveň jsou schopny komplexně popsat i složitou problematiku výrobního procesu. Jedním z takových nástrojů je i materiálově – technologické modelování, které pracuje s reálnými vzorky materiálů, přičemž je modelově zpracovává, tak jako by se jednalo o skutečný výrobní proces. Díky tomu lze sledovat vlivy procesů deformace za daných teplotních podmínek a následně vyhodnotit vývoj struktury a při tom provádět analýzy struktur i měření mechanických vlastností. Výhodou tohoto procesu je to, že automaticky zahrnuje i materiálové fenomény, které nejsou za standardních okolností plně integrovány do modelů využívaných pro numerické simulace. Proto lze materiálově-technologickém modelování použít pro vývoj procesů, kde FEM simulace doposud není schopna plně popsat výrobní proces v celé své komplexnosti. Tato metoda byla použita pro ověření výrobního procesu stávajícího výkovku, tak aby byly objasněny veškeré vlivy parametrů a dosaženo, co nejvyšší shody modelových výsledků s výsledky dosahovanými v reálném procesu na konkrétním zápusťkovém výkovku. Materiálově - technologický model pro konkrétní podmínky výroby vytvořily základ pro další použití tohoto nástroje pro následný vývoj technologického procesu a realizaci dalších inovací, mezi které patří např. náhrada materiálu v kombinaci s řízeným ochlazováním výkovku z dokovací teploty.

Diplomová práce byla vytvořena ve spolupráci s firmou Kovárna VIVA, jednou z kováren, která neustále inovuje své výrobní procesy, a tím zvyšuje svoji konkurenceschopnost. Ve spolupráci s touto firmou byl zmapován celý proces výroby zápusťkového výkovku a byly shromážděny veškeré potřebné informace o technologických parametrech. Tyto údaje poskytly vstupní informace pro numerické simulace. FEM simulace zápusťkového kování daného výkovku byla vytvořena ve společnosti COMTES FHT, a.s. Získaná data ze simulací a reálných měření byla použita pro materiálově-technologické modelování provedené ve Výzkumném centru tvářecích technologií FORTECH, Západočeské Univerzity.

V úvodu teoretické části diplomové práce je shrnuta historie kování a vývoj techniky, která byla v daných časových obdobích využívána. Dále je v práci popsána technologie kování, vývoj mikrostruktury ovlivněné procesem zápusťkového kování a vysvětleny základní pojmy potřebné k porozumění celého výrobního procesu zápusťkového výkovku.

Protože je práce zaměřena na kování, je zde zmapovaný současný stav kovárenství ve světě a postavení českého kovárenství, vůči evropským konkurentům. V práci jsou vysvětleny pojmy jako simulace, modelování a charakterizovány možnosti využití FEM simulací v kovárenských technologiích. V teoretické části je obecně popsán v jednotlivých krocích, samotný proces tvorby materiálově-technologického modelu.

Cílem diplomové práce je tedy nejprve sestavit funkční materiálově-technologický model. Pro tvorbu materiálově-technologického modelu bude nutné komplexní zmapování reálného procesu a pořízení všech potřebných dat z výrobních linek a z pecí pro následné tepelné zpracování. Hlavními sledovanými parametry jsou průběh skutečné celkové vnesené deformace a teploty a to v závislosti na čase. Proto je velmi důležitý správný a pečlivý sběr dat. Tyto data budou vstupními informacemi pro tvorbu FEM simulace vytvořené pomocí programu DEFORM. V experimentální části bude podrobně popsána tvorba materiálově-technologického modelu pro vybraná místa výkovku.

Po optimalizaci a odladění všech hlavních parametrů modelu bude nutné posléze ověřit shodu modelu s reálným výkovkem v předem určených bodech výkovku. Pro experimentální část byl vybrán zápusťkový výkovek s firemním označením 02312. Tento výkovek slouží jako brzdový buben do nákladních automobilů. Výkovek je vyroben z uhlíkové oceli k zušlechťování s označením C45. Výchozí strukturou tohoto výkovku je feriticko-perlitická struktura. Pro získání požadovaných vlastností je po kování zařazeno ještě normalizační žíhání. Pro ověření shody výkovku s modelem bude použita metalografická analýza provedená na světelném a řádkovacím elektronovém mikroskopu. Porovnání bude dále provedeno pomocí měření tvrdosti, zkoušky tahem a zkoušky vrubové houževnatosti.

V případě shody výkovku s modelem bude model uvolněn pro testování materiálových náhrad s následným procesem řízeného ochlazování. Bude navrženo několik variant mikrolegovaných ocelí s různým legováním. Tyto druhy materiálu byly vybrány především z důvodů toho, že je u nich možné dosáhnout požadovaných mechanických vlastností, pomocí technologie řízeného ochlazování přímo z dokovacích teplot. Díky fungujícímu materiálově-technologickému modelu bude možné odzkoušet technologii zápusťkového kování s různými ochlazovacími profily a dosáhnout tak požadovaných mechanických vlastností. Po transformaci dat z laboratorních podmínek materiálově-technologického modelování zpět do reálného provozu, by odstranění tepelného zpracování, v tomto případě normalizačního žíhání, přineslo velké časové i energetické úspory a s tím související snížení finančních nákladů na výrobu výkovků.

## 1. Charakteristika procesu kování

Kování můžeme zařadit mezi nejstarší technologie zpracování kovu. Kováním se tedy rozumí objemové tváření za tepla, prováděné úderem nebo klidně působící silou. Při zpracování kovových materiálů tvářením využíváme jejich plasticitu – tj. schopnost přetváření, aniž by došlo k porušení materiálu. [1], [2]

### 1.1 Historie kování

Předtím, než lidstvo začalo používat oheň pro své vlastní účely, byl oheň považován za nekontrolovatelnou hrozbu představující jen ničení. Tato představa trvala až do doby, kdy člověk dokázal oheň zkrotit a využít ke svému prospěchu. V této době byly položeny základy pro technický vývoj v oblasti kování. Oheň byl zpočátku zdrojem tepla, ochrany před divokými zvířaty, nebo jen prostředkem pro přípravu jídla. Lidé brzy zjistili, že kovy, jako je zlato, stříbro, měď, olovo a cín jsou díky ohni tvarovatelné. První pokusy o zpracování železa jsou datovány ve 3. tisíciletí př. n. l., nálezy z tohoto období jsou velmi vzácné a pocházejí z oblasti Mezopotámie. V tomto období byl zpracováván náhodně nalezený materiál především meteorického původu. [3],[4]

V následujících dobách se železo dostává do popředí a to především proto, že v pozdní době bronzové rapidně vzrůstá počet obyvatel, a tím se poptávka po bronzových výrobcích zvyšuje. Natěžená měď i ostatní používané materiály nedokázaly pokrýt tento nárůst, a proto bylo nutné zaměřit se na nové možnosti a materiály. Pozornost se obrátila na železo. V této době přichází nová epocha ve vývoji lidstva odvozená od názvu tohoto kovu tzv. doba železná. Tato doba byla důležitým historickým milníkem ve vývoji v oblasti kování. Z archeologického hlediska je dobou železnou označováno období, kdy člověk používal převážně železo pro výrobu nástrojů a zbraní (Obr. 1.1, Obr. 1.2) U mnoha společností je tato doba spojena rovněž se změnami v technikách zemědělství, v náboženství, či umění. Doba železná je po době kamenné a bronzové třetí v řadě systému klasifikace pravěkých společností. [5], [6]



Obr. 1.1 meč ( 6.století p.n.l)[7]



Obr. 1.2 Lopatky (1. - 3. století n.l.)[7]

Dle nalezených výrobků a zkoumání technologie zpracování rozlišujeme dobu železnou na dvě éry a to starší část (doba halštatská, trvala zhruba mezi lety 750 – 450 př. n. l.), mladší část (doba laténská je datována do období kolem 450 let př. n. l. až po narození Krista.)

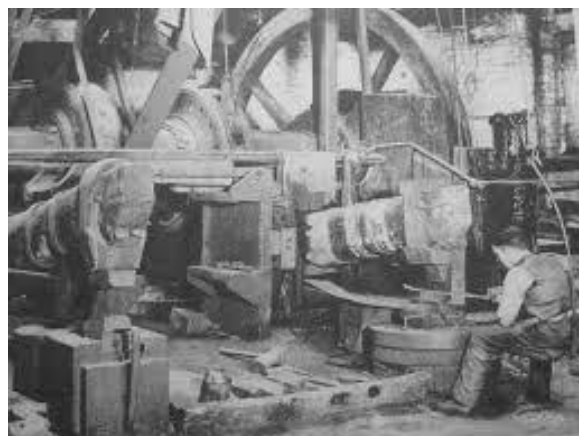
V halštatském období, starší části železné, nastal relativně prudký rozvoj používání železa a s tím i kovářství, ačkoli se jedná o období, kdy je využíván především bronz, postupně na území střední Evropy pronikla i snaha o zpracování železa. Oproti prvním pokusům, kdy se kov opracoval pouze za studena, zde už můžeme mluvit o tepelném, plastickém zpracování. Do střední a východní Evropy se dovážely železné polotovary. V mladé době halštatské vznikaly, už i hutě.[4]

Při práci s mědí a jejími slitinami získali kováři potřebné zkušenosti, díky tomu byly následné pokusy o přetvoření železa úspěšné. Problémy vznikaly až při praktickém využívání vyrobených nástrojů. Železné nástroje nedosahovaly, tak dobrých vlastností, jako tomu bylo u tvrzených bronzů. První výrobky se snadno ohýbaly, neměly požadovanou tvrdost a u řezných nástrojů se brzy tupily čepele. Ruda byla nadměrně okysličená, tím pádem měkká a to z důvodu nedostatečného uvolnění uhlíku z paliva při redukci rudy. Poté co kováři zpracovávali takto získaný materiál ve výhních, se vlastnosti výrobků výrazně zlepšily.[6]

Na nalezených předmětech bylo možno pozorovat základní kovářské techniky jako je vytahování, rozštěpování, ostření a probíjení. Všechny tyto poznatky byly důležitými předpoklady pro vývoj řemesla kování.



Obr. 1.3 Historická kovárna [7]



Obr. 1.4 Hamr [8]

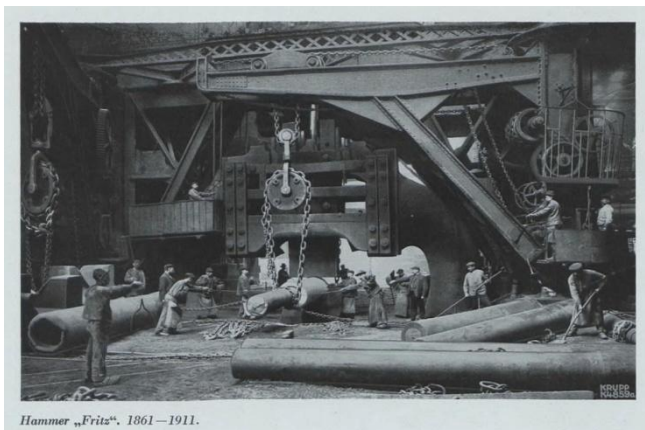
Řemeslo kování neprochází v následujících etapách, především ve vrcholném středověku, významnějšími změnami ve využívaných technologiích. Na rozdíl od období příchodu průmyslové revoluce, kdy dochází k prudkému rozvoji kovárenských postupů a technologií. V druhé polovině 19. století nastává na našem území podstatná změna v získávání železa z rud (vysoké pece).[3]

Samotný obecný pojem kování je popisován, jako proces vedoucí k vytvoření kovových produktů za použití teploty a tlaku. Jak už bylo uvedeno, kování kovů je jednou z nejstarších pracovních technik lidstva. Zpracování kovů, a tedy i kovářské řemeslo sehrálo ve vývoji lidstva důležitou roli. Vyspělost národů byla posuzována podle znalostí zpracování kovů, především železa. Po tisíciletí bylo kovářství nezbytným předpokladem pro rozvoj řemesel a živností, pro výrobu zbraní a stavbu dopravních prostředků - lodí. I dnes jsou kované výrobky používány především v dopravním odvětví průmyslu, ať už v automobilovém či leteckém. [3], [6]

## 1.2 Vývoj techniky využívané v kovárenském průmyslu

Typickým zařízením kováren byli pece, kovadliny a kladiva na ruční nebo nožní pohon (Obr. 1.3) a tak tomu bylo až do 14. století. Všechna tato zařízení byla omezena, pouze na tváření takových rozměrů výkovků, které mohli být přetvořeny lidskou silou. Velkým skokem ve vývoji technologií kování přineslo využívání vody, jako pohonu kovacího stroje pomocí vodního kola, tzv. hamru (Obr. 1.4). Tento mechanismus výrazně ulehčil a urychlil namáhavou kovářskou práci a proti ručnímu kování umožnil zpracovat i větší kusy železa. Hamry byly stavěny podél řek a formovali technologii kování až do přelomu 18. a 19. století.

Průlomový okamžik přišel v době průmyslové revoluce, kdy byl využit zdroj energie dosud neznámého rozměru, parní pohon. Od té doby byl kovárenský průmysl nezávislý na říčních lokalitách a buchary dokázaly vyvinout ohromné síly k překování rozměrných výkovků. Největším slavným německým bucharem byl parní buchar Fritz (Obr. 1.5), který byl využíván společností Krupp od roku 1861. [9]



Obr. 1.5 Parní buchar Fritz v továrně v Essenu [10]



Obr. 1.6 Hydraulický lis pro zápustkové kování LOEWY 500MN [9]

Dalším, pro kovářský průmysl, důležitým milníkem byl rok 1856, kdy Henry Bessemer vynalezl revoluční postup výroby oceli tzv. Bessemerův konvertor. A protože je tato diplomová práce zaměřena na zápustkové kování, je důležitým rokem také rok 1862, kdy ve Spojených státech byla poprvé využita technologie zápustkového kování, která sloužila pro výrobu komponentů při výrobě revolverů. Dalšími důležitými kroky ve vývoji tvářecích zařízení byly spalovací a elektické motory. Díky těmto vynálezům následuje zdokonalování pohonných mechanismů a především řídicích systémů. V prvních letech 20. století se zavedením sériově vyráběných motorových vozidel Henryho Forda značně stoupla poptávka po kovaných výrobcích. A tak byly datovány roku 1930 počátky prvního kovacího lisu (Maxipress). Tento stroj, byl poprvé předveden na trhu v USA firmou National Machinery Company, do této doby byly všechny výkovky vyráběny na bucharech. Dalším americkým úspěchem byl v roce 1955 hydraulický lis pro zápustkové kování LOEWY 500 MN (Obr. 1.6

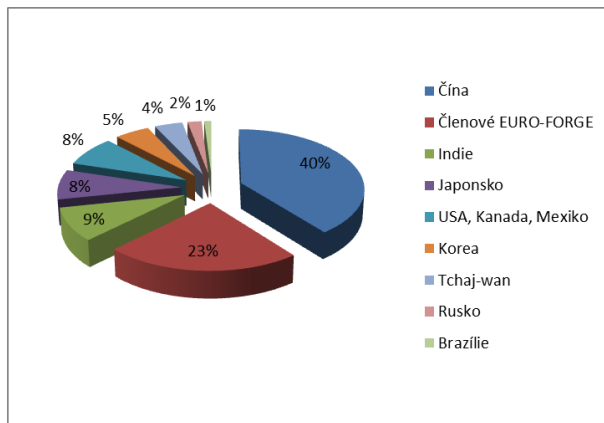
). Pohon byl realizován devíti válci o průměru cca 1,2 m. Lis sloužil pro potřeby leteckého a zbrojařského průmyslu. [9],[10]

S kvalitativním rozvojem elektrických, hydraulických a pneumatických pohonů, včetně moderních řídicích systémů a nových tvářecích technologií, dochází i ve vývoji tvářecích zařízení ke značným kvalitativním změnám. Pracoviště se postupně začínají mechanizovat a v pozdější době automatizovat. Tvářecí stroje pracují jako součásti automatizovaných technologických pracovišť. V současné době máme počítačem řízené buchary a lisy, které jsou schopny tvorby široké škály tvarů výkovků z různých typů materiálů. Tyto výkovky jsou využívány v mnoha průmyslových odvětvích např. letectví, automobilovém průmyslu, hornictví a zemědělství.[9],[11]

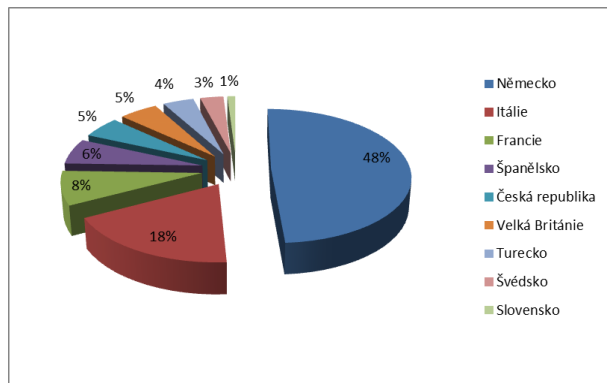
### 1.3 Současné postavení českého kovárenského průmyslu

Kovárenský průmysl České republiky je tradičním oborem a kovárenství jako profese má historii starou několik tisíciletí. Dnes jsou trhem průmyslově produkováných výkovků všechna odvětví strojírenství. Největší význam má u nás i ve světě automobilový sektor. Konkurentem pro kovárenské provozy jsou především slévárny. Ve srovnání s odlitky se kované díly vyznačují především lepšími mechanickými vlastnostmi a relativně snadným způsobem kontroly celého výrobního řetězce, od výroby ocelových tyčí až po finální kontrolu. Díky svým nenahraditelným mechanickým vlastnostem, zajišťují výkovky bezpečný provoz všech strojů a zařízení, ve kterých jsou použity. Jednou z cest k dobrému postavení průmyslového kovárenství ČR na trhu je zvýšení exportu. Kovárny se v posledních letech rovněž soustředily na zvyšování jakosti, získávání nových obchodních vazeb obecně i na důsledné plnění zákaznických požadavků a představ. Kovárny průběžně modernizují svá výrobní zařízení, aby byly co nejvíce konkurenceschopné. V budoucnosti je snahou kovárenského průmyslu zůstat výrazným odvětvím českého průmyslu a stát se srovnatelným s úrovní tohoto odvětví v nejvyspělejších státech ve světě. Celková technická úroveň oboru je dnes nejvyšší v Japonsku a Německu.[12]

A však z diagramu (Obr. 1.7) je patné, že hlavním celosvětovým výrobcem výkovků je Čína. Čínské výkovky tvoří více než 40 % procent celosvětové produkce, která dle serveru Euroforge dosahovala v roce 2015, 26 miliónů tun výkovků. Evropa se svými 23 procenty celkové produkce byla druhým nejmocnějším výrobcem zabývajícím se produkcí kovaných výrobků. Při zaměření na Evropský trh bylo lídrem v oboru kovárenství Německo, které mělo při celoevropské produkci 5,9 miliónů tun výrobků 48 procentní podíl. Další velmi produktivní zemí v rámci Evropy byla Itálie s 18ti procenty. Česká Republika byla se svým 5ti procentním podílem na podobné úrovni jako Velká Británie a Španělsko. Mezi klíčové konkurenty českých výrobců výkovků patří tedy především kovárny v Německu a v Itálii (Obr. 1.8). Kovárny sice zmiňují obavu ze sílící konkurence z asijských zemí a ze zemí s velmi levnou pracovní silou, ovšem zatím pro ně tato konkurence neznamená přímé ohrožení, díky vyspělejšími technologiím využívaným pro proces kování. [13]



Obr. 1.7 Diagram celosvětového podílu výroby výkovků[13]



Obr. 1.8 Diagram podílu výroby výkovků v Evropě[13]

Ze studií, které srovnávaly kovozpracující průmysl České republiky s ostatními průmyslově vyspělými zeměmi, vyplývá, že se české kovárny potýkají s problémem produktivity práce. Tu způsobuje především nižší úroveň automatizace výroby. To má negativní dopad na schopnost českých výrobců dodávat své mnohdy složité výrobky na trh za konkurenceschopné ceny. Obor tváření za tepla, tedy obvykle pracuje s vyšší přidanou hodnotou svých výrobků. Následkem je vyšší cena výkovků ve srovnání např. s odlitky (složitější technologie výroby, dražší strojní vybavení). Je tedy možné říci, že existují typické aplikace, jak pro kovárny, tak i pro slévárny, v určitém segmentu se však obě technologie prolínají a vzájemně si konkurují. U kováren tedy roste tlak na snižování ceny výkovků stejně, jako se u sléváren zvyšují nároky na mechanické vlastnosti odlitků. [12], [14]

### 1.3.1 Zmapování kováren zaměřených na výrobu zápusťkových výkovků

V České republice patří kovárny mezi tradiční průmyslové odvětví s poměrně vysokým podílem na celkové zaměstnanosti a tvorbě HDP. Jedná se o obor s poměrně stabilním odbytem, ovšem s vysokou investiční náročností (nákladné strojní vybavení, nároky na prostor apod.) a s vysokou spotřebou energie (ohřevy materiálu, pohony lisů aj.). Proto i v rámci stejných tržních segmentů dochází k potřebě být na trhu vůči ostatním kovárenským provozům v určité konkurenceschopnosti. V celém kovárenském sektoru neustále narůstá poptávka po komplexních dodávkách výkovků, tj. po výkovcích v obrobeném stavu a po finálním tepelném zpracování. Proto se dnes kovárny transformují z pouhých výrobců výkovků do podoby systémových dodavatelů hotových dílů pro nejrůznější průmyslové odvětví. [12], [15]

#### Kovárna VIVA a.s. [16]

Kovárna VIVA a.s. je přední česká průmyslová kovárna specializující se na výrobu zápusťkových výkovků z legovaných, mikrolegovaných, uhlíkových a konstrukčních ocelí. Hmotnostní rozmezí výrobků leží mezi 0,1-30kg. Svým zákazníkům, předním výrobcům z EU, poskytuje komplexní výrobní program pro zápusťkové výkovky, a to od návrhu konstrukce výkovku až po jeho finální zpracování, tj. chemicko-tepelné zpracování, obrábění výkovků, povrchové úpravy – barvení, zinkování, niklování a logistické služby.

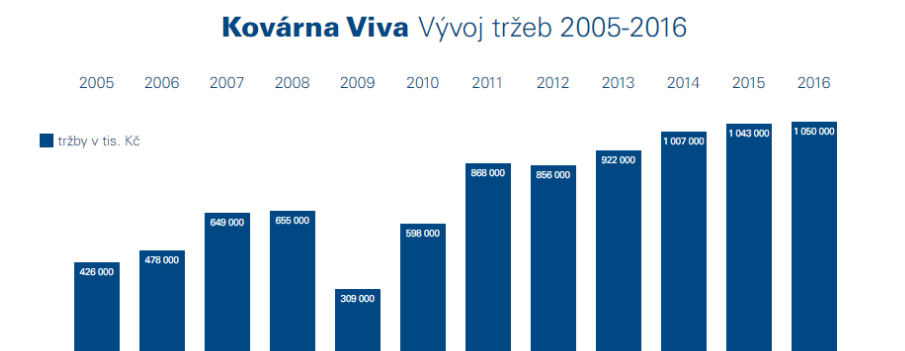
Z průzkumu, který firma zveřejnila na webových stránkách (Obr. 1.9, Obr. 1.10) je patrné, že se výroba výkovků od roku 2005 enormně zvýšila z původních 7100 tun na 18 500 tun. To znamená, že díky propagaci a neustálému zlepšování procesů se během 11 let zvýšila



produkce o cca 11 400 tun. To samozřejmě přispělo i navýšení tržeb, které pro rok 2016 přesahovaly 1 miliardu. Společnost si také zmapovala příležitosti, které by mohly přispět k rozšíření svého odbytu zejména na německém trhu. Jednalo se především o průzkum trhu se zápusťkovými výkovky. [16]

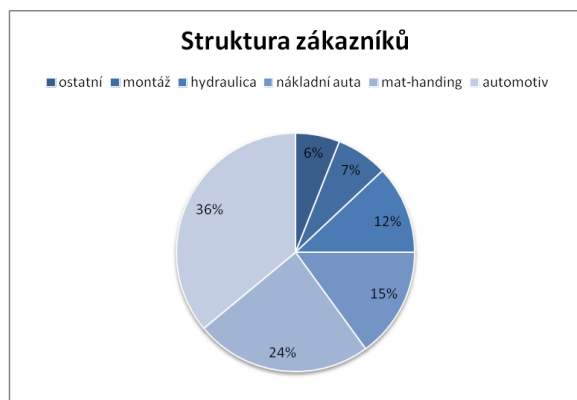


Obr. 1.9 Výroba v období let 2005-2016 Kovárna VIVA a.s. [16]



Obr. 1.10 Tržby v období let 2002-2013 Kovárna VIVA a.s. [16]

Největší procento odběratelů výrobků kovárny VIVA a.s. je ze segmentu zaměřující se na automotive (Obr. 1.11). Ten ze všech vyexpedovaných výkovků tvoří okolo 36 % celkové produkce. Automotive je jeden z nejrychleji se rozvíjejících oblastí průmyslu. Proto je nezbytné celou technologii výroby výkovků neustále mapovat a inovovat a tím přispívat ke zvýšení konkurenceschopnosti na trhu, ať už se jedná o trh v České Republice nebo ve světě.



Obr. 1.11 Diagram procentuální rozdělení zákazníků [16]



Obr. 1.12 Přehled firem zaměřených na výrobu zápustkových výkovek

Z těchto důvodů je v práci uveden i průzkum ostatních firem zabývajících se výrobou výkovek. Tento výčet firem je zaměřen především na výrobu zápustkových výkovek z oceli. Mezi tyto kovárny patří níže uvedené podniky (Obr. 1.12). Všechny kovárny jsou zaštiťovány Svazem kováren České republiky.

#### **CZECH PRECISION FORGE a.s. [17]**

Společnost CZECH PRECISION FORGE (CPF) a.s. je tradiční českou firmou se silným postavením na světovém i domácím trhu v oblasti zápustkového a volného kování. Kovárna disponuje pestrým sortimentem produktů pro globální výrobce v oblasti energetiky, lodního průmyslu, dopravní techniky, letectví, ropného průmyslu a dalších strojírenských oborů. Mezi hlavní výrobní aktivity CPF patří zápustkové a volné kování ocelových slitin, nezelezných kovů a speciálních materiálů do 4000 kg jednotkové hmotnosti. Samozřejmou součástí celkového výrobního procesu je vlastní produkce kovacího nářadí, vlastní tepelné zpracování, provádění destruktivního i nedestruktivního zkoušení a povrchové úpravy včetně hrubování. CPF nabízí rovněž finální obrábění a laserové vypalování vybraných typů výkovek.

#### **OSTROJ a.s. [18]**

Společnost OSTROJ a.s. je významný výrobce sortimentu důlních zařízení pro všechny podmínky dobývání v hlubinných dolech a dalších strojírenských produktů. V oblasti ocelových zápustkových výkovek se kovárna zabývá výrobou výkovek ve váhové kategorii od 0,1 do 25 kg v nejvyšší kvalitě zpracování.

#### **TRIANGOLO spol. s.r.o. [19]**

TRIANGOLO spol. s.r.o. je dynamicky se rozvíjející průmyslová kovárna, která je zaměřena na zakázkovou výrobu a výrobu malých a středně velkých výrobních sérií výkovek. Z materiálů zpracovává oceli všech jakostí a to dle jakýchkoliv norem na základě požadavků zákazníka. V rámci kompletní nabídky zajišťuje dodávky výkovek včetně jejich tepelného zpracování - žíhání a zušlechťování, obrábění a ultrazvukových či jiných zkoušek. Hlavní výrobní sortiment kovárny tvoří zápustkové výkovky rotačních tvarů (kruhy, příruby),

bezešvé rozválcované kruhy (hladké kruhy, tvarové kruhy, příruby) a dále pak volné výkovky (lišty, hřídele, kruhy, kotouče, děrované kotouče, ojnice, táhla, vřetena, atd.)

#### **HF-CZECHFORGE spol. s.r.o. [20]**

HF-CZECHFORGE s.r.o. je moderní zápusťkovou kovárnou se specializací na ocelové výkovky v hmotnostním spektru 0,3 – 7 kg s využitím např. ve strojírenské výrobě, auto průmyslu, výrobě zemědělských, stavebních strojů a strojů a zařízení pro přepravu či manipulaci.

#### **Moravské kovárny a.s. [21]**

Společnost Moravské kovárny a.s. je mezinárodním dodavatelem pro automobilový průmysl. Moravské kovárny a.s. je komerční kovárna zaměřená na výrobu zápusťkových výkovků z oceli tvářených za tepla. Strojní zařízení umožňuje vyrábět díly o hmotnosti 0,10 - 15,00 kg, o průměru 300 mm a délce 400 mm. Dále se zde výkovky tepelně zpracovávají v elektrických průběžných pecích např. zušlechťování, popouštění a žíhání.

#### **Peform Chrudim spol. s.r.o. [22]**

Firma Peform Chrudim s.r.o. je zápusťková kovárna s bohatou historií. Od roku 2010 je firma členem rakouské skupiny Pewag, která je předním světovým výrobcem sněhových řetězů, řetězů pro lesnické hospodářství, břemenových a dopravníkových řetězů, vázacích a kotevních prostředků a ochranných řetězů.

#### **ZETOR KOVÁRNA s.r.o. [23]**

ZETOR KOVÁRNA s.r.o. je tradiční výrobce zápusťkových výkovků s významným postavením na trhu. Má bohaté zkušenosti v oblasti výroby zápusťkových výkovků a rozválcovaných kroužků z uhlíkatých a legovaných ocelí, včetně jejich tepelného zpracování. Hlavním výrobním programem je výroba výkovků pro zemědělskou techniku, výkovků pro ložiskové kroužky, a dále pro tradiční obory - jako je dopravní technika, stavební stroje, motory, pohony, převodová ústrojí, hnací systémy apod.

#### **INPO spol. s.r.o. [24]**

Společnost poskytuje komplexní služby v oblasti výroby zápusťkových výkovků a to od návrhu konstrukce výkovku, přes výrobu kovacího nářadí až po tepelné zpracování a finální úpravu povrchu tryskáním. Specializací firmy je výroba výkovků z ložiskové oceli, zpracovává ale také oceli uhlíkové, legované, konstrukční a nerezové. Výrobní možnosti kovárny jsou od 0,5 kg do 12 kg. Společnost vyrábí široký sortiment zápusťkových výkovků, které jsou následně použity v automobilech, zemědělské technice, hydraulických zařízeních a některých dalších oblastech průmyslové výroby.

#### **MSV Metal Studénka a.s. [25]**

MSV Metal Studénka a.s. se zabývá výrobou zápusťkových výkovků a komponentů nejen pro železniční průmysl ale i pro oblast ostatních průmyslových odvětví. V segmentu automotive je reprezentován především poměrně složitými výkovky a výlisky souvisejícími s brzdovým systémem a spřahovacím systémem spojujícím tahač s návěsem nebo přívěsem. Vyrábí například i dílce určené pro hydromotory, písty a pístnice pro hydrauliku, spojovací segmenty pro věžové jeřáby atd. Pro zemědělský průmysl jsou zde vyráběna různá ozubená kola a to jak pro převodovky traktorů, tak i pro stroje zpracovávající zemědělské plodiny.

**TATRA METALURGIE a.s. [26]**

TATRA METALURGIE a.s. je významným českým výrobcem odlitků a výkovků, které jsou dodávány pro strojírenské aplikace v mnoha evropských zemích. Odlitky a výkovky směřují do automobilového průmyslu, železničního průmyslu, k výrobcům zemědělských strojů, stavebních strojů a manipulační techniky. Své uplatnění naleznou i v oblasti všeobecného strojírenství i speciálních aplikací. Díky rozsáhlému strojnímu vybavení dokáže provoz kovárna svým zákazníkům nabídnout široký sortiment výkovků z konstrukčních, legovaných nebo uhlíkových ocelí. Hmotnostní rozmezí nabízených zápusťkových výkovků se pohybuje od 0,5 kg do 60 kg.

**ZVU Kovárna a.s. [27]**

Kovárna zajišťuje dodávky výkovků a hotových dílů pro strojírenskou výrobu, výrobu ložisek, chemický průmysl a jadernou energetiku. Výkovky jsou vyráběny z běžných uhlíkových ocelí až po vysokolegované materiály pro velmi náročné a specifické aplikace. Výrobní program podniku se zaměřuje na výkovky a opracované výrobky z ocelí uhlíkatých, nízko, středně i vysoce legovaných.

Díky všem těmto skutečnostem si kovárny uvědomují nutnost své stávající procesy inovovat a hledat nové možnosti pro efektivnější postupy, jak už pro samotnou výrobu výkovku, tak pro následné tepelné zpracování. Dalším vlivem, který má negativní dopad na ekonomiku kováren je fakt, že ceny ocelí a legujících prvků začaly výrazně stoupat. I na tyto skutečnosti musí kovárny reagovat, přestože jsou na ně kladeny požadavky na snižování nákladů výroby. Světová globalizace vede k tomu, že zákazníci jsou schopni nakupovat výkovky kdekoli na světě. To posiluje konkurenci mezi jednotlivými kovárnami, kde kromě ceny výkovků rozhoduje i jejich přesnost, kvalita, servis, dodávky na čas a náklady na dopravu. Reakcí kováren na vzniklou situaci je snižování nákladů, zvyšování produktivity a tím k upevnění své pozice na trhu. [14]

**1.4 Deformace kovů**

Po seznámení se s vývojem kování a postavením českých kováren je v práci popsán proces výroby zápusťkových výkovků z hlediska technologie. Proces kování má velký význam nejenom pro tvarování výrobků, ale i pro zlepšení jejich mechanických vlastností (stupeň prokování). Účelem prokování je tedy odstranění nestejnorodé hrubé lící struktury a metalurgických vad u ingotů. Všechny tyto negativní aspekty snižují tvárnost materiálu, zhoršují fyzikální a mechanické hodnoty a vedou ke zhoršení jakosti hotového výrobku. Stupeň prokování se vyjadřuje poměrem průřezové plochy ingotu k průřezové ploše výkovku nebo poměru jejich délek. Výpočet stupně deformace  $p = \frac{l_0}{l_k}$ . [1],[28], [29]

Zvýšený stupeň prokování působí příznivě proti vzniku vloček a jemných trhlin. Podle hodnoty stupně prokování lze posoudit do jaké míry je výkovek protvářen. Díky procesu kování získáváme tedy příznivou makrostrukturu, výhodnou mikrostrukturu a dosahujeme vyšších mechanických hodnot. Kování lze zpracovávat téměř všechny kovy. [28], [30]

Změna tvaru mřížky, která se navenek projevuje změnou tvaru bez vzniku trhlin, nazýváme deformací. Mírou deformace je obecně posuv jednotlivých bodů proti sousedním bodům a s tím spojená změna jeho tvaru. Dle fyzikální povahy je možné deformaci rozdělit na pružnou (elastickou) deformaci a plastickou (trvalou) deformaci. Velikost deformace závisí na teplotě, rychlosti zatěžování, napjatosti, chemickém složení materiálu, zpevnění, tření a na mnoha dalších faktorech. Všechny uvedené vlivy se neuplatňují stejnou měrou a navenek se projevují

odporem kovu ke změně tvaru tzv. deformačním odporem. Deformační odpor [MPa] materiálu je vnitřní napětí, vznikající v tělese jako reakce na působení vnějších tvářecích sil. Chování materiálu a jeho reakce na proces deformace jsou tedy proměnlivé v závislosti na konkrétním technologickém postupu.[30], [31]

#### 1.4.1 Elastická deformace

Pokud je těleso zatěžováno tak, že je jeho deformace vratná tj. že po odlehčení vymizí, jedná se o elastickou deformaci. Jinými slovy po zániku deformačního napětí nabývá deformovaný vzorek materiálu původního tvaru a objemu. Elastická deformace je umožňována relativně malým pohybem, posuvem atomů kolem jejich rovnovážných poloh v krystalové mřížce. V krystalové mřížce, v bezprostřední okolí rovnovážné polohy atomů, je možné průběh výsledné síly nahradit přímkovou závislostí. Tudíž i závislost mezi napětím a deformací krystalických látek je přímková. Konstanty úměrnosti v těchto závislostech jsou materiálové charakteristiky tzv. moduly pružnosti. Pro případ tahového napětí je modulem pružnosti  $E$  – Youngův modul a pro smyková napětí modul pružnosti ve smyku s označením  $G$ . Hodnoty modulů pružnosti jsou závislé jak na typu vazby, tak na uspořádání atomů v prostoru tj. typu krystalové mřížky. Při elastických deformacích způsobených vychýlením atomů z rovnovážných poloh, dochází ke změně mřížkových parametrů, což má za následek změnu objemu materiálu. U všech pevných materiálů má velikost elastické deformace jistou mez - mez elasticity. Za touto mezí již dochází k trvalým změnám v materiálu. Z hlediska tváření kovů má největší význam plastická deformace a však i elastická deformace má vliv na konečný tvar výrobku. [32], [33]

#### 1.4.2 Plastická deformace

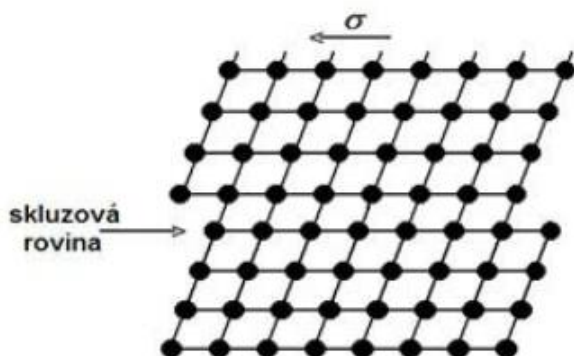
V problematice tváření je důležitějším pojmem tzv. plastická deformace. Ve tvářeném tělese je třeba účinkem vnější síly vyvolat takový stav napjatosti, aby byla překročena mez kluzu daného materiálu a vznikla tak trvalá deformace požadovaného směru a velikosti, aniž by došlo k porušení soudržnosti. Proti těmto vnějším silám, které působí na těleso, působí síly vnitřní. Jsou to takové síly, které brání materiálu k přetvoření. Výsledný efekt tváření závisí proto nejen na charakteru vnějších sil, ale také na faktorech ovlivňujících vnitřní síly. []

Plastická deformace se uskutečňuje pohybem dislokací. Nejčastějším mikro mechanismem plastické deformace je skluz, doplňujícím mechanismem je dvojčatění. Za zvýšené teploty se navíc uplatňují prokluzy po hranicích zrn, difúzní tečení a dislokační tečení. K plastické deformaci vedou i některé fázové přeměny. [1], [33],

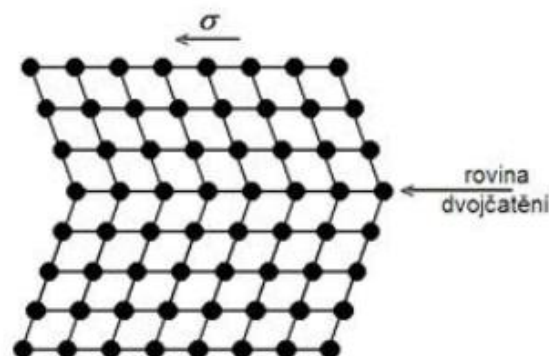
**Dislokace** - Dislokace jsou čárové poruchy krystalické mřížky vznikající přesunutím (dislokováním) určitého množství atomů při skluzovém pohybu vzhledem k vrstvě sousední. Délka dislokace (dislokační čáry) může být rovna až rozměru krystalu. Dislokace se pohybují dvojím způsobem a to skluzem (konzervativní způsob) nebo šplháním (difúzní pohyb). Pohyb dislokací je vyvolán smykovým napětím působícím v určité skluzové rovině a v určitém směru skluzu. [31], [33]

**Skluz** - ke skluzu dochází v krystalografických rovinách a směrech, které jsou nejhustěji obsazeny atomy. Nazýváme je skluzové roviny (Obr. 1.13). Skluzová rovina a směr skluzu tvoří skluzový systém. Nejmenší napětí potřebné k uskutečnění skluzu ve skluzovém systému se nazývá kritické skluzové napětí. Jedná se o materiálovou charakteristiku vyjadřující odolnost monokrystalu vůči plastické deformaci. Jeho hodnota u daného typu krystalové mřížky je funkcí teploty a čistoty. Za velmi nízkých teplot a vysokých rychlostí deformací

vzroste odpor proti pohybu dislokací natolik, že se mění mechanismus plastické deformace. Deformace skluzem se změní na deformaci dvojčatěním. [31], [33]



Obr. 1.13 Deformace skluzem[34]

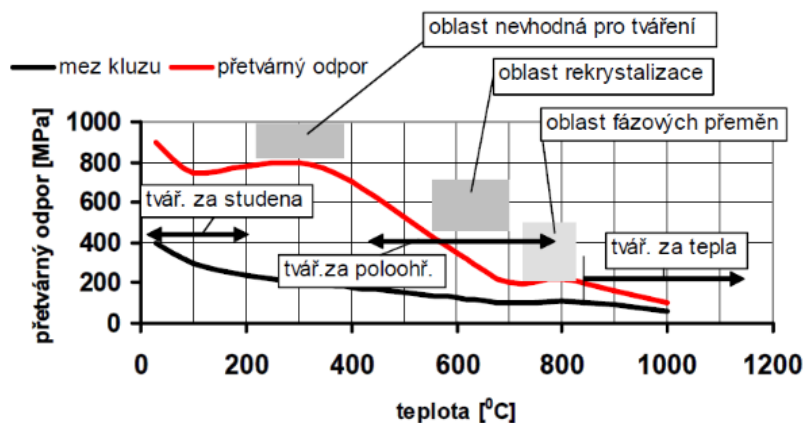


Obr. 1.14 Deformace dvojčatěním [34]

**Dvojčatění** – Dvojčatění je deformační mechanismus uskutečňující se průchodem parciálních (neúplných) dislokací krystalem. Při dvojčatění se část krystalové mřížky posune tak, že vytvoří zrcadlový obraz neposunuté části mřížky (Obr. 1.14). Vzhledem k tomu, že hodnota kritického napětí pro dvojčatění je vyšší než je hodnota kritického skluzového napětí, dochází přednostně k deformaci skluzem. Dvojčatění se uplatňuje, jako doplňující deformační mechanismus tam, kde není dostatek skluzových systémů. [33],[35]

## 1.5 Technologie tváření a její rozdělení

Technologie tváření zahrnuje řadu tvářecích postupů s rozdílnými tvářecími činiteli. V technické praxi se jednotlivé tvářecí postupy rozdělují dle hlavních charakteristik a to např. dle tvářecí teploty (tváření za studena, za poloohřevu a za tepla) dále pak podle tvaru výrobku na tváření objemové, tváření plechů a tváření drátů. Pro dělení dle tvářecí teploty je velmi důležitá rekrytalizační teplota, která má hodnotu přibližně 0,4x teploty tavení čistého kovu. Přítomnost příměsí někdy značně zvyšuje rekrytalizační teplotu. Rekrytalizační teplota je teplota, při které dochází k regeneraci deformovaných zrn vzniklých tvářením za studena beze změny krystalové mřížky. Při změně teploty se mění deformační odpor materiálu (oceli) proti tváření (Obr. 1.15) Z toho vyplývá, že rozlišujeme tváření pod rekrytalizační teplotou (tzv. tváření za studena) a nad rekrytalizační teplotou (tzv. tváření za tepla). [1], [28],[30],[36]



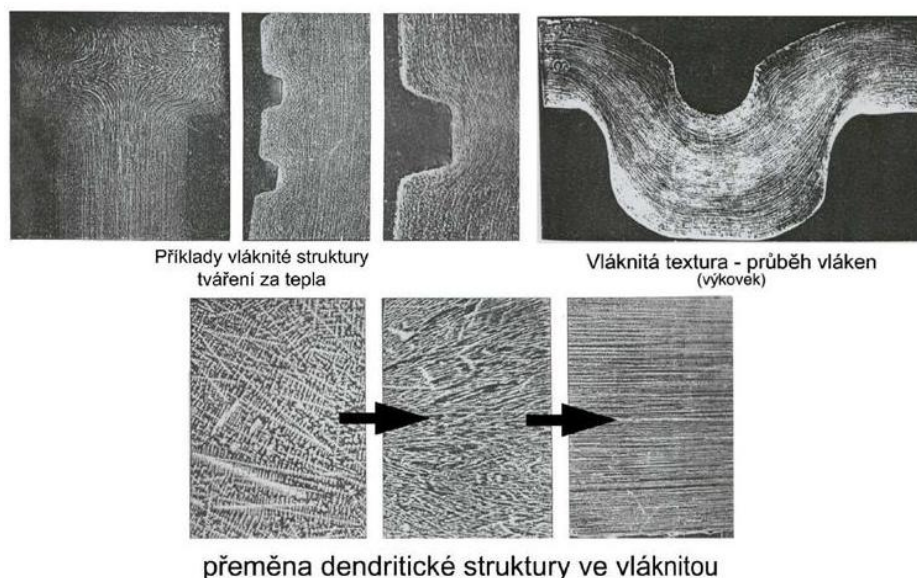
Obr. 1.15 Rozdělení tvářecích procesů podle teploty[36]

### 1.5.1 Tvářením za studena

Tváření za studena probíhá pod rekrystalizační teplotou, kdy teplota pro tvářením klesá pod hodnotu 30% teploty tání daného materiálu. Při takto nízké teplotě dochází při tvářením ke zpevňování materiálu, k nárůstu odporu proti dalšímu tvářením a zvyšuje se zde vnitřní pnutí. Zrna kovu se prodlužují ve směru největšího toku materiálu a vytváří texturu. Díky zpevňování materiálu se zvyšuje mez pevnosti a kluzu avšak klesá tažnost. Výhodami tvářením za studena je vysoká přesnost výsledných rozměrů, kvalitní povrch bez okujů a zlepšení některých mechanických vlastností. Nevýhodami jsou velké tvářecí síly, nerovnoměrné zpevňování a omezená tvárnost materiálu. [28], [29], [37],[38]

### 1.5.2 Tvářením za tepla

Tváření za tepla probíhá nad rekrystalizační teplotou, kdy rychlost rekrystalizace je tak vysoká, že zpevňování způsobené tvářením mizí již v průběhu tvářením nebo bezprostředně po něm. Tvářením probíhá při teplotě nad hodnotou 70% teploty tání daného materiálu a to v závislosti na složení materiálu a rychlosti deformace. Oproti tvářením za studena stačí k tvářením za tepla až desetkrát menší síla, jelikož se materiál nezpevňuje. Negativem u tvářením za tepla je nekvalitní povrch vlivem okujení, navíc hrubé zrno, což je problematické u dalších technologických operací z hlediska kvality výrobku. Typickým znakem výrobku je vláknitá struktura. Příčinou vzniku vláken v kovu, který byl tvářen za tepla, je přítomnost příměsí a segregace. Na obrázku Obr. 1.16 je vidět vznik vláknité struktury z hrubé dendritické struktury ingotu, která kopíruje tvar výkovku. Vláknitou strukturu nelze změnit tepelným zpracováním, ani tvářením. Vláknitá struktura ovlivňuje mechanické vlastnosti a anizotropii. Výhodami tvářením za tepla jsou nižší tvářecí síly, nižší opotřebení nástrojů. Nevýhodami je horší kvalita povrchu (zkuřený povrch) a nižší přesnost. [28], [29],[37],[39]



Obr. 1.16 Vliv tvářením za tepla a vznik vláknité struktury výkovků[40]

Mezi objemové tvářecí operace zahrnujeme strojní kování, které můžeme rozdělit na volné kování, zápustkové kování, rotační kování a přesné kování. Dále pak na válcování, protlačování a tažení drátu. Diplomová práce se zaměřuje na zápustkové kování, proto je blíže popsána metoda objemového tvářením, reprezentována metodou zápustkového kování.

### 1.5.3 Objemové tváření za tepla – zápustkové kování

Zápustkovým kovááním se rozumí tváření ohřátého materiálu v jednoúčelových nástrojích, zápustkách. Tyto zápustky dávají kovu požadovaný, převážně velmi složitý tvar. Malé přídavky na obrábění, značná rozměrová přesnost a dokonalý povrch zápustkových výkovků omezují výrazně podíl obrábění při jejich přeměně na hotové strojní součásti. Rozměry zápustky jsou proti tvaru studeného výkovku zvětšeny o smrštění, které bývá obvykle kolem 1% až 1,5%. Zápustka je doplněna drážkou pro výronek. Výronková drážka je umístěna po obvodě dutiny v dělicí rovině zápustky. Hlavní funkcí uzavřených výronkových drážek je regulace tlaku v dutině zápustky a zachycení přebytečného materiálu, který do ní uniká. Uzavřené výronkové drážky se nejčastěji využívají při výrobě výkovků na bucharech. Výronková drážka je tvořena z můstku a zásobníku. Při kováání na klikových lisech se využívá drážek otevřených a to především proto, že na sebe nesmí zápustky dosednout. Výška výronku je ovlivněna pružením lisu. Po dokončení kovacích operací je výronek odstřižen. [28], [37],[39],[41]

Proti volnému kováání se u zápustkového kováání dosahuje přesnějšího tvaru výkovku. Při zápustkovém kováání se postupuje tak, že se výchozí polotovár ohřátý na potřebnou kovací teplotu vloží do dutiny zápustky a působí se na něj silou tvářecího stroje. Materiál se deformuje a vyplňuje dutinu zápustky. Při kováání na bucharu je zápustková dutina vyplňována postupně během několika úderů. Při zápustkovém kováání je možné dosahovat výrazně přesnějších tvarů a vyšší jakosti povrchu, než je běžné při volném kováání. [28],[31], [37]

Výchozím polotovarem pro zápustkové kováání jsou válcované tyče kruhového a čtvercového průřezu. Tvarově jednoduché zápustkové výkovky se mohou vykovat z výchozího polotovaru v jediné zápustkové dutině tzv. jednodutinovým kovááním. Tvarově členitější výkovky se kovou z vhodně připraveného předkovku, který se zhotovuje volným kovááním nebo na jiných tvářecích strojích. Další metodou výroby výkovků je výroba postupovým kovááním v přípravných a dokončovacích dutinách jediné zápustky tvářecího stroje. Mezi přípravné dutiny patří: prodlužovací dutiny, tvarovací dutiny, ohýbací dutiny a dutiny pro otáčivé kováání tzv. rolery. [28],[31], [37]

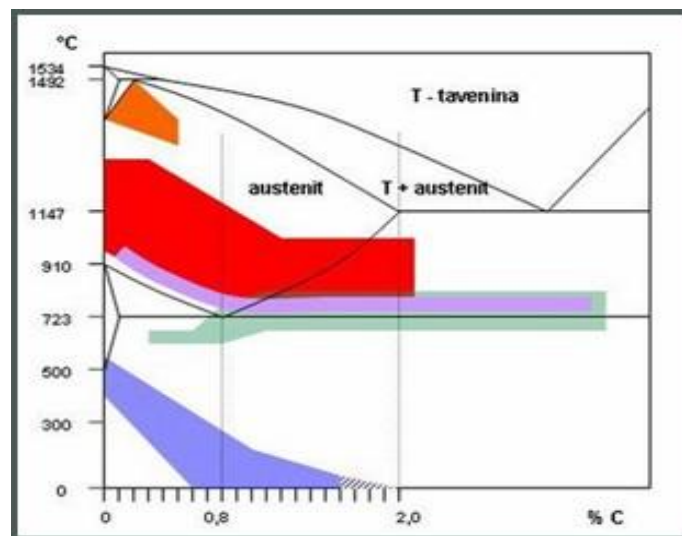
Zápustkovým kovááním se běžně vyrábějí výkovky pro automobilový průmysl, energetiku i do další strojírenské obory. Jedná se o velmi široké spektrum strojních součástí, např. o díly podvozků, motorů, ozubená kola, lopatky turbín apod. Zápustkové kováání poskytuje výkovky s vysokou rozměrovou přesností a s bezvadným povrchem i při značné složitosti průřezu i u osově nesymetrických součástí. Negativem u technologie výroby zápustkovým kovááním je fakt, že zápustka slouží jen jednomu účelu a je relativně drahá. Jedná se tedy vždy o hromadnou až sériovou výrobu zápustkových výkovků. [28],[31], [37]

#### 1.5.3.1 Volba kovacích teplot

Pro dodržení technologických podmínek zpracování je velmi důležitá správná volba a dosažení tvářecích teplot resp. určitých teplotních intervalů. Kováání probíhá zpravidla při nejvyšších přípustných kovacích teplotách a to z důvodu nejsnadnějšího tváření materiálu za kratší časový úsek. Zkrácení kovacích časů má velký vliv u zápustkového kováání a to především na menší opotřebení zápustek. Čím vyšší je teplota, tím nižší je deformační odpor. Je nutné si však uvědomit, že sice při vyšších teplotách jsou menší odpory proti deformaci, na druhé straně hrubne struktura, klesá houževnatost, roste tvorba okujů a dochází k oduhlčení. [28], [29]



U odlitého materiálu (ingotu) probíhá tváření při teplotách přibližně o 100 až 150 °C vyšších, než materiál již jednou tvářený. Nižší teploty jsou i pro volné kování, než pro zápusťkové kování. Kontrola odpovídajících kovací teplot je jednou z podmínek správného kování. Horní kovací teplota ocelí je omezena teplotou tavení ležící zhruba 200°C až 300°C pod solidem. Spodní pak přeměnou fáze  $\gamma$  ve fázi  $\alpha$  pro uhlíkové ocele (Obr. 1.17). Teplota během tváření se snižuje k dolní hranici tvářecích teplot, pokud ještě není práce skončena, je nutný nový přiměřený ohřev. Ohřev musí být proveden tak, aby bylo zajištěno rovnoměrné prohřátí v celém průřezu co nejrychleji, aby ztráty opalem byly co nejmenší. Oceli s vyšším obsahem uhlíku a legované oceli se zpočátku musí ohřívat velmi pomalu, aby nedocházelo k praskání. [28],[38]



Obr. 1.17 Červeně vyznačená oblast kovacích teplot v diagram Fe-Fe<sub>3</sub>C[45]

Rizikem při kování za vysokých teplot je například příliš dlouhá prodleva na takto vysokých teplotách následkem toho může dojít k zhrubnutí zrna. Je-li stupeň deformace dostatečně velký, zjemní se zhrublé zrna materiálu během tváření. Pokud tomu tak není a zrna zůstává vlivem přehřátí zhrublé, je potřeba k jeho zjemnění výrobek následně tepelně zpracovat. Je tomu tak i u výrobků složitějších tvarů, které je nutno kovat při vysokých teplotách. Pro tyto tvarově složitější výrobky je bezpodmínečně nutné odstranit hrubé zrna následnou normalizací. Stejný případ nastává, když časový interval kování je dlouhý a tím pádem probíhá kování při různých teplotách, čímž vzniká nestejnorodá struktura a tím i k nestejným mechanickým vlastnostem. Velmi důležitý je i následný způsob chladnutí výkovku po kování. Toto téma bylo blíže popsáno v kapitole fázové přeměny austenitu při ochlazování. [28],[42]

### 1.5.3.2 Vývoj za tepla deformované mikrostruktury

Mezi základní parametry, které ovlivňují výsledné vlastnosti výrobků tvářených za tepla, můžeme zahrnout velikost zrna a subzrna, množství a disperzitu precipitátů, hustotu dislokací a stavbu tuhého roztoku. Deformačně zpevněná mikrostruktura kovového materiálu obsahuje protažená zrna ve směru deformace. V krystalové mřížce se nachází mnoho poruch a to jak dislokací, tak bodových poruch. Důsledkem těchto změn je růst pevnosti materiálu na straně jedné a pokles tažnosti na straně druhé. Z termodynamického pohledu je deformovaná mikrostruktura neuspořádaná a tedy nerovnovážná. Jinými slovy, deformovaná mřížka představuje soustavu s vyšší volnou energií a je tedy termodynamicky nestabilní. Pro vývoj

struktury je tato skutečnost velmi důležitá. Hnací silou je tedy snaha materiálu minimalizovat svoji vnitřní energii, k čemuž dochází snížením koncentrace poruch. Odstraňování poruch závisí, jak na vnitřních podmínkách systému (stav tuhého roztoku, částice sekundární fáze, koncentrace napětí, atd.), tak i na vnějších podmínkách v kterých se systém nalézá (teplota deformace, rychlost deformace). Návrat struktury do rovnovážného stavu se děje ohřevem tj. žíháním. Procesy, jež probíhají ve struktuře materiálů, se někdy označují jako odpevňovací, protože při nich mizí vlastnosti získané deformačním zpevněním. Pokud je tedy materiál vystaven příliš velké deformaci, začne se dalšímu zpevňování bránit nějakým uzdravovacím procesem. [33],[42],

Odpevňovacími (uzdravovacími) procesy se rozumí tepelně aktivované děje. Těch je celkem pět. Dva dynamické (tzn., že k nim dochází ještě během deformace) – dynamické zotavení a dynamická rekrytalizace a tři postdynamické (tzn., že k nim dochází buď v pauze mezi úběry při tváření za tepla, nebo při rekrytalizačním žíhání po tváření za studena) – statické zotavení, statická a metadynamická rekrytalizace. [33],

Jak již bylo uvedeno, struktura deformovaného materiálu je nestabilní. Je tedy nutné strukturu po tváření stabilizovat následným žíháním. Při tepelném zpracování dochází k podstatnému snížení energie vložené do materiálu. Je možné uvést, že při nízkých teplotách žíhání ( $0,4 - 0,5 T_1$ ) obvykle dominuje zotavení a to vede k pomalému logaritmickému poklesu tvrdosti. Naopak při vysokých teplotách (nad  $0,7 T_1$ ) se může uplatnit velmi rychle rekrytalizace a to bez výrazného předchozího zotavení. Při středních teplotách žíhání se mohou uplatňovat oba zmíněné mechanismy. [42]

### **Zotavení**

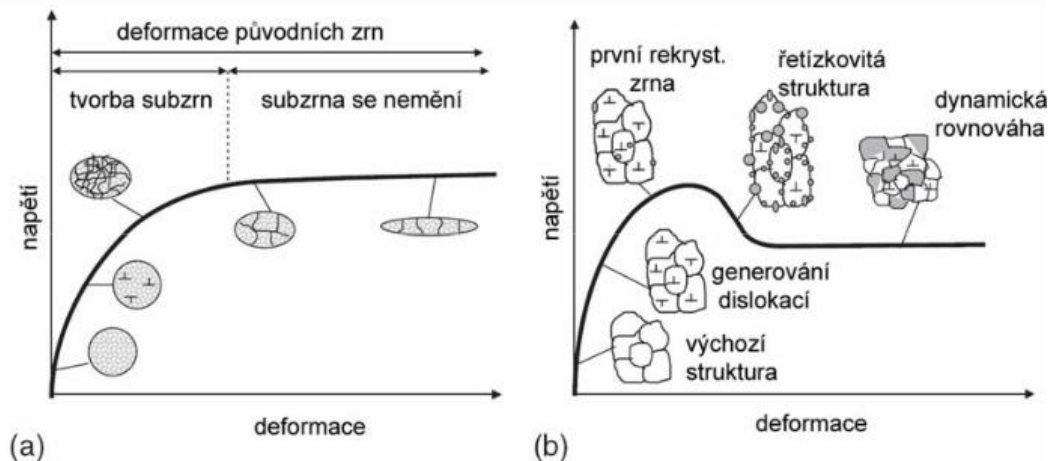
Je to děj, u kterého dochází k postupnému vymizení bodových poruch, k částečnému snížení hustoty a především k přeuspořádání dislokací. Zotavení probíhá při nižších teplotách než je rekrytalizační teplota daného kovu. Bodové poruchy jsou vyžihány již při relativně nízkých teplotách (pod  $0,3 T_1$ ). Ačkoliv platí, že u vyšších teplot dominuje rekrytalizace, obvykle probíhá i zotavení. Zotavení se může vyskytnout okamžitě po deformaci nebo také během ní. Při zotavování kovu se samotný vzhled mikrostruktury nebo krystalografické textury nemění, ale snižuje se vnitřní pnutí a mění se některé fyzikálně mechanické vlastnosti vzhledem k původním vlastnostem před deformací. Mezi tyto vlastnosti patří např. tvrdost, dislokační hustota, velikost subzrn, ovšem detekovatelnost těchto změn je velmi nízká. [42], [43], [45]

### **Rekrytalizace**

Primární (diskontinuální) rekrytalizace začíná po ohřátí kovu na rekrytalizační teplotu. Bývá často definována jako proces nukleace a růstu. Tento děj je dán změnou struktury kovu, při níž se upravuje předchozí deformací porušená stavba krystalů bez změny modifikace – nemění se strukturní typ mřížky. Rekrytalizace je tedy pochod, při kterém zanikají hranice mezi původními zrny a dochází k tvoření zárodků nových zrn s podstatně menším množstvím mřížkových poruch. Zdroje rekrytalizovaných zrn jsou deformovaná zrna, smykové pásy nebo částicově stimulované nukleace. Po rekrytalizaci vzniká nová struktura kovu s vlastnostmi blízkými stavu před deformací. Při rekrytalizaci dochází k výraznému zjemnění zrna. Rekrytalizovaná zrna, už nemají protažený tvar. Jsou rovnoosá a hlavně menší než zrna výchozí, což má následně velmi příznivé dopady na tvářitelnost kovu. Při tváření mohou vznikat na hranicích zrna mikrotrhliny – jejich intergranulární (po hranici zrna) šíření je energeticky snadné. Rekrytalizace změní hranice zrn a dostane tyto trhliny do nových poloh – jejich šíření v objemu zrna je méně pravděpodobné. Snižuje se tak nebezpečí křehkého interkrystalického lomu. [42], [43], [47]

Za jistých podmínek může struktura rekrystalizovat během vlastní deformace tj. dynamicky. Dynamickou rekrystalizaci lze uvažovat buď jako diskontinuální, geometrickou nebo dynamickou rekrystalizaci založenou na progresivní rotaci subzrn. Dynamická rekrystalizace je charakterizována nepřetržitou nukleací a omezeným růstem zrna. [42], [47]

Na obrázku Obr. 1.18 je znázorněn vývoj mikrostruktury, jak pro proces zotavení, tak právě pro proces dynamické rekrystalizace.



Obr. 1.18 Vývoj mikrostruktury během deformace za tepla : (a) zotavení, (b) dynamická rekrystalizace [42]

Následný růst zrna po rekrystalizaci je řízen zejména povrchovou energií nebo energií hranice zrna. Vhodnější označení pro růst zrna je hrubnutí zrna (někdy označován jako sekundární rekrystalizace). Existují dva základní druhy hrubnutí zrna: normální a abnormální. Při normálním hrubnutí je hlavním mechanismem ztráta nejmenších zrn, zatímco zůstává zachována téměř konstantní distribuce velikosti zrn. Při abnormálním růstu zrna dochází k růstu několika zrn uvnitř ukotvené struktury. [42]

## 1.6 Fázové přeměny austenitu při ochlazování výkovků

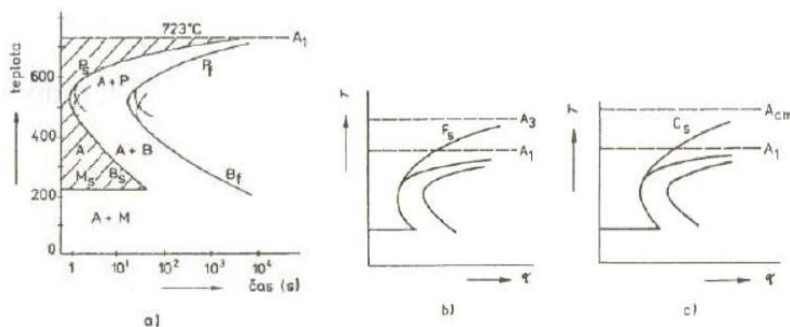
Tato kapitola pojednává o tom, jaké fáze nebo strukturální složky mohou vznikat při ochlazování austenitu, tedy tuhého roztoku  $\gamma$ . Které struktury vzniknou, závisí na podmínkách ochlazování, především na rychlosti ochlazování. Zjednodušeně rozlišujeme při ochlazování materiálu v pevném stavu dva způsoby ochlazování. Je to buď ochlazování izotermické, nebo ochlazování anizotermické. Tyto znalosti fázových přeměn jsou nutné pro stanovení parametrů (rychlostí ochlazování) pro navržené materiálové náhrady v kombinaci s technologií následného řízeného ochlazování z dokovacích teplot. [43]

### 1.6.1 Izotermické ochlazování

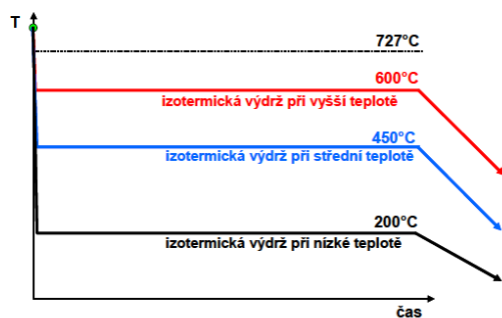
Izotermické ochlazování nazýváme ochlazování se zařazenou výdrží na konstantní teplotě. Izotermické ochlazování se skládá ze tří etap. V první etapě je materiál z výchozí teploty nejprve prudce ochlazen na zvolenou izotermickou teplotu. Na této teplotě pak proběhne výdrž, jinými slovy to znamená, že materiál na této teplotě po určitou dobu setrvá. Poslední třetí etapou je pak další ochlazování z teploty izotermické výdrže na teplotu okolí. Toto ochlazování už probíhá většinou na vzduchu. Schematicky je izotermické ochlazování zobrazeno na obrázku Obr. 1.20 pro tři rozdílné teploty izotermické výdrže. [33],[43], [47]

### 1.6.1.1 Diagramy izotermického rozpadu austenitu (IRA)

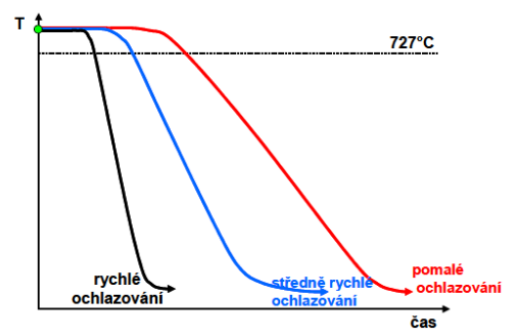
Izotermický rozpad austenitu spočívá v co nejrychlejším ochlazení austenitu z austenitizační teploty na předem stanovenou konstantní teplotu pod teplotou  $A_1$ . Reálně mohou izotermickým rozpadem austenitu vznikat struktury jen u velmi malých nebo tenkých výrobků, u nichž lze materiál rychle zchladit na danou teplotu v celém objemu tělesa. Konkrétní IRA diagramy platí jen pro oceli s určitým chemickým složením a pro určité podmínky austenitizace (Obr. 1.19). Mezi tyto podmínky patří velikost zrna austenitu a homogenita austenitu. Diagramy IRA mají praktický význam při izotermických pochodech tepelného zpracování (izotermické žíhání a izotermické zušlechťování). [47], [48]



Obr. 1.19 IRA diagramy, a) eutektoidní, b) podeutektoidní a c) nadeutektoidní ocel [47]



Obr. 1.20 Znárodnění izotermického ochlazování pro rozdílné teploty izotermické výdrže[49]



Obr. 1.21 Znárodnění anizotermického ochlazování pro rozdílné rychlosti ochlazování[49]

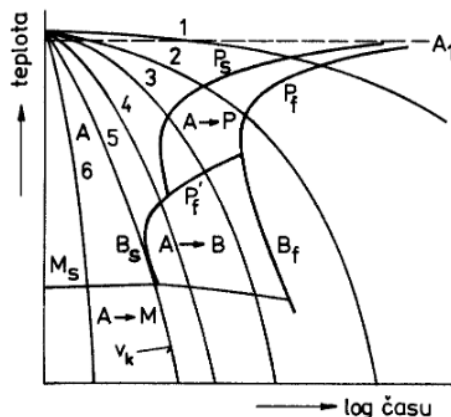
## 1.6.2 Anizotermické ochlazování

Anizotermické ochlazování je takové ochlazování, kdy teplota materiálu klesá v čase plynule. Tuto závislost lze znázornit křivkami, jejichž příklady jsou uvedeny na obrázku Obr. 1.21.

### 1.6.2.1 Diagramy anizotermického rozpadu austenitu (ARA)

V technické praxi se neseťkáváme s ochlazování za izotermických podmínek příliš často. Mnohem více se pracuje s případy, kdy dochází k postupnému ochlazování z teploty austenitizace. Princip anizotermického rozpadu austenitu spočívá v jeho plynulém ochlazování různou rychlostí na teplotu okolí. Pro každou rychlost se zjišťuje průběh rozpadu, tj. začátky a konce jednotlivých přeměn (Obr. 1.22). ARA diagramy jsou složitější než IRA

diagramy, protože výsledná struktura je složená z více produktů přeměn, které vznikají při různých teplotách v procesu ochlazování. [47]



Obr. 1.22 ARA diagram[48]

### 1.6.3 Typy fázových přeměn

Transformace austenitu na různé produkty probíhá v závislosti na chemickém složení a rychlosti ochlazování. Jejich znalost má velký význam při tepelném zpracování, jelikož austenit prodělává většinou více proměn. Fázové transformace představují kvalitativní změny v atomárním uspořádání jednotlivých fází termodynamické soustavy. Dochází k nim v případě, že je vlivem změny vnějších podmínek porušena termodynamická rovnováha soustavy. Přeměna souvisí s výraznou objemovou změnou a také se značnou změnou rozpustnosti uhlíku v odpovídajících tuhých roztocích. [43], [48]

V důsledku ochlazování se transformuje  $Fe\gamma$  v modifikaci  $Fe\alpha$ . Tuto přeměnu lze rozdělit do dvou základních variant z hlediska uskutečněných atomárních mechanismů:

#### a) Rekonstruktivní fázová přeměna

Tato přeměna souvisí s narušením všech atomárních vazeb za vzniku vazeb nových. V případě rekonstruktivních procesů jsou řídicím mechanismem difúzní procesy. Do rekonstruktivních fázových přeměn zahrnujeme přeměny: alotriomorfního feritu, idiomorfního feritu, masivního feritu a perlitu. [48]

#### b) Displacivní fázová přeměna

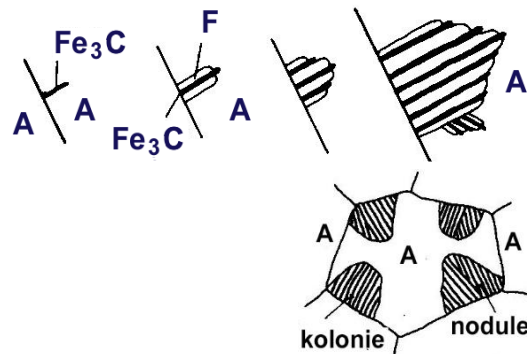
Displacivní změna souvisí s narušením původního uspořádání v matici a se vznikem nového typu krystalické mikrostruktury. Mezi displacivní fázové přeměny patří přeměny: Widmanstattenovaferitu, acikulárního feritu, bainitu a martenzitu. [48]

#### 1.6.3.1 Perlitická přeměna

Perlitická přeměna je fázová přeměna řízená difúzí. Tato přeměna austenitu probíhá při pomalém ochlazování, v zásadě se jedná o rovnovážné podmínky, kdy se austenit při ochlazování přemění na perlit. Perlitická transformace nastává při rychlém ochlazení na teplotu od 720-550°C. Perlit se skládá ze střídajících se lamel feritu a cementitu. Obě dvě fáze vznikají difúzí. To znamená, že zárodky vznikají v důsledku pohybu atomů železa a uhlíku v mřížce na vzdálenost větší, než je parametr mřížky. Skupinky lamel jsou uspořádány

navzájem rovnoběžně. Takto vzniklé oblasti se stejnou orientací lamel v prostoru jsou nazývány perlitické kolonie (Obr. 1.23). Skupiny těchto perlitických kolonií tvoří tzv. perlitické nodule. Nodule v průběhu transformace austenitu na perlit rostou jako kompaktní perlitické oblasti. Přeměna austenitu na perlit neprobíhá okamžitě, ale začne probíhat až po určité době. Této době se říká inkubační perioda. [43], [47], [48]

Okolo modelu vzniku perlitických kolonií a nodulí vzniklo více teorií. Zpočátku se předpokládalo, že perlitická transformace začíná ze zárodka cementitu. Později bylo však prokázáno, že úlohu aktivního zárodka může hrát i ferit. Tvorba perlitu tedy začíná vznikem zárodka aktivní fáze ( $\text{Fe}_3\text{C}$  nebo feritu), která nukleuje přednostně na hranici austenitického zrna. Vznikne-li nejprve  $\text{Fe}_3\text{C}$ , je v jeho bezprostředním okolí v austenitu méně uhlíku a tento může nukleovat feriticky. Z feritu je vytlačován uhlík do austenitu, což vede k jeho obohacení o uhlík v bezprostřední blízkosti feritu  $\alpha$ , kde může vzniknout další destička  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Tak se podél hranic střídavě opakuje nukleace cementitu a feritu. V novém modelu vzniku perlitických kolonií a nodulí dochází k tomu, že každý zárodek feritu a cementitu vyrůstá v celou (feritickou nebo cementitickou) část kolonie, tj. jeden zárodek feritu stačí k vytvoření celé kolonie, tvorba dalších zárodků znamená růst nových kolonií. [33], [43], [47]



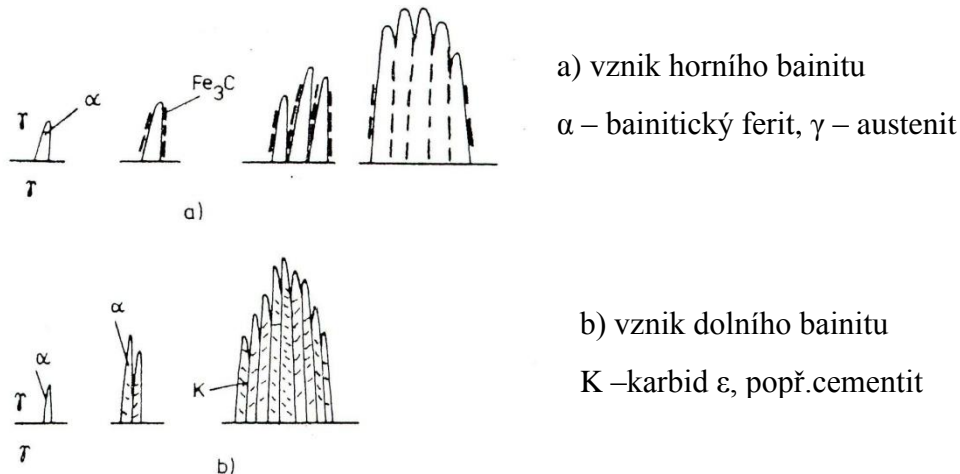
Obr. 1.23 Vznik perlitu[49]

U lamelárního perlitu je tloušťka lamel závislá na difúzní rychlosti uhlíku v austenitu. Tloušťka je tím větší, čím vyšší je teplota. Proto perlit, který vzniká při vyšší teplotě, je hrubozrný. Je-li teplota těsně pod eutektoidní teplotou, vzniká perlit globulární. Čím více se bude teplota rozpadu blížit k teplotě nosu křivky, tím jemnější bude vzniklý lamelární perlit. Čím více se bude teplota izotermického rozpadu blížit teplotě  $A_{r1}$ , tím bude perlit hrubozrnější. [43], [47]

### 1.6.3.2 Baitická přeměna

Baitická transformace je fázová přeměna řízená difúzí a smykem. Je to přeměna austenitu při středně rychlém ochlazování. Baitická transformace se považuje za reakci smíšenou. Představuje tedy kombinaci martenzitické přeměny krystalové mřížky a změny v rozdělení rozpuštěného prvku-uhlíku. Dle novějšího výkladu se jedná o kombinaci semikoherentní transformace (jako je vznik Widmattenferitu) a precipitace karbidů. Při středně velkém ochlazování se podchlazený austenit rozpadá v nerovnovážnou heterogenní strukturu. Bait je směs přesyceného feritu a karbidů nelamelárního typu. Základem baitické přeměny je přeměna austenitu na ferit vzniklý smykovým mechanismem. Dochází také ke změně v rozložení uhlíku (je možná difúze), ale nedojde ke změně rozložení přísadových prvků, protože jejich difúze je téměř neuskutečnitelná. Mechanismus tvorby baitu i jeho morfologie se výrazně mění s transformační teplotou i s chemickým složením, proto je obvyklé bait rozdělit na horní a dolní. S klesající teplotou přeměny roste u baitu jeho

tvrdost i pevnostní vlastnosti. Vysokou pevnost bainitu způsobuje několik druhů zpevnění. Je to deska (laťka) bainitického feritu, jenž má zvýšenou hustotu dislokací, dále zpevnění uhlíkem tuhého roztoku a také disperzní zpevnění vyprecipitovanými karbidy. Bainit lze rozdělit na horní a dolní bainit. Na obrázku Obr. 1.24 je schematicky znázorněn vznik struktury horního a dolního bainitu. [33], [43], [47]



Obr. 1.24 Bainitická přeměna – schéma tvorby bainitu ve středně uhlíkové oceli [49]

**Horní bainit** vzniká při teplotách 350 -500°C. Feritická laťka může nukleovat, buď na hranicích austenitu, nebo uvnitř mateřských zrn austenitu. Jeho strukturu tvoří svazky hrubších desek (laťek) bainitického feritu s podélně uspořádanými částicemi cementitu, které jsou vyloučeny hlavně na fázovém rozhraní bainitický ferit a austenit. Desky (laťky) bainitického feritu vznikají smykem. Bainitický ferit narůstá jen velmi slabě do šířky, ale přednostně do délky. Uhlík je přerozdělován difúzí, je schopen se dostat na fázová rozhraní, kde precipituje a vznikají hrubé karbidy ( $\text{Fe}_3\text{C}$  – cementit). Někdy proto bývá horní bainit nazýván hrubým bainitem. Horní bainit má vysokou pevnost, ale nízkou houževnatost. [33], [43], [47]

**Dolní bainit** vzniká při nižších teplotách pro vznik bainitu a je tvořen tenkými deskami bainitického feritu přesyceného uhlíkem s precipitací karbidů, ke které dochází převážně uvnitř desek feritické matrice. Precipitace karbidů probíhá přednostně na vrstevných chybách austenitu. Bainitický ferit vzniká opět smykem. Teplota je velmi nízká, proto není bainitický ferit schopen vytlačit uhlík, neboť nejsou vytvořeny podmínky pro difúzi. Bainitický ferit narůstá velmi pomalu a desky bainitického feritu jsou velmi tenké. Mikrostruktura dolního bainitu je jemnější a vlastnostmi se blíží martenzitu. Dolní bainit vykazuje vysokou tvrdost a zároveň i dobrou houževnatost. [33], [43], [48]

### 1.6.3.3 Martenzitická přeměna

Ochlazujeme-li vzorek z oblasti teplot stabilního austenitu dostatečně rychle, transformuje při nízkých teplotách martenziticky. Martenzitická přeměna austenitu je technicky nejzávažnějším příkladem bezdifúzní přeměny. Při martenzitické transformaci dochází k přeměně plošně středěné mřížky austenitu na prostorově středěnou mřížku martenzitu bez přerozdělení uhlíku. Mechanismus martenzitické transformace je podobná plastické deformaci a označuje se proto jako stříhová přeměna. Martenzit vzniká při teplotách, které

jsou tak nízké, že při nich v ocelích není prakticky možná ani substituční difuze, ani difuze intersticiální. Díky tomu je chemické složení vznikajícího martenzitu totožné se složením původního austenitu a přesuny atomů při transformaci jsou možné jen na vzdálenosti kratší, než je meziatomová vzdálenost. [33], [43], [48]

Martenzit je nerovnovážený přesycený tuhý roztok uhlíku v matici  $\alpha$ . Pro vznik martenzitu je nutno austenitizovanou matici ochladit pod teplotu  $M_s$ , na dobu kratší, než je doba potřebná pro zahájení perlitické nebo bainitické přeměny. Teplota  $M_s$  se nazývá martenzit start, jež reprezentuje teplotu počátku martenzitické přeměny. Tato teplota není ovlivněna rychlostí ochlazování, ale závisí na chemickém složení austenitu. Teplotu  $M_s$  většina prvků snižuje, ale např. C a Co ji zvyšují. Teplotu  $M_s$  ovlivňuje především obsah uhlíku. [33], [43], [48]

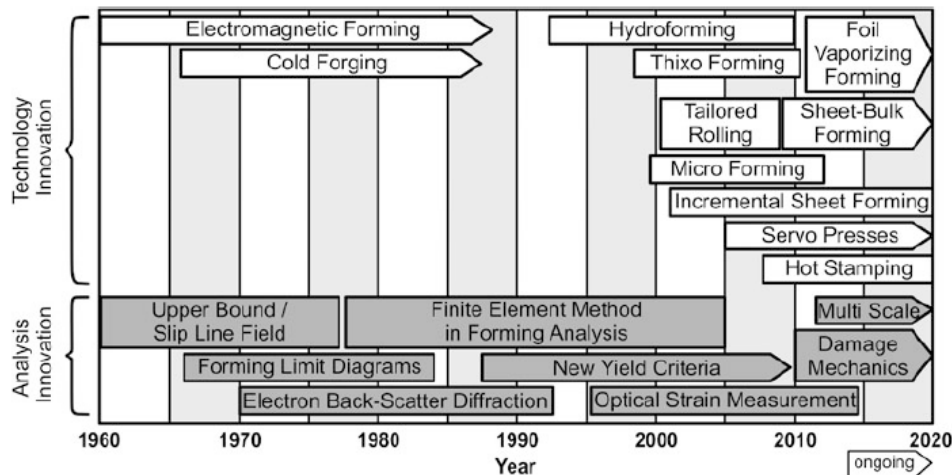
Martenzitická přeměna probíhá až do teploty  $M_f$  (martenzit finish), což představuje teplotu konce martenzitické přeměny. Teplota  $M_f$  je definována jako teplota, pod kterou martenzitická transformace již neprobíhá nebo je její rozsah zanedbatelně malý. Pod teplotou martenzit finish však zůstává ve struktuře určitý podíl zbytkového austenitu. Na množství zbytkového austenitu má vliv stabilita austenitu, velikost austenitického zrna, ale také obsah uhlíku a přísadových prvků. [33], [43], [47]

Martenzitická transformace je podobně jako jiné reakce při tepelném zpracování kovů podmíněna existencí zárodků a jejich růstem. Na rozdíl od jiných reakcí se však martenzitická reakce v ocelích vyznačuje velmi velkou rychlostí růstu částic. V případě že některé částice martenzitu začnou růst, vyrostou do své konečné velikosti prakticky okamžitě. Průběh reakce je proto dán střední velikostí částic martenzitu a rychlostí nukleace. [33], [43], [48]



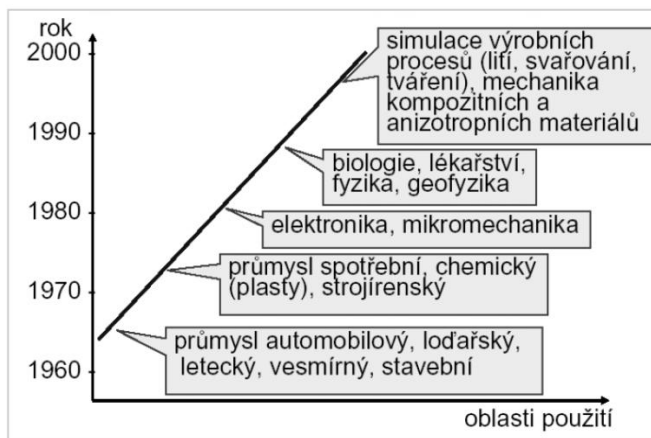
## 2. Úvod do materiálů-technologického modelování

Tváření kovů je dáno, jak tradicí tohoto řemesla, tak i inovacemi řízené vědeckými a technologickými vynálezy. Komplexní vývoj materiálů, nástrojů a strojů využívaných při výrobě tvářených produktů vede k tvorbě nových procesů nebo ke kombinaci stávajících procesů, které vedou k novým nebo vylepšeným výrobkům (Obr. 2.1) [50]



Obr. 2.1 Přehled vývoje technologických inovací v posledních 60 let [50]

Proto hnací silou v oblasti tváření kovů jsou technologické inovace. Obrovský nárůst inovací, ke kterým došlo v posledních desetiletích, byl možný pouze souběžným vývojem v metodách analýzy a techniky. Díky novým typům měřících zařízení je možné poskytovat ucelený, fyzický pohled na procesy tváření.



Obr. 2.2 Použití numerických metod v průmyslu [51]

podporován zaváděním numerických simulačních metod (Obr. 2.2). Mezi tyto metody patří metoda konečných prvků (FEM) a metoda konečných rozdílů (FDM). Pro simulace

Tradiční metody využívané k testování a rozvoji celého výrobního procesu výrobků byly v minulosti založeny především na zkušenostech. Bylo tomu tak i z důvodů nedostatečného rozvoje analytických přístupů ke komplexnímu návrhu procesů. Geometrie součástí jsou obecně poměrně složité a jednodušší analytické metody na rozdíl od dnešních počítačově podporovaných numerických metod, nezvládli pro tyto náročné úlohy zajistit přesné řešení technických problémů.

Díky rychlému pokroku digitální výpočetní techniky je proces kování

zápustkových výkovek je metoda konečných prvků nevhodnější a to zejména vzhledem ke složitosti toku materiálu při tváření kovů.

Díky metodě konečných prvků je možné zmapování jinak velmi složitého procesu kování a možnost nasimulování chování výkovek například i při náhradě materiálu za materiál jiný. Aplikace simulační technologie je sice efektivní a velmi elegantní metoda popisující analýzu technologických procesů, ale i zde je velmi důležité hlubší a komplexní pochopení problematiky celého simulovaného procesu.

Jednou z možností jak nové přístupy i v zápustkovém kování odzkoušet mimo výrobní zařízení představuje materiálově-technologické modelování. Od FEM simulace se tento druh modelování liší tím, že je to reálná technologie, která je odzkoušena na vzorku materiálu o malém objemu prostřednictvím termomechanického simulátoru. Expozice vzorku probíhá za podmínek, které se přibližují reálným podmínkám provozu. Tento postup přináší velké výhody především při zavádění nových technologií tváření, stejně jako při jejich optimalizaci.

Proto, aby mohlo být lépe porozuměno materiálově-technologickému modelování výkovek, je nutné znát základní problematiku a pojmy.

## 2.1 Modelování

Modelování je proces, při kterém je snaha napodobit určitou věc nebo činnost za specifických podmínek. Díky modelování jsme schopni co nejlépe řešit reálné, zpravidla předem neznámé situace. Modelováním se lidé zabývají dlouho, ale teprve posledních 20 let umožňují výkonné počítače simulovat opravdu komplexní systémy - tedy takové systémy, které mají mnoho podčástí a vztahů, v nichž fungují složité interakce a jejichž studium jde napříč tradičními vědeckými obory. Mezi komplexní systémy patří zásadní problémy současnosti, jako jsou například změny klimatu, epidemie AIDS, stabilita ekonomických systémů nebo využití obnovitelných zdrojů. Pomocí modelování a simulace můžeme tyto systémy lépe uchopit a učit se o nich uvažovat. V praxi bývá cílem pochopit pozorované jevy a napodobit chování zkoumaného systému. Dalším krokem je tyto jevy simulovat na vlastním modelu a následně ovlivnit chování modelu požadovaným způsobem. Model je vždy pouze přiblížením skutečnosti. Reálný systém může být velmi složitý, model mu nemusí odpovídat. Z těchto důvodů jsou dále prováděny ověřovací experimenty, kterými jsou doplňovány a dále zpřesňovány parametry modelu nebo i model samotný. [52], [53]

Modelování slouží nejen pro řešení problémů z praxe, ale je určeno i k provádění nejrůznějších výzkumů a experimentů nebo pro simulace sociálních jevů. Použití modelů a simulací je vhodné především pro případy, kdy by při experimentu na reálném systému hrozilo poškození majetku či zdraví.

Modelovaný systém lze formálně popsat a následně simulovat i v reálném čase. Modelování procesů proniklo i do oboru tváření kovů, kde jsou například modelovány samotné procesy kování. V případě modelování procesů tváření a termomechanického zpracování musí být výstupem odpovídající struktura, nebo materiálové vlastnosti, nebo třeba tvar výrobku.

Zatímco výsledkem simulace může být pouhý odhad, výsledkem formalizovaného matematického modelu je hodnota o předpokládatelné přesnosti. Model a jeho parametry jsou výsledkem analýzy systému, jeho úpravou pak lze syntetizovat nový systém, již s požadovanými vlastnostmi. Na něm pak lze ověřovat další vlastnosti, především robustnost a citlivost na změny.

## 2.2 Simulace

Efektivním nástrojem, který se stále více uplatňuje v predikci a optimalizaci způsobu řešení problémů, je simulace. V simulacích se pracuje nejčastěji s matematickým, fyzikálním, fenomenologickým nebo kombinovaným popisem předpokládaného problému, respektive popisem jeho řešení.

Definice pojmu podle p. Křivého a Kindla: „*Simulace je výzkumná technika, jejíž podstatou je náhrada zkoumaného dynamického systému jeho simulačním modelem s tím, že se experimentuje s cílem získat informace o původním zkoumaném dynamickém systému.*“ [54]

Simulace reálně neexistujícího stavu se rychle rozšiřuje do všech oborů lidské činnosti. V současné digitalizované společnosti jsou simulace stejně jako modelování hlavními podpůrnými technologiemi využívanými v oboru tváření pro simulaci tvářecích jevů. Modelování a simulace umožňují nastavit přesné teplotní průběhy a parametry deformace tak, jak je tomu ve skutečném procesu, nebo jak by tomu mohlo ve skutečném procesu být, pokud se jedná o vývoj nových technologií, nebo materiálů, resp. struktur. [52], [54]

Příchod numerických metod, především založených na metodě konečných prvků (FEM - Finite Element Method), umožnil detailnější a přesnější analýzu problémů velkých deformací vyskytujících se v oboru kování. Přesto však jejich využití má ještě dnes několik omezení. Numerická simulace je pouze analytickým nástrojem, nikoliv nástrojem pro návrh technologie. Numerická simulace našla své uplatnění a v řadě případů se stala nepostradatelnou technologií pro nalezení optimálních parametrů deformačního procesu.

### 2.2.1 Použití FEM simulace na proces tváření

Metoda konečných prvků (FEM) je přibližná numerická metoda používaná k řešení širokého spektra fyzikálních problémů. Tato metoda je využívána pro mechanické výpočty, pro řešení teplotních úloh, uplatnění nachází i v řešení elektromagnetických polí, akustice i biomechanice.

Principem metody konečných prvků je nahrazení tvarově složitěho tělesa konečným počtem jednoduchých vzájemně spojených geometrických tvarů – elementů. Jedná se tedy o diskretizaci (rozdělení) tělesa na malé části (prvky), které jsou matematicky jednoduše popsitelné. Řešení je provedeno pro tyto menší části a následně z nich je zkonstruováno výsledné řešení. Tyto menší části se nazývají prvky a z matematického hlediska mají konečnou velikost i počet, což je smyslem názvu metody. Výhodami aplikace FEM jsou simulace jevů a dějů, které by se v praxi uskutečňovaly velmi obtížně nebo by, s ohledem na destrukci zařízení při zkouškách, byly příliš nákladné. [55]

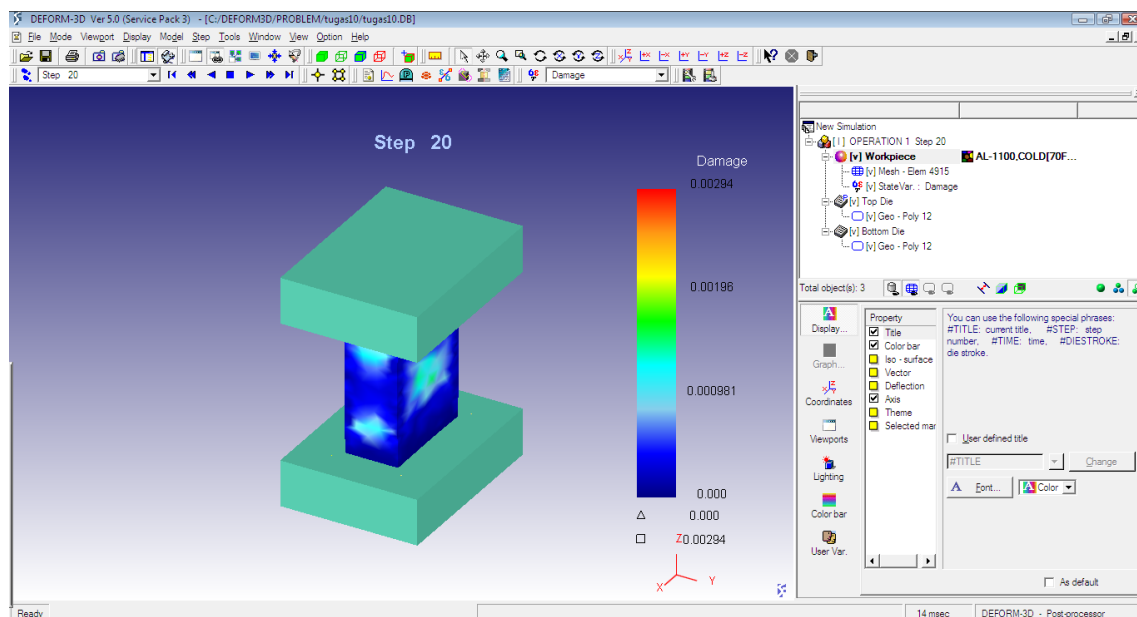
Z provozních nebo poloprovozních experimentů či z fyzikálního modelování prakticky nikdy nedokážeme stanovit přesné časové průběhy termomechanických veličin a jejich distribuci. Proto má procesní modelování pomocí počítačové simulace velký význam v technologii tváření kovů.

Rozhodující při tváření materiálů je znalost deformačních mechanismů probíhajících v daném procesu. Bez znalosti vlivu proměnných je nemožné optimálně navrhnout tvar nástrojů a konfiguraci strojů, případně předvídat vznik defektů a vývoj mikrostruktury. V simulaci tváření kovů jsou proto zahrnuty všechny vstupní proměnné vztahující se k polotovaru (geometrie a materiál), k nástrojům (geometrie a materiál), podmínky rozhraní nástroj-polotovar (tribologie), mechanismus plastické deformace, použité zařízení (buchary, lisy, válcovací stolice) a samozřejmě jsou zde zahrnuty i charakteristiky okolního prostředí, ve

kterém se daný proces provádí. Tok kovu je například ovlivňován procesními proměnnými. Procesní proměnné ovlivňují makro a mikrogeometrii výrobku (finální rozměry a povrch). Procesní podmínky (teplota, deformace, rychlost deformace) ovlivňují mikrostrukturální změny v polotovaru a tím i jeho výsledné vlastnosti. Tento systémový přístup umožňuje studovat vliv jednotlivých proměnných procesu na ukazatele kvality výrobku a na ekonomiku procesu. Klíčem k úspěchu procesu tváření kovů tj. dosažení požadovaného tvaru a mechanických vlastností výrobku, je porozumění a řízení toku kovu.

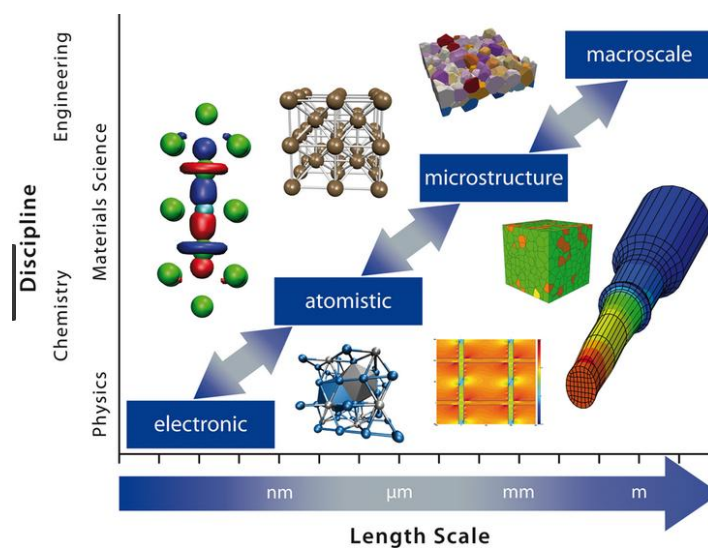
Pro FEM simulaci jsou v současné době používány zejména softwarové produkty americké firmy SFTC. Jedná se především o programy DEFORM 2D a 3D (Obr. 2.3).

DEFORM je technický software, který je přímo určen pro deformační modelování. Je také vhodný pro řešení úloh s extrémně velkými deformacemi, které se v procesu kování využívají. V analýze technologie kování je velmi důležitá znalost lokálních napětí a deformační historie polotovaru v průběhu procesu tváření. Díky softwaru DEFORM lze simulovat a analyzovat veliké množství problémů od návrhu jednotlivých operací, porovnání několika variant technologií nebo sledování vlivu jednotlivých parametrů na konečnou kvalitu výkovku. Díky přídavnému modulu „Heat Treatment“ je software schopný simulovat i tepelné zpracování jako např. žíhání, kalení, popouštění, stárnutí a nauhličení. Mezi další funkce DEFORMU patří schopnost předvídat tvrdost, vnitřní pnutí, deformaci a další materiálové charakteristiky důležité při tepelném zpracování. Nespornou výhodou je také komplexnost celého procesu tváření, kdy je možno propojit, jak tváření, tak modul tepelného zpracování. Díky tomu je možné analyzovat i procesy tepelně-mechanického zpracování. [37],[56].



Obr. 2.3 Ukázka uživatelského rozhraní DEFORM 3D – využití FEM simulace v oblasti tváření, polotovaru s tvářecími nástroji[57]

S nezadržitelným vývojem technologií a nových možností v oblasti kování je aktuální vizí v oboru tváření tzv. multi-scale. Principem je modelování na více úrovních zaměřených na výpočet vlastností materiálu nebo chování systému na jedné úrovni pomocí informací nebo modelů z ostatních úrovní (Obr. 2.4). Metody multi-scale umožňují přechod fenomenologického přístupu plasticity k fyzikálnímu přístupu. [50]



Obr. 2.4 Multi – scale[58]

Obvykle jsou rozlišovány následující úrovně:

1. úroveň kvantových mechanických modelů - obsahuje informace o elektronech
2. úroveň modelů molekulární dynamiky - obsahuje informace o jednotlivých atomech
3. modely s hrubou strukturou – jsou zde zahrnuty informace o atomech a / nebo skupinách atomů
4. Mesoscale nebo nano úroveň - obsahuje informace o velkých skupinách atomů a / nebo poloh molekul

Mesoscale - mezioperační procesy vyplňují mezeru mezi makro- a mikroprodukčním procesem a překrývají oba (rozsahu přibližně od 0,1 mm do 5 mm)

5. úroveň kontinuálních modelů a úroveň modelů zařízení (využití FEM simulací)

Multiscale modelování materiálů v rámci délky váhy vyžaduje překonání hranic mezi disciplínami pro plynulou integraci modelů na různých délkových stupnicích do jednoho koherentního multi-scale modelovacího rámce. Každá úroveň řeší fenomén přes určité okno délky a času. Multiscale modelování je obzvláště důležité v integrovaném výpočetním materiálovém inženýrství, protože umožňuje předpovídat vlastnosti materiálu nebo chování systému založené na znalosti vztahů mezi strukturou a vlastností procesu. Nedílnou součástí multiscale modelování je i využití FEM simulací a fyzikálních modelů. [50], [59]

Omezením numerická simulace je však to, že slouží pouze jako analytický nástroj a ne jako nástroj pro návrh technologie. Díky numerické simulaci, ale můžeme naleznout optimální parametry deformačního procesu. Data, které FEM simulace poskytne, složí jako vstupní údaje pro tvorbu komplexního materiálově-fyzikálního modelu a to především pro optimalizaci zkušební procesu.

## 2.3 Fyzikální modelování

Fyzikální modelování je modelování na reálném materiálu, který má tvar vhodného zkušební tělesa. Proto je fyzikální modelování jednou z efektivních možností, při které je umožněno vyvíjet a optimalizovat nové postupy. V oboru tváření se nejčastěji fyzikální modelování využívá, buď na pochopení procesu deformace, nebo na proces vývoje struktury a s tím spojených mechanických vlastností. K pořízení dat potřebných pro analytické výpočty a zejména pak pro simulace na bázi konečných prvků je zapotřebí stanovit deformační chování materiálu právě za pomoci fyzikálního modelování. Čím lepší budou modely získané díky výzkumu materiálově-technologických vlastností daných materiálů, tím přesněji se budou modely a simulace blížit skutečnosti.

Právě provázanost dat v případě modelování tvářecích procesů je velmi klíčovým aspektem. Tváření je velmi komplikovaným procesem, kdy dochází k ovlivnění velkého množství různých materiálových vlastností. Řadu těchto vlastností lze změřit nebo popsat. Tyto vlastnosti je nutné zahrnout do modelu, který je posléze využit v simulaci daného technologického postupu. Existuje však i celá řada jevů, o kterých se sice mnoho ví, ale ve skutečnosti jsou tyto jevy v reálném procesu natolik komplikované, že často svým výsledkem nezapadají do běžné praxe.

V dnešní době rozvoje elektroniky, sensoriky, řízení procesů a numerické simulace se fyzikální modelování technologických procesů vyvinulo do podoby, kdy je možno s vysokou přesností napodobit v modelu takové podmínky, které jsou shodné se skutečným výrobním procesem. Současný stav modelování umožňuje nastavit přesné teplotní průběhy a parametry deformace tak, jak ve skutečnosti v procesu probíhají. A pokud se jedná o vývoj nových technologií nebo materiálů nastavit podmínky takové, aby odpovídali předpokládanému průběhu teplot a deformací.

Ve fyzikálním modelování lze využít dva základní přístupy. U prvního chceme docílit co nejpřesnější analytické simulace a modelování části výrobního procesu nebo technologického kroku v laboratorních podmínkách. V průběhu fyzikální simulace jsou monitorovány nebo řízeny nejdůležitější technologické parametry. Výsledný produkt (vzorek) je pak analyzován a porovnán s reálným výrobkem, v našem případě s reálným zápusťkovým výkovkem.

Druhým přístupem je provedení, již optimalizované laboratorní zkoušky na náhradních materiálech. Tento vhodně zvolený experiment nahradí plnohodnotný výrobní proces, který by byl jinak v reálném provozu mnohem složitější a nákladnější.

Avšak kdykoliv je vytvořen jakýkoliv návrh fyzikálního modelování, je nezbytné provést jeho následnou kontrolu a to nejlépe na několika stupních modelu. Tato kontrola poskytuje nejen zpětnou vazbu, při vývoji modelu, ale také potvrzuje jeho přesnost. Proto fyzikální modelování poskytuje větší spolehlivost řešení, než použití pouze např. výpočtového modelu.

### 3. Tvorba materiálově-technologického modelu a jeho odzkoušení

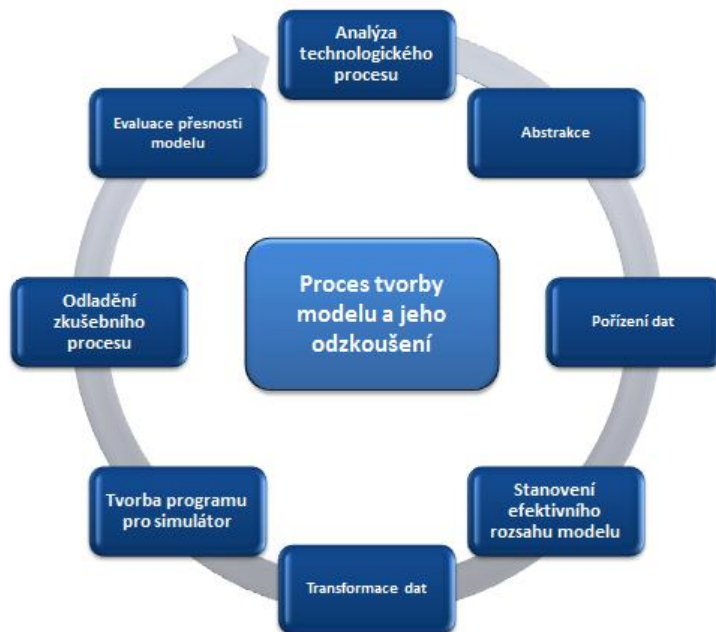
Při tvorbě materiálově-technologického modelu je velmi důležité fyzikální modelování, které je vytvořeno pomocí tzv. virtuálního technologického zařízení. Pod pojmem virtuální zařízení si v našem případě představíme termomechanický simulátor, který zpracuje daný materiál (vzorek) za velmi podobných podmínek, jako by byl zpracován při reálném procesu. Velmi podobné znamená, že v některých ohledech je nutno provést zjednodušení modelu. Aby bylo možné dodržet parametry deformace (zejména rychlosti a velikosti) aniž by došlo k poškození vzorku např. přetržením, využívá se tzv. kumulovaná deformace. Vzorek je tedy deformován stejnou deformační energií, ale jednotlivé deformační kroky jsou realizovány jinak např. ve smyslu tah a tlak. V okamžiku, kdy dojde k postupnému odladění modelu je virtuální technologické zařízení připraveno k dalšímu použití. [60], [61], [62]

Vedle virtuálních postupů je kladen důraz právě na fyzikální model a na přenos výsledků do skutečných tvářecích procesů. Cílem materiálově-technologického modelování je nasimulování vývoje struktury pro proces tváření za podmínek, co nejvíce podobných reálnému procesu. Při správně zvolených parametrech lze očekávat, že proces modelování dosáhne, co nejlepší shody se skutečným procesem. Existuje několik procesů, které využívají fyzikálního materiálově-technologického modelování jako např. modelování tepelného zpracování malých vzorků, při kterém se využívá řízeného ohřevu a následného napodobení rychlosti ochlazování za pomoci nejrůznějších chladících médií. Dále pak laboratorní modelování pomocí termomechanického simulátoru, popřípadě kombinace reálného předzpracování vzorku a následné pokračování nějakou z laboratorních metod. Nebo spojení jednotlivých procesů v komplexní materiálově-technologické modelování celého technologického řetězce. Díky termomechanickému simulátoru lze řídit, jak deformační, tak tepelné zpracování materiálů. U deformačního procesu lze řídit velikost, rychlost a částečně i charakter deformace. Při velkých intenzivních tzv. inkrementálních deformacích se využívá rozložení deformace na tah-tlak. Tím se zajistí odpovídající kumulace deformační energie. V průběhu deformace je nutné řídit také rychlost deformace a samozřejmě teplotu, při které k této deformaci dochází. Součástí modelovaného cyklu je také následné ochlazování materiálu, jak je tomu v reálném procesu. [60], [61], [62]

Celý proces tvorby modelu a jeho odzkoušení se skládá z následujících 8 kroků (Obr. 3.1).

#### 3.1 Analýza technologického procesu

Prvním krokem pro tvorbu modelu je tzv. analýza procesu. Pomocí analýzy se definují specifika daného procesu, který se bude modelovat. Mezi tyto specifika patří především, jaké technologické kroky jsou zařazeny ve výrobním řetězci, jaká výrobní zařízení byla použita, jaké jsou parametry těchto zařízení a jako intenzitou tyto parametry ovlivňují vývoj struktury v průběhu procesu na finální výrobek. Zároveň je možné v analýze zahrnout změny jednotlivých uvažovaných parametrů zařízení, která by bylo možno pozměnit. A využít těchto změn při vývoji nových strategií výroby nebo výroby nových produktů.



Obr. 3.1 Proces tvorby modelu

### 3.2 Abstrakce

Následně je provedena abstrakce na základě výsledků z analýzy procesu. Podle toho, jak intenzivně jednotlivé parametry ovlivňují celý proces, jsou vybrány parametry základní. Základní parametry jsou zohledněny v modelu. V případě tváření se jedná o popis průběhu deformace a teploty v čase. Je tedy nezbytně nutné uvedené parametry a zejména jejich změny, co nejpřesněji detekovat a v modelu přesně dodržet. Proto velmi důležitým krokem je samotné pořízení dat v provozu.

### 3.3 Pořízení dat

Nutnou podmínkou pro přesnou funkci modelu je, co nejpřesněji pořídit data. U tohoto kroku je velmi důležitá spolupráce s pracovníky na daných strojích. Při pořizování dat je využita kombinace měření, výpočtu, odečtu z technické dokumentace a částečně i odhadu. Hlavní neboli základní data jsou pořizována především měřením. Standardně jsou odečítána z měřících míst ve výrobních linkách nebo na příslušných strojích. Naměřená data v důležitých měřitelných místech, představují důležité uzlové body modelu. Týká se to především průběhu teplot v procesu. Osvědčeným zařízením na měření teploty je dvouspektrální optický pyrometr s laserovým zaměřovačem. Díky tomuto zařízení jsme schopni automaticky eliminovat vliv emisivity a vyhledávat nejteplejší místo měřeného objektu. V experimentální části diplomové práce budou podrobně popsány hlavní data a způsob jejich pořízení pro konkrétní proces zápusťkového kování.

### 3.4 Stanovení efektivního rozsahu materiálově-technologického modelu

Pro vytvoření funkčního a efektivního modelu je nutné správné stanovení jeho rozsahu. Model rozhoduje o vývoji finální struktury a vlastností, proto je nutné efektivně pokrýt celou oblast procesu. Ke stanovení rozsahu materiálově-technologického modelu se využívá FEM simulací. Pořízená data z reálných procesů slouží jako vstupní informace pro tvorbu FEM simulace. A hodnoty vypočítané díky FEM simulacím, v případě zápusťkového kování průběh teplot a skutečných logaritmických deformací v daném místě v určitý časový okamžik, poskytují informace pro stanovení efektivního materiálově-technologického modelu. Posléze se pokračuje k dalšímu kroku, k transformaci dat.



### 3.5 Transformace dat do modelu

V okamžiku kdy jsou k dispozici všechna data a stanoven rozsah modelu provede se transformace technologických dat do modelu. Úplná matice modelu se nejčastěji skládá z informací o čase, teplotě a deformaci. Deformace představuje v modelu polohu nástroje provádějící deformaci na modelovém vzorku. Změny jsou vždy dány v závislosti na čase a tím je definován i další významný parametr a to rychlost deformace. Vzhledem k odchylce tvarů a rozměrů reálného produktu a modelového vzorku je nutno zvolit jeden parametr jako řídicí a druhý jako závislý. Řídicí parametr je nutno v modelu přesně dodržet, avšak u závislého parametru je potřeba akceptace odchylky od skutečnosti. V modelech zápusťkového kování je zvolen jako řídicí parametr velikost deformace a jako závislý parametr rychlost deformace.

### 3.6 Tvorba programu simulátoru

V době kdy je k dispozici úplná matice modelu, je možno provést naprogramování simulátoru. V programu je sestaven sousled jednotlivých kroků pro řízení polohy a teploty simulátoru v závislosti na čase. Díky vysokým rychlostem změn parametrů a nutnosti dosažení co nejvyšší vypovídající schopnosti dat o reálném procesu je program proveden v blocích a následně propojen v celistvý program.

### 3.7 Odladění programu simulátoru

Po tvorbě programu pro simulátor je nutné provést odladění tohoto programu. Nejprve dochází k odzkoušení přesnosti a k minimalizaci odchylek průběhu teplot v čase. Poté co je dosaženo požadované odchylky mezi zadanými a naměřenými hodnotami, přichází na řadu optimalizace deformace. V okamžiku, kdy jsou parametry v rozmezí dovolených odchylek je model připraven k porovnání s reálným procesem.

### 3.8 Evaluace přesnosti modelu

Díky pečlivému odladění modelu se dá předpokládat, že bude dosaženo vysoké shody modelu s realitou. Tento fakt je ale nutno potvrdit porovnáním struktur a mechanických vlastností na zkušebních vzorcích odebraných z reálného procesu a na vzorcích odebraných z modelového zpracování. To je nejčastěji provedeno pomocí porovnání struktur na světelném a elektronovém mikroskopu. Dále pak pomocí analýzy podílu jednotlivých fází, naměření tvrdosti a porovnání hodnot z tahových zkoušek jako např. hodnoty meze pevnosti a tažnosti materiálu. Pro experiment je předpoklad povolené odchylky na úrovni 15%. Jaká vysoká shoda je považována hodnota pod 10%.

Pokud jsou všechny tyto body splněny a dojde k dosažení shody modelu s realitou je model uvolněn k optimalizaci a k vývoji nových výrobních technologií popřípadě k odzkoušení náhrad materiálů. Pomocí modelu lze například ověřovat modifikaci teplot, rychlost kování, popřípadě řídit proces ochlazování výrobku. Vyvinutý model by mohl sloužit pro vývoj zcela nových výrobních strategií.

## 4. Experimentální část

Experimentální část diplomové práce se zabývá praktickým využitím materiálově-technologického modelování v technologii zápusťkového kování na vybraném výkovku. Experiment byl proveden ve spolupráci s kovárnou VIVA a.s. a společností COMTES FHT a.s. Kovárna VIVA a.s. poskytla pro experiment výkovky na testování, všechna potřebná data týkající se výroby výkovku a umožnila na pracovišti měření reálného průběhu teplot v jednotlivých krocích kování a následného tepelného zpracování. COMTES FHT a.s. provedl FEM simulaci z reálných dat a následně poskytl potřebná data z FEM simulací. Analýza shody mezi modelem a reálným výkovkem byla provedena v metalografické laboratoři Výzkumného centra tvářecích technologií FORTECH.

Cílem experimentální části a celé této diplomové práce je na základě naměřených a získaných dat z reálného modelu a s podporou FEM simulace vytvořit fungující materiálově-technologický model reálného procesu kování zápusťkového výkovku, který je možno odzkoušet v laboratorních podmínkách.

Vzhledem k tomu, že se materiálově-technologického modelování provádí na reálných vzorcích, umožňují získat představu o struktuře i mechanických vlastnostech navržených produktů bez nutnosti zásahu do výrobního procesu podniku. Díky materiálově-technologickému modelování je reálný proces zápusťkového kování, odzkoušen na vzorku v termomechanickém simulátoru, kdy je proces tváření nahrazen tahem a tlakem. Přitom musí být zabezpečena podobnost všech atributů modelu a reality. Expozice vzorku probíhá za podmínek, které se přibližují reálným podmínkám provozu. Program pro termomechanický simulátor je sestaven na základě dat získaných v reálném procesu a na základě výsledků FEM simulace procesu kování v předem stanoveném místě. Zkušební vzorky jsou následně porovnány s reálným výkovkem např. pomocí strukturní analýzy, změření velikosti feritického zrna, určení podílu jednotlivých fází a stanovení mechanických vlastností.

V první části experimentu ve spolupráci s Kovárnou VIVA a.s., nejprve vznikl optimalizovaný ucelený materiálově-technologický model celého procesu kování i s následným tepelným zpracováním. Byly ověřeny shody, jak strukturních analýz, tak shody mechanických vlastností mezi modelem a reálným výkovkem. Po úplném odladění materiálově-technologického modelu, byl dalším krokem návrh náhrady stávajícího materiálu mikrolegovanými oceli, u kterých je možné využít proces řízeného ochlazování. Jako materiálové náhrady byly zvoleny mikrolegované oceli 30MnVS6, 38MnVS6 a 46MnVS6. Předností mikrolegovaných ocelí je především v možnosti snížení nákladů vhodným mikrolegováním s technologií řízeného ochlazování přímo z kovací teploty. Pro klasicky využívané materiály zápusťkových výkovků je po samotném kování nutné ještě výkovky tepelně zpracovat. Avšak, při využití mikrolegované oceli jako materiálové náhrady s následujícím procesem řízeného ochlazování odpadne nutnost žhání nebo zušlechťování výkovku.

Pokud bude experiment s materiálovými náhradami mikrolegovaných ocelí dosahovat požadovaných vlastností, v našem případě perliticko-feritické struktury s tvrdostí nepřekračující tvrdosti 250HV a dobrými mechanickými vlastnostmi, došlo by k velkým úsporám výrobních nákladů. Kromě redukce nákladů na energii by byly úspory patrné i v oblasti personální a došlo by i k úspoře dodatečných nákladů. Pod pojmem dodatečné náklady si můžeme představit náklady na zmetkovitost, náklady na kontrolu výkovků a náklady do investice na zařízení pro tepelné zpracování. Ve všech těchto oblastech by došlo

ke značné redukci. V kovárně VIVA a.s., tepelné zpracování zápuštěkových výkovků tvoří 12 až 20 % výrobních nákladů. Náklady na zušlechťení 1 kilogramu jakostní oceli se v současné době pohybují v cenových relacích okolo 4-5kč na 1kg materiálu a to u modernějších průběžných linek. U starších linek je tato cena ještě o 25% vyšší. Samozřejmě další nespornou výhodou by bylo snížení ekologických dopadů tepelného zpracování na životní prostředí. I v oblasti kovárenství se dnes řeší ekologická stopa, kterou tyto výrobní procesy zanechávají.

#### **4.1 Použitá zařízení**

Pro materiálovou analýzu byla využívána zařízení nacházející se v metalografické laboratoři výzkumného centra tvářecích technologií FORTECH a Katedry materiálů a strojírenské metalurgie na Západočeské univerzitě. Mezi tyto zařízení patřili:

##### Metalografická pila Struers - Discotom 6 a přesná pila ISO MET 4000 - Buehler GmbH

Reálný výkovek díky svým rozměrům bylo nutno nejprve rozřezat na pásové pile značky Pilous. Po rozřezání výkovku na menší segmenty byly tyto segmenty ve stanovených místech v okolí bodů P10, P26 dále rozřezány na katedře KMM na pile značky Struers. Jedná se o automatickou pilu s konstantní rychlostí posuvu a chladícím systémem. Vzorky byly rozřezány na odpovídající velikosti o maximální ploše 30x30mm.

Pro modelové vzorky z temomechanického simulátoru bylo potřeba zajistit minimální plochu průřezu kotouče do vzorku. Proto byla pro modelové vzorky využita přesná pila ISO MET 4000 od firmy Buehler GmbH umístěná v metalografické laboratoři výzkumného centra tvářecích technologií FORTECH. Modelové vzorky jsou rozděleny na dvě půlky, z nichž jedna je zalisována a druhá slouží pro vyřezání minitahových a vrubových zkoušek na drátořezu.

##### Lis CITO-PRESS-10 - STRUERS GmbH a automatická metalografická bruska a leštička

Po nařezání segmentů materiálu jak skutečného výkovku, tak modelu byly segmenty zalisovány a zapečeny do vodivé hmoty v lisu CITO-PRESS. Jedná se o jednokomorový lis vyznačující se velmi krátkou dobou zapékání (5 minut včetně chlazení). Jsou zde dvě možnosti maximální velikosti vzorků a to buď 30 mm, nebo 50 mm v závislosti na použitém průměru zapékacího válce. Po zapečení segmentů se vzorky připravovaly na automatické metalografické brusce a leštičce. Brusné disky a leštící plátina jsou v tomto případě magneticky uchycovány na kotouče.

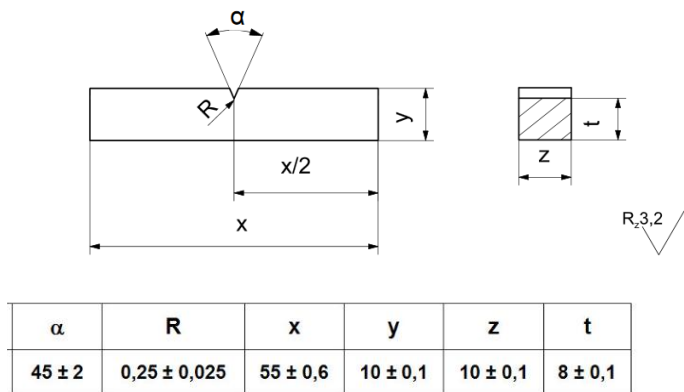
##### Světelný mikroskop a skenovací elektronový mikroskop VEGA 3 SEM – Tescan

Po vyleštění vzorků byly vzorky naleptány 3 % Nitalem a pozorovány na světelném mikroskopu, kde bylo provedeno porovnání struktur vzorků, vyhodnocení velikosti feritického zrna a určen podíl jednotlivých fází. Pro podrobnější prozkoumání struktur a případných vad vyskytujících se ve struktuře byl použit řádkovací elektronový mikroskop VEGA 3 SEM od firmy Tescan

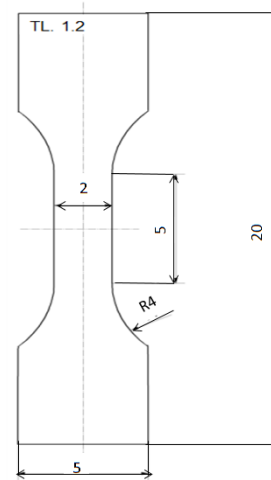
##### Tvrdoměr Latzke, 432SVD

Po strukturální analýze jsou na tvrdoměru Latzke, 432SVD naměřeny tvrdosti dle Vickerse .

Tahové zkoušky byly prováděny ve Výzkumném centru tvářecích technologií FORTECH a vrubové zkoušky byly zajištěny externí firmou COMTES FHT a.s. Jednalo se o mini- tahové a mini- vrubové zkoušky(Obr. 4.1,Obr. 4.2)



Obr. 4.1 Rozměry mini vrubové těleso



Obr. 4.2 Rozměry mini tahové těleso

## 4.2 Charakteristika vybraného výkovku

Experimentální část práce se zabývá technologií zápusťkového kování a tepelného zpracování výkovku (Obr. 4.3), který je vyráběn z uhlíkové oceli C45 (Tab. 4. 1 a 4. 2). Výkovek slouží jako brzdový buben do nákladních automobilů.

Od odběratele výkovků jsou na materiál kladeny tyto požadavky:

Požadována perliticko-feritická struktura

Tvrdoost nepřesahující 250HV – z důvodů následného obrábění výkovku

### Technologie výroby

Při výrobě byl materiál výkovku nejprve pēchován, poté následovala operace předkování a dokování. Po dokončení operací na kovací lisu byl výkovek přesunut na ostřihovací lis typu LU400. Na tomto zařízení byl výkovek děrován a přebytečný materiál ostřihnout. Výkovek byl z lisu vyjmut a na vzduchu volně vychlazen a následně normalizačně žihán.

### Materiál výkovku C45

**Vlastnosti oceli** - Ocel C 45 je jednou z nejpoužívanějších ušlechtilých uhlíkových ocelí. Tato ocel je vhodná k zušlechťování a povrchovému kalení. Ocel je běžně dodávána v žiháném stavu a je známá svojí vysokou houževnatostí. Dále je materiál C 45 (12050) velmi dobře obrobitelný a vyznačuje se dobrou tvarovou stabilitou po tepelném zpracování. Její nevýhodou je však malá prokalitelnost. Mez pevnosti v tahu se udává v rozmezí 590 - 710 MPa. Tvrdoost ve stavu žiháném na měkko dosahuje hodnot maximálně 200 HB. Dosažitelná tvrdoost po kalení je pak 62 HRC

**Použití oceli** - Ocel C45 je využívána pro pevnostní díly ve všeobecném strojírenství. Tento typ oceli je vhodný zejména pro tepelně zpracované díly, kdy jsou maximálně využity



Obr. 4.3 Vybraný výkovek

mechanické vlastnosti této oceli. Je hojně používána především pro následující typy dílů jako např. hřídele těžních strojů, turbokompresorů, karuselů apod. Dále pak na větší ozubená kola, šneky, ozubené věnce, rotory šroubových kompresorů, ojnice, pístnice, vřetena, plunžry, písty kompresorů, pevnostní kolíky, čepy a šrouby, dopravní válečky, frézovací trny atd. Zvyšování užitečných vlastností těchto ocelí má především dopad na snížení hmotnosti finálního výrobku.

### Tepelné zpracování oceli

Žíhání normalizační: 840 - 880 °C

Žíhání na měkko: 650 - 700 °C

Kalící teplota: 820 - 860 °C

Kalící médium: voda, olej

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
dle ČSN	0,42 0,50	0,50 0,80	0,17 0,37	max 0,25	max. 0,30	max 0,30	max 0,040	max. 0,040
aktuální stav	0,51	0,69	0,25	0,15	0,00	0,12	0,023	0,017

Tab. 4.1 Chemické složení mat. C45 v %

			12 050.1
Mez kluzu	<b>Rp0,2</b>	MPa	min. 325
Mez pevnosti	<b>Rm</b>	MPa	min. 540
Tažnost	<b>A5</b>	%	min 17
Tvrdost		HB	max 225
Kontrakce	<b>Z</b>	%	
Modul pružnosti v tahu	<b>E</b>	GPa	211
Modul pružnosti ve smyku	<b>G</b>	GPa	79

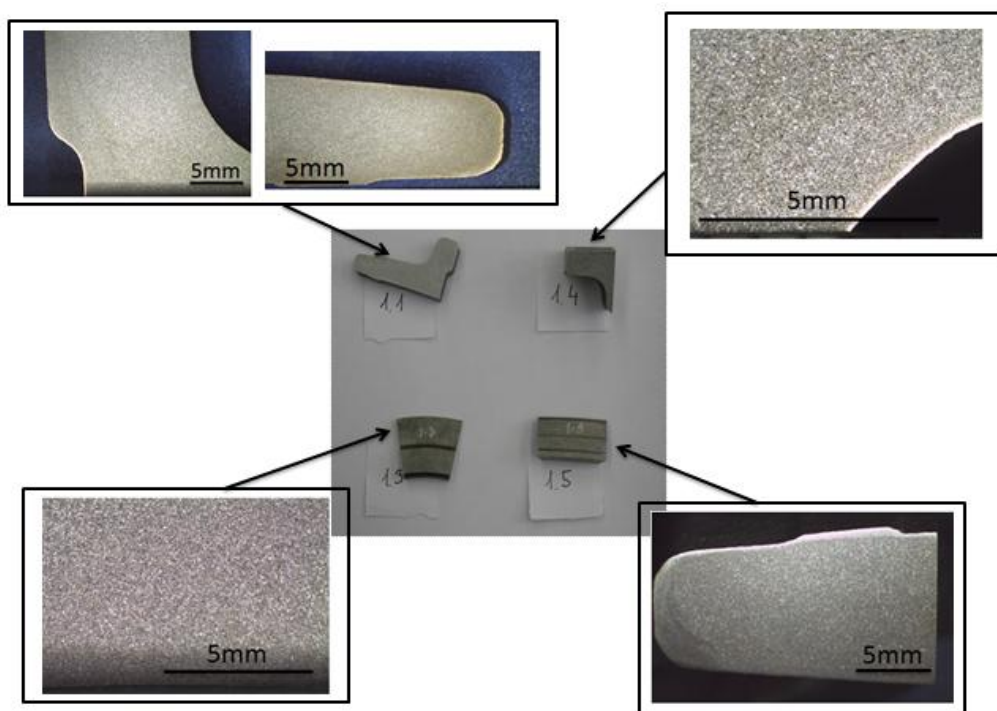
Tab. 4.2 Mechanické vlastnosti mat. C45

### Vyhodnocení makrostruktury výkovku – výchozí stav

Ke komplexnímu zmapování klíčových oblastí výkovku byl výkovek rozřezán na části (Obr. 4.4) Tyto části byly vybroušeny, vyleštěny a následně naleptány (ředěná lučavka královská) na makrostrukturu. Makrostruktura byla nafocena na stereolupě. Na snímcích makrostruktury je patrná homogenita materiálu ve všech místech výkovku. Nebyly zde patrné žádné vady jako např. trhliny, zakované okraje nebo nezaběhnutí materiálu do zápustky (Obr. 4.5)



Obr. 4.4 Dokumentace rozřezaného výkovku pro hodnocení makrostruktury

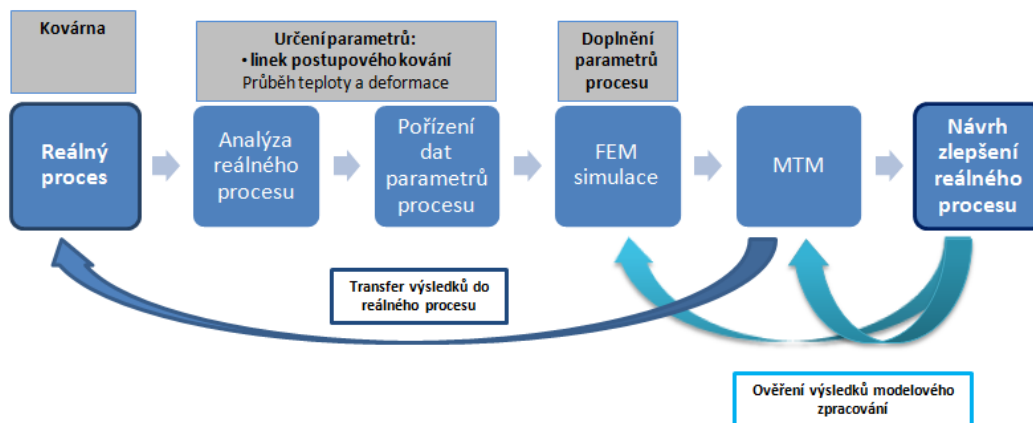


Obr. 4.5 Makrostruktura v jednotlivých částech výkovku

### 4.3 Materiálově- technologický model brzdového bubnu

V první etapě byl vytvořen materiálově-technologický model výkovku. Byl vytvořen dle metodiky popsané v teoretické části. Prvním krokem byla tedy analýza procesu a následné pořízení dat parametrů procesu. Ke stanovení rozsahu materiálově-technologického modelu

byla využita FEM simulace, která poskytla přehled o průběhu teplot a skutečných logaritmických deformacích v daném místě výkovku v určitý časový okamžik. Dalším krokem byla transformace dat a vytvoření programu pro termomechanický simulátor. Poté se daný program odzkoušel na vzorku ze shodného materiálu jako výkovek. Po provedení nasimulované technologie kování a následného tepelného zpracování byla vyhodnocena struktura a mechanické vlastnosti namodelovaného vzorku. Posledním krokem bylo ověření shody mezi reálným výkovkem a modelem. Celý tento proces je graficky znázorněn na obrázku Obr. 4.6



Obr. 4.6 Proces tvorby materiálově-technologického modelu

#### 4.3.1 Analýza reálného procesu - zápusťkové kování výkovku a tepelné zpracování

Pro ucelený popis technologie procesu zápusťkového kování bylo nutné zmapování reálných teplot v průběhu jednotlivých operací, jak pro proces kování, ostříhu tak i pro proces chladnutí výkovků na dopravníku. Všechny teploty byly naměřeny pomocí pyrometru a termokamery. Naměřené údaje sloužili jako vstupní informace pro tvorbu FEM simulací. Všechny tyto informace byly následně zahrnuty v materiálově-technologickém modelu výkovku. V technologii procesu zápusťkového kování byl kladen velký důraz na soulad geometrie výkovků, materiálových požadavků a tvářecího a ochlazovacího procesu. Technologický postup bylo nutno v celém rozsahu velmi přesně monitorovat. V prvním kroku byl při procesu zápusťkového kování daný materiál ohřát na kovací teplotu. Za kovací teplotu se považuje teplota austenitizace. Aby došlo k úplnému rozpuštění karbidů, musí být jak teplota, tak i setrvání na této teplotě dostatečné. Zároveň však nesmí dojít k výraznému růstu austenitického zrna. Pro ohřev polotovaru byl využit indukční způsob ohřevu, jehož nespornou výhodou je především jeho rychlost, rovnoměrnost a také efektivnější kontrola. Při volbě teploty je nutné brát v potaz interval kovacích teplot, který je závislý na chemickém složení materiálu, zejména obsahu uhlíku. Pro horní hranici je důležité nepřekročení kovací teploty, při které by v materiálu docházelo k natavení nízko tavitelných strukturních složek a naopak dolní hranice teploty nesmí poklesnout natolik, že by se deformační odpor neúměrně zvýšil. Ideální teplota pro zvolený výkovek z materiálu C45 byla stanovena na 1235°C. Zatímco minimální teplota vstupního materiálu musí dosahovat 1210°C. Při překročení maximální teploty 1260°C je materiál přehřátý a nechává se šrotovat.

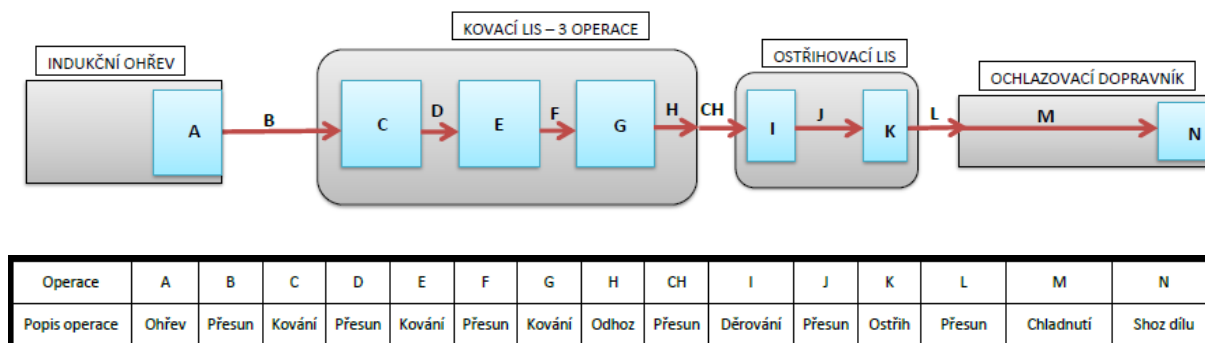
Po ohřevu polotovaru následuje kování na hydraulickém lisu LVH 2500 (Obr. 4.7), které bylo rozděleno do 3 operací a to na přechování, předkování a dokování. Zápustkové kování je typické svým malým počtem operací.



Obr. 4.7 Kovací lis (vlevo) a ostřihovací lis (vpravo)

Obr. 4.8 Ostřihovací lis a vychlazovací dopravník (vpravo)

Po dokování byl výkovek přesunut na ostřihovací lis typu LU400 (Obr. 4.8), kde byla nejprve provedena operace děrování výkovku a následné odštížení výrobků. Posledním procesem, který byl v kovárně VIVA zmapován, byl proces chlazení výkovků na ochlazovacím dopravníku. Celý postup zpracování reálného výkovků je graficky znázorněn na obrázku Obr. 4.9



Obr. 4.9 Proces zápustkového kování

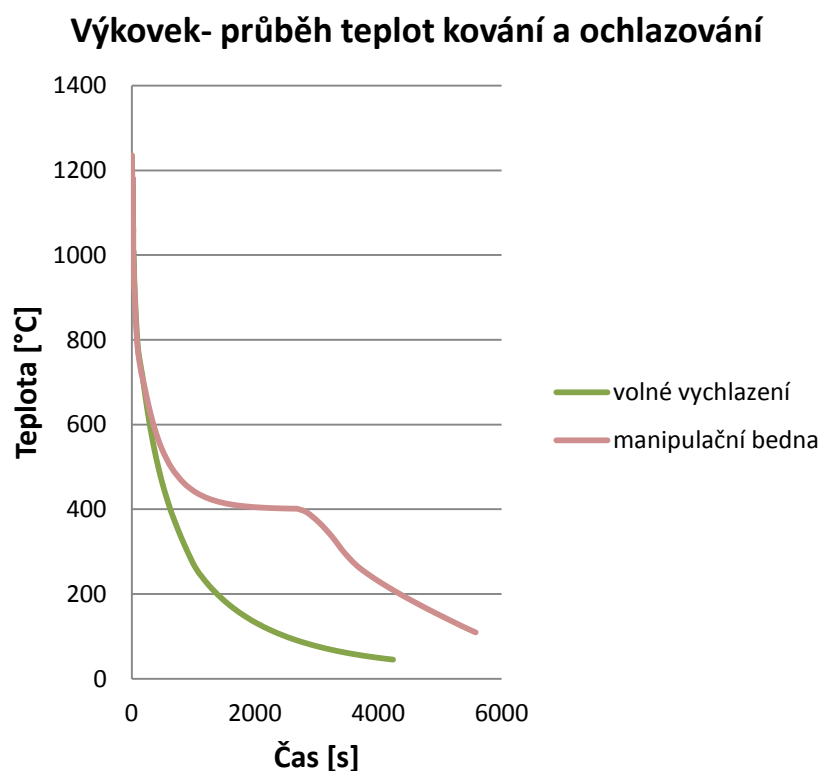
Po proběhnutí všech tvářecích operací a následném vychlazení výkovku na teplotu okolí bylo nutno, z důvodů nevyhovující struktury výkovku a mechanické vlastností, výkovky tepelně zpracovat a to normalizačně žíhat. Proto dalším zařízením, které bylo využito, byly austenitizační pece. Jedná se o průběžné 4 zónové pece, které jsou součástí linek následného tepelného zpracování výkovků.



#### 4.3.2 Pořízení dat parametrů procesu – průběh teplot a deformací

Po vyhodnocení všech výsledků naměřených teplot byly vytvořeny grafy závislosti teplot na čase v jednotlivých bodech výkovku, jak pro proces kování a volného ochlazení na vzduchu nebo v manipulační bedně, tak i pro následné normalizační žihání.

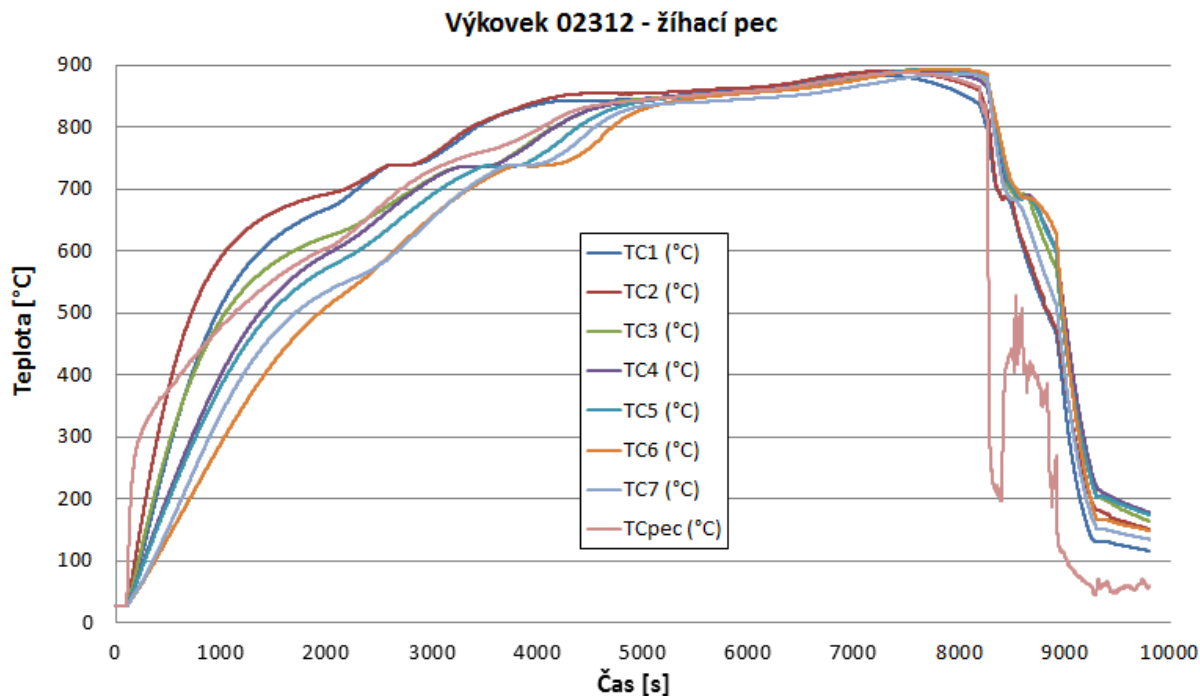
Teplota při kování a následném ochlazování byla měřena pomocí pyrometru a termokamery. Z termokamery a pyrometru vznikl teplotní záznam (Obr. 4.10). Data pořízená z těchto zařízení byla použita pro FEM simulace, tak aby bylo možné stanovit teplotní průběh v jednotlivých bodech uvnitř výkovku. Výkovky, které byly na ochlazovacím dopravníku bez manipulační bedny, chladly rovnoměrněji a rychleji. Doba chladnutí těchto výkovků byla cca 4000s něco přes 1h. Na rozdíl od výkovků, které byly umístěny do manipulační bedny. U těchto výkovků docházelo k rovnoměrnému chladnutí do teploty okolo 400°C při této teplotě došlo k prodlevě na cca.17min. Důvodem bylo naakumulování tepla z výkovků, které byly naskládány na sobě. Po této prodlevě se materiál následně rovnoměrně ochlazoval na pokojovou teplotu. Celý tento proces trval přibližně 6000s tedy okolo 1h 40min. V programu pro materiálově-technologický model bylo pracováno pouze s teplotou volně vychlazených výkovků. Průběh teplot v manipulační bedně byl naměřen především z důvodů informativních. Naměřená data průběhu teplot při ochlazování výkovků v manipulační bedně, by mohla posloužit k tvorbě dalších materiálově-technologických modelů.



Obr. 4.10 Průběh teplot kování a následné ochlazování na vzduchu ve všech bodech. Zdroj FEM simulace výkovku ve vybraných bodech.

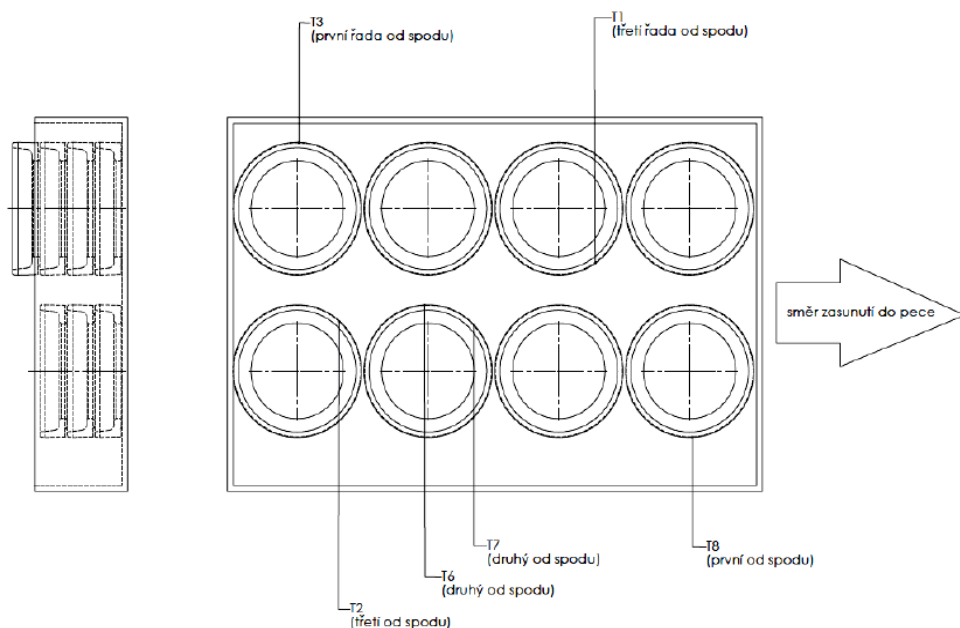
Na rozdíl od teplot měřených při procesu tváření byla teplota na výkovicích, při normalizačním žihání, měřena pomocí termo-izolačního boxu s termočláanky. Výkovky byly

normalizačně žíhány na teplotu 840-880°C s rychlostí ohřevu 10°C/min (Obr. 4.11). Po vyrovnání teplot na všech výkovech následovala prodleva 50min na teplotě. Posléze byly výkovky vyjmuty z pece a ochlazeny na vzduchu. Naměřené teploty byly zahrnuty v materiálově-technologickém modelu.



Obr. 4.11 Průběh teplot při normalizačním žíhání výkovek naměřených na vybraných termočláncích

Pro měření bylo využito inconelových termočlánců. Termočlánci byly přichyceny k různým částem výkovek v definovaných navrtaných otvorech (Obr. 4.13). Rozložení výkovek a umístění jednotlivých termočlánců je naznačeno na obrázku Obr. 4.12



Obr. 4.12 Definovaná místa termočlánců ve vsázkovém koši (manipulační bedna)



Obr. 4.13 Umístění termočlánků na výkovicích

Pro vyhodnocení dat byl využit termo-izolační box s datovou sběrnicí, do které byly přivedeny studené konce termočlánků. Tento box projížděl v peci společně se vsázkovým košem naplněným výkovky. Termo-izolační box byl tvořen ocelovou schránkou, ve které byla umístěna datová sběrnice. Schránka byla obklopena tuhou žáruvzdornou izolací a vodními tanky s výfuky. Celý box byl obalen v Sibralu (Obr. 4.14)



Obr. 4.14 Termo-izolační box

Vzhledem k tomu, že bylo zjištěno, že homogoneta teplotního pole uvnitř pece je termo-izolačním boxem narušena, byl pro naměření správných tepotních průběhů mezi ním a vsázkovým košem s výkovky umístěn jeden koš s ocelovým šrotem nahrazujícím skutečně zpracovávanou produkci.

Poté, co byly naměřeny všechny teplotní průběhy, je dalším krokem pro ucelený popis technologie, znát výrobní postu výkovku. Průběh skutečných deformací v jednotlivých místech výkovku lze stanovit pouze za využití simulace a modelování. V reálném procesu jsou tyto hodnoty nezjistitelné. Pro program DEFORM, ve kterém byl celý proces kování nasimulován, byly důležitými vstupními hodnotami, geometrické parametry nástroje a

polotovaru, dále materiálové vlastnosti polotovaru a procesní parametry. Mezi procesní parametry jsou zahrnuty pohyb nástroje a polotovaru, samotná geometrie vstupního polotovaru a mazání zápustek. Je také nutné znát hmotnost soustavy beran-zápustka. U lisu byly známy jednotlivé parametry a to rychlosti lisu, maximální síla, kterou je lis schopen vyvodit a rozsah zdvihu lisu. Pro každý výkovek je vytvořen přesný pracovní postup (Obr. 4.15). V tomto postupu jsou definovány jednotlivé kroky i s předehřevem zápustek.

<b>Sevření ostříhovacího lisu</b> při dolní úvra <b>560</b> ± 2mm ✓ ! <b>Pozor!</b> na rozevření lisu - montáž nářadí dle Pokynů VP 062					
<b>Předehřev zápustek:</b> Předkovací a dokovací zápustky předehřívát po montáži a přerušení práce hořáky na : <b>200</b> ± 50°C					
<b>Ohřev polotovaru:</b>		<b>Mazivo:</b>			
Přehřátý materiál	nad teplotu 1275°C šrotovat !	Označení: směrnice VP 061 skupin: 1			
Maximální teplota	### [°C]	Poměr ředění: viz výše uvedená směrnice			
Optimální teplota	<b>1235</b> [°C]				
Minimální teplota	### [°C]				
Nedohřátý materiál	lze opakovaně použít	<b>Kontrola výkrovku se provádí dle pokynu VP 063</b>			
		Úroveň kontroly: <b>A</b>			
<b>Postup tváření: Program 57 LAY OUT pracoviště L10-2LVH 2500 viz Rámcová návodka VF E</b>					
pořadí operací	stroj	ozn. nářadí	energie (kJ) orientace	kontrolní rozměry	poznámka
pěchování		07-0008 s úkošem	174	kontrolní výška pěchu - žhavý: <b>19</b> mm	Pěchovat ve svislé poloze s dosednutím na drážky
předkování	L10 LVH 2500	z110	200	žhavý: MAX: 60,8 mm 59,6 MIN: 58,4 mm středový: MAX: 60,2 mm 59,0 MIN: 57,8 mm (odpovídá 53,0 po dokování kontrolní rozměr viz nastavení)	Kontrolní rozměr při vyplnění dutiny. <b>Konstruováno na nedotečení.</b> Ustavit pěch do dutiny bez vůle
dokování		z110	110		
děrování		d6			Děrovat bílou dolů Po vyděrování otočit o 180°
ostříhování	LU400	o6		žhavý: MAX: 54,8 mm 53,6 MIN: 52,4 mm středový: MAX: 54,2 mm 53,0 MIN: 51,8 mm	Ostříhovat bílou nahoru

Obr. 4.15 Pracovní postup pro výkovek

### 4.3.3 FEM simulace zápustkového kování brzdového bubnu

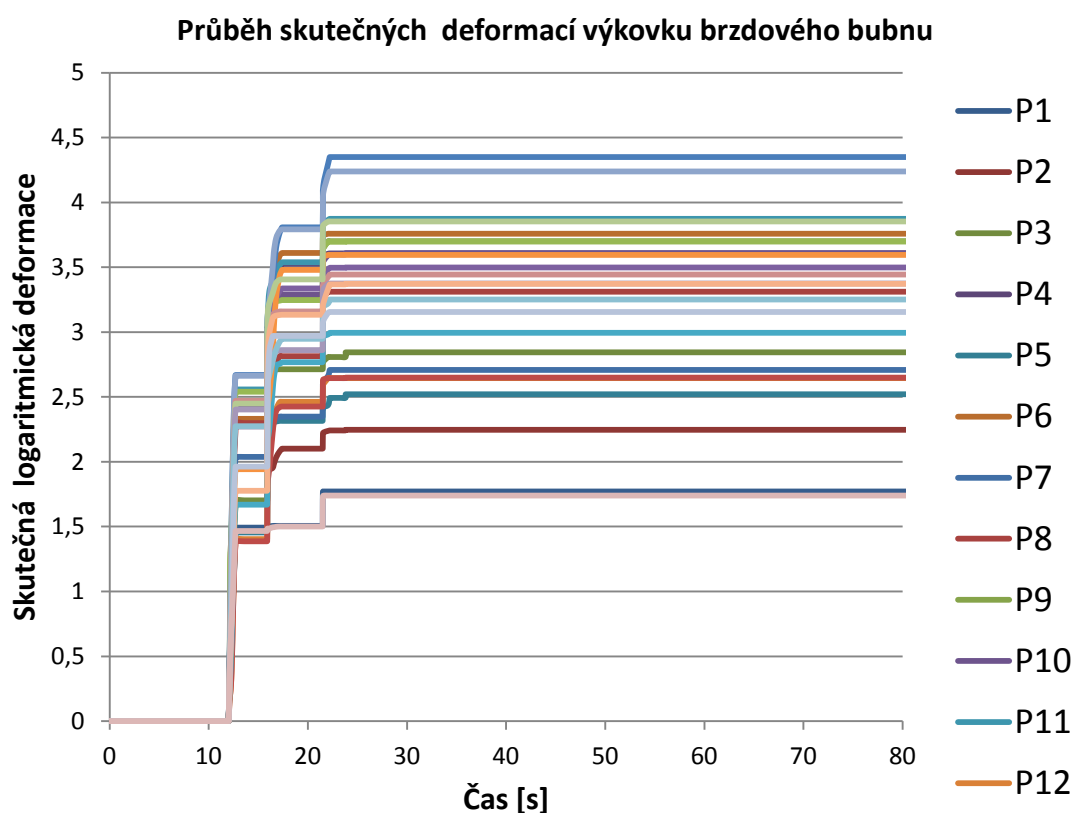
FEM simulace představují účinný nástroj poskytující informace o jinak technicky neměřitelných parametrech, jako průběhu deformací a teplot v konkrétních oblastech výkrovku, které jsou však z hlediska návrhu materiálově-technologického modelování nezbytné znát. Pro jejich výpočet byl využit software DEFORM 3D, program zaměřený na procesy tváření a tepelného zpracování. FEM simulace byly zhotoveny ve spolupráci s firmou COMTES FHT a.s. Výpočty FEM simulací byly založeny na datech pořízených z měření v reálném provozu, již popsáném v předešlé kapitole. Vstupními daty pro FEM simulace jsou reálné teploty naměřené na výkovicích, jak pomocí pyrometru a termokamery při procesu kování, tak pomocí termo-izolačního boxu při následném tepelném zpracování. Tyto data jsou v přesném časovém sledu jednotlivých operací zápustkového kování výkrovků. Na daném výkrovku byl proto vytvořen úplný záznam teplot a časů mezi jednotlivými operacemi. Jako časový záznam pro operace prováděné v loži kovacího lisu byl využit elektronicky ukládaný záznam jednotlivých zdvihů beranu lisu. Důležitými informacemi pro komplexní popsání celého procesu zápustkového kování jsou i mechanické a termo-fyzikální vlastnosti

samotného materiálu výkovku. Součástí programu DEFORM je materiálová knihovna obsahující všechny potřebné informace o vlastnostech zvoleného materiálu.

Všechna data, jak naměřená z reálného provozu, tak ta která nám poskytl program DEFORM, byla získána za účelem přesného materiálově-technologického modelu. Výpočty FEM simulace poskytly informace o časovém průběhu teplot a deformací v konkrétních místech průřezu výkovku ( Obr. 4.16 a Obr. 4.17). Na výkovku bylo definováno 26 bodů P1- P26 (Obr. 4.19). Díky všem těmto naměřeným a vypočteným hodnotám materiálově-technologický model věrně popisuje chování materiálu při tváření a následném tepelném zpracování. Do simulace nebyly zahrnuty konečné operace děrování a následné odstřížení výrobků. A to z důvodů velmi malých, zanedbatelných, vnesených deformací. Proto tvářecími operacemi, na které se bude práce zaměřovat, jsou operace pýchování, předkování a dokování.

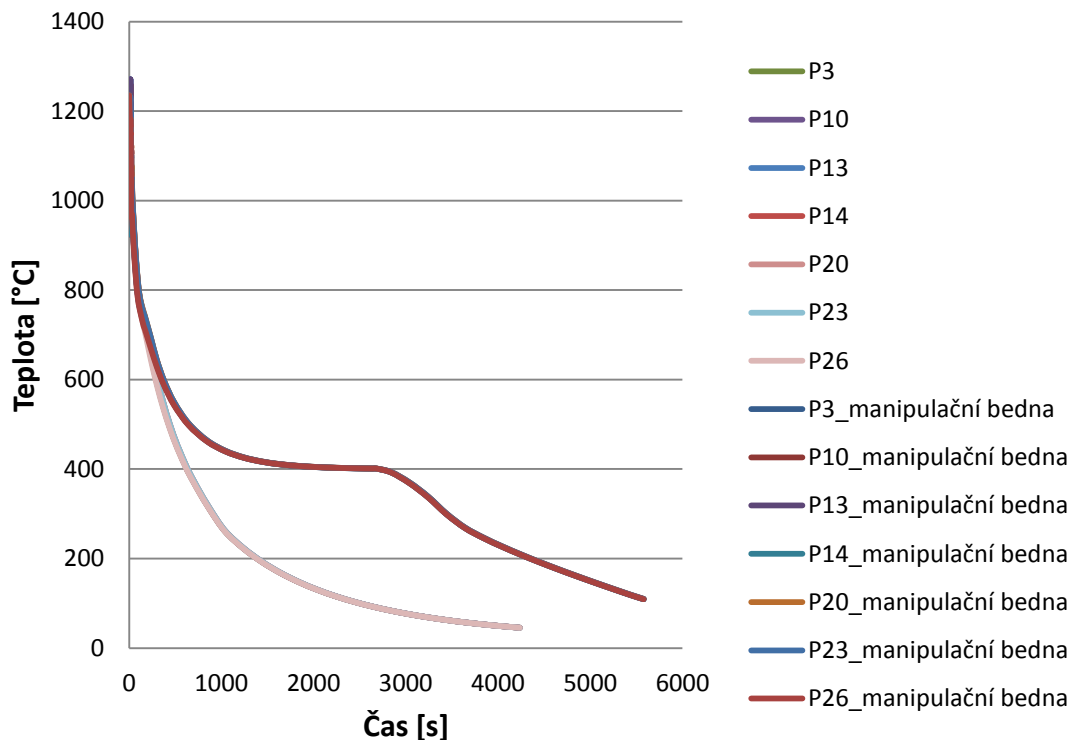
Po domluvě s kovárnou VIVA a.s. a odběratelem daného výkovku byly, jako referenční body, definovány bod P10 a P26. Tyto body byly vybrány z několika důvodů a to z důvodu umístění bodů na výkovku, celkové vnesené deformaci při tváření a dále v těchto bodech docházelo k občasnému výskytu vad v podobě trhlin.

Z FEM simulace byla pro všechny body získána závislost skutečné logaritmické deformace na čase (Obr. 4.16). Dle vytvořené simulace byl bod s největší vnesenou deformací 4,35 bod P13 naproti tomu bod s nejnižší vnesenou deformací 1,74 byl vybrán bod P26. Bod P10 byl zástupce skupiny bodů v kategorii vyšších hodnot vnesené deformace, kdy pro bod P10 byla konkrétní hodnota vnesené deformace 3,60. Druhým představitelem z opačné kategorie bodů s nižší hodnotou vnesené deformace, bod P26 dosahující pouze hodnoty 1,74.



Obr. 4.16 FEM simulace, výkovek - průběh skutečné logaritmické deformace ve všech bodech

**Výkovek- průběh teplot kování a ochlazování**

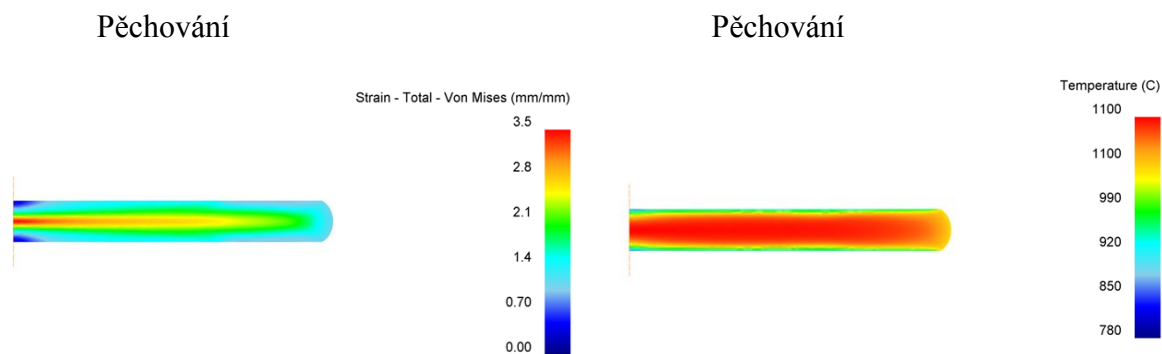


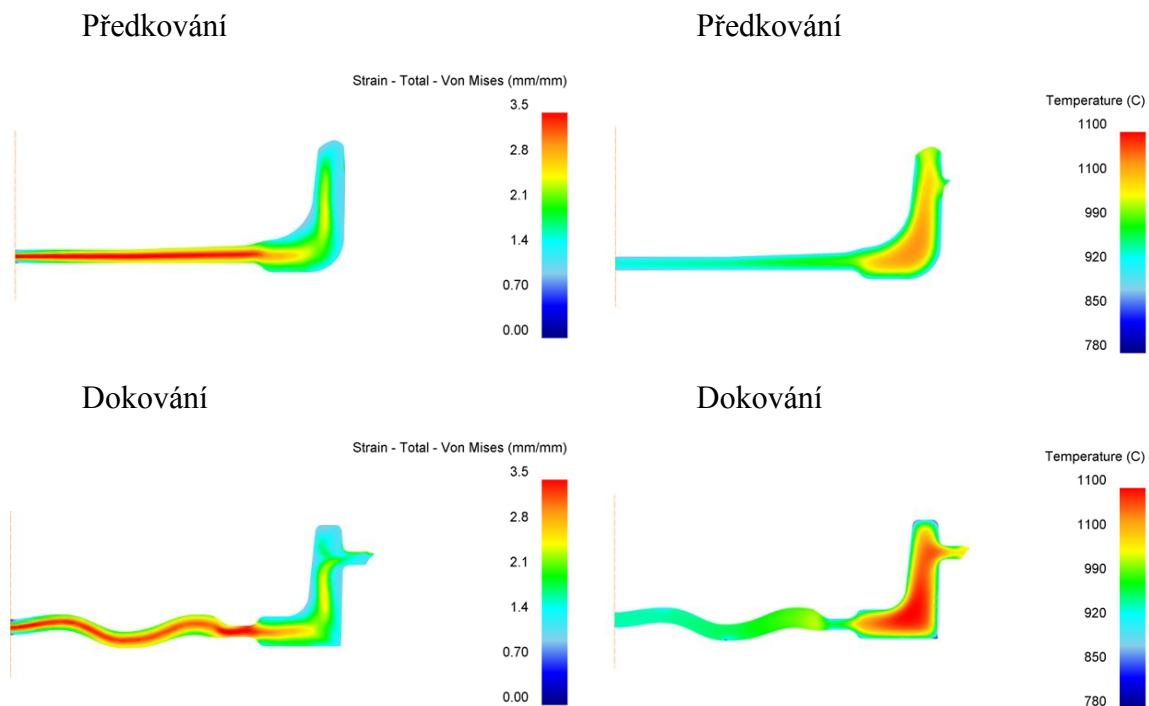
Obr. 4.17 FEM simulace, výkovek - průběh teplot v jednotlivých bodech výkovku

Na obrázcích Obr. 4.18 a Obr. 4.19 jsou blíže popsány jednotlivé kroky procesu kování. Kdy při každém kroku je do materiálu vnesena skutečná logaritmická deformace a to, jak pro proces pēchování, předkování, tak pro konečné dokování. Skutečná logaritmická deformace je vyjádřena vzorcem  $\varphi = \ln \frac{l_1}{l_0}$ . Kdy  $l_1$  je rozměr tělesa po deformaci a  $l_0$  je hodnota rozměru tělesa před deformací. Důležitými vstupními parametry pro vytvoření materiálově-technologického modelu je i průběh teplot při jednotlivých operacích pro zvolené body P10 a P26.(Obr. 4.17, Obr. 4.11)

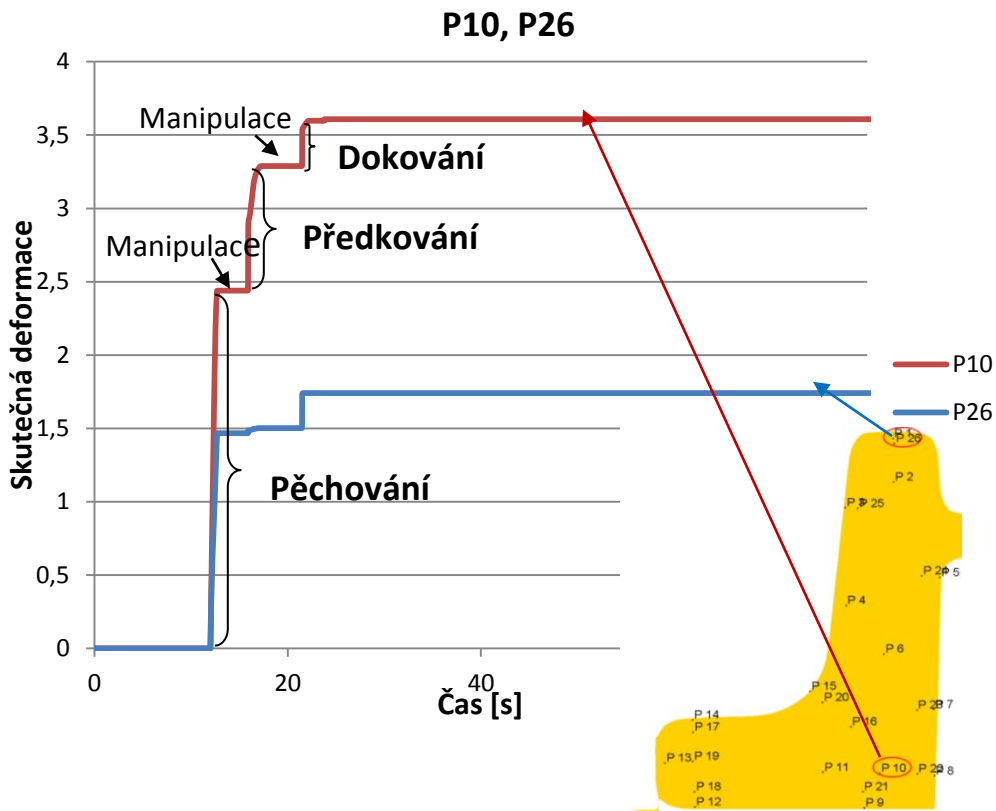
**Rozložení celkové deformace**

**Rozložení teploty**





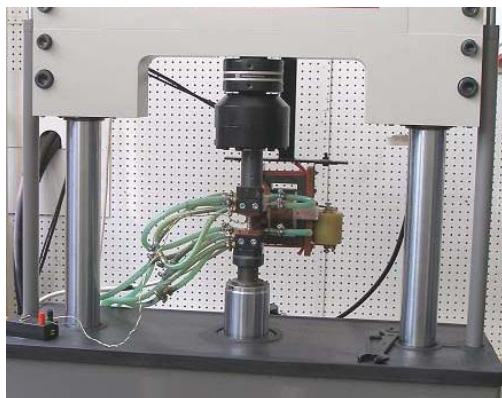
Obr. 4.18 Rozložení deformace a teploty v řezu v rovině kolmé na osu y, během procesu pēchování, předkování, dokování



Obr. 4.19 FEM simulace, výkovek - průběh skutečné logaritmické deformace ve vybraných bodech průřezu P10, P26

#### 4.3.4 Transformace dat a vytvoření programu pro termomechanický simulátor

Materiálově-technologické modelování bylo provedeno pomocí termomechanického simulátoru (Obr. 4.20)



Obr. 4.20 Termomechanický simulátor

Jedná se o zařízení zaručující přesné řízení a monitorování předepsaných parametrů termomechanického zpracování. Simulátor se skládá ze tří hlavních součástí. Základem je elektrohydraulický zkušební systém MTS FlexTestSE umožňující maximální zatížení 50kN při rychlostech aktuátoru až 3m/s. Tento systém se stará o mechanické zatěžování testovaného vzorku a zároveň funguje jako hlavní řídicí část celého zařízení. S dalšími dvěma subsystemy, které mají na starost řízení teploty vzorku, obousměrně komunikuje.

Druhým subsystemem je systém ohřevu vzorku. Ten je založen na principu vysokofrekvenčního odporového ohřevu vzorku. Systém je napájen 230V/16A, maximální proud protékající vzorkem dosahuje 1kA. Regulovanými veličinami jsou proud a frekvence. Zpětná vazba je zprostředkována pomocí termočlánku připevněného na testovaném vzorku. Maximální výkon systému 3kW umožňuje řízený ohřev vzorků s maximálními rychlostmi dosahujícími přes 500°C/s v závislosti na zkoušeném materiálu a tvaru zkušebního vzorku.

Třetím subsystemem simulátoru je systém chlazení. Jedná se o zpětnovazební systém úzce spolupracující se systémem ohřevu. Systém ohřevu digitálně posílá aktuální hodnoty teploty vzorku a teploty požadované. V případě, že teplota vzorku je nižší než teplota požadovaná, je aktivován ohřev, v opačném případě je automaticky aktivován systém chlazení. Jako chladicí médium se používá směs vzduchu a vody s proměnným poměrem a proměnou intenzitou. Maximální řízené chladicí rychlosti dosahují 100°C/s.

Regulátory obou systémů chlazení i ohřevu vzájemně komunikují a udržují předem zadaný průběh teploty vzorku během celého procesu zcela autonomně bez nutnosti zásahu obsluhy. Díky všem výše popsaným systémům je termomechanický simulátor schopen přesně řídit a monitorovat předepsané parametry termomechanického zpracování. Jeho reakční časy odpovídají požadavkům na dodržení vysokých rychlostí deformace (časy tvářecích operací se pohybují v setinách sekundy). Stejný požadavek jsou kladen i na řízení teploty.

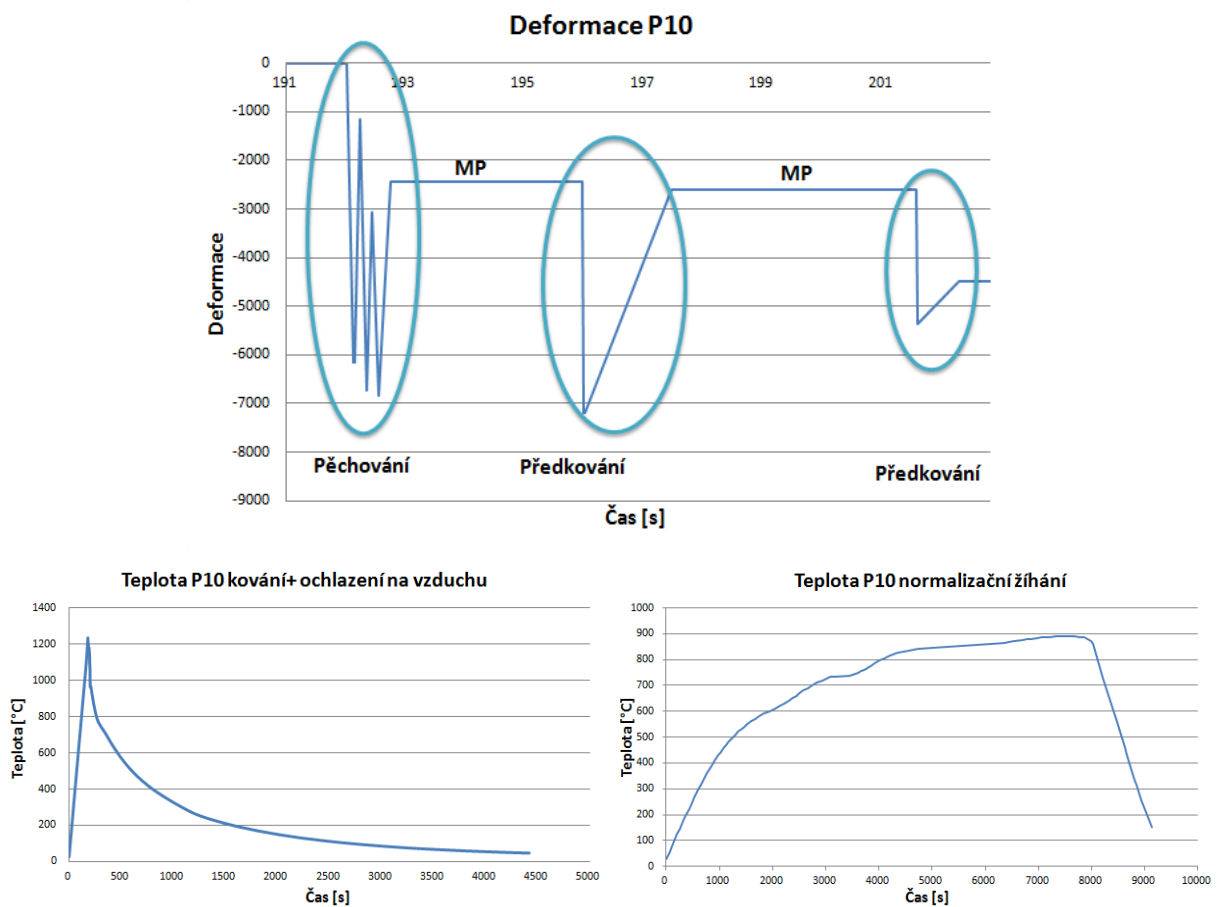
Pro každý test se v řídicím systému simulátoru připraví procedura s definicí deformačního procesu, průběhu teplot, rychlostí logování, atd. Řídicí systém se pak stará o mechanické zatěžování vzorku, průběžné zobrazování dat a logování. Pomocí analogové výstupní linky posílá aktuální požadovanou teplotu řídicí jednotce ohřevu. Ta zabezpečuje ohřev vzorku na požadovanou teplotu. Pro účely zobrazování a logování je aktuální teplota vzorku odesílána do řídicí jednotky opět analogovou linkou. Dodržování požadované teploty je záležitostí spolupráce systému ohřevu a chlazení, přičemž oba systémy vždy pracují jen s aktuálními hodnotami teplot, požadované a skutečné.



### Vytvořený program pro termomechanický simulátor

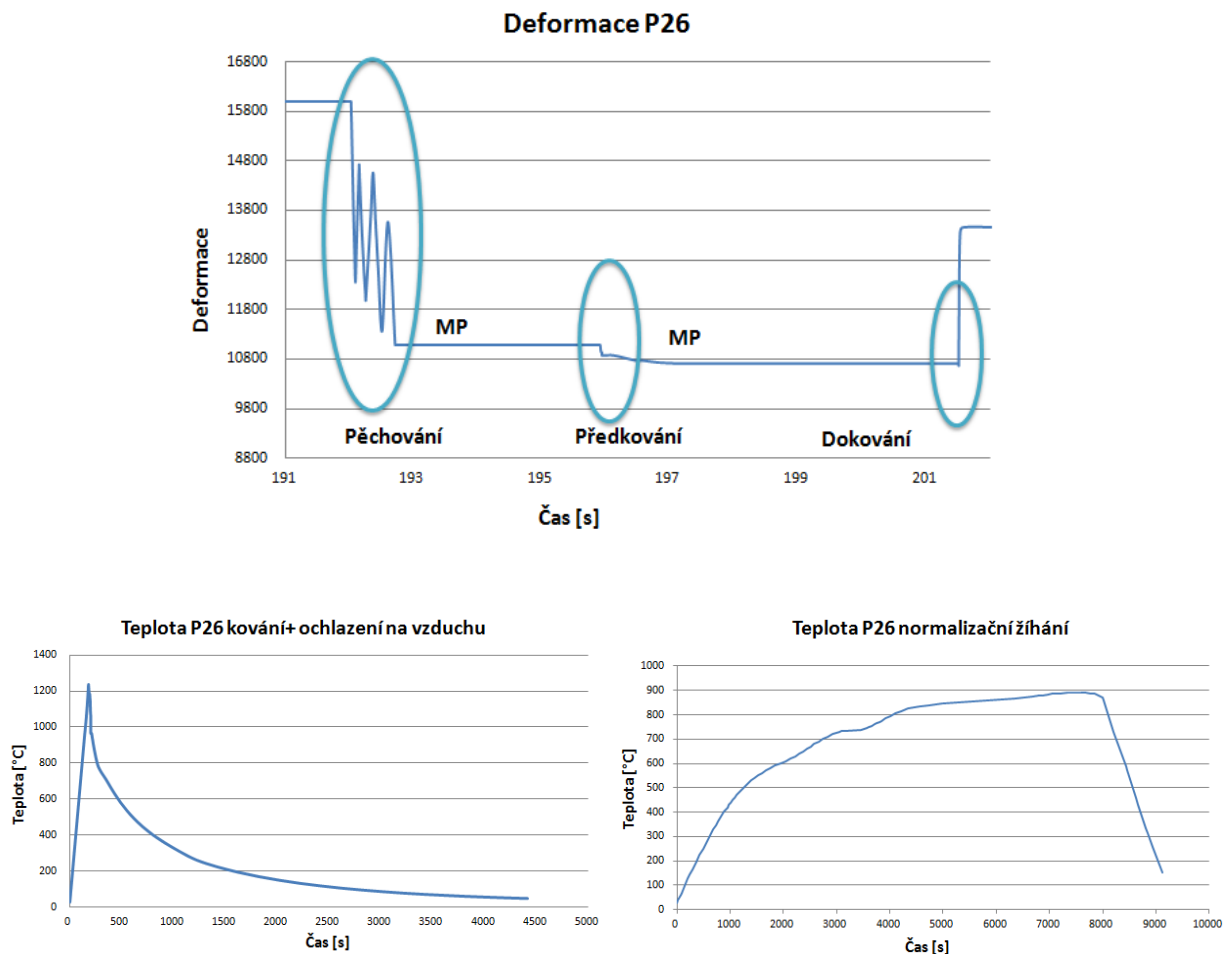
Modelovány byly tvářecí operace pěchování, předkování a dokování záпустkového výkovku. Pro jednotlivé operace byly uvažovány všechny relevantní manipulační časy. Tvorba materiálově-technologického modelu tvářecích operací výkovku vycházela z postupu, který byl popsán v kapitole analýza reálného procesu. Modelování bylo založeno na výpočtech FEM simulace. V případě námi zvoleného výkovku bylo modelování provedeno nejprve v bodě P10. Hlavním úkolem při materiálově-technologickém modelování byl tedy přepočít skutečné logaritmické deformace z FEM simulace (Obr. 4.19) na pohyb příčnicku termomechanického simulátoru s daným teplotním průběhem (Obr. 4.21 a Obr. 4.22).

Primárním cílem materiálově-technologického modelování bylo vnést celkovou sumu skutečné energie, jak už deformační, tak i teplotní do vzorku z reálného materiálu v čase odpovídajícím konkrétním procesům záпустkového kování. Tato deformace byla přepočítána na posun ve svislé ose simulátoru (ose y). Zatímco časové prodlevy mezi jednotlivými tvářecími operacemi byly v řádu sekund, rychlost samotných tvářecích operací byla v řádu setin sekundy. Uřídit tedy celý proces bylo technicky velmi náročné. Zejména proto, že při větších hodnotách deformace v jedné tvářecí operaci nebylo možné, aby byla vnesena v jednom úběru. Při kumulaci takto velkých deformací by mohlo dojít k destrukci vzorku. Proto byla deformace rozdělena na tahovou a tlakovou složku. To vyžadovalo velmi rychlou reakci a nastavení programu simulátoru tak, aby byl co nejpřesněji dodržen čas a rychlost deformace.



Obr. 4.21 Ukázka zpracování dat z FEM simulace pro materiálově-technologické modelování výkovku, bod P10 (poznámka MP – manipulace), chlazení výkovků a následné normalizační žíhání

Pro zvolený bod P10 dosahovala celková hodnota logaritmické deformace dle FEM simulace hodnoty  $\phi P10=3,6$ . K nejvyššímu nárůstu deformace došlo v první operaci, pēchování. Přírůstek deformace v tomto kroku představoval 67% celkové deformace. Při tvorbě řídicího programu pro termomechanický simulátor musela být, s ohledem na stabilitu zkušebního tělesa, deformace na první operaci pēchování rozdělena v systému tlak/tah do tří kroků. Pro operace pēdkování a dokování stačil pouze jeden krok (tah/tlak). Operace děrování nebyla při tvorbě programu pro systém řízení termomechanického simulátoru zahrnuta. Uvažovány tedy byly operace pēchování, pēdkování a dokování. Všechny tyto operace i s manipulací jsou provedeny na termomechanickém simulátoru během 10s.



Obr. 4.22 Ukázka zpracování dat z FEM simulace pro materiálově-technologické modelování výkovku, bod P26 (poznámka MP – manipulace), volné chladnutí výkovků a následné tepelné zpracování

Druhým experimentálním bodem z kategorie bodů s nižší hodnotou vnesené deformace je bod P26. V tomto bodě byla celková hodnota logaritmické deformace dle FEM simulace  $\phi P26=1,74$ . Stejně jako u předešlého bodu došlo k nejvyššímu nárůstu deformace v operaci pēchování. Avšak v první operaci pēchování byla vnesena deformace v systému tah/tlak do 3,5 kroků. Jak je zřejmé z grafu průběhu deformace, pro první až třetí krok byla využita dvojice deformací tah/tlak pro poslední půl krok je využita deformace tahová. Díky umístění tohoto bodu jsou následné deformace u operací pēdkování a dokování oproti operaci

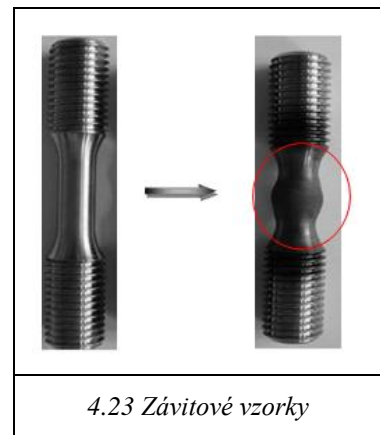
pěchování velmi malé. Oba body byly ochlazovány z dokovací teploty dle křivky odpovídající volnému ochlazování výkovků na vzduchu.

Po vytvoření modelu celého procesu kování složeného z jednotlivých operací (pěchování, předkování, dokování) byl připraven i druhý model. U druhého modelu následného tepelného zpracování, v tomto případě normalizačního žíhání.

Materiál pro výrobu závitových vzorků pro termomechanický simulátor, byl hutní materiál zajištěný z dodávek pro kovárnu Viva a.s. Tento materiál byl dále překován na tyče o průměru cca. 20 mm a normalizačně žíhán. materiálově-technologickMikrostruktura a mechanické vlastnosti byly hodnoceny ze středu závitových vzorků.

#### 4.3.5 Vyhodnocení a porovnání shody modelu a reálného výkovku

Po odzkoušení materiálově-technologického modelu zápusťkového kování pomocí termomechanického simulátoru byly, jak výkovky, tak modely (závitové vzorky) rozřezány ve stanovených oblastech (Obr. 4.23). Výkovek v oblasti bodu P10 a P26 a odpovídající modelové závitové vzorky ve střední části. Následně byly vzorky analyzovány na světelném mikroskopu. V případě nejednoznačnosti struktury na světelném mikroskopu byly vzorky nafoceny i na elektronovém skenovacím mikroskopu. K leptání vzorků byl použit 3 % Nital.



4.23 Závitové vzorky

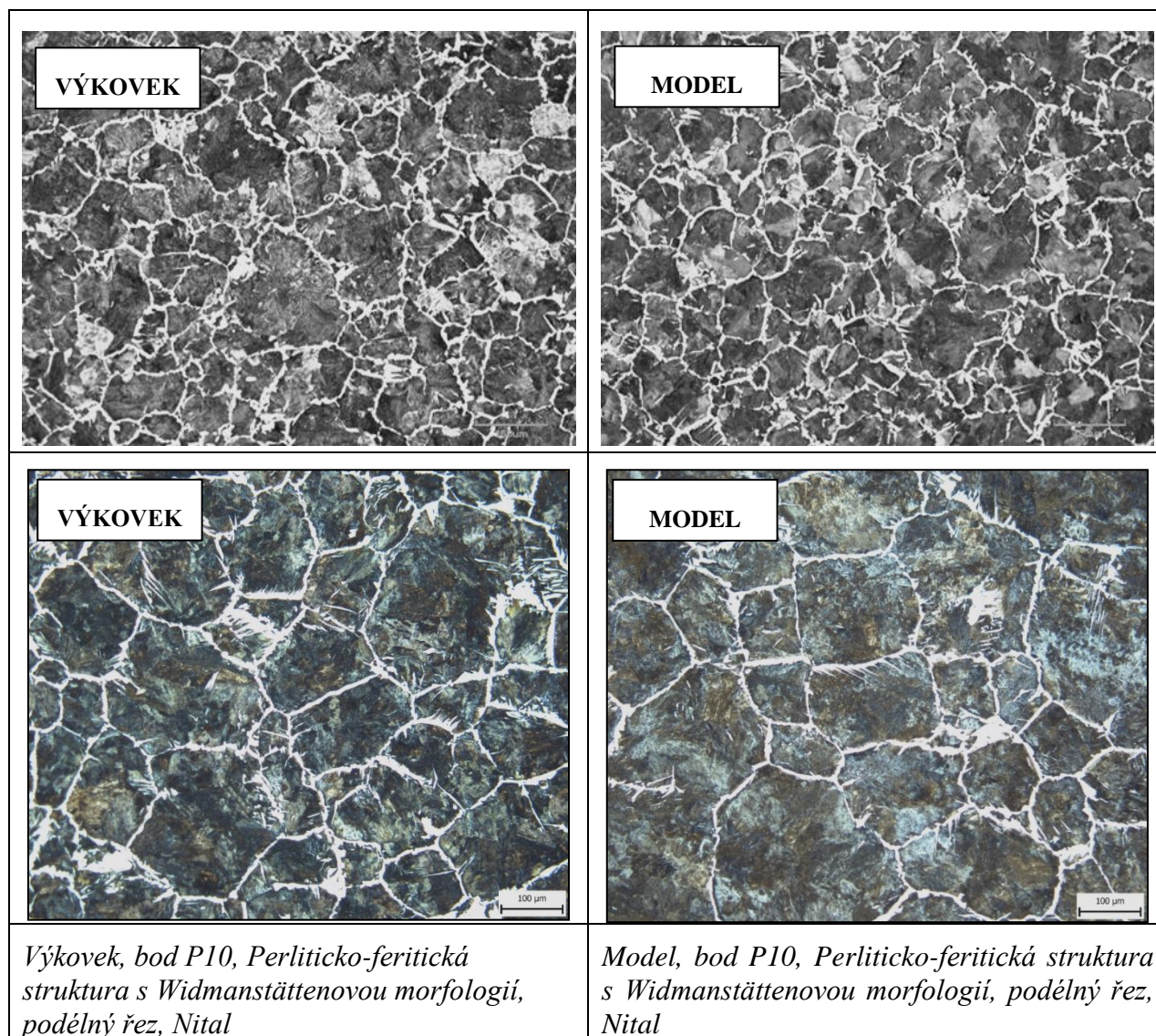
##### 4.3.5.1 Porovnání výkovku a modelu v bodě P10 Materiál C45

V první kroku byla nafocena mikrostruktura výkovku a modelu ve zvoleném bodě P10. Jednalo se o výkovek a model po volném vychlazení z kovací teploty bez normalizačního žíhání. Simulace a její výsledky sloužily k ověření správnosti programu pro termomechanický simulátor pro průběh teplot a deformací při samotném kování. Dalším krokem bylo nasimulování kompletního procesu kování s ochlazováním výkovku na vzduchu a následným tepelným zpracováním - normalizačním žíháním.

Mikrostruktura výkovku bez tepelného zpracování byla tvořena nežádoucí Widmannstättenovou feritickou strukturou a perlitem. Tato struktura předchází perlitické přeměně, jedná se o tzv. proeutektoidní přeměnu sekundárního cementitu. Výskyt feritu s takovouto morfologií, ve formě desek nebo jehlic, je podporován vyšší ochlazovací rychlostí a hrubozrnným austenitickým zrnem. Za těchto podmínek probíhá vylučování feritu po štěpných plochách austenitických zrn a tvoří se v nich feritické „šipky“. Widmannstättenův ferit vzniká vždy intergranulárně, tedy na hranicích zrn austenitu. Widmannstättenova struktura je příčinou velké křehkosti oceli. Widmannstättenovu strukturu lze eliminovat následným normalizačním žíháním.

Posléze byla nafocena středová oblast rozříznutého závitového vzorku zpracovaného modelem na termomechanickém simulátoru (Obr. 4.24) Bylo zjištěno, že charakter struktury je totožný a struktura byla opět tvořena nežádoucí Widmannstättenovou strukturou a perlitem.

V tomto případě byla naměřena pouze tvrdost dle Vickerse. Tahové a vrubové zkoušky byly provedeny, až pro vzorky normalizačně žíhané.



Obr. 4.24 Přehled struktur výkovku a modelu bez tepelného zpracování

Pro ověření shody byla na vzorcích naměřena tvrdost dle Vickerse (Tab. 4.3) Tvrdost výkovku i modelu odpovídala Widmanstättenově struktuře. Kdy na výkovku bylo naměřeno 221 HV10 a na modelovém vzorku 226 HV10. To odpovídalo rozdílu 5-ti bodů, což bylo méně než 2% odchylky tvrdostních hodnot.

		HV10 [-]
Pouze kováno	Výkovek	221
	Model	226

Tab. 4.3 Porovnání tvrdosti výkovku a modelu HV10

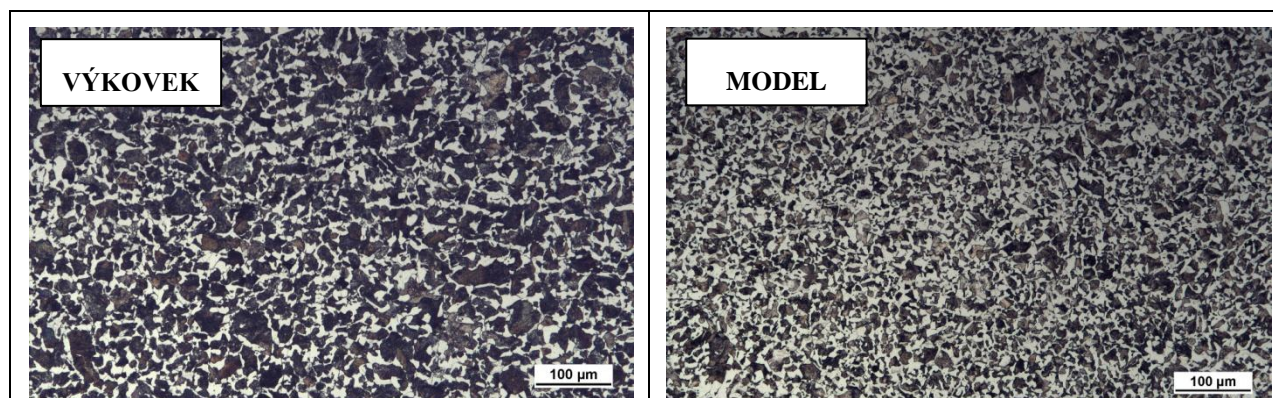
- **Materiál C45 v bodě P10 s následným tepelným zpracováním**

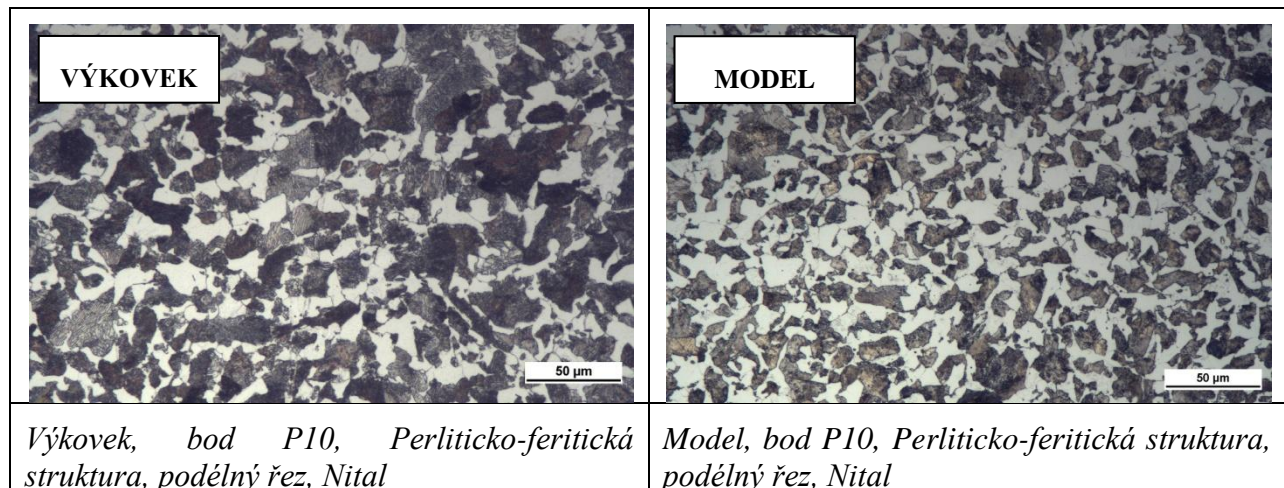
Poté, co byla ověřena správnost vytvořeného programu pro termomechanický simulátor, bylo přistoupeno k testování uceleného procesu kování výkovku v bodě P10 a to i s následným tepelným zpracováním. Tentokrát byl pro ověření shody modelu s výkovkem rozřezán výkovek, na kterém bylo po zápusťkovém kování provedeno i tepelném zpracování normalizačním žíháním.

Na termomechanickém simulátoru byl odzkoušen materiálově-technologický model představující zápusťkové kování i tepelné zpracování pro bod P10. Pomocí světelného mikroskopu byla zdokumentována jako oblast bodu P10 na výkovku, tak i středová část závitového vzorku. Metalografickou analýzou bylo zjištěno, že struktura byla tvořena již požadovanou perliticko-feritickou strukturou bez výskytu nežádoucího Widmanstättenovo feritu (Obr. 4.25). Ferit byl ve struktuře již rovnoměrně rozmístěn a nekopíroval hranice původních austenitických zrn. Jak pro výkovek, tak pro model byl naměřen podíl feritu. Tento podíl byl vyhodnocen z pěti různých snímků, při zvětšení 500x. Podíl feritu ve výkovku činil 26%. U modelu byl tento podíl o 5% vyšší, tedy 31%.

	Podíl feritu [%]
Výkovek	26
Model	31

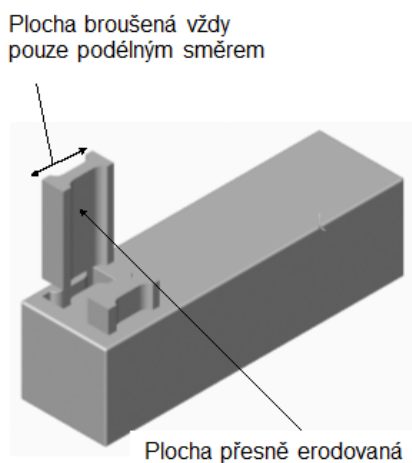
Tab. 4.4 Porovnání podílu feritu výkovek, model





Obr. 4.25 Přehled struktur výkovku a modelu s následným normalizačním žiháním, bod P10

Mechanické hodnoty výkovků i modelů byly stanoveny tahovou zkouškou a zkouškou rázem v ohybu. Vzhledem k tomu, že bylo k dispozici malé množství materiálu ze středu závitového vzorku, bylo využito mini zkušebních těles (Obr. 4.26 Obr. 4.27)



Obr. 4.26 Odběr vzorku - schéma



Obr. 4.27 Ukázka mini tahových a vrubových těles

Hodnota meze pevnosti reálného normalizačně žíhaného výkovku byla 675 MPa při tažnosti A5mm 28 %. V případě modelově zpracovaného materiálu byla naměřena hodnota meze pevnosti 655 MPa při tažnosti 32 % (Tab. 4.5). Z výsledků je zřejmé, že hodnota meze pevnosti mezi výkovkem a modelem se liší pouze o 20 MPa, což odpovídá odchylce 3%. Dále byla i v tomto případě naměřena tvrdost. Na výkovku po normalizačním žihání bylo naměřeno 189 HV10 a na modelu 192 HV10. Rozdíl naměřených hodnot tvrdostí byl pouhé 3 body, což odpovídá odchylce necelé 2%. Pro ucelené ověření shody mechanických vlastností výkovku a modelu byly provedeny zkoušky rázem v ohybu. A to z důvodu hodnocení houževnatosti materiálu. Pro testování bylo využito mini vrubových těles s V-vrubem (Tab.

4.6). U výkovku byla naměřena hodnota lomové houževnatosti 26 J/cm<sup>2</sup> a u modelu hodnota 38 J/cm<sup>2</sup>.

		HV10 [-]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>5mm</sub> [%]
Normalizačně žháno	Výkovek	189	675	28
	Model	192	655	32

Tab. 4.5 Porovnání tvrdostí a mechanických vlastností výkovku a modelu, bod P10

	Vrub	Rozměry		Hloubka	Teplota.	KV <sub>2</sub>	KCV	KCV
		Šířka	Výška					
	V	[mm]	[mm]	[mm]	[°C]	[J]	[J/cm <sup>2</sup> ]	[J/cm <sup>2</sup> ]
Výkovek	V	3,00	4,00	2,98	20	2,6	29,1	26
	V	3,00	4,00	2,98	20	2,1	23,5	
Model	V	2,99	4,00	2,98	20	x	35,7	38
	V	2,99	4,00	2,98	20	x	38,2	
	V	2,99	4,00	2,98	20	3,5	39,3	

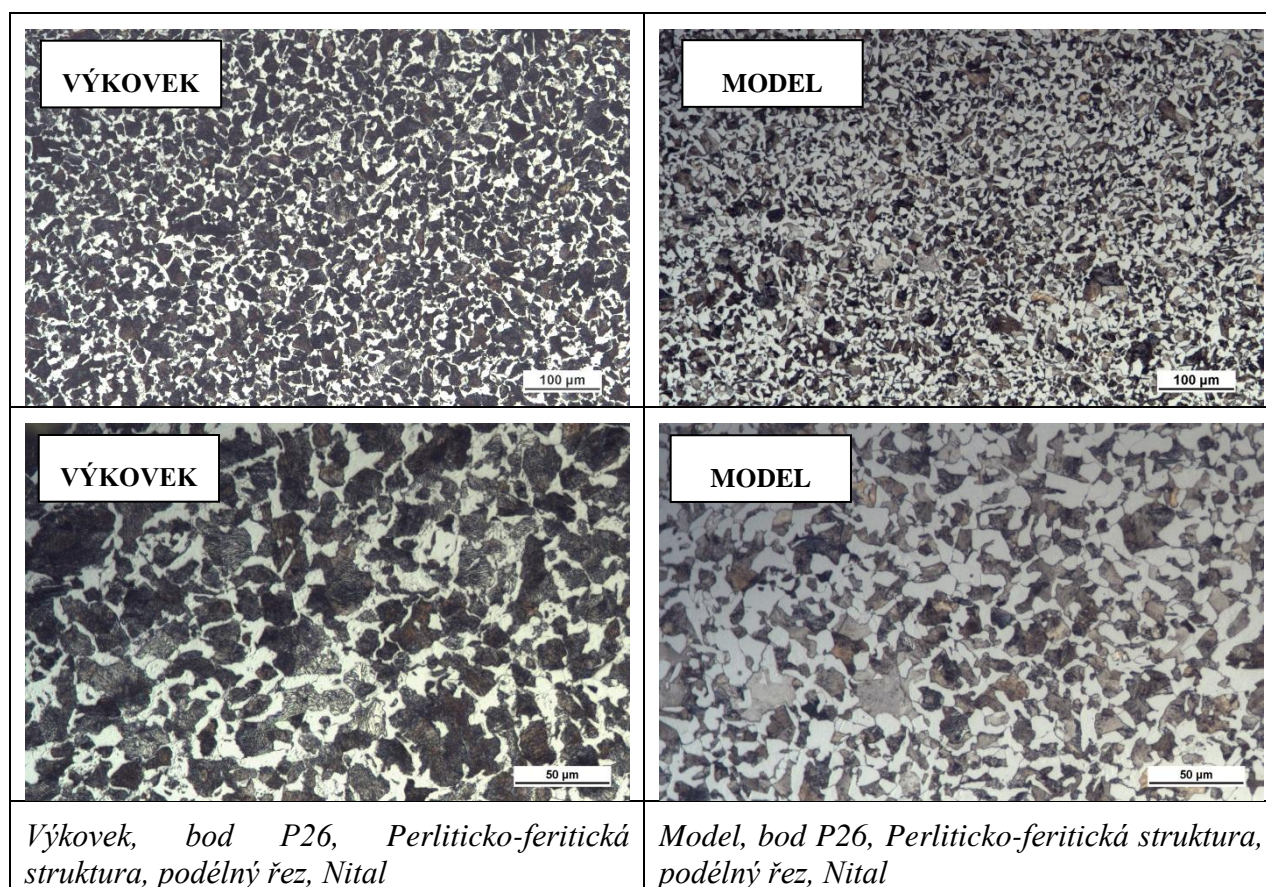
Tab. 4.6 Porovnání vrubové houževnatosti výkovku a modelu, bod P10

#### 4.3.5.2 Porovnání výkovku a modelu v bodě P26 - Materiál C45

Po ověření materiálově-technologického modelu pro bod P10 bylo nutné ověřit i správnost modelu pro bod P26. Stejně jako u předchozího bodu i u bodu P26 byla v první řadě hodnocena mikrostruktura. I zde byla potvrzena shoda. Mikrostruktura byla tvořena feriticko-perlitickou strukturou, jak na výkovku v bodě P26, tak i na modelově zpracovaném závitovém vzorku (Obr. 4.28). Střední hodnota tvrdosti pro výkovek odpovídala 193 HV10. Pro model dosahovala tvrdost hodnoty 190 HV10 (Tab. 4.8). I zde byl rozdíl hodnot pouhých 3 body. A odchylka mezi hodnotami tedy činila pouhých 2%. To vypovídá o homogenitě celého výkovku, kdy tvrdost výkovku v bodě P10 byla 189 a hodnota pro bod P26 činila 193 HV10. I zde je velmi malý rozdíl a to pouze 4 body. Dále byl pro bod P26 určen podíl fází pro výkovek a pro model. U výkovku byla vzniklá perliticko-feritická struktura tvořena 28% feritu. Zatím co u modelu byl podíl feritu o 4% vyšší, tedy 32% feritu ve struktuře. (Tab. 4.7)

	Podíl feritu [%]
Výkovek	28
Model	32

Tab. 4.7 Porovnání podílu feritu výkovek, model, bod P26



Obr. 4.28 Přehled struktur výkovku a modelu s následným normalizačním žháním, bod P26

		HV10 [-]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>5mm</sub> [%]
Normalizačně žháno	Výkovek	193	659	30
	Model	190	670	29

Tab. 4.8 Porovnání tvrdostí a mechanických vlastností výkovku a modelu bod P26

Pevnost reálného normalizačně žíhaného výkovku v bodě P26 byla 659 MPa. V případě modelově zpracovaného materiálu byla naměřena hodnota meze pevnosti 670 MPa (Tab. 4.8). Pevnostní rozdíl mezi výkovkem a modelem je pouhých 11 MPa. I při porovnání hodnot získaných ze zkoušky rázem v ohybu, kdy hodnota KCV pro reálný výkovek byla po zaokrouhlení 29 J/cm<sup>2</sup> a hodnota pro model 34 J/cm<sup>2</sup>, bylo dosaženo shody a to s 15 % rozdílem lomové houževnatosti mezi výkovkem a modelem (Tab. 4.9).



	Vrub	Rozměry		Hloubka	Teplota.	KV <sub>2</sub>	KCV	KCV
		Šířka	Výška					
	V	[mm]	[mm]	[mm]	[°C]	[J]	[J/cm <sup>2</sup> ]	[J/cm <sup>2</sup> ]
Výkovek	V	3,00	4,00	2,98	20	2,7	30,2	29
	V	3,00	4,00	2,98	20	2,4	26,9	
	V	3,00	4,00	2,98	20	2,6	29,1	
Model	V	3,00	4,00	2,98	20	3,2	35,8	34
	V	3,00	4,00	2,98	20	2,9	32,5	
	V	3,00	4,00	2,98	20	3,1	34,7	

Tab. 4.9 Porovnání vrubové houževnatosti výkovku a modelu bod P26

Na základě výsledků metalografických analýz a mechanických zkoušek lze považovat oba modely za funkční (pro bod P10 a P26), neboť relativní odchylky modelu od skutečnosti ležely v případě tvrdostí a mezí pevnosti v rozsahu pod hranici pěti procent. Pouze u lomové houževnatosti pro bod P10 byla relativní odchylka hodnot vyšší. To může být zapříčiněno lokálním iniciátorem trhliny a to např. vměstky v materiálu. Díky tomu, že bylo v testech využíváno mini zkušebních těles, může každá sebemenší nehomogenita materiálu zkreslit konečné výsledky. U bodu P26 už byl rozdíl odchylek u vrubové houževnatosti pouhých 15%. U všech ostatních naměřených hodnot, nedošlo k větším relativním odchylkám. Proto mohlo být přikročeno k navrhování možných materiálových náhrad.

#### 4.4 Návrh materiálových ekvivalentů bez nutnosti následného tepelného zpracování

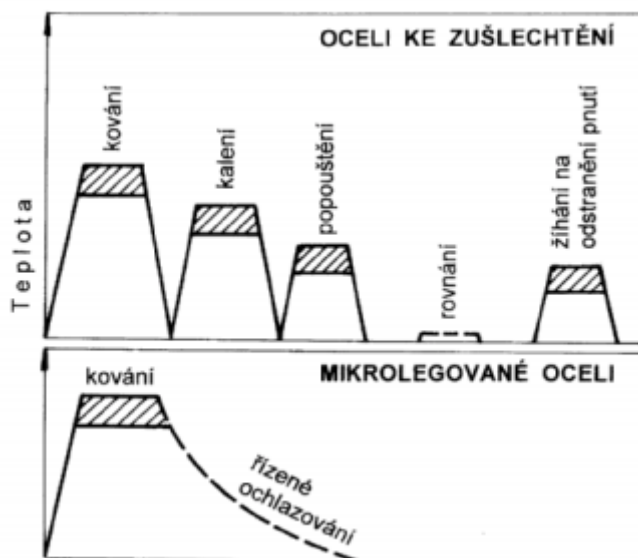
Díky potvrzené shodě mezi reálným výkovkem a vytvořeným modelem je možné materiálově-technologický model využít pro návrh možných materiálových ekvivalentů bez nutnosti následného tepelného zpracování. Pro materiálově-technologické modelování byly využity mikrolegované feriticko–perlitické oceli 30MnVS6, 38MnVS6 a 46MnVS4.

Jak již bylo uvedeno, výkovek je využíván jako brzdový buben nákladních automobilů. Automobilový průmysl je jeden z nejdynamičtější se rozvíjejících odvětví průmyslu. Proto se u výkovků klade velký důraz na neustálé zvyšování užitečných vlastností a to především na zvyšující se pevnost výkovků. Způsoby, které se běžně využívají ke zvyšování mechanických vlastností výkovků jako např. použití vyšších přísad legujících prvků nebo tepelné zpracování u výkovků ze středně uhlíkových ocelí, obvykle nepřináší požadované efekty. Jedním z negativ je především požadavek odběratelů na přijatelné ceny výkovků. V posledních letech se ukazuje nutnost omezit nebo zjednodušit tradičně používané způsoby kování a následného tepelného zpracování výkovků. Je tomu tak především z důvodů neustále prudce stoupající ceny energií. Řešením je využití mikrolegovaných ocelí s technologií následného řízeného ochlazování.

Při využívání mikrolegovaných ocelí jsou vlastnosti výkovků přizpůsobovány tak, aby odpovídali požadavkům zpracovatelského průmyslu. Výroba výkovků z mikrolegovaných ocelí přináší snížení výrobních a zpracovatelských nákladů a to díky zjednodušení výrobních postupů. Na obrázku jsou porovnány schéma procesu kování u běžných a mikrolegovaných ocelí (Obr. 4.29).

Pomocí mikrolegovaných ocelí s technologií řízeného ochlazování lze zajistit kvalitu výkovků a přesně nadefinovat požadované vlastnosti těchto výkovků. Dále je zaručeno optimální sestavení technologie kování a zabezpečena účelná kontrola výsledných vlastností. Ve světě se ve velkém měřítku výrazně prosazují právě oceli mikrolegované vanadem s obsahem uhlíku kolem 0,35 % a manganu kolem 1,5 %. Velmi výhodné jsou rekrytalizační, transformační a precipitační charakteristiky těchto ocelí. Řízeným vývojem struktury a substruktury lze u mikrolegovaných ocelí získat velmi široké a různorodé vlastnosti.

Na zvolených materiálech 30MnVS6, 38MnVS6 a 46MnVS6 byl odzkoušen materiálově-



technologický model záпустkového kování s následným řízeným ochlazováním z dokovacích teplot, který byl proveden na termomechanickém simulátoru. Křivky řízeného ochlazování byly zvoleny na základě křivek z CCT diagramů pro jednotlivé materiály.

Přínosem zvolených ocelí a řízeného ochlazování bude významná úspora nákladů na energie. A to za předpokladu správně stanovených křivek chladnutí a dodržení výsledné, požadované feriticko-perlitické struktury s odpovídajícími mechanickými vlastnostmi.[63], [64], [65].

Obr. 4.29 Porovnání technologického procesu - běžná ocel k zušlechťení a ocel mikrolegované s řízeným ochlazováním[65]

#### 4.4.1 Charakteristika zvolených ocelí

Všechny vybrané oceli patří do skupiny tzv. HSLA ocelí (High Strength Low Alloy Steels). HSLA oceli jsou vysokopevné nízkolegované oceli (nebo mikrolegované) oceli. Tyto oceli se vyznačují lepšími mechanickými vlastnostmi a větší odolností proti atmosférické korozi než konvenční uhlíkové oceli. Rozhodující je také obsah uhlíku od 0,05 do 0,5%. Jednou z dalších nesporných výhod HSLA ocelí je dobrá tažnost. Z těchto důvodů se oceli používají na tvarově složité součásti a to hlavně na dynamicky namáhané součásti automobilů. Typické pro tyto oceli je jejich velmi nízký obsah karbidotvorných a karbidonitridotvorných prvků. Mezi prvky patří Nb, V a Ti. Tyto legury přispívají k precipitačnímu zpevnění, zjemnění zrna, a k možnému řízení teploty přeměny austenit-ferit. V tabulce Tab. 4.10 je popsán souhrnný vliv mikrolegovacích prvků v tuhém roztoku a v precipitátech na průběh základních dějů při řízeném tváření za tepla.

<b>Mikrolegující prvky</b>			
<b>v tuhém roztoku</b>		<b>v precipitátech</b>	
<b>Vliv</b>	snížení difuzní schopnosti	brzdění rekrytalizace	blokování hranic zrn
	snížení teploty přeměny		brzdění pohybu dislokací
<b>Strukturní jevy</b>	zjemnění zrna	zjemnění zrna tvorba textury	zjemnění zrna
	dislokační zpevnění		precipitační zpevnění
			ovlivnění tvaru sulfidů

Tab. 4.10 Schéma působení mikrolegujících prvků [42]

Hlavními legury pro vybrané oceli jsou především mangan a vanad.

- **Mangan**

Mangan patří mezi austenitotvorné prvky. Ve slitinách Fe-Mn-C je část manganu rozpuštěna v základní kovové matici (tj. ve feritu nebo austenitu), část tvoří podvojný karbid  $(Fe,Mn)_2C$ . Mangan rozpuštěný ve feritu zvyšuje jeho pevnostní vlastnosti a snižuje tažnost, dále ovlivňuje také tepelné zpracování ocelí. Se stoupajícím obsahem manganu se zpomaluje transformace austenitu v perlitické i bainitické oblasti. Křivky TTT (Temperature-Time-Transformation) se posouvají doprava, takže se zvyšuje prokalitelnost. Současně s tím se také zvyšuje doba stability austenitu. Manganové oceli jsou citlivé na zhrubnutí zrna, takže je nutné při tepelném zpracování dodržovat austenitizační teplotu. Mangan se často používá k legování konstrukčních ocelí, zejména v kombinaci s jinými prvky, protože je laciný a snadno dostupný. U běžných konstrukčních ocelí se používá až do obsahu 2%. Při legování oceli manganem je nutno počítat s jeho velkým sklonem k odměšování a jeho malou difuzní rychlostí. [66].

- **Vanad**

Vanad patří mezi silně feritotvorné prvky. Vanad tvoří s uhlíkem velmi stabilní karbid VC. V ocelích má však proměnlivé složení, označuje se obvykle jako  $V_4C_3$  nebo  $VC_{0,89}$ . Jiné typy karbidů vanadu v ocelích netvoří, může se však částečně rozpouštět v cementitu. Karbidy vanadu mají vysokou tvrdost, pohybující se okolo 2500 HV. Při nízkém obsahu vanadu se tvoří jemné globulární karbidy, které zpomalují růst zrna austenitu. Vliv vanadu na zjemnění zrna se používá u některých ocelí. Vliv vanadu na mechanické vlastnosti závisí ve velké míře na kalící teplotě tj. na stupni rozpuštění vanadu v austenitu. Pokud se kalí oceli s přísadou vanadu z normální teploty, získávají se menší tvrdosti, protože část uhlíku zůstává vázána jako karbid vanaditý. Přísada vanadu se obvykle kombinuje s jinými legovacími prvky. V ocelích na zušlechťování bývá obsah vanadu asi 0,1%. Vyšší obsah vanadu mají žárupevné oceli a oceli odolné proti vodíkové korozi [66].

#### 4.4.1.1 30MnVS6

30MnVS6 (1.1302) je vysokopevnostní nízkolegovaná mangan-vanadová ocel (Tab 4.11 a Tab 4.12). Vyznačuje se vysokou kvalitou a dobrou obrobiteľnosťou. Je vhodná pro řízené ochlazování z dokovacích teplot. Využívá se především pro výrobu součástek v automobilovém průmyslu jako ojnice, komponenty u náprav automobilů a trojúhelníkových ramen.

Předkovací teplota: 1220-1280 °C

Teplota dochlazení na vzduchu: 1000 – 500 °C

Teplota na odstranění pnutí: <= 600 °C

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	N
30MnVS6	0,26	0,15	1,20	<	0,020	< 0,30	< 0,08	0,08	0,01
1.1302	0,33	0,80	1,60	0,025	0,060			0,20	0,02

Tab 4.11 Chemické složení materiál 30MnVS6

30MnVS6			
Mez kluzu	R <sub>p0,2</sub>	[N/mm <sup>2</sup> ]	min. 450
Mez pevnosti	R <sub>m</sub>	[N/mm <sup>2</sup> ]	700-900
Tažnost	A <sub>5</sub>	[%]	min. 14
Kontrakce	Z	[%]	min. 30

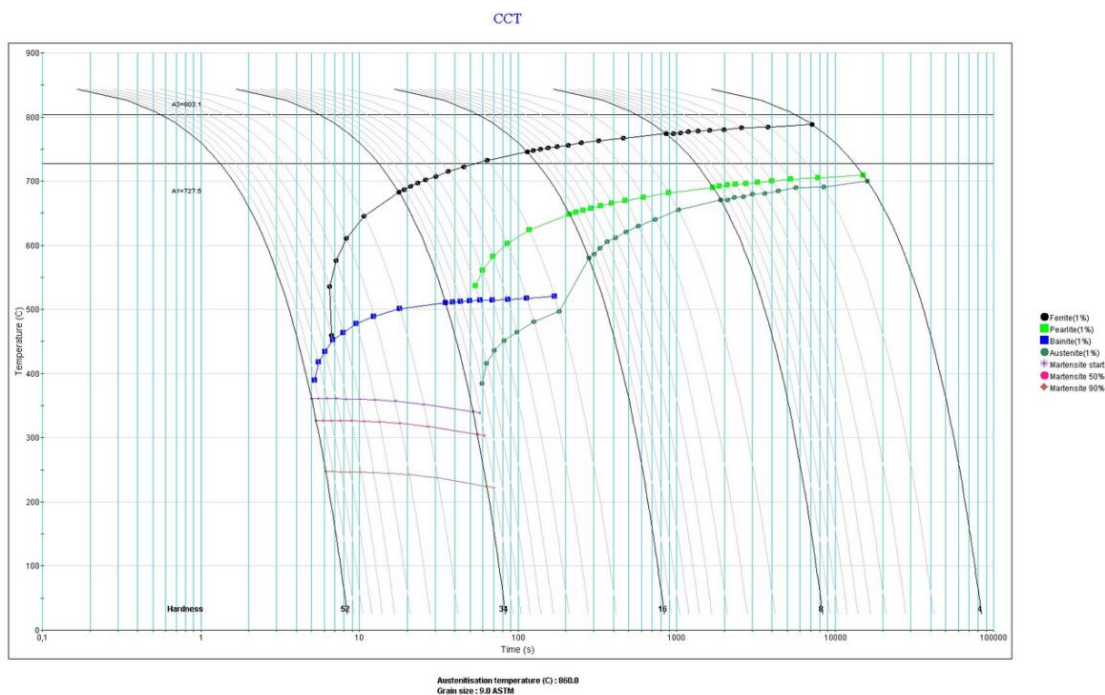
Tab 4.12 Mechanické vlastnosti materiál 30MnVS6

Výchozí strukturou je perliticko-feritická struktura s 10 – 30 % podílem feritu.

U všech materiálových náhrad byla nutná znalost ARA diagramů pro správné navržení křivek ochlazování (Obr.4.30, Obr. 4.31, Obr.4.32). V současné době existuje několik výpočtových softwarů, které umožňují získat potřebné charakteristiky materiálů. Jedním z těchto softwarů je i software JMatPro (Java-based Materials Properties), který byl využit pro získání ARA digramů. Mezi další materiálová data, která můžeme pomocí tohoto softwaru získat, patří zejména fyzikální a termofyzikální vlastnosti jako je prokalitelnost, vysoko-teplotní mechanické vlastnosti a IRA diagramy. Při výpočtu materiálových dat v softwaru JMatPro bylo zadáno chemické složení odpovídající danému materiálu, velikost austenitického zrna a austenitizační teplota. Na základě těchto informací provedl program sérii termodynamických výpočtů, ze kterých byla získána požadovaná materiálová data.[67]

Legující prvky mají velký vliv na polohu a tvar rozpadových křivek austenitu. Téměř všechny přísadové prvky zpomalují rozpad austenitu a tím zvětšují inkubační dobu rozpadu. V IRA diagramech se to projevuje výrazným posunem křivek počátku rozpadu směrem doprava k delším časům. Současně dochází i k prodloužení rozpadových dob. Některé legury, např. Cr, Mo, W, V, zapříčiňují oddělení perlitického a bainitického rozpadu, díky tomu má křivka dva nosy. Avšak přísadové prvky mají jen malý vliv na teplotu M<sub>s</sub>, a to převážně takový, že ji mírně snižují.

U navržených materiálových náhrad bylo nutné zvolit takové křivky ochlazování z teploty tváření, aby u zvolených materiálových náhrad byla získána feriticko-perlitická struktura. Za jistých okolností mohou být ve struktuře přítomny nepatrné podíly bainitu a martenzitu. To je však pro odběratele výkvočků struktura nepřijatelná.



Obr.4.30 ARA diagram materiálu 30MnVS6

#### 4.4.1.2 38MnVS6

38MnVS6 (1.1303) je vysokopevnostní nízkolegovaná mangan- vanadová ocel (Tab 4.13, Tab 4.14). Vyznačuje se vysokou kvalitou a dobrou obrobiteľnosťí. Je vhodná pro řízené ochlazování z dokovacích teplot. Využívá se především pro výrobu součástek v automobilovém průmyslu jako klikové hřídele, tyče namáhané tlakem, rotační ložiska, rozbočovače a pístové hlavy.

Předkovací teplota: 1220-1280 °C

Teplota dochlazení na vzduchu: 1000 – 500 °C

Teplota na odstranění pnutí:  $\leq 600$  °C

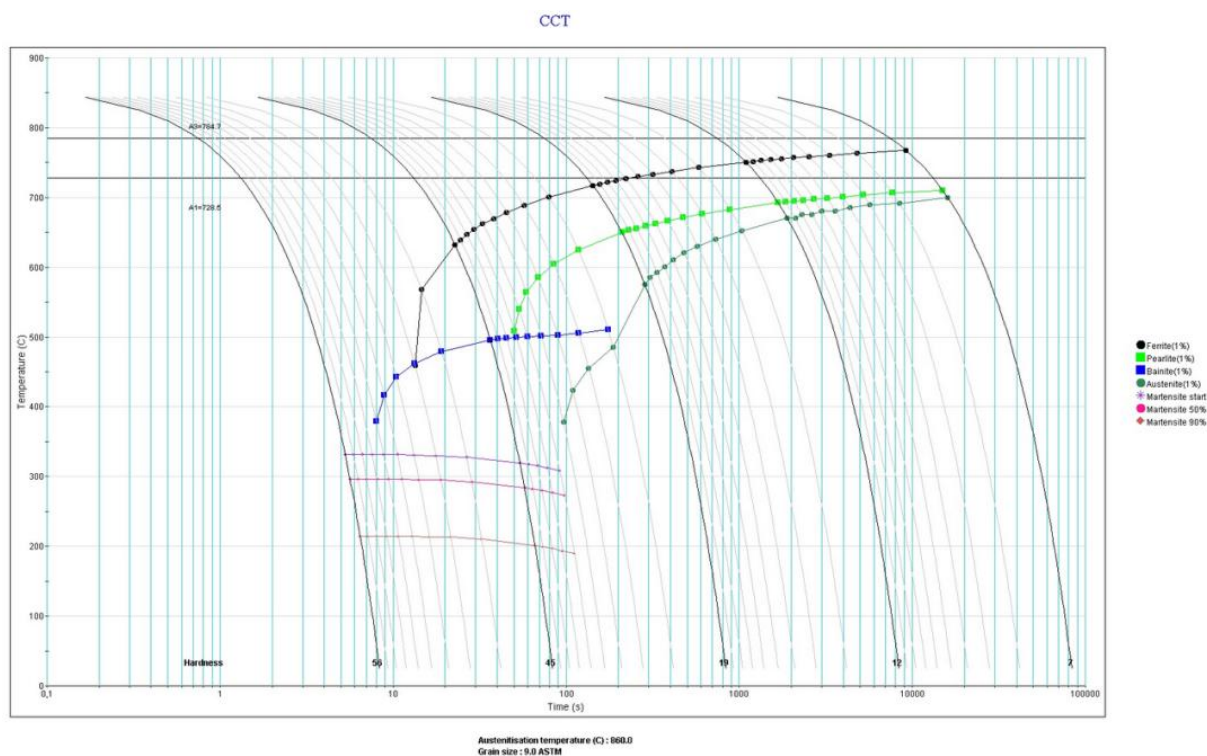
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	N
<b>38MnVS6</b>	0,34	0,15	1,20	< 0,025	0,020	< 0,30	< 0,08	0,08	0,01
<b>1.1303</b>	0,41	0,80	1,60		0,060			0,20	0,02

Tab 4.13 Chemické složení materiál 38MnVS6

38MnVS6			
Mez kluzu	$R_{p0,2}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	min. 520
Mez pevnosti	$R_m$	[N/mm <sup>2</sup> ]	800-950
Tažnost	$A_5$	[%]	min. 12
Kontrakce	Z	[%]	min. 25

Tab 4.14 Mechanické vlastnosti materiál 38MnVS6

Výchozí stav je perliticko-feritická struktura s 5 – 25 % podílem feritu.



Obr. 4.31 ARA diagram materiálu 38MnVS6

#### 4.4.1.3 46MnVS6

46MnVS6 (1.1304) je vysokopevnostní nízkolegovaná mangan- vanadová ocel (Tab 4.15 a Tab 4.16). Vyznačuje se vysokou kvalitou a dobrou obrobiteľnosťou. Je vhodná pro řízené ochlazování z dokovacích teplot. Využívá se především pro výrobu součástek v automobilovém průmyslu jako komponenty zadních náprav, pístní tyče a rozbočovače.

Předkovací teplota: 1220-1280 °C

Teplota dochlazení na vzduchu: 1000 – 500 °C

Teplota na odstranění pnutí: ≤ 600 °C

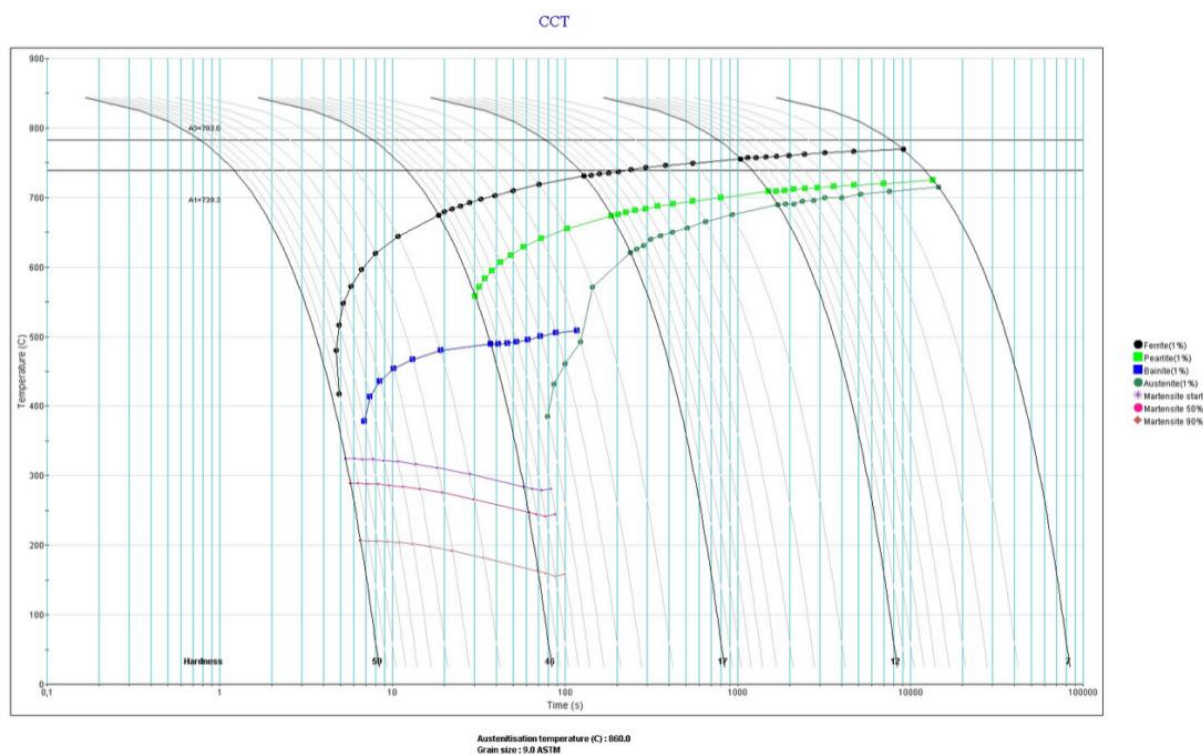
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	N
<b>46MnVS6</b>	0,42	0,15	1,20	<	0,020	< 0,30	< 0,08	0,08	0,01
<b>1.1304</b>	0,49	0,80	1,60	0,025	0,060			0,20	0,02

Tab 4.15 Chemické složení materiál 46MnVS6

46MnVS6			
<b>Mez kluzu</b>	R <sub>p0,2</sub>	[N/mm <sup>2</sup> ]	min. 580
<b>Mez pevnosti</b>	R <sub>m</sub>	[N/mm <sup>2</sup> ]	900-1050
<b>Tažnost</b>	A <sub>5</sub>	[%]	min. 10
<b>Kontrakce</b>	Z	[%]	min. 20

Tab 4.16 Mechanické vlastnosti materiál 46MnVS6

Výchozí strukturou je perlit-ferit s 30 – 50 % podílem feritu.



Obr.4.32 ARA diagram materiálu 46MnVS6

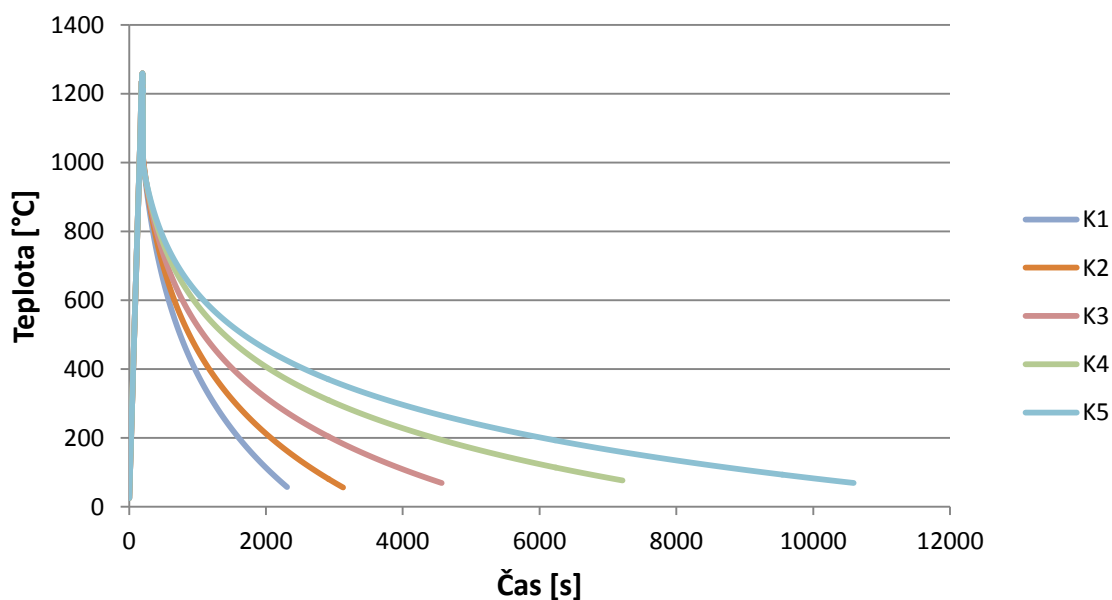
#### 4.4.2 Návrh řízeného ochlazování pro zvolené materiálové náhrady

Dle ARA diagramů všech materiálových náhrad bylo zvoleno 5 křivek ochlazování. Křivky ochlazování byly vybrány především tak, aby bylo docíleno feriticko-perlitické struktury. Řízené ochlazování bylo zařazeno po ukončení posledního kroku záпустkového kování a probíhalo od teploty 950°C do teploty cca 60°C. Křivky byly označeny K1 až K5 (Obr.4.33a Tab. 4.17).

V případě křivky K1 byl výkovek ochlazován po dobu 33min 50s (2030s), v tomto případě byla rychlost ochlazování nejrychlejší. Druhou hraniční křivkou ochlazování byla křivka K5. Pro tuto křivku bylo ochlazování pozvolné. Doba chladnutí byla 2h 51min a 50s (10310s). Dalšími křivkami byly křivky K2 s dobou ochlazování 47min 30s(2850s), křivka K3s dobou ochlazování 1h 11min 30s (4290s) a křivka K4 s dobou chladnutí 1h 55min 30s (6930s).

Program pro simulátor byl sestaven, jak z části samotného kování v bodě P10, tak z následného řízeného ochlazování dle křivek K1-K5. V části kování byl proveden teplotní a deformační průběh odpovídající materiálově-technologickému modelu pro bod P10. Závitové vzorky daných materiálů byly rozřezány ve středových oblastech a zdokumentovány na světelném a v případě nejednoznačnosti i na elektronovém řádkovacím mikroskopu. U všech vzorků byly naměřeny tvrdosti a provedeny tahové zkoušky.

### Křivky ochlazování K1-K5



Obr.4.33 Křivky ochlazování K1-K5

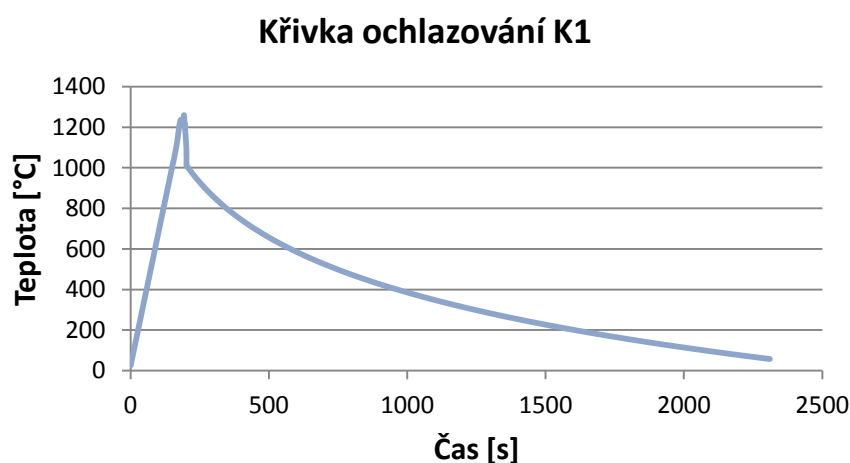
Křivky ochlazování	Doba ochlazování
<b>K1</b>	33min 50s (2030s)
<b>K2</b>	47min 30s (2850s)
<b>K3</b>	1h 11min 30s (4290s)
<b>K4</b>	1h 55min 30s (6930s)
<b>K5</b>	2h 51min 50s (10310s)

Tab. 4.17 Přehled dob ochlazování pro jednotlivé křivky



#### 4.4.2.1 Křivka ochlazování K1 - 2030s

V prvním kroku byly všechny tři materiálové náhrady po modelování zápusťkového kování ochlazovány dle křivky K1 s dobou ochlazování 2030s (Obr. 4.34). Tato křivka představovala nejvyšší rychlost ochlazování. Vzorky po materiálově-technologickém modelování byly pro analýzu mikrostruktury připraveny standartní metalografickou přípravou. Struktura byla vyvolána leptáním v 3% Nitalu a dokumentována na světelném mikroskopu. Detailní analýza struktury byla provedena na řádkovacím elektronovém mikroskopu.



Obr. 4.34 Křivka ochlazování K1

Jak u materiálu 30MnVS6, tak u materiálu 38MnVS6 byla struktura tvořena převážně feritem a perlitem s podílem zákalné fáze, bainitu a martenzitu (Obr. 4.35 a Obr. 4.36) U materiálu 30MnVS6 se jednalo, s největší pravděpodobností, především o horní bainit. Z obrázků (Obr. 4.35 a Obr. 4.36) byly patrné pásy zákalné struktury. Ve struktuře 38MnVS6 byl nalezen, jak horní, tak dolní bainit. Ve struktuře materiálu 46MnVS6, už nebyl nalezen žádný bainit ani martenzit (Obr. 4.37). Struktura byla tvořena převážně perlitem s alotriomorfním feritem a částečně i s malým podílem idiomorfního feritu. Alotriomorfní ferit tvořil souvislé síťové po hranicích původních austenitických zrn.

	HV 10 [-]	HV 0,01 [-]	R <sub>p0,2</sub> [Mpa]	R <sub>m</sub> [Mpa]	A <sub>5mm</sub> [%]
<b>30MnVS6</b>	260	364	557	851	26
<b>38MnVS6</b>	306	418	648	1001	22
<b>46MnVS6</b>	273	-	621	934	19

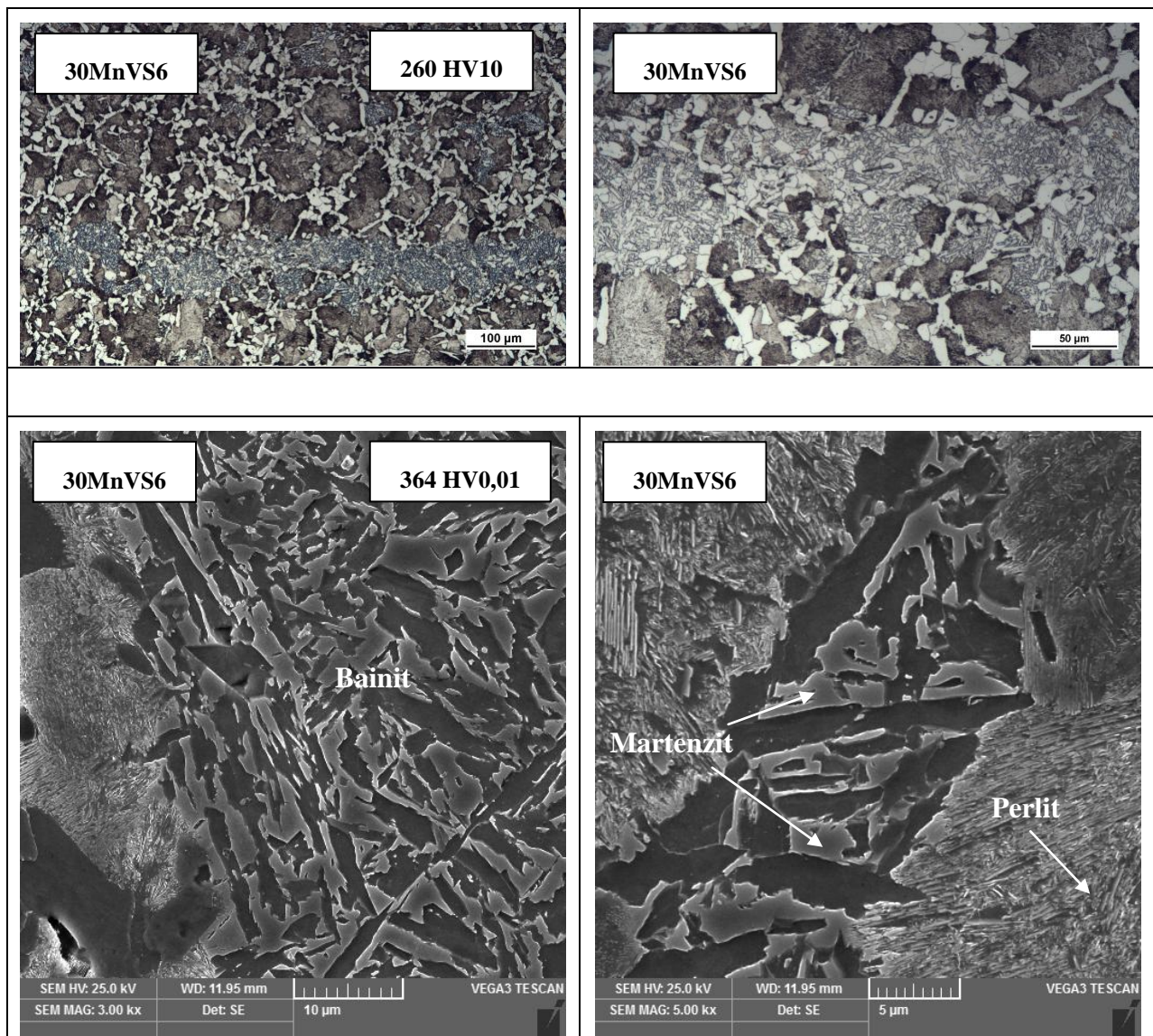
Tab. 4.18 Mechanické vlastnosti a hodnoty tvrdosti všech materiálových náhrad pro křivku K1

Na všech vzorcích byla v jejich středu naměřena tvrdost HV10 (Tab. 4.18). U vzorků, kde se vyskytovaly ostrůvky bainitu a martenzitu, byla v těchto ostrůvkách naměřena i mikrotvrdost HV 0,01. Dále byly na vzorcích provedeny mini tahové zkoušky. U všech třech materiálových náhrad překračuje hodnota tvrdosti požadovanou maximální tvrdost 250HV10. Nejvyšší

hodnotu tvrdosti měl materiál 38MnVS6 a to 306HV10. Tato tvrdost byla dána vyšším podílem perlitu a přítomností zákalné bainiticko-martenitické fáze (Obr. 4.36). Nižší tvrdost materiálu 30MnVS6 byla dána vyšším podílem feritu ve struktuře, přestože i zde byla zákalná struktura bainitu a martenzitu. Z naměřených mikrotvrdoostí bylo zjištěno, že pásy u materiálu 38MnVS6 obsahovaly vyšší podíl martenzitu. To se projevilo, jak dosažením nejvyšší hodnoty tvrdosti ze všech tří zkoušených materiálů, tak byla získána i nejvyšší hodnota meze pevnosti 1001 MPa při hodnotě tažnosti  $A5mm = 22\%$ . Nejvyšší hodnota tažnosti 26% byla naměřena u oceli 30MnVS6 s nejvyšším podílem feritu. U oceli 46MnVS6 s nejvyšším obsahem uhlíku byla díky nepřítomnosti zákalné fáze naměřena hodnota meze pevnosti pouze 934 MPa s tažností 19% (Tab. 4.18).

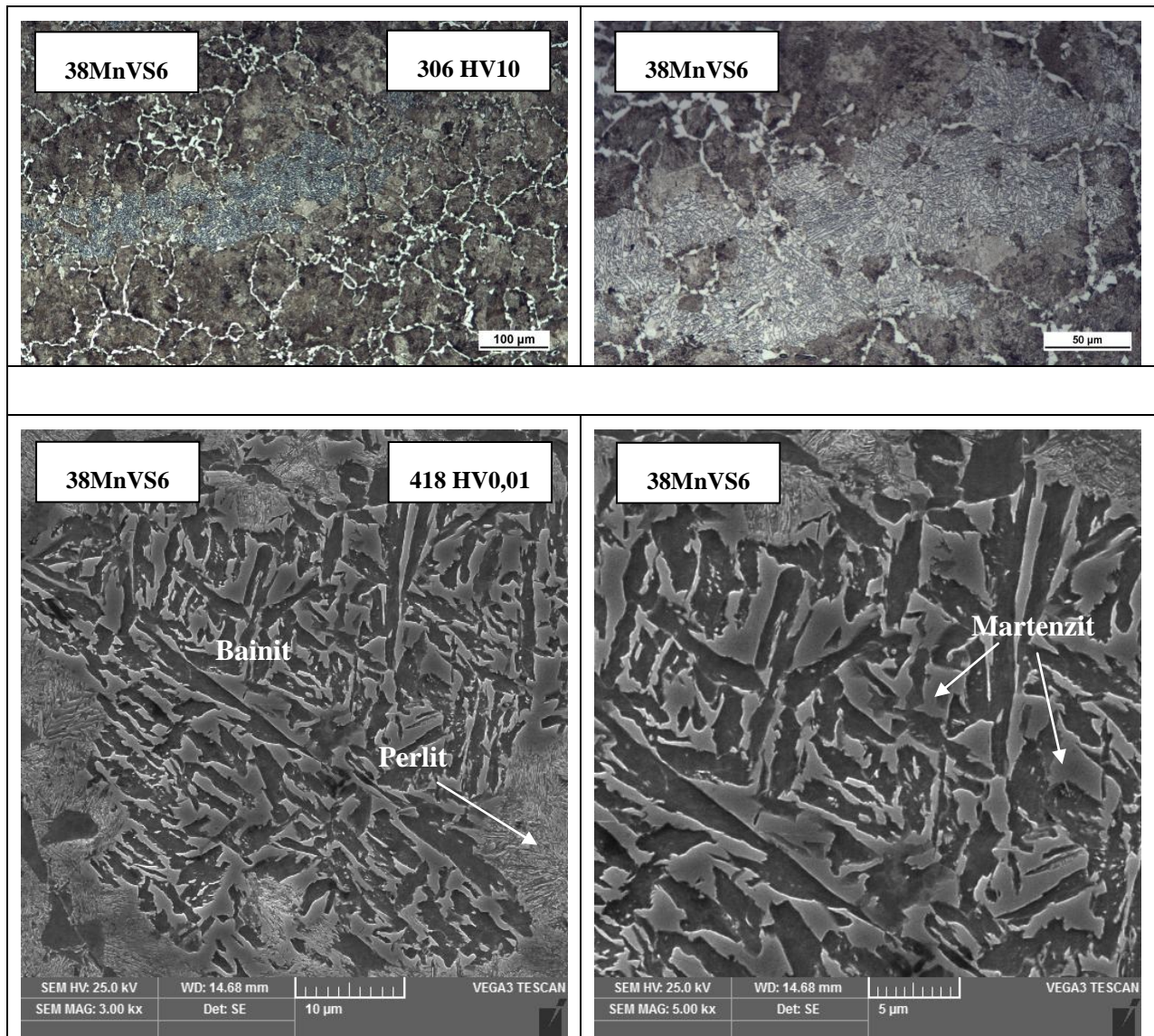
Ze získaných výsledků bylo zřejmé, že profil ochlazování dle křivky K1 (Obr. 4.34) není vhodný, protože nebyly získány požadované vlastnosti.

### 30MnVS6

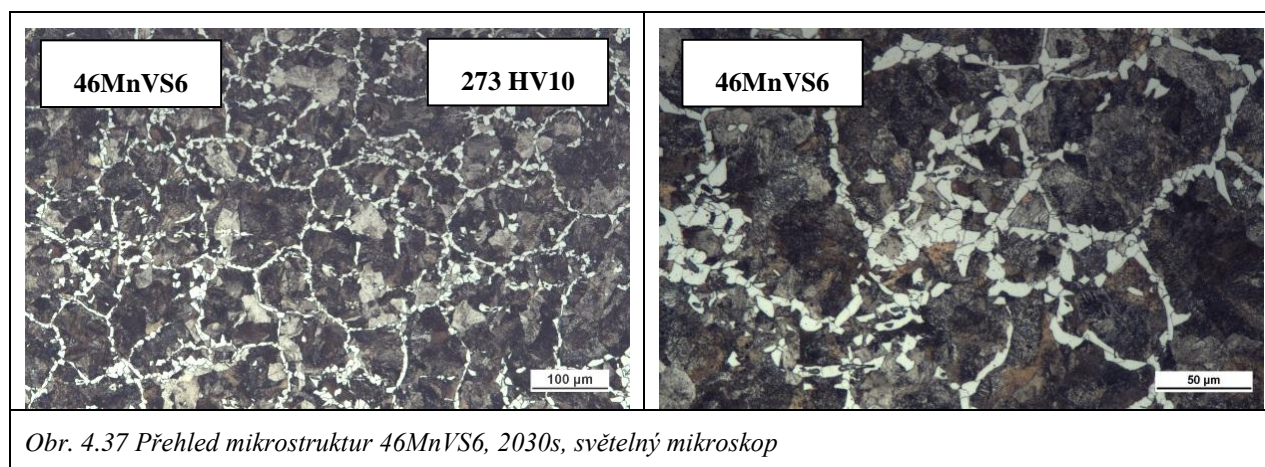


Obr. 4.35 Přehled mikrostruktur 30MnVS6, 2030s, světelný a řádkovací elektronový mikroskop

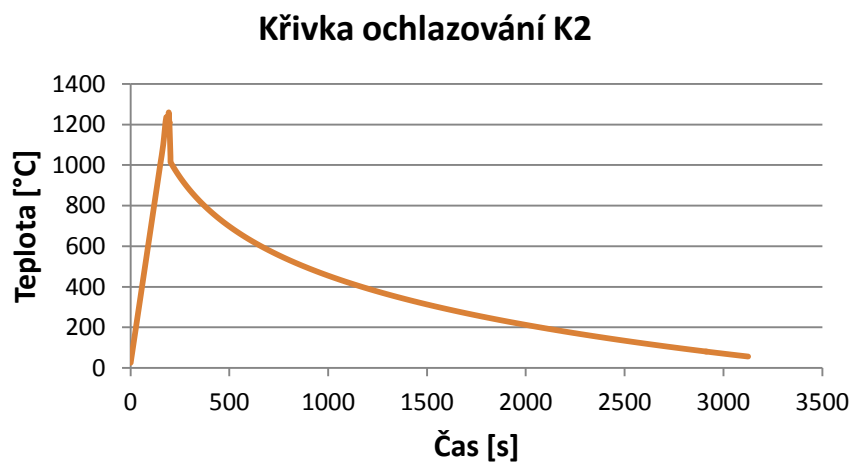
**38MnVS6**



Obr. 4.36 Přehled mikrostruktur 38MnVS6, 2030s, světelný a řádkovací elektronový mikroskop

**46MnVS6****4.4.2.2 Křivka ochlazování K2 - 2850s**

Pro křivku K2 byla doba ochlazování z teploty 950°C stanovena na 47min 30s.



Obr. 4.38 Křivka ochlazování K2

I přes to, že doba ochlazování byla u křivky K2 oproti křivce K1 prodloužena o 820s byla v materiálech 30MnVS6 a 38MnVS6 detekována zákalná fáze bainitu a mertenzitu (Obr. 4.39 a Obr. 4.40). U materiálu 30MnVS6 byly oblasti bainitu a mertenzitu pouze ve formě menších ostrůvků na rozdíl od oblastí pro křivku K1, kde se zákalná fáze vyskytovala ve větších pásech. To potvrzuje i nižší tvrdost 258 HV10 a vyšší hodnota tažnosti (Tab. 4.19). Dále byl u materiálu 30MnVS6 ve struktuře patrný největší podíl feritu v porovnání s materiály 38MnVS6 a 46MnVS6. To potvrzuje i nejvyšší hodnota tažnosti, která byla u materiálu 30MnVS6 stanovena na A5mm 28% (Tab. 4.19).

Jak u křivky K1, tak i u křivky K2 byl materiálem s nejvyšší hodnotou tvrdosti 339 HV10 materiál 38MnVS6. I zde byl ve struktuře nalezen martenzit a bainit a to jak horní, tak dolní

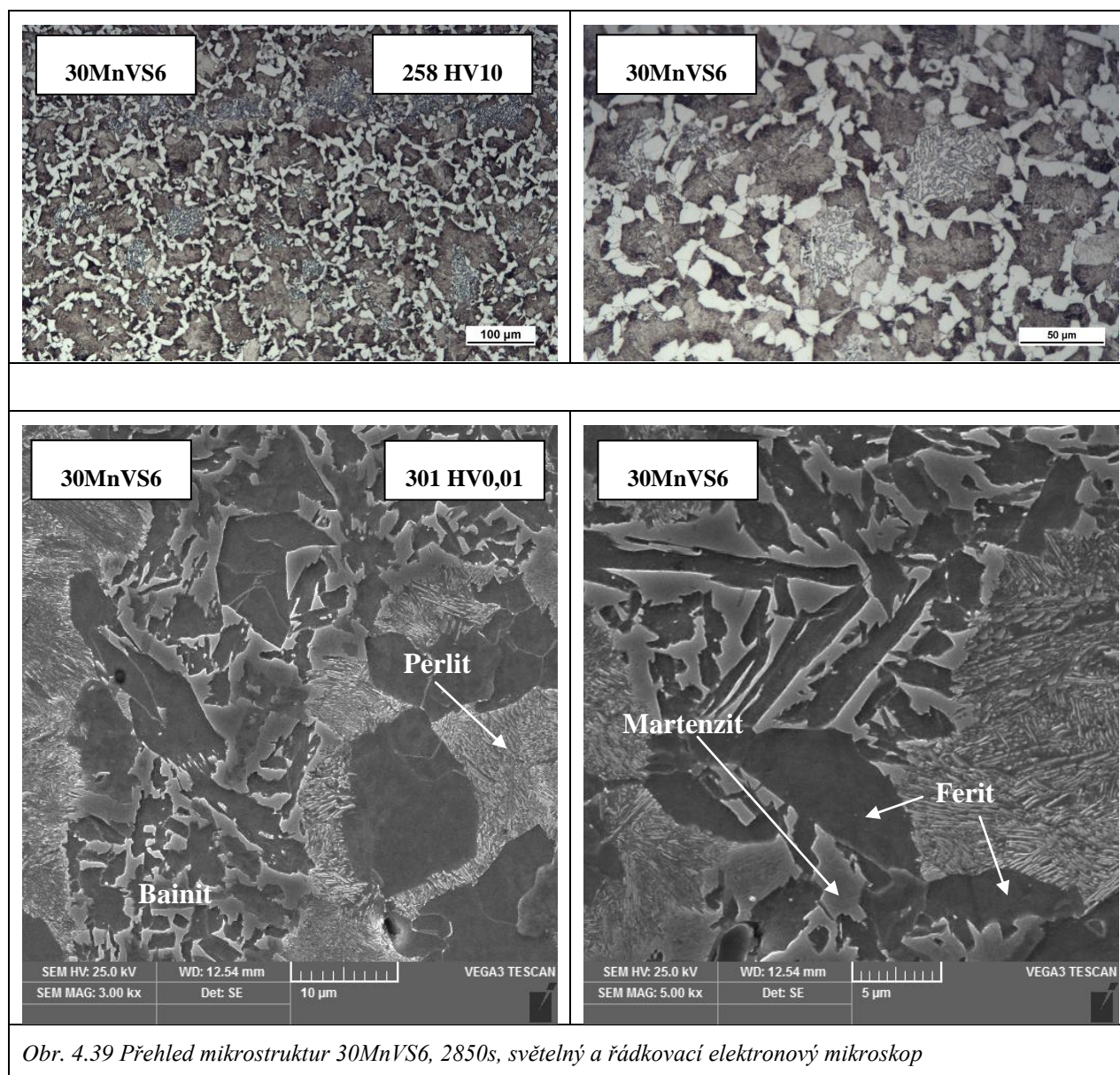
bainit (Obr. 4.40). Vysoká tvrdost byla také dána tím, že struktura byla tvořena především perlitem. Podíl feritu byl velmi malý a tvořil síťový po hranicích původních austenitických zrn.

Materiál 46MnVS6 byl tvořen perliticko-feritickou strukturou bez zákalné fáze (Obr. 4.41). Byl zde patrný vyšší podíl perlitu. Struktura byla tvořena alotriomorfním a idiomorfním feritem. Idiomorfní ferit se vyskytoval jen v malé míře. Při tahových zkouškách byla u tohoto materiálu naměřena mez pevnosti 917 MPa při tažnosti A5mm 19%, což byla nejnižší hodnota tažnosti při této rychlosti ochlazování (Tab. 4.19)

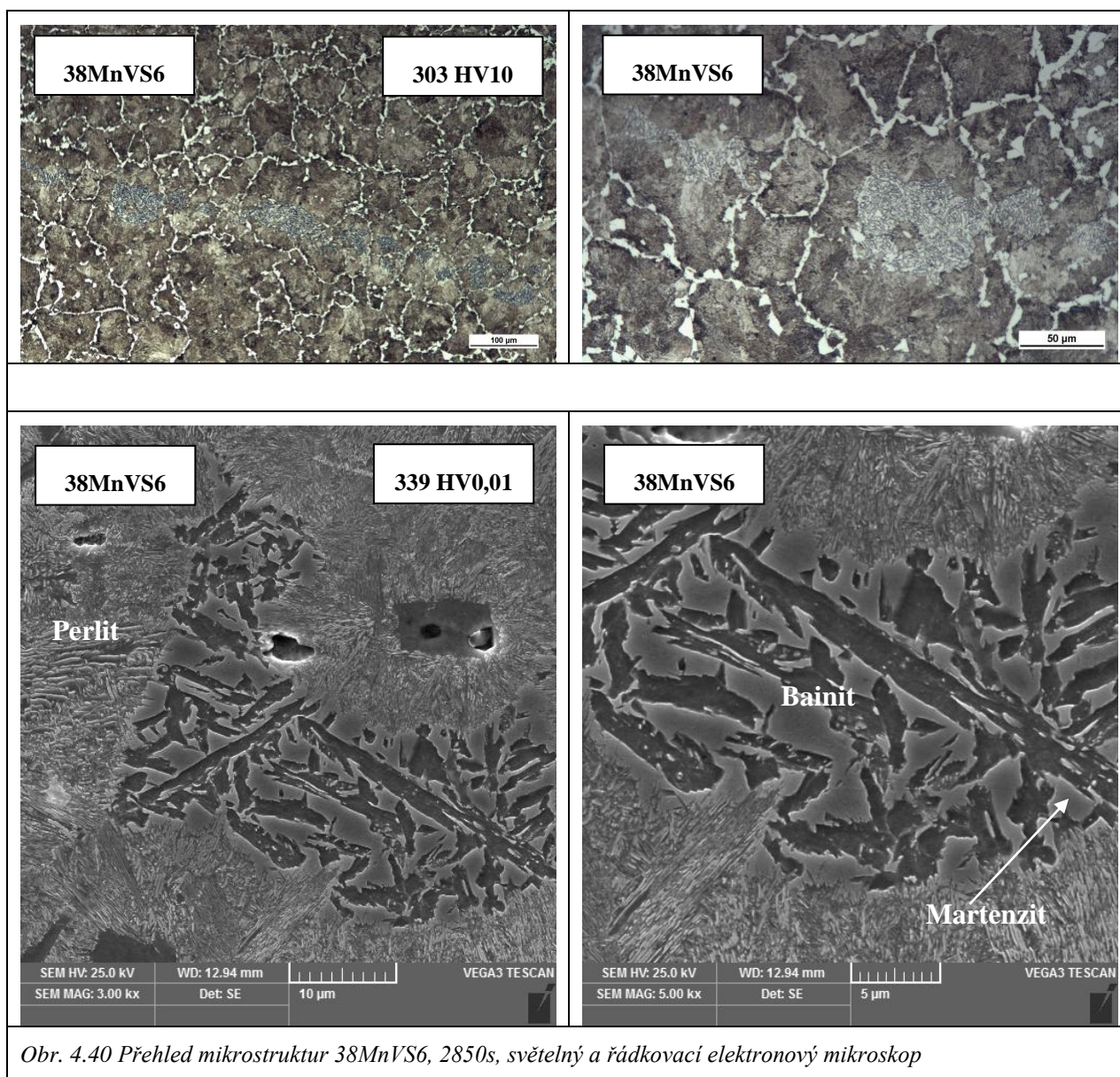
I u křivky K2, však všechny zvolené náhrady přesahovaly hranici 250HV10.

	HV 10 [-]	HV 0,01 [-]	R <sub>p0,2</sub> [Mpa]	R <sub>m</sub> [Mpa]	A <sub>5mm</sub> [%]
<b>30MnVS6</b>	258	301	551	823	28
<b>38MnVS6</b>	303	339	662	984	21
<b>46MnVS6</b>	281	-	597	917	19

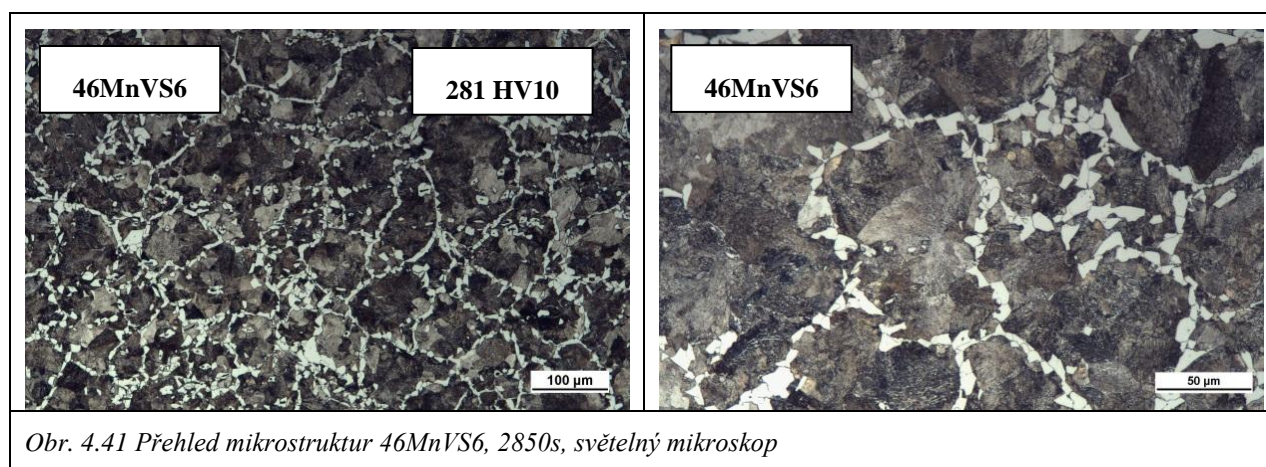
Tab. 4.19 Mechanické vlastnosti a hodnoty tvrdostí všech materiálových náhrad pro křivku K2

**30MnVS6**

**38MnVS6**

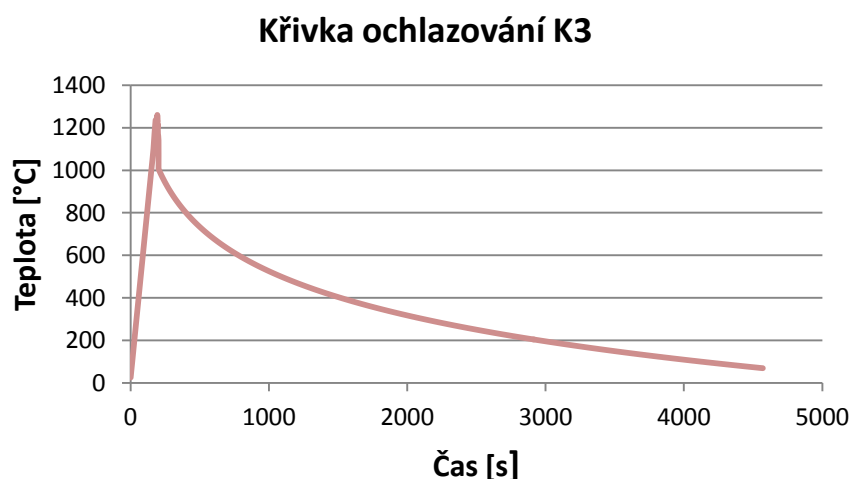


### 46MnVS6



#### 4.4.2.3 Křivka ochlazování K3 - 4290s

Křivka K3 odpovídala době ochlazování materiálových náhrad po dobu 1h 11min 30s.



Obr. 4.42 Křivka ochlazování K3

U materiálu 30MnVS6 byla zjištěna fericko-perlitická struktura s výrazným podílem feritu a pouze s malým podílem bainitu a martenzitu (Obr. 4.43). Tyto fáze, však tvořili, už jen velmi malé ostrůvky. Tyto ostrůvky dosahovaly, tak malých rozměrů, že už na nich nebylo možné změřit ani mikrotvrdoost HV<sub>0,01</sub>. Tomu odpovídala i hodnota tvrdosti 239 HV<sub>10</sub>. Materiál dosahoval tažnosti A<sub>5</sub>mm = 30%, na rozdíl od materiálu 46MnVS6, kde byla naměřena tažnost o 13% nižší (Tab. 4.20). Materiály 38MnVS6 a 46MnVS6 dosahovaly vyšší meze pevnosti a meze kluzu než materiál 30MnVS6. U materiálu 38MnVS6 byla naměřena mez pevnosti 957MPa a mez kluzu 646MPa. Pro materiál 46MnVS6 hodnoty odpovídaly 922MPa pro mez pevnosti a 602MPa pro mez kluzu. Tvrdoosti materiálů 38MnVS6 a 46MnVS6 přesahovaly požadovanou hranici 250HV<sub>10</sub>. Také u materiálu 38MnVS6 byla stále struktura tvořena nejen feriticko-perlitickou strukturou, ale i bainitem a martenzitem (Obr. 4.44). Byl zde převážně dolní bainit. Tvrdoost tohoto materiálu dosahovala 288HV<sub>10</sub> a to díky velkému

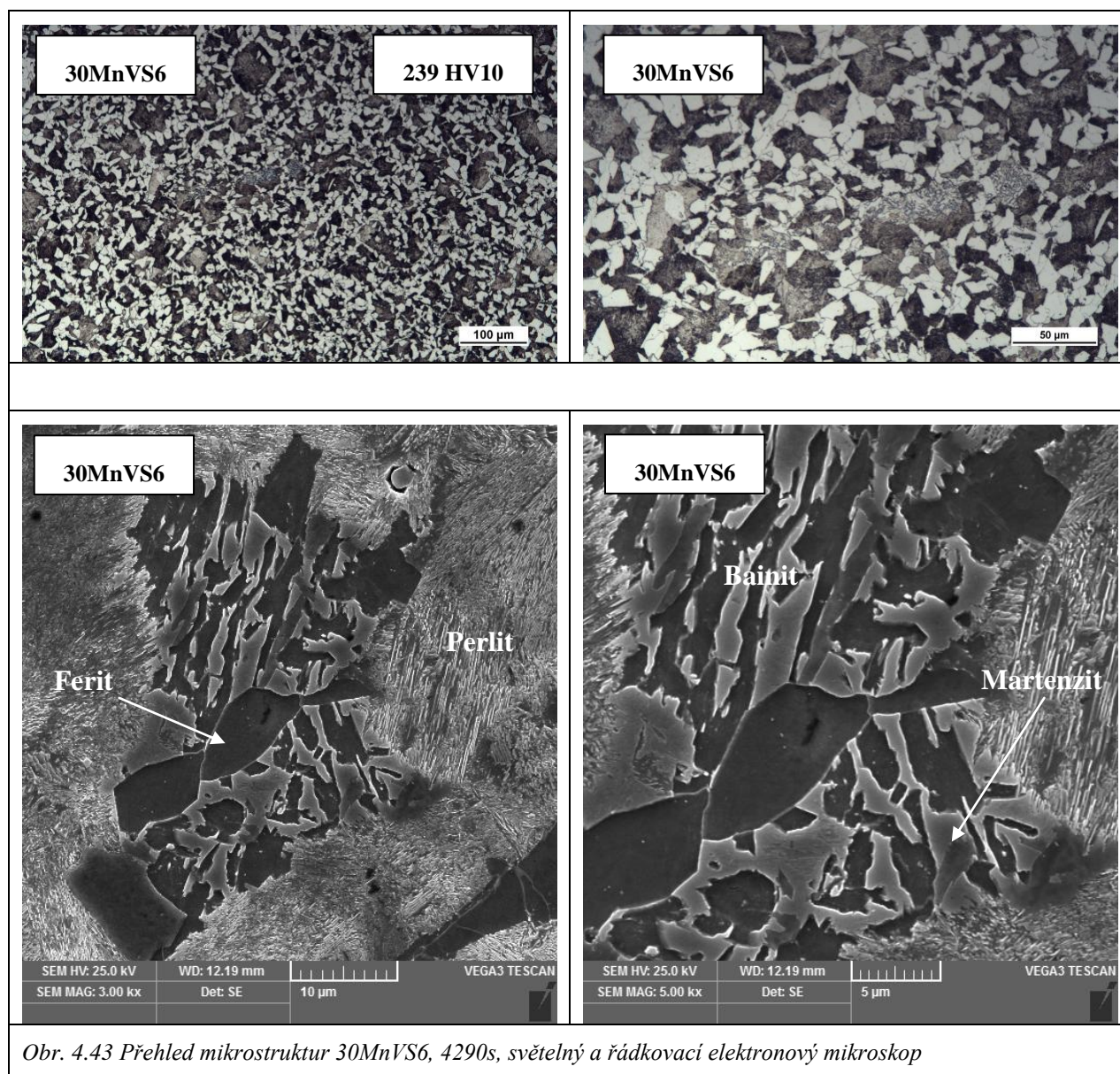


podílu perlitu ve struktuře. Struktura materiálu 46MnVS6 byla opět tvořena alotriomorfním a idiomorfním feritem a perlitem (Obr. 4.45).

	HV10 [-]	R <sub>p0,2</sub> [Mpa]	R <sub>m</sub> [Mpa]	A <sub>5mm</sub> [%]
<b>30MnVS6</b>	239	510	779	30
<b>38MnVS6</b>	288	646	957	22
<b>46MnVS6</b>	284	602	922	17

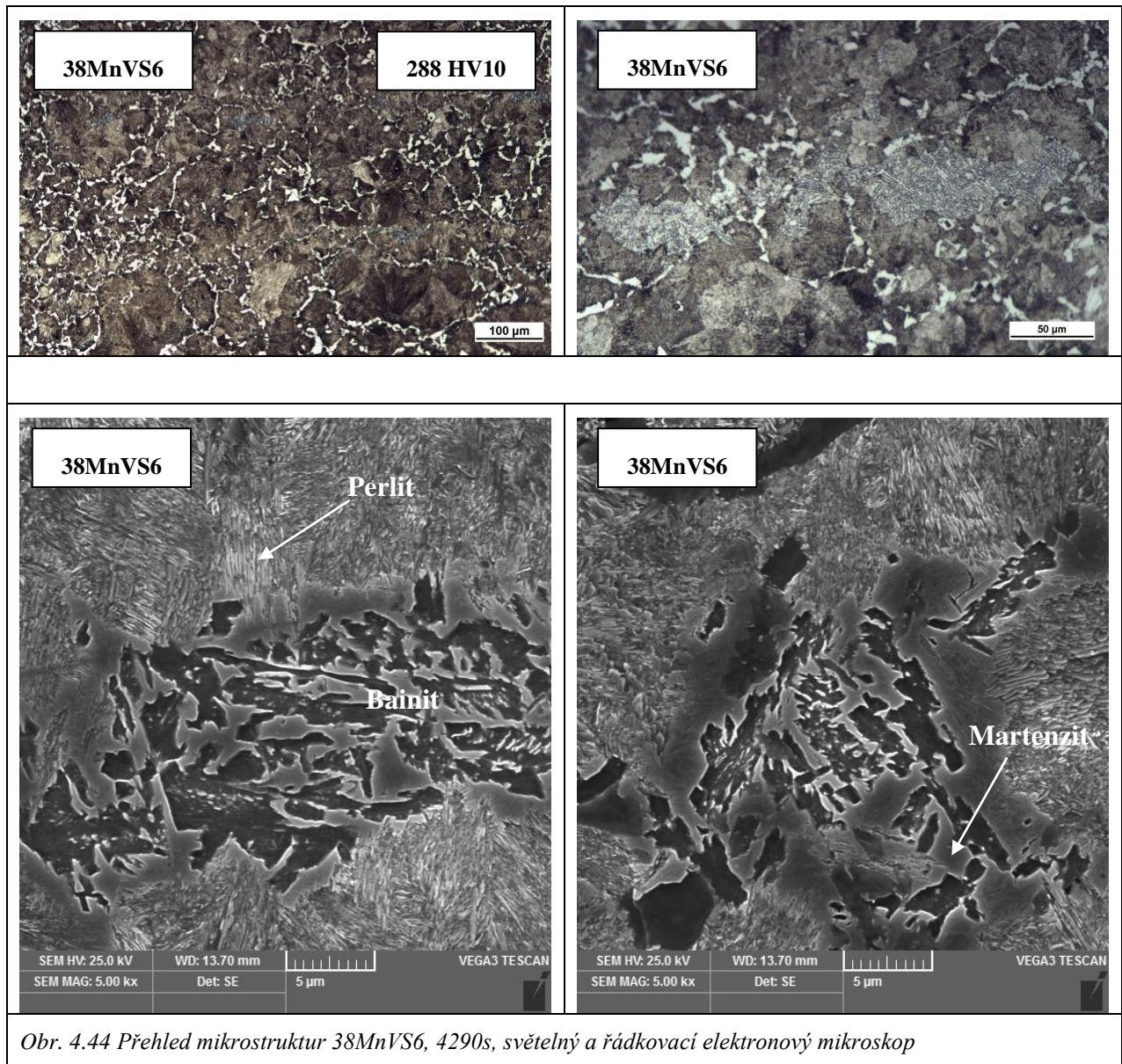
Tab. 4.20 Mechanické vlastnosti a hodnoty tvrdostí všech materiálových náhrad pro křivku K3

### 30MnVS6

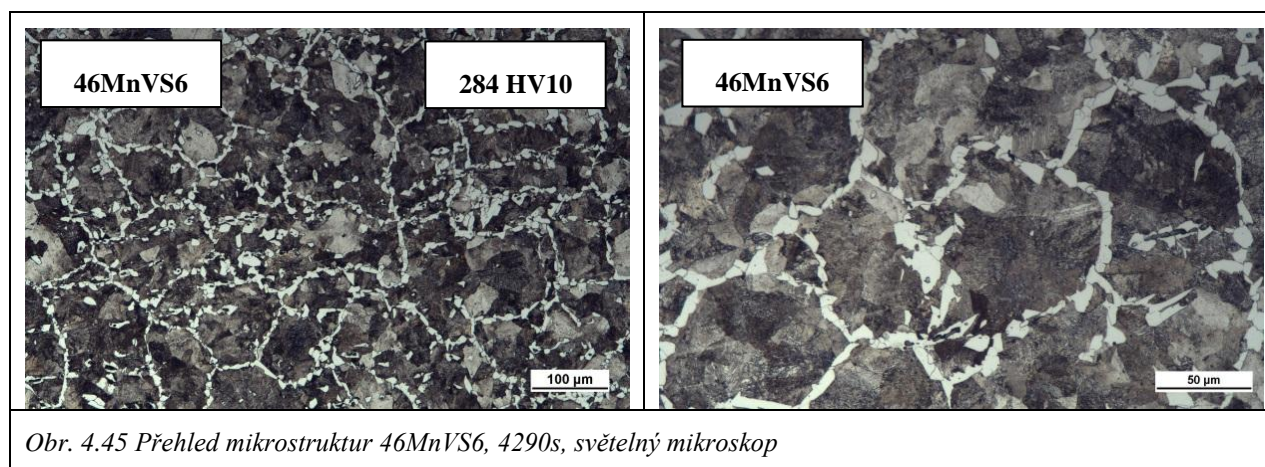


Obr. 4.43 Přehled mikrostruktur 30MnVS6, 4290s, světelný a řádkovací elektronový mikroskop

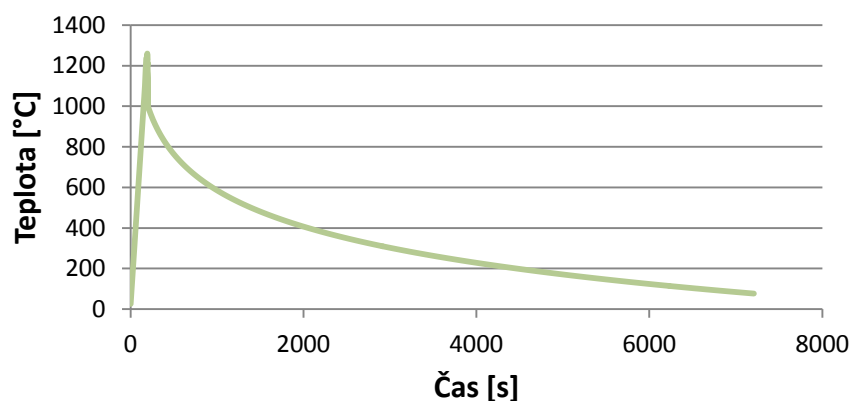
**38MnVS6**



Obr. 4.44 Přehled mikrostruktur 38MnVS6, 4290s, světelný a řádkovací elektronový mikroskop

**46MnVS6****4.4.2.4 Křivka ochlazování K4 - 6930s**

U křivky K4 činila doba ochlazování z teploty 950°C na teplotu cca 50°C 1h 55min 30s. Při dosažení teploty cca. 50°C byly záznamy průběhu teplot pro všechny křivky ukončeny.

**Křivka ochlazování K4**

Obr. 4.46 Křivka ochlazování K4

Po ochlazování dle křivky K4 (Obr. 4.46) nebyla již v žádném z materiálů zjištěna zákalná struktura. Všechny tři materiály byly tvořeny perliticko-feritickou strukturou. Avšak u materiálu 38MnVS6 a 46MnVS6 převažoval ve struktuře perlit. Tomu odpovídaly i výsledky naměřených tvrdostí. U oceli 30MnVS6 dosahovala tvrdost 237 HV10, což odpovídalo nejvyššímu podílu feritu ve struktuře. Pro ocel 38MnVS6 byla naměřena tvrdost 267HV10 a pro ocel 46MnVS6 tvrdost činila 297HV10 (Tab. 4.21). I přestože, byla u všech materiálových náhrad přítomna perliticko-feritická struktura, jen u oceli 30MnVS6 odpovídala tvrdost stanoveným podmínkám (< 250 HV10). Struktura u materiálu 38MnVS6 a 46MnVS6 byla tvořena alotriomorfním feritem, který tvořil feritické síťoví po hranicích původních austenitických zrn. Byl zde přítomen i ferit idiomorfní, a to především ve struktuře oceli 46MnVS6 (Obr. 4.49).

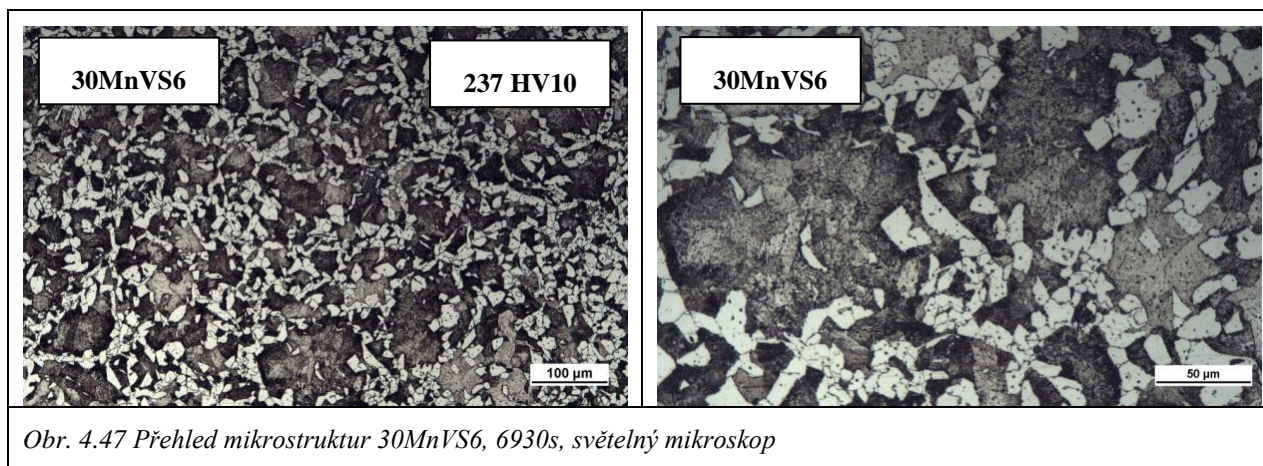
U materiálu 30MnVS6 byla naměřena nejnižší hodnota meze pevnosti 754MPa, při tažnosti materiálu 30%. Hodnota tažnosti materiálu 30MnVS6 odpovídala nejvyšší naměřené hodnotě ze všech ocelí. A to především, díky nejvyššímu podílu feritu ve struktuře. Mez pevnosti v tahu pro materiál 38MnVS6 činila 941MPa, jednalo se o nejvyšší naměřenou hodnotu. Tažnost tohoto materiálu byla 21%. U materiálu 46MnVS6 byla hodnota meze pevnosti 897MPa při tažnosti 18% (Tab. 4.21)

Z výsledků je zřejmé, že křivka ochlazování K4, je vhodnou variantou pro řízené ochlazování materiálu 30MnVS6.

	HV10 [-]	R <sub>p0,2</sub> [Mpa]	R <sub>m</sub> [Mpa]	A <sub>5mm</sub> [%]
30MnVS6	237	498	754	30
38MnVS6	267	628	941	21
46MnVS4	297	582	897	18

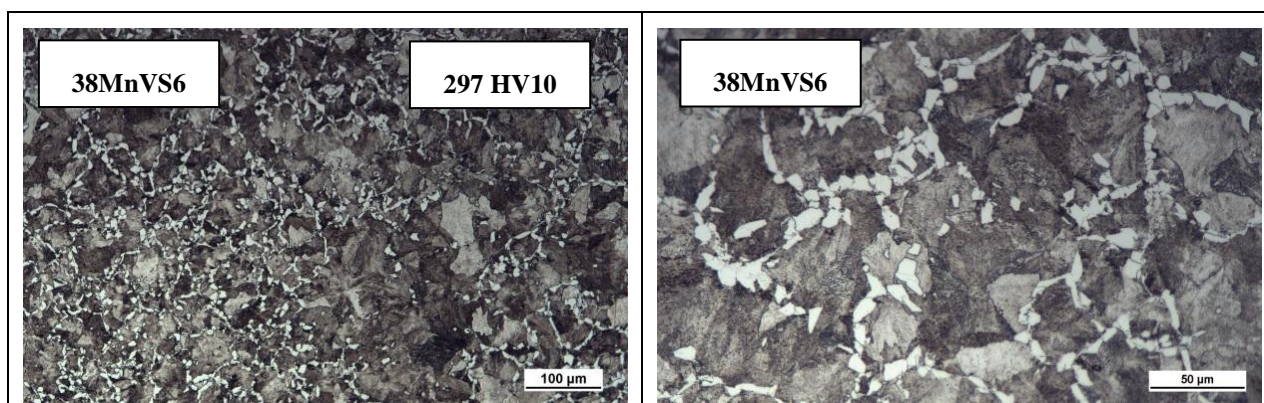
Tab. 4.21 Mechanické vlastnosti a hodnoty tvrdosti všech materiálových náhrad pro křivku K4

### 30MnVS6



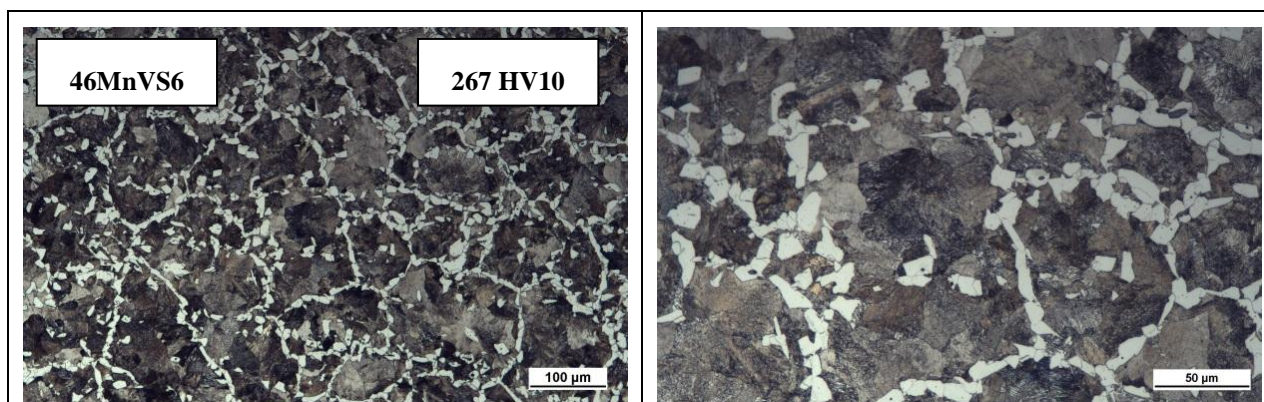
Obr. 4.47 Přehled mikrostruktur 30MnVS6, 6930s, světelný mikroskop

### 38MnVS6



Obr. 4.48 Přehled mikrostruktur 38MnVS6, 6930s, světelný mikroskop

### 46MnVS6

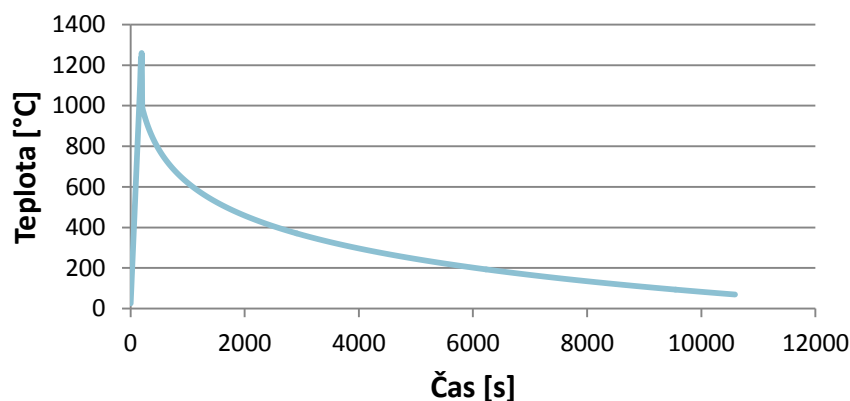


Obr. 4.49 Přehled mikrostruktur 46MnVS6, 6930s, světelný mikroskop

#### 4.4.2.5 Křivka ochlazování K5 - 10310s

Pro křivku K5 byla doba ochlazování z teploty dokování 950°C stanovena na 2h 51min 50s. jednalo se tedy o nejpomalejší průběh ochlazování.

**Křivka ochlazování K5**

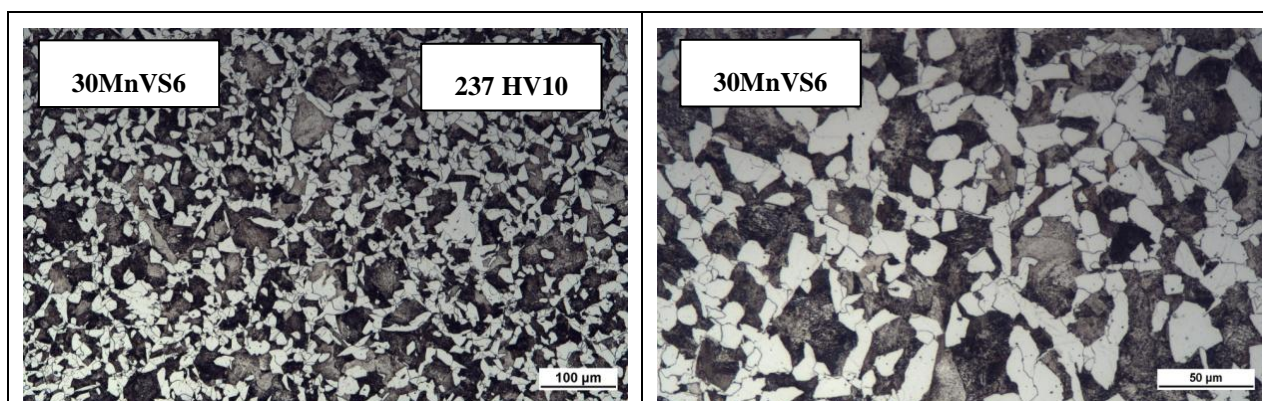


Obr. 4.50 Křivka ochlazování K5

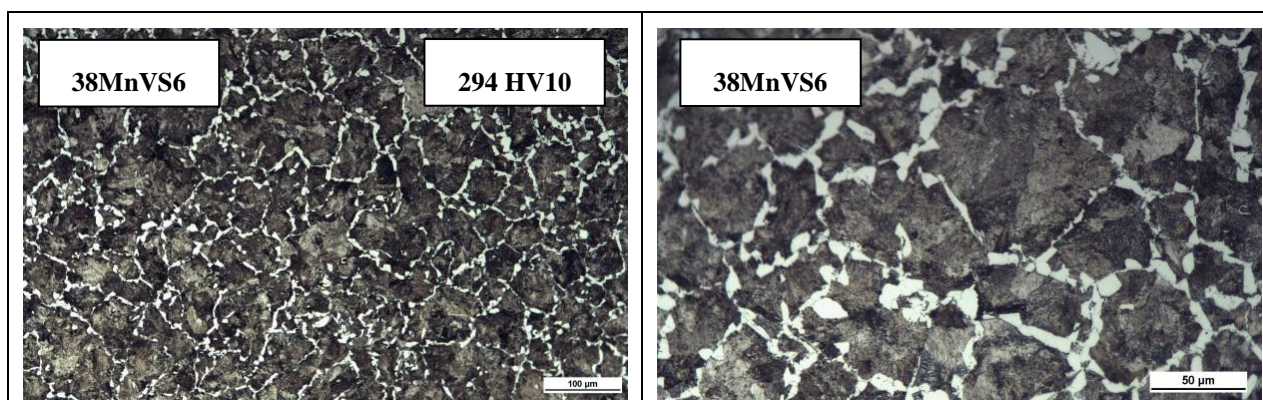
Jak, už bylo zřejmé z předešlé křivky ochlazování K4, byla i u křivky K5 struktura všech zkoumaných ocelí tvořena perlitem a feritem (Obr. 4.51, Obr. 4.52, Obr. 4.53). I zde byl patrný nejvyšší podíl feritu ve struktuře oceli 30MnVS6. Struktura byla tvořena rovnoměrně rozloženou perliticko-feritickou strukturou. Tomu odpovídala naměřená tvrdost 237 HV10 a nejvyšší tažnost 29%. Mez pevnosti dosahovala 505 MPa. I u křivky K5 byly hodnoty tvrdostí materiálu 38MnVS6 a 46MnVS6 nadlimitní. U materiálu 38MnVS6 byla naměřena hodnota tvrdosti 275HV10 a u materiálu 46MnVS6 ještě o 19 Vickers vyšší. Bylo tomu tak, i u meze pevnosti a meze kluzu. Materiály 38MnVS6 a 46MnVS6 dosahovaly vyšší meze pevnosti a meze kluzu než materiál 30MnVS6. U materiálu 38MnVS6 byla naměřena mez pevnosti 950MPa a mez kluzu 638MPa. Pro materiál 46MnVS6 hodnoty odpovídaly 876MPa pro mez pevnosti a 555MPa pro mez kluzu. Odchylka hodnot tažností materiálu 38MnVS6 a 46MnVS6 činila 4% (Tab. 4.22)

	HV10 [-]	R <sub>p0,2</sub> [Mpa]	R <sub>m</sub> [Mpa]	A <sub>5mm</sub> [%]
30MnVS6	237	505	764	29
38MnVS6	275	638	950	22
46MnVS4	294	555	876	18

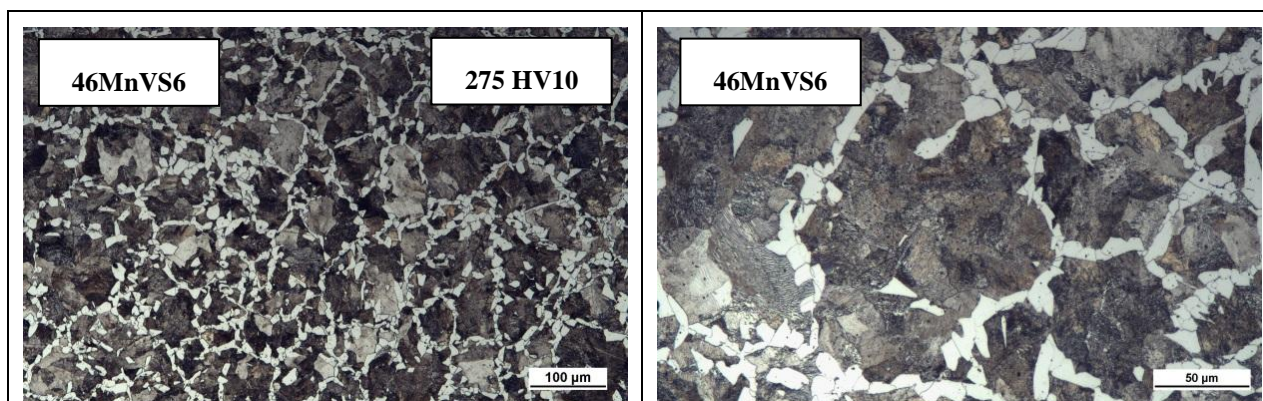
Tab. 4.22 Mechanické vlastnosti a hodnoty tvrdostí všech materiálových náhrad pro křivku K5

**30MnVS6**

Obr. 4.51 Přehled mikrostruktur 30MnVS6, 10310s, světelný mikroskop

**38MnVS6**

Obr. 4.52 Přehled mikrostruktur 38MnVS6, 10310s, světelný mikroskop

**46MnVS6**

Obr. 4.53 Přehled mikrostruktur 46MnVS6, 10310s, světelný mikroskop

## 5. Diskuze výsledků

Diplomová práce se zabývala fyzikálními simulacemi zápusťkového kování, využívající materiálově-technologického modelování. Pro experimentální účely byl jako zástupce vybrán výkovek spadající do kategorie malých výkovek. Jednalo se o výkovek využívaný jako brzdový buben nákladních automobilů, který je vyráběn z uhlíkové oceli C45. Požadavkem u tohoto výkovku bylo dosažení feriticko-perlitické mikrostruktury nepřesahující tvrdost 250 HV10. Na výkovku byla provedena analýza výchozí makrostruktury. Pro tvorbu materiálově-technologického modelu byla nutná detailní analýza reálného procesu kování a následného tepelného zpracování výkovku. Sběr potřebných dat byl proveden v kovárně VIVA, a.s. Ke stanovení rozsahu materiálově-technologického modelu byla využita FEM simulace. Simulace zápusťkového kování byla vytvořena v programu DEFORM ve spolupráci s firmou COMTES FHT, a.s. Vytvořená FEM simulace poskytla přehled o průběhu teplot a skutečných logaritmických deformacích v jednotlivých místech výkovku. Výstupní data z programu DEFORM sloužily jako vstupní data pro tvorbu programu pro termomechanický simulátor. Pomocí termomechanického simulátoru bylo provedeno několik materiálově-technologických modelování. Principem materiálově-technologického modelování je vnesení skutečných logaritmických deformací a skutečného průběhu teplot do vzorku.

Pro diplomovou práci byly vybrány dva referenční body ve výkovku a to bod P10 a P26. Pro oba tyto body byl vytvořen příslušný materiálově-technologický model. Oběma materiálově-technologickými modely byly zpracovány závitové vzorky na termomechanickém simulátoru. Tyto vzorky následně sloužily k potvrzení shody mezi reálným výkovkem a modelem. A tím i k ověření správnosti vytvořeného materiálově-technologického modelu.

- **Bod P10 – materiálově-technologický model pouze části kování**

V první fázi byla, jak u výkovku, tak u vzorku zpracovaného modelem dokumentována mikrostruktura. V obou případech byla výsledná struktura tvořena perlitem a feritem s nežádoucí Widmanstättenovou morfologií. U modelu i výkovky byla naměřena tvrdost. Zkoušky pro stanovení mechanických vlastností nebyly pro tento model prováděny. Na výkovku byla naměřena tvrdost 221 HV10 a na modelovém vzorku 226 HV10. To odpovídalo méně než 2% odchylce hodnot.

- **Bod P10 – materiálově-technologický model pro kování a normalizačního žihání**

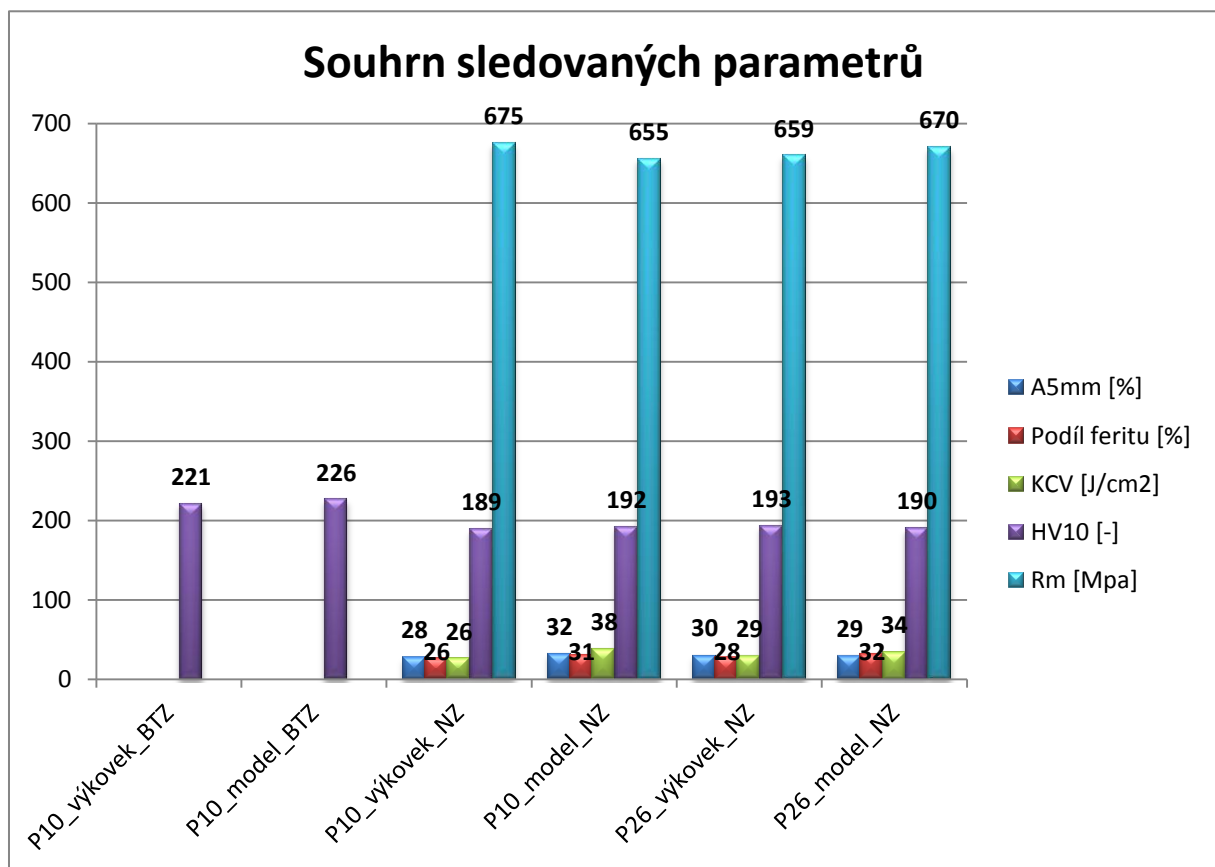
I zde byla nejprve hodnocena mikrostruktura reálného výkovku a vzorku zpracovaného modelem pomocí světelného mikroskopu. Struktura po normalizačním žihání byla tvořena perlitem a feritem. Podíl feritu u výkovku činil 26% a u modelu 31%. Dále byly naměřeny tvrdosti. Výkovek dosahoval tvrdosti 189HV10 a model se lišil o pouhé 3 Vickerse. Jak je uvedeno na grafu Graf. 5. I rozdíl hodnot byl pouze 2%. Pro stanovení mechanických vlastností byly pro výkovek a model provedeny zkoušky tahem a zkoušky vrubové houževnatosti. Pro výkovek hodnoty meze pevnosti dosahovaly 675MPa při tažnosti 28% a pro model byly naměřeny hodnoty 655MPa při tažnosti 32%. U zkoušky vrubové houževnatosti byla naměřena pro výkovek hodnota 26 J/cm<sup>2</sup> a pro model 38 J/cm<sup>2</sup>. U této hodnoty došlo k největší odchylce. Tato odchylka mohla být dána nehomogenitou materiálu, popřípadě výskytem vměstků.



- **Bod P26 – materiálově-technologický model pro kování a normalizačního žíhání**

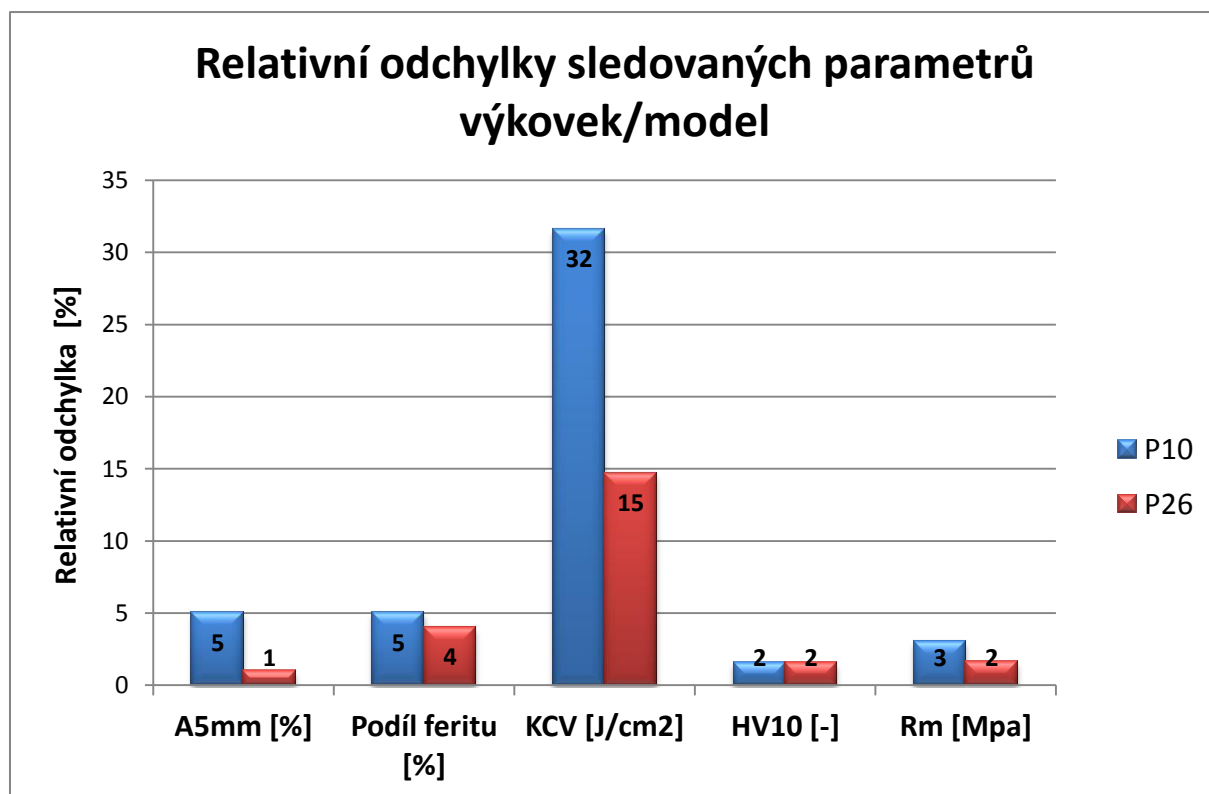
Po zpracování naměřených dat pro bod P10 byl vytvořen materiálově-technologický model i pro bod P26. I zde byla nejprve vyhodnocena mikrostruktura výkovku a modelu. U obou byla prokázána perliticko-feritická struktura, kdy pro výkovek byl stanoven podíl feritu na 28% a u modelu na 32%. Střední hodnota tvrdosti pro výkovek odpovídala 193 HV10. Pro model dosahovala tvrdost hodnoty 190 HV10. I zde byl rozdíl hodnot pouhé 3 body. Pevnost výkovku byla 659 MPa. V případě modelově zpracovaného materiálu byla naměřena hodnota meze pevnosti 670 MPa. Při porovnání hodnot získaných ze zkoušky rázem v ohybu byla hodnota KCV výkovku  $29 \text{ J/cm}^2$  a hodnota KCV pro model  $34 \text{ J/cm}^2$ . Zde už činila odchylka hodnot jen 15 % na rozdíl od bodu P10.

Všechny sledované parametry mezi výkovkem a modelově zpracovaným vzorkem a jejich odchylky jednotlivých hodnot jsou přehledně shrnuty na grafu Graf. 5.1.



Graf. 5.1 Souhrn sledovaných parametrů pro výkovek a odpovídající model. Poznámka: BTZ-bez tepelného zpracování, NZ – normalizačně žíháno

Jak je zřejmé z grafu odchylek hodnot (Graf. 5.2) získaných na vzorcích z materiálově-technologického modelování, a na vzorcích ze skutečného procesu, vykazuje model velmi dobrou shodu s realitou. Většina odchylek se pohybuje v intervalu do 5-ti procent. Výjimku tvoří pouze hodnoty odchylek naměřené při zkoušce vrubové houževnatosti. Tento rozdíl může být zapříčiněn nehomogenitou materiálu nebo výskytem vměstků v těsné blízkosti vrubu.



Graf. 5.2 Souhrn relativních odchylek sledovaných parametrů mezi výkovkem a modelem  
 Souhrn relativních odchylek sledovaných parametrů mezi výkovkem a modelem

Poté, co bylo prokázáno, že pomocí materiálově-technologického modelu je možné dosáhnout výrazné shody mezi skutečným výkovkem a závitovými vzorky zpracovaných modelem, bylo přistoupeno k druhé části experimentu. V této části bylo pomocí fungující materiálově-technologického modelu provedeno odzkoušení navržených materiálových náhrad. U

Křivky ochlazování	Doba ochlazování
<b>K1</b>	33min 50s (2030s)
<b>K2</b>	47min 30s (2850s)
<b>K3</b>	1h 11min 30s (4290s)
<b>K4</b>	1h 55min 30s (6930s)
<b>K5</b>	2h 51min 50s (10310s)

Tab.5.1Přehled dob ochlazování pro jednotlivé křivky

výkovku z materiálu C45 bylo po kování nutné provést ještě následné tepelné zpracování, aby byla ze struktury odstraněna Widmanstättenova struktura a získány požadované mechanické vlastnosti. Při návrhu vhodných materiálových náhrad, kde je možné následné tepelné zpracování nahradit technologií řízeného ochlazování, by bylo možné ušetřit ekonomické i časové náklady. Jako materiálové náhrady byly vybrány tři typy mikrolegovaných ocelí. Ocel 30MnVS6, 38MnVS6 a 46MnVS6, kde je jako mikrolegur využíváno 0,15-0,80% Si, 1,20-1,60% Mn, 0,08-0,20% V. Rozdíl v podílu uhlíku je 0,08%. Pro tyto oceli byly dle vypočtených ARA diagramů navrženy křivky ochlazování K1 až K5, které představovaly dobu ochlazování od 2090s do 10310s (Tab.5.1.). Požadavek odběratele na konečné vlastnosti výkovku bylo dodržení maximální hodnoty tvrdosti 250 HV10. Dále pak musela být výsledná struktura tvořena feritem a perlitem. Proto byly navrženy křivky ochlazování stanoveny tak, aby bylo docílenou feriticko-perlitické

struktury s požadovanou tvrdostí. Doba ochlazování byla stanovena od teploty 950°C do teploty cca. 50°C. Při teplotě 950°C je ukončena poslední operace kování a u oceli C45 následuje volné vychlazení na vzduchu. Závitové vzorky vyrobené z materiálových náhrad byly odzkoušeny pomocí materiálově-technologického modelu odpovídající bodu P10. Na vzorcích byl odzkoušen proces kování a poté bylo od teplotě 950°C napojeno řízené ochlazování dle navržených křivek. Po odzkoušení všech materiálových náhrad a všech křivek ochlazování byly nejprve vyhodnoceny mikrostruktury a poté provedeny tahové zkoušky.

U křivek K1 až K3 (2030s až 4290s) byla mikrostruktura materiálu 30MnVS6 a 38MnVS6 tvořena perliticko-feritickou strukturou s podílem zákalné fáze. Tato fáze se vyskytovala ve formě pásů. Ze snímků pořízených na světelném mikroskopu nebylo jednoznačně detekovatelné, o jakou fázi se jedná. Po analýze mikrostruktury na skenovacím elektronovém mikroskopu byla prokázána perliticko-feritická struktura s podílem bainitu a martenzitu. Struktura materiálu 46MnVS6 byla tvořena převážně perlitem a alotriomorfním feritem po hranicích původních austenitických zrn. Ani z pohledu naměřených tvrdostí neměly materiály požadované vlastnosti. Téměř ve všech případech byly naměřeny hodnoty HV10 vyšší než 250HV10. Pouze u materiálu 30MnVS6 byla v případě ochlazování dle křivky K3 naměřena hodnota tvrdosti 239 HV10. Struktura však obsahovala ještě nepatrný podíl zákalné fáze ve formě malých ostrůvků.

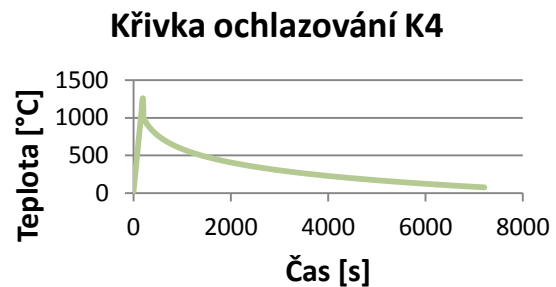
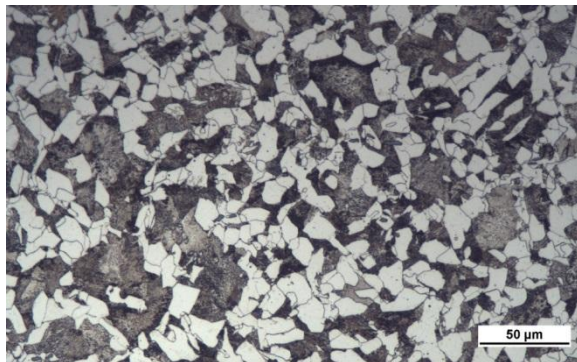
Při řízeném ochlazování dle křivek K4 (6930s) a K5 (10310s) byla struktura všech materiálových náhrad tvořena perlitem a feritem. Avšak u materiálů s vyšším podílem uhlíku 38MnVS6 a 46MnVS6 byly opět naměřeny hodnoty tvrdosti přesahující 250HV10 (Tab. 5.2). Ve struktuře byl detekován vyšší podíl perlitu než u oceli 30MnVS6. Ferit se zde vyskytoval převážně ve formě alotriomorfního feritu po hranicích původních austenitických zrn. U materiálu 46MnVS6 se uvnitř zrn perlitu vyskytoval i nepatrný podíl idiomorfního feritu.

Jako nejlepší varianta materiálové náhrady byl vyhodnocen materiál 30MnVS6 s křivkami ochlazování K4 a K5 (Obr. 5.3). U obou variant ochlazování byl materiál tvořen feriticko-perlitickou strukturou s vyšším podílem rovnoměrně rozmístěného feritu než u materiálů 38MnVS6 a 46MnVS6. I naměřené hodnoty tvrdostí splňovaly požadované podmínky a tvrdost byla v obou případech stanovena na 237 HV10 (Tab. 5.2).

	30MnVS6		38MnVS6		46MnVS6	
	Struktura	HV10 [-]	Struktura	HV10 [-]	Struktura	HV10 [-]
<b>K1</b>	P+F+B+M	260	P+F+B+M	306	P+F	273
<b>K2</b>	P+F+B+M	258	P+F+B+M	303	P+F	281
<b>K3</b>	P+F+B+M	239	P+F+B+M	288	P+F	284
<b>K4</b>	P+F	237	P+F	297	P+F	267
<b>K5</b>	P+F	237	P+F	294	P+F	275

Tab. 5.2 Přehled jednotlivých variant. Poznámka: P-perli, F-Ferit, B- bainit, M- martenzit

V závislosti na dosažených výsledcích a nejkratší době ochlazování byla jako nejlepší materiálová náhrada zvolena ocel 30MnVS6 s křivkou ochlazování K4, představující dobu ochlazování 6930s, tedy cca 2h.



Obr. 5.3 Nejvhodnější variant materiálová náhrada 30MnVS6 a křivka ochlazování K4

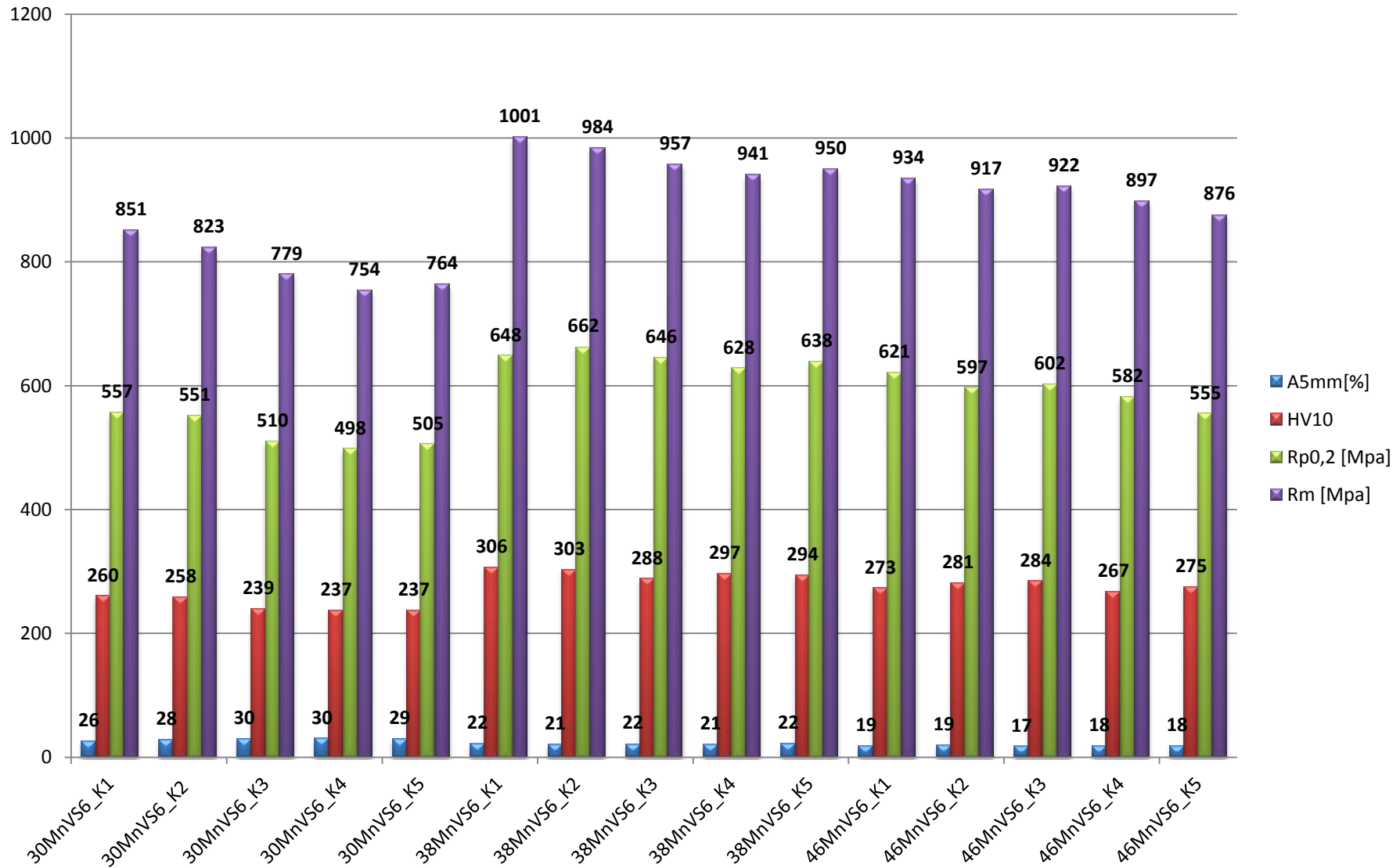
V dalším kroku byl vytvořen ucelený přehled všech mechanických vlastností materiálových náhrad po řízeném ochlazování. U materiálu zpracované dle ochlazovací křivky K1 s nejkratší dobou zpracování dosahovaly nejvyšší hodnoty meze kluzu i pevnosti u materiálu 38MnVS6 hodnot 1001 Mpa pro mez pevnosti a 648Mpa pro mez kluzu. Nejnižší hodnoty byly naměřeny u materiálu 30MnVS6. Pro tento materiál byla hodnota meze pevnosti 851MPa a meze kluzu 557MPa. Druhou limitní křivkou byla křivka K5, kde byly pro materiál 38MnVS6 naměřeny opět nejvyšší hodnoty meze pevnosti 950MPa a meze kluzu 638MPa. U materiálu 30MnVS6 byla naměřeny hodnoty nejnižší, a to pro mez pevnosti 764MPa a pro mez kluzu 505Mpa. Byl zde patrný klesající trend hodnot mechanických vlastností a tvrdosti, kdy u všech variant materiálových náhrad klesaly s prodlužující se dobou ochlazování hodnoty meze kluzu, meze pevnosti i hodnoty tvrdosti. Na druhou stranu hodnoty tažnosti mírně stoupaly.

Z pohledu chemického složení jednotlivých ocelí je překvapivě nejvyšší mez pevnosti u materiálu 38MnVS6 než u předpokládané oceli 46MnVS6 s nejvyšším obsahem uhlíku. To bylo z největší pravděpodobnosti dáno výskytem zákalné fáze ve struktuře materiálu 38MnVS6. U meze kluzu byl rozdíl hodnot pouhá 4% a odchylka hodnot pro mez pevnosti mezi oběma oceli byla 7%. Materiálová varianta vyhodnocená jako nejlepší, tedy materiál 30MnVS6, má však prokazatelně nejvyšší hodnotu tažnosti 30%. Při porovnání s výkovkem z materiálu C45 jsou hodnoty meze pevnosti materiálu 30MnVS6 skoro o 80MPa vyšší při zachování vysokého procenta tažnosti (Tab. 5.3).

	<b>HV10 [-]</b>	<b>R<sub>m</sub> [Mpa]</b>	<b>A<sub>5mm</sub> [%]</b>
Výkovek, C45, normalizačně žíhaný	189	675	28
Model, 30MnVS6, K4	237	754	30

Tab. 5.3 Přehled vlastností výkovku C45 a modelu s navrhovanou materiálovou náhradou 30MnVS6 s křivkou ochlazování K4.

## Mechanické vlastnosti materiálových náhrad po řízeném ochlazení



## Závěr

V diplomové práci bylo na základě literární rešerše a sběru dat v kovárně VIVA, a.s. provedeno zmapování celého reálného procesu zápustkového kování a následného tepelného zpracování výkovku. Jako zástupce byl vybrán výkovek z materiálu C45, který je využíván jako brzdový buben automobilů. Všechny získané údaje z reálného procesu sloužily jako vstupní informace pro FEM simulace vytvořené v programu DEFORM. Ze získaných informací z reálného provozu a dat poskytnutých z FEM simulace byl navrhnout materiálově-technologický model reálného procesu zápustkového kování, který byl následně odzkoušen za použití termomechanického simulátoru. Po odzkoušení modelu na simulátoru následovalo ověření shody mezi reálným výkovkem a vzorkem zpracovaným materiálově-technologickým modelem. Pro porovnání shody byly využity dva body výkovku. Tyto body byly vybrány po konzultaci s kovárnou. Pro oba body byly vytvořeny materiálově-technologické modely. Porovnání modelu a výkovku bylo provedeno pomocí metalografické analýzy pomocí světelného mikroskopu a mechanické vlastnosti byly srovnávány měřením tvrdosti HV10, zkouškou tahem a zkouškou rázem v ohybu. Na základě shody mezi dosaženými výsledky byl model považován za funkční. V první fázi experimentu bylo potvrzeno, že model dosahuje velmi vysoké vypovídací schopnosti, přičemž tato skutečnost vytvořila předpoklad k tomu, že takovéto modely mohou být vhodné pro další aplikace. Výsledky experimentu ukazují, že lze vytvořit velmi přesné modely i pro složité technologické procesy. Podmínkou bylo však správně analyzovat proces, zajistit potřebná a přesná data a vytvořit odpovídající program pro zpracování modelového materiálu na termomechanickém simulátoru. Díky tomu mohlo být přikročeno k druhé fázi experimentu a to k návrhu materiálových náhrad s řízeným ochlazováním. Metoda řízeného ochlazování v kombinaci s mikrolegovanými oceli je dnes hojně využívána. Především díky tomu, že pomocí mikrolegovaných ocelí s technologií řízeného ochlazování, lze zajistit kvalitu výkovku a přesně nadefinovat požadované vlastnosti. Nespornou výhodou je možnost řízeným vývojem struktury získat velmi různorodé vlastnosti výsledného produktu. Pro materiálové náhrady byly navrženy tři typy mikrolegovaných ocelí s odlišným procentuálním podílem uhlíku. Pro ocele 30MnVS6, 38MnVS6 a 46MnVS6 byly stanoveny křivky ochlazování. Po odzkoušení všech navržených variant byla mikrostruktura modelů hodnocena pomocí světelného a řádkovacího elektronového mikroskopu. Provedeno měření tvrdostí dle Vickerse a zkouška tahem. Dle všech naměřených hodnot a vyhodnocených mikrostruktur byla stanovena jako nejlepší materiálová varianta ocel 30MnVS6 s příslušnou křivkou ochlazování.

Hlavním přínosem práce byl návrh vhodné mikrolegované oceli s technologií řízeného ochlazování, která může nahradit stávající materiál C45 využívaný pro výrobu brzdového bubnu. Výsledky experimentu poukazují na fakt, že při využití materiálové náhrady je možné u vybraného materiálu dosáhnout vyšší pevnosti, než materiálu stávajícího, při zachování dobré tažnosti. Nespornou výhodou je i ekonomická stránka věci, kdy dochází k energetickým úsporám, díky odstranění následného tepelného zpracování, které je nutné pro výkovek z materiálu C45 provést. Všechny dosažené výsledky byly poskytnuty kovárně VIVA a.s.

## Použitá literatura

- [1] LENFELD, P., *Technologie II. Tváření kovů, zpracování plastů*. [online]. Liberec: Technická univerzita Liberec. [cit. 18. 11. 2017]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/03.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/03.htm)
- [2] BENEŠOVÁ, S., BERNÁŠEK, V., *Technologie tváření*. Plzeň: ZČU, 2014. ISBN 978-80-261-0449-0.
- [3] EUROFORGE, *History of Metal Forming*. [online]. [cit. 25. 10. 2016]. Dostupné z: <http://www.euroforge.org/industry-portrait/how-about-history.html>
- [4] MUZEUM KOMENSKÉHO V PŘEROVĚ, *Stručná historie*. [online]. [cit. 25. 10. 2016]. Dostupné z: <http://www.helfstyn.cz/kovarstvi/strucna-historie>
- [5] WIKIPEDIE, *Doba železná* [online]. [cit. 27. 10. 2016]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Doba\\_%C5%BEelezn%C3%A1](https://cs.wikipedia.org/wiki/Doba_%C5%BEelezn%C3%A1)
- [6] ZELINA, R., *Kovářství - řemeslo procházející staletími, srovnání a experiment*. Brno. 2013. Diplomová práce. Masarykova univerzita. Pedagogická fakulta. Katedra historie.
- [7] MOODEL EDUTIP s.r.o., *Z historie kovářského řemesla* [online]. [cit. 25. 10. 2016]. Dostupné z: <http://www.moodle.adlib.cz/mod/resource/view.php?id=309>
- [8] MIDGARD, *Der Dampfhammer*, [online]. [cit. 27. 10. 2016]. Dostupné z: <https://midgard-1880.de/shop/der-dampfhammer/>
- [9] ČECHURA, M., HLAVÁČ, J., STANĚK, J., *Konstrukce tvářecích strojů*. Učební texty.[online]. [cit. 1. 11. 2016]. Dostupné z: <http://zcu.cz/export/sites/zcu/pracoviste/vyd/online/Konstrukce-tvarecich-stroju.pdf> Plzeň: ZČU-KKS, 2014.
- [10] PRACTICALMACHINIST.COM, *Steam hammer "Fritz"*. [online]. [cit. 1. 11. 2016]. Dostupné z: <http://www.practicalmachinist.com/vb/antique-machinery-and-history/photo-fritz-301987/>
- [11] AZO MATERIALS, *Forging - History and Key Developments in the Metals Forging Industry*. [online]. [cit. 2. 11. 2016]. Dostupné z: [http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2195#\\_Modern\\_Computer\\_Controlled](http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2195#_Modern_Computer_Controlled)
- [12] ŠUCHMANN, P., KUBINA, T., *Strategická výzkumná agenda. Technologické platformy Svazu kováren České republiky*. [online]. [cit. 14. 11. 2016]. Dostupné z: [www.skcr.org/wp-content/uploads/2015/02/Strategická-výzkumná-agenda.doc](http://www.skcr.org/wp-content/uploads/2015/02/Strategická-výzkumná-agenda.doc)
- [13] EUROFORGE, *Production of Forgings*. [online]. [cit. 14. 11. 2016]. Dostupné z: <http://www.euroforge.org/statistics/production-figures.html>
- [14] ČERMÁK, J., *Trendy v kovářenském průmyslu*. MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 10. 11. 2016]. Dostupné z: <http://m.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-kovarenskem-prumyslu>
- [15] SVAZ KOVÁREN ČR z. s., *O svazu*. [online]. [cit. 5. 11. 2016]. Dostupné z: <http://www.skcr.org/>
- [16] KOVÁRNA VIVA a.s., *O firmě. Výroba*. [online]. [cit. 6. 11. 2016]. Dostupné z: [www.viva.cz](http://www.viva.cz)

- [17] CZECH PRECISION FORGE a.s. *O společnosti. Výrobní aktivity*. [online]. [cit. 6. 11. 2016]. Dostupné z: [www.cpforge.com](http://www.cpforge.com)
- [18] OSTROJ a. s. [online]. [cit. 6. 11. 2016]. Dostupné z: [www.ostroj.cz](http://www.ostroj.cz)
- [19] TRIANGOLO spol. s r. o. [online]. [cit. 6. 11. 2016]. Dostupné z: [www.triangolo.cz](http://www.triangolo.cz)
- [20] HF-CZECHFORGE spol. s r. o. [online]. [cit. 6. 11. 2016]. Dostupné z: [www.hammerwerk.cz](http://www.hammerwerk.cz)
- [21] Moravské kovárny, a.s. [online]. [cit. 6. 11. 2016]. Dostupné z: [www.mokov.cz](http://www.mokov.cz)
- [22] PEFORM Chrudim, spol. s r. o. [online]. [cit. 6. 11. 2016]. Dostupné z: [www.peform.cz](http://www.peform.cz)
- [23] ZETOR KOVÁRNA, s.r.o [online]. [cit. 6. 11. 2016]. Dostupné z: [www.zetorkovarna.cz](http://www.zetorkovarna.cz)
- [24] INPO spol. s r. o. [online]. [cit. 6. 11. 2016]. Dostupné z: [www.inpo-cz.cz](http://www.inpo-cz.cz)
- [25] MSV Metal Studénka a.s.[online]. [cit. 6. 11. 2016]. Dostupné z: [www.msvmetal.eu](http://www.msvmetal.eu)
- [26] TATRA METALURGIE a.s. [online]. [cit. 6. 11. 2016]. Dostupné z: [www.tatrametalurgie.cz](http://www.tatrametalurgie.cz)
- [27] ZVU Kovárna a.s. [online]. [cit. 6. 11. 2016]. Dostupné z: [www.kovarna.cz](http://www.kovarna.cz)
- [28] HAŠEK, V. a kolektiv, *Kování*. Praha: STNL, 1965.
- [29] MOJŽÍŠ, A., PFROGNER, F., *Teorie a technologie tváření kovů*. Plzeň: Vysoká škola strojírenská a elektrotechnická v Plzni, 1977.
- [30] LENFELD, P., *Technologie II. Tváření kovů, zpracování plastů*. [online]. Liberec: Technická univerzita Liberec. [cit. 18. 11. 2017]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/01.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm)
- [31] FABÍK, R., *Tváření kovů*. [online]. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství., 2012. ISBN 978-80-248-2572-4.
- [32] SCHINDLER, I., KAWULOK, P., *Deformační chování materiálů*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství., 2013. Dostupné z: [https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/deformacni-chovani/materialu/Schindler\\_Kawulok\\_Deformacni\\_chovani\\_materialu.pdf](https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/deformacni-chovani/materialu/Schindler_Kawulok_Deformacni_chovani_materialu.pdf)
- [33] PTÁČEK, L., *Nauka o materiálu I*, Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2003. ISBN 80-7204-283-1.
- [34] DROZD, Z., *Superlehké slitiny hořčíku*. [online]. Praha: Matematicko-fyzikální fakulta UK, [cit. 25. 11. 2017]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3099081/>
- [35] ATEAM, *1. cvičení. Strojírenské materiály*. [online]. [cit. 20. 11. 2016]. Dostupné z: [www.ateam.zcu.cz/staticke\\_zkouseni\\_cviceni.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/staticke_zkouseni_cviceni.pdf)
- [36] BEROUN, Stanislav. *Úvod do strojírenství*. [online]. [cit. 25. 11. 2016]. Dostupné z: [http://www.kvm.tul.cz/studenti/texty/uvod\\_do\\_strojirenstvi/UdS-5pr.pdf](http://www.kvm.tul.cz/studenti/texty/uvod_do_strojirenstvi/UdS-5pr.pdf)
- [37] ALTAN, T., NGAILE, G., SHEN, G., *Cold and hot forming: fundamentals and applications*. Materials park, Ohio: ASM International, 2005. ISBN-13: 978-0-87170-805-2.
- [38] LENFELD, Petr. *Technologie II* [online]. Liberec: [cit. 25. 11. 2016]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/03.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/03.htm)



- [39] ČERMÁK, J., Teorie a metodika tváření1.[online]. [cit. 2. 12. 2016]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/6541767-Teorie-a-metodika-tvareni-1-volba-vyrobn%C3%AD-technologie-cvut-v-praze-fakulta-strojni-ustav-strojirenske-technologie-doc-ing-jan-cermak-csc.html>  
Praha: ČVUT v Praze.
- [40] LENFELD, Petr. *Technologie II* [online]. Liberec: [cit.25.11.2016]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/03-kovani/01-vlaknita%20textura.JPG](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/03-kovani/01-vlaknita%20textura.JPG)
- [41] DAVIS, J. R., ed. *Metals handbook. Vol. 14, Forming and forging*, Metals Park: ASM International, 1996. ISBN 0-87170-020-4.
- [42] KOCICH, R., *Termomechanické procesy tváření*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství., 2013. Dostupné z: [https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/termomechanicke-procesy-tvareni/Kocich\\_Termomechanicke-procesy-tvareni.pdf](https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/termomechanicke-procesy-tvareni/Kocich_Termomechanicke-procesy-tvareni.pdf)
- [43] KASL, J., JANDOVA, D., *Fyzikální metalurgie a mezní stavy mat.* Podklady k přednáškám FMM .Plzeň: ZČU Plzeň
- [44] VOJTĚCH, D., *Kovové materiály*. 1. Vyd. Praha: VŠCHT v Praze, 2006. ISBN 80-7080-600-1. [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_isbn-80-7080-600-1/pdf/049.pdf](http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-600-1/pdf/049.pdf)
- [45] KRÁL, R., *Kalení I.*, [online]. [cit. 5. 12. 2017]. Dostupné z: [http://kovarna.webzdarma.cz/stranky/zakladni\\_postupy/kaleni1.htm](http://kovarna.webzdarma.cz/stranky/zakladni_postupy/kaleni1.htm)
- [46] VOJTĚCH, D., *Kovové materiály*. 1. Vyd. Praha: VŠCHT v Praze, 2006. ISBN 80-7080-600-1. [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_isbn-80-7080-600-1/pdf/049.pdf](http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-600-1/pdf/049.pdf)
- [47] SKÁLOVÁ, J., KOUTSKÝ, J., MOTYČKA, V., *Nauka o materiálech*. Plzeň: ZČU, 1999. ISBN 80-7082-501-4
- [48] MAZANCOVÁ, E., *Technické materiály I. Kovové materiály.*, Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2577-9.
- [49]VÁŇOVÁ, I., *Základy tepelného zpracování.*, Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2011. .[online]. [cit. 15. 12. 2016]. Dostupné z: [http://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/cs/studium-a-vyuka/studijni-opory/636-Vanova\\_ZTZ.pdf](http://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/cs/studium-a-vyuka/studijni-opory/636-Vanova_ZTZ.pdf)
- [50] TEKKAYA, A.,E.,HOMBERG, W.,BROSIUS, A., *60 Excellent Inventions*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. ISBN 978-3-662-46311-6.
- [51] DOLEŽALOVÁ, S., *Simulace v konfekční výrobě s využitím metody konečných prvků*. [cit.18.1.2017]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/5975288-Simulace-v-konfekcni-vyrobe-s-vyuzitim-metody-konecnych-prvku-mkp-fem.html>
- [52] PALÁN, R., *Modelování a simulace komplexních systémů* Nakladatelství Masarykovy univerzity, 2011. ISBN: 978-80-210-5318-2.
- [53] WIKIPEDIE, *Vědecké modelování*. [online]. [cit. 15. 1. 2017]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/V%C4%9Bdeck%C3%A9\\_modelov%C3%A1n%C3%AD](https://cs.wikipedia.org/wiki/V%C4%9Bdeck%C3%A9_modelov%C3%A1n%C3%AD)
- [54] KŘIVÝ, I., KINDLER, E., *Simulace a modelování.*, Ostrava: Ostravská univerzita. Přírodovědecká fakulta, 2001.

- [55] LAŠOVÁ, V., *Metoda konečných prvků ve výpočtech obráběcích strojů*. Plzeň: ZČU, 2011. ISBN 978-80-261-0008-9.
- [56] DEFORM, [online]. [cit. 20. 1. 2017]. Dostupné z: [www.deform.com](http://www.deform.com)
- [57] DEFORM3D [online]. [cit. 20. 1. 2017]. Dostupné z: <http://asroni.blogspot.cz/2013/01/simulasi-3-dimensi-pengaruh-variasi.html>
- [58] ICAMS, [online]. [cit. 25. 1. 2017]. Dostupné z: <http://www.icams.de/content/research/>
- [59] WIKIPEDIE, *Multiscale modeling*. [online]. [cit. 15. 1. 2017]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Multiscale\\_modeling](https://en.wikipedia.org/wiki/Multiscale_modeling)
- [60] IBRAHIM, K., et al. A study of material-technological modelling for choosing the ideal cooling rate for designing production of closed die forgings using 30MnVS6 steel. In: *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*. Viena: DAAAM International, 2016. s. 551-555. ISSN 1726-9679. ISBN 978-3-902734-08-2.
- [61] VOREL, I., et al. Material-technological modelling of C45 steel die forgings. In: *Procedia Engineering*, 2015, 100, s. 714-721. ISSN 1877-7058.
- [62] VOREL, I., VANČURA, F., MAŠEK, B., Material-technological modelling of controlled cooling of closed die forgings from finish forging temperature. In: *METAL 2015: 24th international conference on metallurgy and materials: conference proceedings*. Ostrava: Tanger, 2015. s. 202-208. ISBN 978-80-87294-62-8.
- [63] GREGER, M., RUSZ, S., HERNAS, A., Vliv dokovacích teplot na strukturu a vlastnosti výkovků z mikrolegovaných ocelí. *METAL 2003*, Hradec nad Moravicí: 2003. [online]. [cit. 20. 11. 2016]. Dostupné z: <http://konference.tanger.cz/data/metal2003/sbornik/papers/194.pdf>
- [64] GREGER, M., Vliv dokovací teploty na strukturu a vlastnosti mikrolegovaných ocelí. *METAL 2002*, Hradec nad Moravicí: 2002. [online]. [cit. 20. 11. 2016]. Dostupné z: [http://metal2012.tanger.cz/files/proceedings/metal\\_02/papers/76.pdf](http://metal2012.tanger.cz/files/proceedings/metal_02/papers/76.pdf)
- [65] GREGER, M., Kování mikrolegovaných ocelí s vanadem. *METAL 2001*, Ostrava: 2002. [online]. [cit. 20. 11. 2016]. Dostupné z: <http://konference.tanger.cz/data/metal2001/sbornik/papers/73.pdf>
- [66] SVANDA, *Vliv legovacích prvků na vlastnosti ocelí*. [online]. [cit. 20. 3. 2017]. Dostupné z: <http://svanda.webz.cz/vyuka/legury.htm>
- [67] SEDLÁČEK, M., *Hutnické listy* [online]. [cit. 8. 5. 2017]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/7516048-M-e-t-a-l-l-u-r-g-i-c-a-l-j-o-u-r-n-a-l.html> - hutnické listy