

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Zpracování středně uhlíkové nízkolegované oceli v semi-solid stavu

Autor: **Kateřina RUBEŠOVÁ**

Vedoucí práce: **Dr. Ing. Hana JIRKOVÁ**

Akademický rok 2016/2017

(ZDE BUDE VLOŽENO OFICIÁLNÍ ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ 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 práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Rubešová	Jméno Kateřina	
STUDIJNÍ OBOR	B2301 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Dr. Ing. Jirková	Jméno Hana	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Zpracování středně uhlíkové nízkolegované oceli v semi-solid stavu.		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKM	ROK ODEVZD.	2017
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	54	TEXTOVÁ ČÁST	54	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Tato bakalářská práce se zabývá možnostmi zpracování středně-uhlíkové nízkolegované oceli pomocí semi-solid zpracování. Cílem práce bylo aplikovat tento druh zpracování na materiál středněuhlíkové nízkolegované oceli 30MnVS6. V průběhu experimentu bylo nejprve na termomechanickém simulátoru odzkoušeno několik režimů na polotovaru bez formy, s ohřevem na vhodnou teplotu. Poznatky získané ohřevem vzorku bez formy byly následně aplikovány na proces mini-tixoformingu, který probíhal v uzavřené dutině formy.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Semi-solid zpracování, mini-tixoforming, termo mechanické zpracování, near net shape, 30MnVS6</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Rubešová	Name Kateřina		
FIELD OF STUDY	B 2301 “ Materials Engineering and Engineering Metallurgy“			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Dr. Ing. Jirková	Name Hana		
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Processing of medium carbon low-alloy steels in semi-solid state.			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2017
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	54	TEXT PART	54	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This bachelor thesis deals with the possibilities of processing medium-carbon low-alloy steel using a semi-solid processing. The aim of this work was to apply this kind of processing for the steel 30MnVS6, with a relatively narrow forming interval. During the first experiments, several schedules were tested on the thermo-mechanical simulator on a specimen without the die. Specimens were heated to the desired temperatures. Skills obtained by the heating of the specimen without the die were applied to the process of mini-thixoforming in the closed die.
KEY WORDS	Semi-solid processing, mini-thixoforming, thermo mechanical processing, near net shape, 30MnVS6

Poděkování

Autorka děkuje Dr. Ing. Haně Jirkové, za odborné vedení a pomoc při zpracování bakalářské práce, Ing. Davidu Aišmanovi, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci v oblasti řešené problematiky semi-solid zpracování. Dále pak Výzkumnému centru tvářecích technologií za poskytnutí zařízení, výrobu vzorků a pomoc při prováděných zkoušek.

Obsah

1. Úvod.....	10
2. Jednotlivé technologie zpracování v semi-solid stavu	11
2. 1. Thixoforging (Tixokování)	12
2. 2. Rheocasting	13
2. 3. Tixocasting	14
2. 4. Thixomolding	15
2. 6 Thixo lateral extrusion	15
3. Tixoforming	16
3.1 Podstata zpracování v semi-solid stavu	16
3.2 Tixotropní chování.....	17
3.3 Využití tixotropie při tváření kovů.....	18
3.4 Tixoforming ocelí.....	19
3.5 Vliv chemického složení na tixoforming	20
3.6. Struktury dosahované při tixoformingu	23
3.6.1. Vývoj mikrostruktury	23
4. Důležité parametry pro konkrétní zpracování polotovarů	26
4. 1. Konstrukce zápusky	26
4. 2. Ohřev polotovarů	28
4. 2. 1. Ohřev polotovaru do semi-solid stavu	28
4. 2. 2. Kombinovaný odporově indukční ohřev	29
5. Cíle práce - návrh experimentu	30
6. Experimentální část.....	31
6. 1. Použitý software, přístroje a metody.....	31
6. 2. Volba materiálu.....	32
6. 3. Analýza výchozího stavu zvoleného materiálu.....	33
6. 3. 1. Výsledky analýzy výchozího stavu materiálu 30MnVS6.....	33
6. 4. Stanovení vhodné teploty ohřevu pomocí softwaru JMatPro pro středně uhlíkovou ocel 30MnVS6	34
6. 5. Stanovení parametrů pro tixoforming	36

6. 6. Příprava vzorků pro odzkoušení tixoformingu na termomechanickém simulátoru	37
6. 7. Zkoušení semi-solid zpracování na závitových vzorcích upnutých přímo do čelistí simulátoru.....	38
6. 7. 1 Určení vhodné teploty ohřevu	38
6. 7. 2. Vliv rychlosti a průběhu ochlazování z teploty semi-solid stavu na vývoj struktury	41
6. 8 Zpracování polotovarů na termomechanickém simulátoru ve formě	45
9. Diskuse výsledků	49
10. Závěr	51

Použité zkratky a jednotky

ARA Antizotermický rozpat austenitu

FEM Finite element method, (Metoda konečných prvků)

hm% Hmotnostní procenta

HV Tvrdost dle Vickerce

mm Milimetr

s Sekunda

SSM Semi solid metal forming

1. Úvod

Neustále se zvyšující požadavky na zlepšování všech potřebných vlastností materiálu vedou k vývoji nových technologií pro jejich zpracovávání. Mezi materiály, u kterých je stále víc požadováno zlepšování vlastností a zrychlení výroby, patří zejména materiály kovové. Díky nově zaváděným technologiím a zkoušení nových výrobních postupů u nich lze dosahovat zcela jiných fyzikálních, mechanických. Toto platí i pro produkty dříve vyráběné konvenčními metodami. Pomocí těchto nových technologií lze docílit mikrostruktur s lepšími mechanickými vlastnostmi a to při zachování stejného chemického složení zpracovávaných ocelí.

Tato skupina je velmi široká, může zahrnovat velkou škálu materiálu, jako jsou např.: oceli vysokopevné a ořevzdorné, amorfní kovy, superplastické kovy ale i kompozity. Jednou z velmi často zmiňovaných metod je metoda zpracování v semi-solid stavu. Jako každá z inovativních metod se tato metoda snaží vyvinout lepší a pro trh využitelnější výstupní produkt nebo polotovár. Jedná se o nekonvenční metodu tváření, což umožňuje dosahovat zcela nových mikrostruktur. Díky tomu je možné zpracovávat materiály, které je konvenčním způsobem zpracování jen obtížně tvářet. Jedná se například o vysokolegované oceli vyrobené práškovou metalurgií. Metoda tváření v semi-solid stavu probíhá v jednom nebo jen několika krocích, což je velmi časově i cenově výhodné. Je také možné vyrábět složitější a členitější tvary výrobku, než je tomu u běžného konvenčního tváření.

Technologie tváření v semi-solid stavu zahrnuje široké pole různých metod. Pro jejich označení se ve světové literatuře zavedlo označení SSM nebo-li semi solid metal forming. Tyto technologie s vysokým podílem natavené fáze při zpracování jsou označovány názvy rheocasting, tixocasting a thixomolding. Pro zpracování v semi-solidním stavu s nižším podílem natavené fáze je pak možné používat pojem tixofforming nebo minitixofforming, který je oproti klasickému tváření v semi-solid stavu náročnější [1]. Při minitixofmingu se jedná o tváření velmi malých objemů, což sebou přináší nutnost větší opatrnosti při manipulaci, větší přesnosti při nastavování a řízení teplotních průběhů, jak ohřevu, tak ochlazování. Tixofformingem je možno docílit velmi přesných výrobků s malou tloušťkou stěny.

2. Jednotlivé technologie zpracování v semi-solid stavu

Zpracování materiálů v semi-solid stavu neboli semi solid metal forming má v sobě zahrnuje velké množství jednotlivých technologií. Tyto technologie lze podle způsobu zpracování dále rozdělit na dva základní druhy. Technologie s vysokým a s nižším podílem natavené fáze. Technologie, které jsou prováděny při vysokém podílu natavené fáze, se označují jako rheocasting, tixocasting a tixomolging. Při nižším obsahu natavené fáze pak mluvíme o technologii tixofforming, do které můžeme řadit thixoextrusion, thixo lateral extrusion, thixorolling, thixofforming.

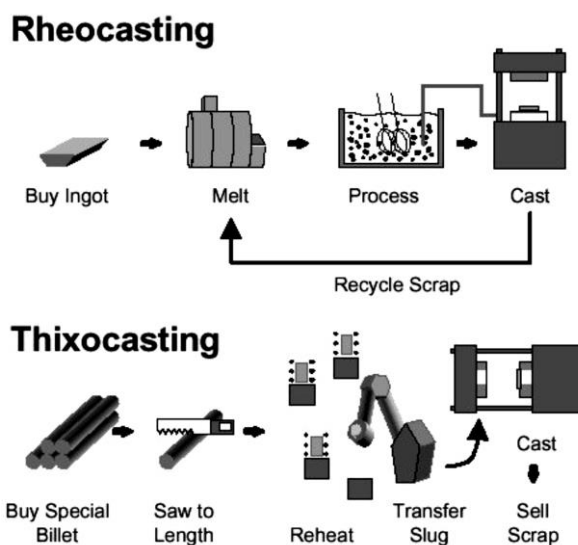
Pro zpracování materiálu v semi-solid stavu je několik procesních cest s ohledem na teplotnou historii a technologii provedení.

Podle teplotní historie je možné tyto procesy dělit na : Tixo-procesy

Rheo-procesy [2]

Při tixo-procesu je materiál nejprve odlit a plně solidifikován až po té znovu ohřát do semi-solid stavu, ve kterém je při vhodné teplotě a poměru solidu a liquidu tvářen.

U rheo-procesu je materiál ochlazen do semi solid stavu přímo po odlití materiálu a následně tvářen (Obr.1).



Obr. 1: Schematické znázornění tixo a rheo procesu [3]

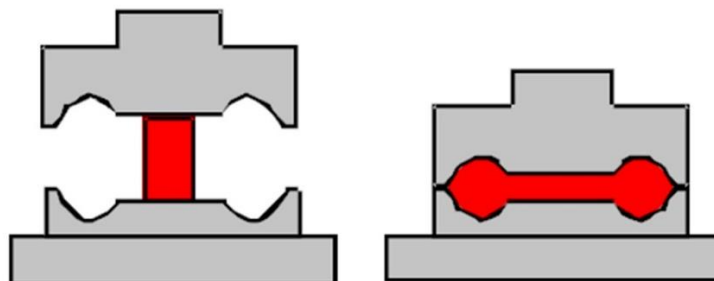
Jako vstupní materiál pro tixo-procesy je použit materiál v pevném stavu. Ten je následně dále zpracováván v několika dalších oddělených krocích, což je určitou nevýhodou při začleňování tohoto procesu do výroby.

Oproti tomu u rheo-procesů je výrazná úspora nákladů oproti tixo-zpracování. Úspora je dána zejména zredukováním počtů jednotlivých kroků materiálu v pevném stavu a dalšího opětovného ohřevu na teplotu tavení, roztavený kov je odléván do kokily, kde je ochlazen na vhodnou teplotu pro semi-solid zpracování a následně tváření. U toho procesu je zařazení do výroby daleko vyšší i ve srovnání s konvenčními technologiemi tváření. Vstupní polotovary i získaný produkt jsou vyrobeny v souvislém na sebe navazujícím výrobním procesu. [4]

2. 1. Thixoforging (Tixokování)

Tato technologie je založena na podobném principu jako konvenční technologie kování v uzavřené zápustce. V porovnání s ním je použito velmi malých sil, ale naopak je zde pracováno s vyššími teplotami nataveného polotovaru a dochází tak k většímu namáhání formy. Pro ohřev polotovaru bývá nejčastěji využit indukční ohřev. Po ohřevu na požadovanou teplotu, při které materiál vykazuje podíl nataveného kovu kolem 30 %, je polotovar vložen mezi dvě poloviny rozdělené zápustky a je stlačen pohybem horního kovádkla (Obr. 2). Kování však neprobíhá klasickým rázovým dopadem bucharu, jako při konvenčním kování. Tento pohyb není vhodný pro tuto technologii, protože by docházelo k rozstříku tvářeného kovu a k rychlému ochlazení přechodem tepla do zápustky. Dále by se znehodnocovala výsledná kvalita povrchu, jelikož by docházelo k oxidaci povrchu polotovaru a při následné úderu zakování zoxidovaného povrchu do polotovaru. Proto probíhá tváření stlačením poloviny zápustky, po vyplnění celé dutiny zápustky je stále udržován tlak na zápustku, tak aby došlo k celkové solidifikaci tvářené části. Díky dodržení těchto základních kroků, lze získat polotovar s dobrou kvalitou povrchu, a přesnějšími rozměry, za malé porezity [1,5].

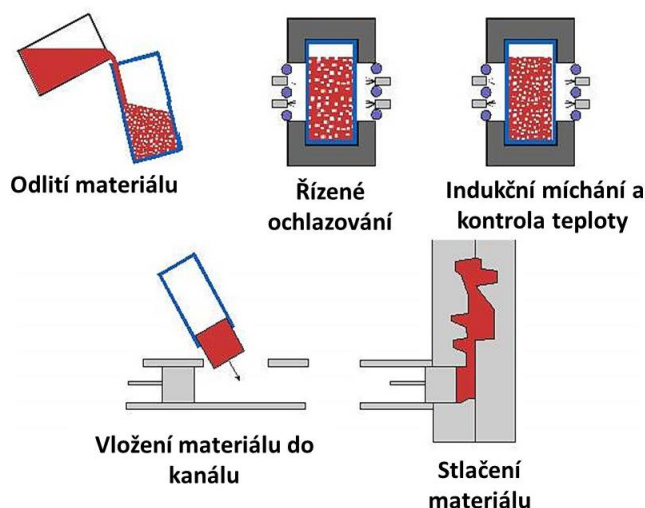
Thixoforging (tixokování)



Obr. 2: Schematické znázornění tixokování [1]

2. 2. Rheocasting

Tato technologie zpracování je popisována jako jedna z nejstarších technologií zpracování v semi-solid stavu. Tato technologie se postupně vyvíjela při hledání nových způsobů odlévání kovů v počátku 60 let minulého století [6.] V tomto období ještě nebylo přímo popisováno tixotropní chování kovů. Jedná se o jednu z technologií tváření, při které se podíl nataveného materiálu pohybuje mezi 40 – 60% [7]. Dalo by se tedy říci, že tváření polotovaru probíhá z tuhneoucího polotovaru. Tato technologie byla následně modernizována a upravena. Při tomto způsobu je uvažován vliv tixotropního chování. Roztavený polotovar je zde odléván do nádoby, kde je řízeně chlazen a zároveň je materiál indukčně nebo mechanicky míchán (Obr. 3.).



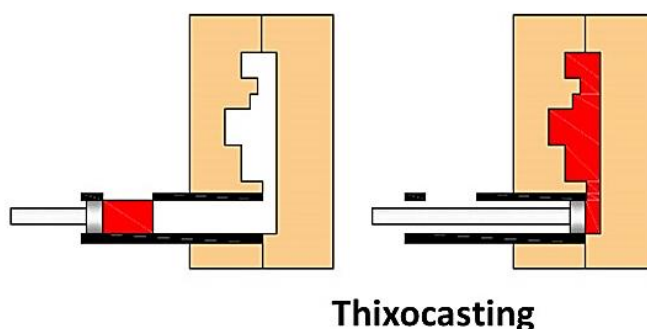
Obr. 3: Schéma new-rheocastingu [7]

Tímto mícháním je dosaženo toho, že se netvoří z pevných částech shluky, ale je tvořena jemná globulitická struktura. Po dosažení přesné teploty a podílu pevné fáze je polotovar přelit do formy a následně vtlačen do dutiny zápustky, ve které polotovar vychladne. Toto zpracování lze spodobňovat s vysokotlakým litím.

2. 3. Tixocasting

Princip této technologie je velice podobná technologii new-rheocastingu. Podíl tekuté fáze by se u této technologie měl pohybovat také mezi 40-60%. Tixocasting neboli tixoodlévání je složeno ze tří krků. Příprava polotovaru, ohřev na požadovanou teplotu a vlastní tváření (Obr. 4) Polotovar je při této technologii odléván nebo jen tepelně zpracován. Tento proces je velice podobný vysokotlakému lití.

Thixocasting nabízí celou řadu výhod, jako jsou zdokonalené mechanické vlastnosti, dobrou jakost povrchu, dosažení tzv. near net shape produktu. Ve srovnání s obvyklými technologiemi odlévání, má thixocasting nižší tvářecí teplotu, podstatně delší životnost zápustky. Účinnost výroby a komplexní mechanické vlastnosti. Ve srovnání s konvenčními kovacími technologiemi lze dosáhnout složité geometrie produktu v jednom tvářecím kroku. Tato technologie byla široce využívána u barevných kovů tváření, kde bylo dosaženo uspokojivých výsledků u železných kovů však ne [8].

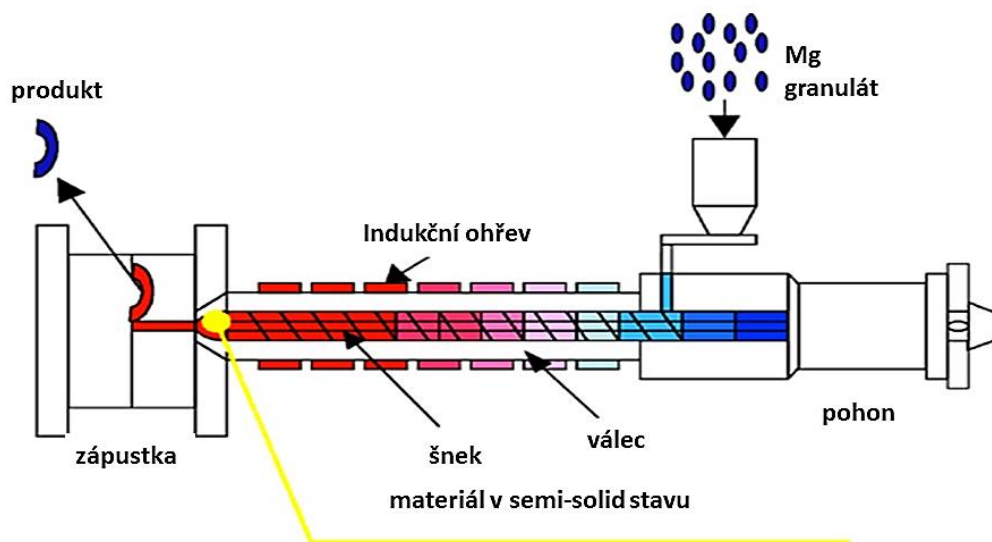


Obr. 4: Schématické znázornění tixoodlévání [9]

2. 4. Thixomolding

Tato technologie se používá zejména na výrobu hořčíkových součástí. Před vlastním procesem je potřeba připravit vstupní materiál, ten je možno používat ve formě třísek, nebo je vstupní materiál rozemlet na velmi malé částičky. Třísky nebo granule hořčíku jsou podávány podavačem do šneku, pomocí kterého je materiál následně protlačován. Při cestě šnekovým podavačem je polotovar indukčně ohříván, ale také míchán a homogenizován. Podíl pevné fáze při této metodě může dosahovat až 65%. Připravený a ohřátý materiál je vstříknut do dutiny formy (Obr. 5). Při tomto procesu je ze vstupní dentritické struktury struktura přeměněna na globulární.

Zpracování hořčíku touto metodou má několik výhod. Kvalita povrchu u takto vyrobených součástí je velmi dobrá, pórovitost materiálu je minimální, rozměrová přesnost je také velmi dobrá. Oproti konvenčnímu tlakovému lití je tato metoda ekonomičtější, z hlediska nižší spotřeby energie, tepleného namáhání formy ale snížení nákladů na výrobu [8].



Obr. 5: Schéma tixomoldingu [10]

2. 6 Thixo lateral extrusion

Příčné tixo-vytlačování je prováděno do uzavřené zápustky formy. Materiál je do ní vtlačován bočně z kanálu vtokové soustavy. Tento způsob se dá připodobnit k lití.

Forma je před plněním uzavřena a materiál je do ní vtlačován z boku. Horní razník je nehybný (řízení proti přetížení rázem) a spodní razník pohyblivý, dokud není forma zaplněna. Tekutá fáze slitiny umožňuje na chvíli konstantní tlak v součásti. Objem materiálu vyráběné součásti je přesně přizpůsoben tak, aby přebytečný materiál zůstal ve vtokové soustavě zápustky. Geometrie vyráběných součástí je tedy stálá.

3. Tixofforming

Tixofforming je nekonvenční technologie tváření známá již od počátku 70. let minulého století. Tato technologie se z počátku vyvíjela jako technologie, která má uplatnění pouze pro materiály s nízkou teplotou tavení. Hlavními zástupci jsou hliník a jeho slitina a také hořčík. Výzkum v oblasti kovů s vyšší teplotou tavení, zejména ocelí, přišel později [1].

To bylo hlavním důvodem, k zavedení výzkumu právě na materiály s vysokou teplotou tavení, zejména pak oceli. U těchto materiálů lze pomocí tixoformingu zjednodušit technologický postup výroby součásti, tím minimalizovat veškeré náklady na následné výrobní nebo dokončovací operace jako je například třískové obrábění. Touto technologií lze dále dosáhnout členitých a komplikovanějších tvarů a to v jednom tvářecím kroku. Dále lze díky tixoformingu dosáhnout změny mikrostruktury, která pak vede ke zlepšení, fyzikálních a mechanických, což je velmi atraktivní.

3.1 Podstata zpracování v semi-solid stavu

Tixotropní tváření je tváření materiálu v „polotuhém“, nebo-li tzv. semi – solid stavu. Podstatou tixoformingu je tváření polotovaru, který je po ohřevu na tvářecí teplotu částečně ve skupenství kapalném a částečně ve skupenství pevném. Tvářený polotovar pak vykazuje tzv. tixotropní chování (kapitola 3.2). Podíl taveniny ve tvářeném objemu se pohybuje mezi 10 až 60%. Tixotropie je reologická vlastnost některých pseudoplastických a plastických systémů, které jsou podrobeny smykovému namáhání (např.: tváření, míchání, třepání apod.). Tyto systémy jeví zpočátku vysokou zdánlivou viskozitu, která s časem postupně klesá. Je – li systém ponechán v klidu, původní struktury se začnou opět obnovovat a viskozita se asymptoticky blíží k původní hodnotě [2].

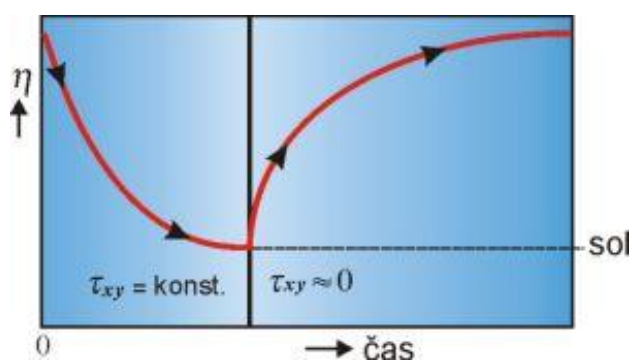
Tixotropní tváření je technologie, při které je možné materiál tvářit jak v otevřené, tak uzavřené dutině formy v tzv. semi-solid stavu. Po tixotropním tváření je získán výrobek, který má obvykle odlišnou mikrostrukturu oproti konvenčnímu zpracování. Díky tomu

může být docíleno lepších fyzikálních, chemických ale i mechanických vlastností. Dále má výrobek velmi přesný tvar (v anglické literatuře označováno jako near net shape), může být velmi členitý a tvarově náročný. Výrobek po tixotropním tváření nemusí být vždy dále opracováván například třískovým obráběním, čím je dosahováno značných časových tak finančních úspor při výrobě. Ohřev polotovaru probíhá buď mimo formu, polotovar je zahříván na požadovanou teplotu a následně je vložen do formy. Další technologie, jako je minitixofoming, umožňují ohřátí polotovaru již přímo ve formě, což značně šetří čas a odstraňuje tím náročnou manipulaci s ohřátým polotovarem.

Technologie tixotropního tváření se aplikuje zejména na výše legované slitiny, které se jinak zpracovávají vysokotlakým litím.

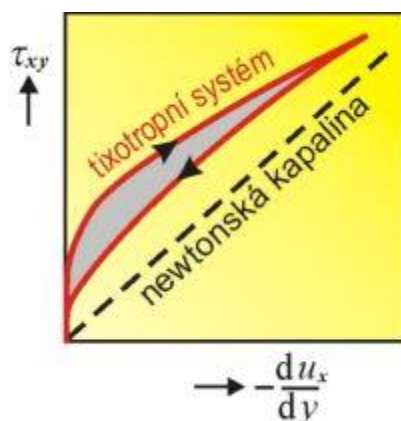
3.2 Tixotropní chování

Tixotropie je reologická vlastnost některých pseudoplastických a plastických systémů, které jsou podrobeny určitému smykovému namáhání (např.: tváření, míchání, třepání apod.). Tyto systémy jeví z počátku vysokou zdánlivou viskozitu, která s časem postupně klesá. Pokud se systém ponechán v klidu, dochází k postupnému obnovování struktur a viskozita opět roste a asymptoticky se blíží k původní vysoké hodnotě. Časový průběh zdánlivé viskozity ukazuje (Obr. 6).



Obr. 6: Časová závislost zdánlivé viskozity tixotropního systému [12]

“Na křivce toku těchto systémů se objevuje hysterezní smyčka – průběh křivky naměřené při pravidelném zvyšování napětí se neshoduje s průběhem naměřeným při snižování [12], (Obr. 7).



Obr. 7: Průběh tokové křivky pro tixotropní a newtonskou kapalinu [12]

To vše je způsobeno tendencí globulárních částic ke shlukování. V klidovém stavu mají globulární částice tendence ke shlukování a spojování se do větších celků. Toto chování způsobuje nárůst viskozity. Což je pro zpracování tvářením značně nežádoucí, jelikož s nárůstem viskozity se zhoršuje zabíhavost materiálu. Když polotovar smykově namáháme, dochází k rozptýlení těchto shluků, což naopak způsobí pokles viskozity celého systému a tím opět zlepšuje zabíhavost materiálu, což je žádoucí [13].

Tixotropie se běžně užívá v kosmetice, farmacii, ale na příklad i v průmyslu barev. Díky zvyšujícím se nárokům a zlepšování fyzikálních, chemických a mechanických vlastností kovových materiálů a dále také požadavkům na rychlejší a finančně méně náročnou výrobu, se začalo tixotropie využívat i v oblasti tváření kovů.

3.3 Využití tixotropie při tváření kovů

Tixotropie je běžně využívána při různých průmyslových odvětvích, až zhruba v polovině minulého století však bylo toto deformační chování pozorováno a detailněji popsána i pro kovové materiály. Tixotropie popisovaná u kovů je definována jako pokles viskozity materiálu s nárůstem smykového poměru a času smyku v tzv. semi-solid stavu.

Aby slitiny kovů mohly vykazovat tixotropní chování, je nutné, aby tyto slitiny v polotuhém stavu měly vhodnou strukturu, nejlépe pak pevné částice globulárního tvaru obklopené tekutou maticí.

Jedna z výhod metody tixotropního tváření oproti konvenčním metodám tváření je například v tvářecí síle, ta je zapotřebí nižší než u konvenčních metod. Je to způsobeno vlivem smykového napětí, to působí na materiál během tváření, tím se snižuje viskozita materiálu a díky snížení viskozity je zapotřebí menší síly. Teploty při tixoformingu jsou naopak oproti konvenčnímu způsobu tváření vyšší, což způsobuje větší teplotní namáhání formy. Při tixoformingu jsou tedy kladeny vysoké nároky na nástroje a zejména pak na materiály použité při výrobě formy. Materiály používané při této technologii musí mít nízkou teplotní citlivost, být odolné opotřebení, vysokým teplotám a teplotním šokům.

Podíl tuhé fáze po ohřátí do polotuhého stavu by měl být mezi 0,1 a 0,6 (tj. 10-60%)[1], to je podíl fází, při kterém je dosaženo tixotropní chování, to vše v závislosti na konkrétní technologii zpracování daného materiálu semi-solid stavu. Proto je tixoforming vhodnější pro slitiny s nízkou citlivostí k podílu tuhé fáze a energetického nárůstu nebo ztráty. U takto zvolených slitin je pak menší pravděpodobnost ochlazení během plnění formy a teplota během ohřevu tak může být lépe regulována [14].

Slitiny určené k tixoforming musí splňovat hlavní požadavky. Především musí mít příhodné mikrostrukturní vlastnosti, jde hlavně o velikost zrna, tvarový faktor a vlastnosti související s povrchem. Běžně používané materiály pro tixotropní tváření mají rovnoosou dendritickou strukturu, ta se po ohřátí do polotuhého stavu přemění z dendritické na globulární. Globulární struktura je pro tento druh zpracování vhodná.

3.4 Tixoforming ocelí

Hlavními skupinami materiálu pro tixotropní tváření jsou v současnosti slitiny hliníky, slitiny hořčíku, ale i speciální oceli. Tixoforming slibuje rozšíření škály použití různých kovů. Oproti odlévání nebo konvenčním metodám tváření může být kvalita výrobku lepší a omezuje se tím výskyt počtu vad.

Slitiny železa byly ve většině případů zpracovávány pouze odléváním tvárných nebo šedých litin. Tixoforming s sebou nese výhody jako výrobek odlévaný, jako jsou nízké

náklady, úspora materiálu a tvarová složitost spolu s vynikajícími mechanickými vlastnostmi.

Jako základní materiál pro tixoforing jsou používány termomechanicky válcované tyče z oceli 100Cr6 nebo z nástrojové oceli M2, která je nejčastěji využívána jako modelový materiál pro tixoforing. Tato ocel má totiž teplotní interval mezi $0,4 < f_s > 0,6$ [14], nízkou teplotní citlivost a v tuhém stavu se nevyskytuje žádná martenzitická fáze.

Tixoforing přináší, oproti konvenčním metodám výhody jakou jsou: značná geometrická flexibilita díky tomu možnost výroby tvarově složitých součástí. Výrobek je tak vyráběn pouze v jednom kroku a tím dochází ke snížení počtu závěrečných operací a to především zpracování vysoko pevných ocelí nízkou tvářecí silou. To vše díky speciálnímu deformačnímu chování tixoforing [1].

Tixoforing ocelí má však i své nevýhody. Mezi ty patří zejména úzký interval zpracování (teplota, rychlost apod.) potřebný pro zabezpečení kvality výrobku. Pokud totiž není tento interval dodržen, hrozí u výrobku částečné zhoršení mechanických vlastností, což je nežádoucí. Další nevýhodou je možnost vzniku trhlin způsobených nedodržením správné teploty a obecně vzato vysokými tvářecími teplotami. Tyto teploty mají u ocelí za následek vzniku vysokoteplotní koroze. U oceli se nevytváří ochranná povrchová vrstva, díky čemuž vzniká nárůst okují a tím pak následně trhlin. Aby se tedy zabránilo vzniku těchto nežádoucích okují, udržují se ingoty v ochranných plynových atmosférách, ve kterých se provádí ohřev ingotů i veškeré tvářecí operace.

3.5 Vliv chemického složení na tixoforing

Před zpracováním každého polotovaru je nutné znát chemické složení výchozího materiálu. U běžných konvenčních metod nám však stačí přibližné chemické složení udávané výrobcem, kde je udávané zastoupení jednotlivých prvků v rozmezí jednotek až desítek procent.

Při výběru vhodného materiálu pro tixoforing je však důležité pracovat s přesnými hodnotami. U polotovaru, který má být následně zpracováván tixoforingem je důležité určit přesné chemické složení vstupní struktury. Toto přesné chemické složení lze určitě pomocí chemického rozboru vzorku, ale je také možné toto chemické složení vyčíst z certifikovaného materiálového listu dané zakázky. V tomto listu jsou udány přesné hodnoty

chemického složení pro konkrétní tavbu dané oceli. Pro tento experiment byla zvolena ocel 30MnVS6 (značeno podle normy DIN).

Přesné chemické složení má u ocelí značný vliv na teplotu solidu a liquidu. Správné určení těchto teplot je pro tixofoming zásadní. Po tixofoming je tedy zásadní určení šířky teplotního intervalu v závislosti na chemickém složení tvářeného materiálu. Jednotlivé prvky mají ale také vliv na fyzikální i mechanické vlastnosti. Aby se zjistilo, jaký vliv tyto prvky mají, byla prováděna celá řada experimentů jednotlivých prvků se zabývala celá řada experimentů. Podobné studie byly provedeny pro nízkolegované ocele pomocí MTDData software (který je dostupný pro národní fyzikální laboratoř UK). Nevýhodou tohoto softwaru je, že dokáže počítat vliv prvků pouze v rovnovážných podmínkách. Pro stanovení vlivu jednotlivých prvků to ale postačuje a bylo zjištěno, že mezi základní prvky, které mají významný vliv na teplotu solidu a liquidu patří C, Mn, Si, Cr, P (Tab. 1). Obecně tyto prvky snižují elektrickou vodivost a například Mn pozitivně ovlivňuje mechanické vlastnosti, zvyšuje odolnost proti korozi a svařitelnost, ale také urychluje tuhnutí taveniny.

Prvek	TS	T50%	TL	(df/dT)10%	(df/dT)50%	T50% - TS
C	↓	↓	↓	↓	↓	↑
Mn	↓	↓	↓	↓	↑	↑
Si	↓	↓	↓	↑	↓	↑
Cr	↑	≈	≈	↑	↑	↓
P	↓	↓	≈	↓	↓	↑

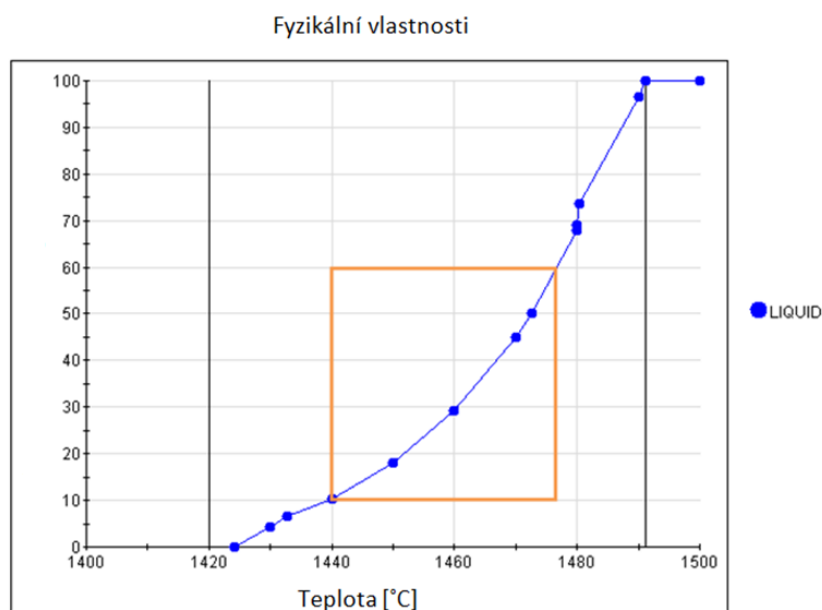
Tab. 1.: Vliv jednotlivých prvků ve slitině oceli a její vlastnosti v semi-solid stavu. [15]

V Tab. 1 je souhrnně znázorněn vliv jednotlivých prvků na teploty důležité pro tváření v semi-solid stavu. Kde TS je teplota solidu, TL teplota liquidu, T50% představuje stejný podíl pevné a tekuté fáze, df/dT představuje derivaci podílu tekuté fáze podle času.

Z tabulky je vidět, že na pokles teploty solidu i teploty liquidu mají vliv zejména uhlík, chrom a fosfor.

Procentní obsah uhlíku určuje šířku teplotního intervalu vhodného pro tixotropní tváření. Chrom zvyšuje teplotu solidu, ale teplotu liquidu neovlivňuje, což znamená, že zužuje teplotní interval vhodný pro tváření v tixotropním stavu. Kdežto fosfor naopak snižuje teplotu solidu a teplotu liquidu také neovlivňuje, což znamená, že teplotní interval vhodný pro tváření v semi-solid stavu naopak rozšiřuje.

Pro tváření v semi-solid stavu však není důležitá jen šířka teplotního intervalu, ale i průběh křivky liquidu (Obr. 8). Z grafu podílu tekuté fáze v závislosti na teplotě, vypočteném v softwaru JMatPro vidíme vypočtenou tuto křivku v grafu pro ocel 30MnVS6 s přesným chemickým složením (příloha č.1). Oranžově je pak vyznačena oblast s teoretickým obsahem tekuté složky 10%-60%. V tomto úseku by měl být průběh křivky velmi pozvolný a neměla by prudce stoupat (Obr. 8).



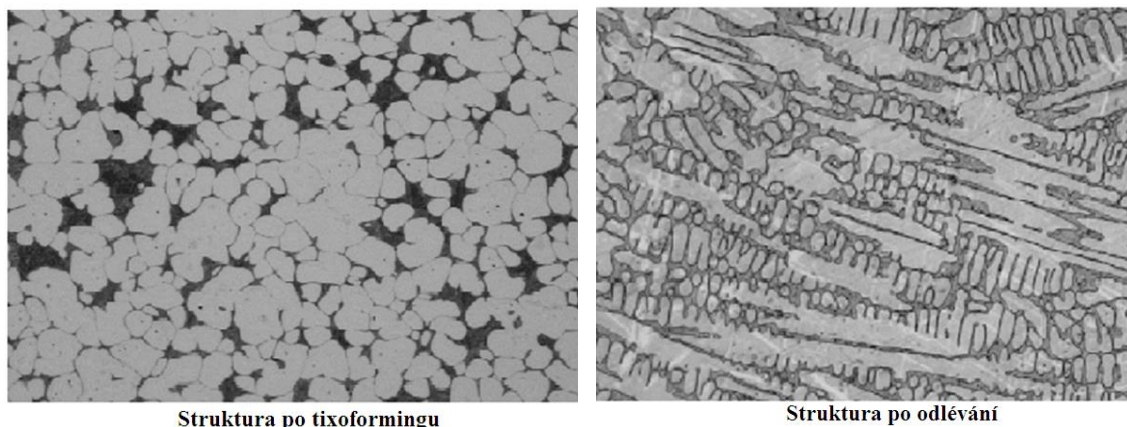
Obr. 8: Průběh křivky liquidu pro materiál 30MnVS6.

Pro tixofforming jsou využívány zejména oceli legované. Čisté železo, eutektika nebo slitiny s podobným složením mají totiž konkrétně daný bod tavení nebo velmi úzký teplotní interval nevhodný pro tváření v semi-solid stavu. Proto nevykazují komplexní chování při tavení. Naproti tomu oceli vysoce legované oceli vykazují široký teplotní interval, díky čemuž nejsou tak citlivé na změnu teplot a nejsou tak náročné na přesné řízení teploty. Toto rozmezí teplot je názorně vidět na obr. 8 [6]. Kde jsou pomocí DTA analýzy

vypočtené křivky pro vybrané materiály používané pro tixoforing. Jako například oceli X210CrW12, 100Cr6 nebo HS6-5-3.

3.6. Struktury dosahované při tixoforingu

Po zpracování tixoforingem je struktura materiálu obvykle výrazně odlišná od výchozího stavu i od běžné morfologie dosahované konvenčním tvářením nebo tepelným zpracováním. Tato výsledná struktura je charakteristická globulárními zrny obklopenými maticí (Obr. 9) Takto vzniklá výsledná globulární struktura vzniká bez ohledu na použitý materiál a je typická pro materiály ochlazené ze semi - solid stavu. Na rozdíl od struktury vytvořené litím nedochází k dendritickému odmíšení.



Obr. 9: Rozdíl mezi strukturou po tixoforingu a po odlévání [16]

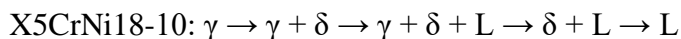
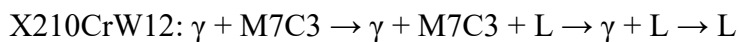
3.6.1. Vývoj mikrostruktury

Jak již bylo zmíněno, pro tixoforing je výhodná mikrostruktura s globulitickými částicemi obklopena přiměřeným množstvím kapalné fáze. Pro některé slitiny, jako jsou například slitiny hliníku, je nutné vstupní strukturu speciálně připravovat například metodou SIMA (Strain Induced Melt Activation), nebo magnetohydrodynamickým mícháním (MHD) a je potřeba získat požadovanou strukturu během ohřevu. Stejně tak proces úpravy mikrostruktury u některých ocelí je třeba upravit některou ze zmíněných metod. Rozdíl mezi SIMA a RAP (rekrystalizace a částečné tavení) je v pracovní teplotě indukční zátěži. Vývoj mikrostruktury při ohřívání je v podstatě pro každou ocel odlišný a závisí na předcházející tvářecí historii. Obecně platí, že stabilní fáze při dané teplotě se určují

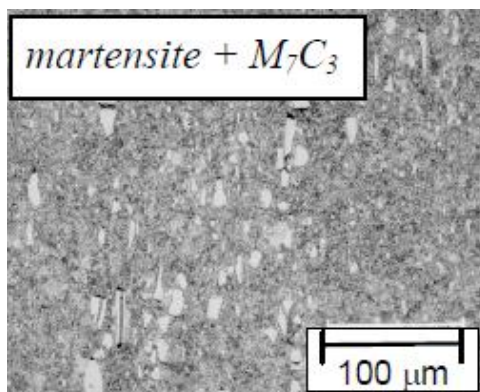
podle chemického složení oceli. Pak jsou původní stav mikrostruktury a distribuce chemických prvků ovlivněny historií zpracování a podle toho se stanovuje vývoj morfologie mikrostruktury. V případě zpracování materiálu metodou SIMA, dojde k tavení materiálu, materiál začne rekrystalizovat, což vede k narušení hranic zrn materiálu a tím dojde k oddělení jednotlivých částic v kapalně matrici [17].

Tento postup může být jasně pozorovat u některých ocelí, jejichž mikrostruktura v semi-solid stavu lze zmrazit kalením. Tento jev můžeme pozorovat například u nerezové oceli X5CrNi18-10 [8,9] nebo nástrojová ocel X210CrW12 (pouze pro omezenou část kapalinu) [18].

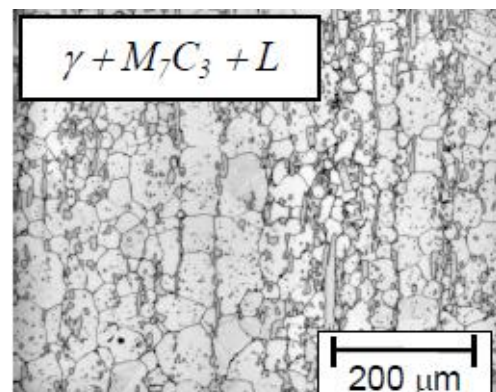
Stávající stabilní fáze kolem polotuhé teploty obou ocelí jsou popsány takto:



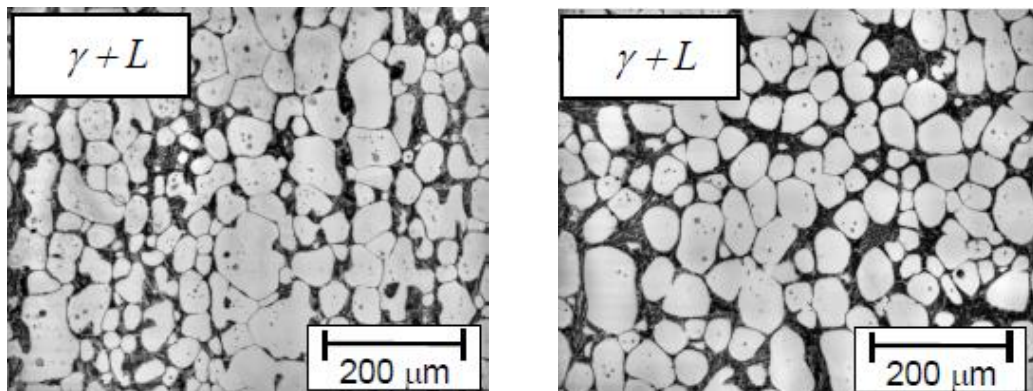
Kde γ , δ , M_7C_3 a L představují austenit, delta ferit, karbid (většinou karbid chromu) a kapalinu. Snímky mikrostruktury těchto ocelí při různých topných teplotách jsou uvedeny na obr. 10 a 11 [10,8].



(a) při pokojové teplotě
(výchozí stav, válcované)



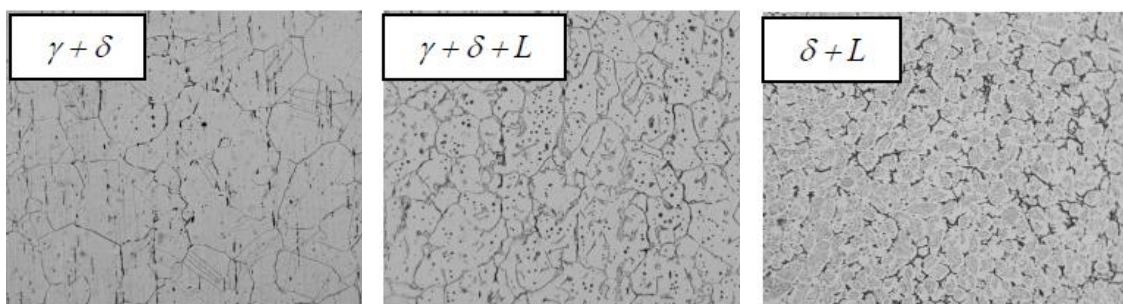
(b) při 1210 °C
(mírně pod solidem)



(c) při 1250 ° C
(nad solidem)

(d) při 1250 ° C
(po dostatečné době výdrže na teplotě)

Obr. 10: Mikrostruktura nástrojové oceli X210CrW12 v (a) pokojové teplotě tak, jak byl (válcovaný za tepla) a při různých teplotách ohřevu: (b) 1210 ° C, (c) 1250 ° C a (d) 1250 ° C [18].



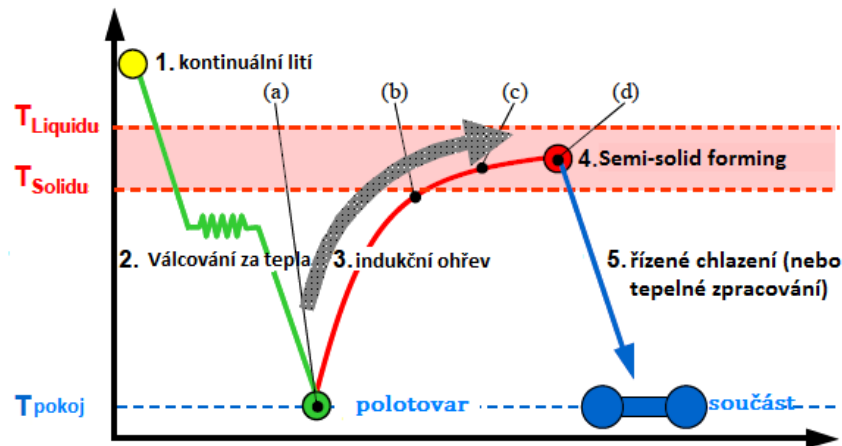
(b) při 1370 ° C
(mírně pod solidem)

(c) v 1402 ° C
(těsně nad solidem)

(d) při 1415 ° C
(po tavení austenitu)

Obr. 11.: Mikrostruktura z nerezové oceli X5CrNi18-10 při různých topných teplotách: (b) 1370 ° C, (c) 1402 ° C a (d) 1415 ° C [19].

Odpovídající umístění mikrostruktur je zobrazeno na schématu Proces schéma thixoforming trasy jako (a) až (d) v obr. 12.



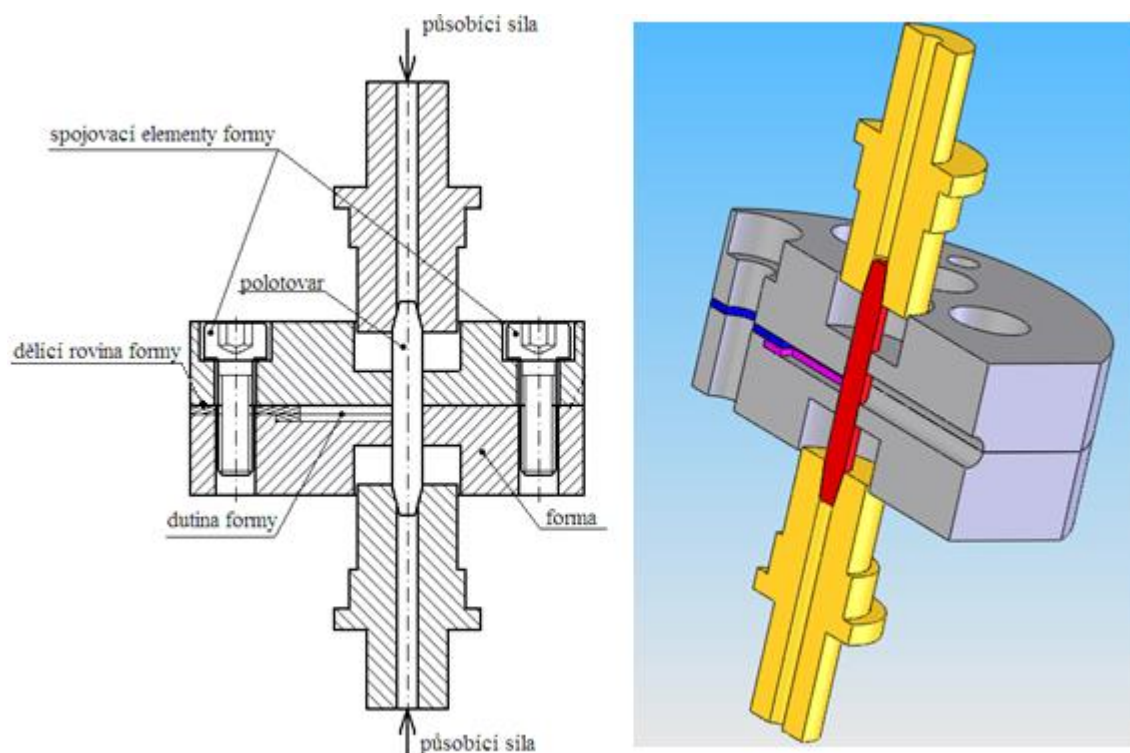
Obr. 12.: Schéma procesu zapojení SIMA trasy, který má vliv na struktury na obr. 10 a 11. [16]

4. Důležité parametry pro konkrétní zpracování polotovarů

4. 1. Konstrukce zápustky

Pro výrobu malých součástí tixoforingem bylo nejprve nutno navrhnout vhodné zařízení. Po stanovení základních parametrů pro zpracování, bylo navrženo zařízení s principem příčného stranového vytlačování (Obr. 13).

Jeden z hlavních kritérií hrající roli při návrhu zařízení je způsob ohřevu, podle kterého musí být konstrukce zařízení přizpůsobena. Pro natavení materiálu do oblasti mezi solidem a liquidem byl zvolen vysokofrekvenční odporový ohřev, který byl na pracovišti Západočeské univerzity navržen a následně i sestaven [20]. Tento způsob ohřevu umožňuje provádět ohřev přímo v dutině tvářecí formy, takže odpadá manipulace s nataveným materiálem a současně lze přesněji dodržet a kontrolovat teploty ohřevy a tváření. Proud je do vzorku přiváděn měděnými elektrodami, které zajišťují ohřev polotovaru, zajištění polohy vzorku, popřípadě regulaci sil. Elektrody chlazené vodou, aby nedošlo k jejich teplotní deformaci, tím je zajištěn i odvod tepla z polotovaru.



Obr. 13 : Schematické znázornění konstrukce a principu formy [21]

Materiál vhodný pro formu musí být, žárupevný, odolný vůči korozi, musí být stálý, aby nedocházelo například k zapečeninám. Dále forma nesmí být příliš těžká, aby nevznikaly problémy při manipulaci.

Vlastní forma je vyrobena ze slitiny titanu. Tento materiál nabízí dobrou kombinaci mezi pevností, tažností a má vůči oceli také příznivější hmotnost. Má vysokou odolnost vůči korozi v silně oxidických a středně redukčních prostředích. Velmi důležitým požadavkem je nemagnetičnost celé formy, aby nedocházelo k jejímu ohřevu v elektromagnetickém poli.

Pro snadnou manipulaci s nástrojem a jednoduchou manipulaci se zkušebními vzorky byla forma rozdělena na dvě části, spodní a horní část. Rozměry formy jsou: průměr 80 mm a výška formy 40 mm. Forma se spojuje sedmi spojovacími šrouby M8. Ve spodní části formy jsou vybrání, do kterých jsou vloženy dva plechy s tvarovou dutinou. Výměnou plechů jde jednoduše testovat různé tvary dosažitelné touto technologií. V případě vyjmutí jednoho plechu je možno tuto část zaslepit, a tímto způsobem získat rozdílnou tloušťku drážky v rozmezí 1,5 až 3 mm, do které je následně vstřikován materiál v tixotropním stavu. Maximální délka drážky může být 20 mm.

Teplota polotovaru je kontinuálně snímána a přesně řízena pomocí termočlánku, který je ke vzorku přiveden korundovou trubičkou [21]. Tím je zabráněno přístupu vzduchu do dutiny formy a zároveň výtoku kovu během tváření.

Ve formě se také nachází otvor pro vhánění inertního popřípadě aktivního plynu, aby se zabránilo oxidaci materiálu. Pokud není využito ochranné atmosféry, je vstupní otvor zaslepen. Vlastní forma pro tváření je namontována do pracovního prostoru termomechanického simulátoru. Díky tomu je možné přesně řídit požadovaný deformační průběh zpracování [21].

4. 2. Ohřev polotovarů

4. 2. 1. Ohřev polotovaru do semi-solid stavu

Správné provedení ohřevu polotovaru do semi-solid stavu je jedním z nejdůležitějších činností při tixo-procesech. Při ohřevu polotovar se zásadním způsobem rozhoduje o parametrech finální mikrostruktury, a z toho vyplývající výsledných mechanických vlastností. Způsobem a parametry ohřevu lze ovlivnit velikost, rozložení a podíl tuhých částic v tavenině. Důležitých parametrů ohřevu je hned několik např. rychlost dosažení požadované teploty, výdrž na této teplotě po požadovanou dobu a dále dodržet homogenitu teplotního pole. Tyto parametry následně udávají, homogenitu výsledné struktury, velikost zrn a rozložení jednotlivých fází.

S ohledem na tyto účinky musí být ohřev polotovaru rychlý, přesně řízený a homogenní v celém objemu ohřivaného materiálu. Nejtěžší částí takového zpracování je, zajištění reprodukovatelnosti takového ohřevu ve stejném režimu u většího množství vzorků.

V praxi je v tixo-procesech hojně využíváno indukčního ohřevu. Ten je ve srovnání s běžným ohřevem například v peci rychlý a dobře říditelný. Teplo je vytvářeno vířivými proudy přímo uvnitř ohřivaného polotovaru [22].

Odporový ohřev je pro zpracování v semi-solid stavu používán velice málo, jelikož teplo při něm vzniká průchodem elektrického proudu. Přeměna elektrické energie v teplo je

dána Joulovým zákonem. Rychlost ohřevu je dána použitými parametry zdroje a odporem daného materiálu. S rostoucí vodivostí výrazně klesá generované množství tepla, proto je např. pro hliníkové a hořčíkové slitiny velmi obtížné dosáhnout vysokých teplot. V omezené míře lze tento princip použít pro vysocelegované oceli, které mají již dostatečný el. odpor.

4. 2. 2. Kombinovaný odporově indukční ohřev

Pro zpracování materiálu v semi-solid stavu byl na Západočeské univerzitě vyvinut speciální patentovaný vysokofrekvenční indukčně-odporový zdroj, ten spojuje výhody ohřevu indukčního a odporového ohřevu.

Ohřev je založen na principu vysokofrekvenčního odporového ohřevu vzorku. Systém ohřevu je napájen 230V/16A, maximální proud protékající vzorkem dosahuje 1kA. Veličiny, které lze při ohřevu regulovat jsou proud a frekvence. Zpětná vazba a záznam řízení teploty je zajištěn pomocí termočlánku, který je připevněn na testovaný vzorek. Maximální výkon systému 3 kW umožňuje řízený ohřev vzorků s maximální rychlostí dosahující přes 500°C a to v závislosti na zkoušeném typu materiálu. Přesnost měření teploty je limitována druhem použitého termočlánku [23].

5. Cíle práce - návrh experimentu

1. Výběr materiálu
 - a) Volba vhodného experimentálního materiálu
 - b) Charakterizace vstupního stavu (struktura, mechanické vlastnosti)
 - c) Určení teplotního intervalu mezi solidem a liquidem (JMatPro, ThermoCalc)
 - d) Návrh vhodného teplotního intervalu pro zpracování

2. Návrh, odzkoušení a optimalizace parametrů tváření
 - a) Realizace navrhnutého procesu tváření
 - b) Optimalizace jednotlivých parametrů procesu: rychlost ohřevu, teplota ohřevu, doba výdrže na teplotě, rychlost ochlazování, rychlost deformace
 - c) Semi-solid zpracování na vzorcích bez formy
 - d) Semi-solid zpracování v zápustce formy (tixofforming)

3. Analýza produktů získaných tixotvářením
 - a) Metalografická analýza struktur vzniklých tixotropních tváření
 - b) Teplotní stabilita výsledné mikrostruktury
 - c) Analýza mechanických vlastností

6. Experimentální část

Zpracování kovů v semi-solid stavu (tixofforming) slibuje rozšíření škály využití různých kovů. Ve srovnání s konvenčními technologiemi jako je odlévání a tvářením může být kvalita konečného produktu lepší jak z hlediska mikrostruktury, lepší tvarové přesnosti, ale i s menším výskytem počtu vad. Zpracování ocelí touto technologií, je technologicky velmi náročný proces. Je zde nutné, správně vymezit teplotní interval vhodný pro tuto technologii. Toto technologické okno je přímo závislé na přesném chemickém složení daného materiálu. Celkovou technologii je také nutno přizpůsobit cílové skupině tvářených materiálů, neboť každý má specifické požadavky.

Proto byl experimentální program rozdělen do několika částí. Nejprve byl vybrán vhodný materiál pro tváření v semi-solid stavu, byla provedena analýza jeho vstupních vlastností a charakterizace mikrostruktury. Dále bylo zjištěno jeho chování v tixotropním stavu. Na základě přesného chemického složení byl pomocí výpočtového programu JMat-Pro a ThermoCalc určen vhodný teplotní interval pro navržení prvních pokusů zpracování v semi-solid stavu na polotovarech tepelně zpracovaných bez formy upnutých přímo do čelistí termomechanického simulátoru, vlastního tváření ve formě a byly optimalizovány různé parametry procesu tak, aby byl získán produkt s odpovídající povrchovou kvalitou, tvarem a požadovanou mikrostrukturou.

6. 1. Použitý software, přístroje a metody

V průběhu experimentálního programu byly použity různé vyhodnocovací a měřící techniky.

Určení vstupních parametrů pro tváření (technologického okna) a určení podílu tekuté fáze v závislosti na teplotě ohřevu bylo provedeno v programu JMatPro a ThermoCalc. Program JMatPro je zaměřen na komplexní stanovování fyzikálních a termofyzikálních vlastností za rovnovážných i nerovnovážných podmínek, vlastností a chování materiálu během tuhnutí, fázové transformace a mechanické a chemické vlastnosti.

Experimentální program byl z velké části zrealizován na termomechanickém simulátoru. Jedná se o zařízení speciálně vyvinuté pro modelování složitých, praxi odpovídajících

termomechanických procesů. S jeho pomocí lze řízeným způsobem realizovat jak deformační, tak teplotní průběh zpracování.

Metalografické hodnocení probíhalo na světelném mikroskopu Olympus GX 51 s digitální kamerou ProgRes C10 plus se softwarem A4i Analysis a A4i Docu a na konfokální mikroskop Olympus Lext OLS3000XL, který umožňuje provádět analýzy až do zvětšení 14tis. bez nutnosti vakua. Pro detailnější analýzy byl použit i řádkovací elektronový mikroskop TESCAN VEGA3 vybavený detektory sekundárních a zpětně odražených elektronů a EDX pro stanovení lokálního chemického složení.

Měření bylo vyhodnoceno softwarem TOPAS. Měření tvrdosti probíhalo na Vickersově tvrdoměru kalibrovaném pro měření HV10 a HV30.

6. 2. Volba materiálu

Pro experiment byly zvoleny kruhové loupáné tyče, normalizačně vyžíhané o průměru 25mm ze středně uhlíkové oceli 30MnVS6 (Tab. 2). Tento materiál byl zvolen proto, že ve světové literatuře bylo zatím popsáno pouze zpracování vysokolegovaných ocelí, eventuálně ocelí s vysokým obsahem uhlíku. Dalším důvodem byla snaha získat odlišnou strukturu od běžných globulárních struktur získávaných tixoforingem viz kapitola 3.6.1. Po provedení literární rešerše bylo zvoleno chemické složení experimentálního materiálu tak, aby bylo docíleno výsledné mikrostruktury bez karbidického síťoví, které je jinak ve standardně využívaných materiálech pro tuto technologii běžné. Toto síťoví má ale za následek, z důvodu jeho křehkosti, zhoršení mechanických vlastností a to zejména při tahovém zatížení. Se snižujícím se obsahem uhlíku však výrazně stoupá technologická náročnost procesu, zejména přesné řízení teploty zpracování a homogenity teplotního pole.

6. 3. Analýza výchozího stavu zvoleného materiálu

U každého polotovaru, který bude dále zpracováván, je nutné provést analýzu výchozího stavu daného materiálu. Pro polotovar, který se bude dále zpracovávat metodou tixoformingu, je důležité určit hlavně přesné chemické složení prvků, mechanické vlastnosti a také určit podíly jednotlivých fází ve výchozím stavu polotovaru. Tyto základní kritéria se provádí laboratorním zkoušením, provedením zkoušky tahem a odběrem vzorku pro metalografický rozbor z dané tavby, odkud pochází používaný polotovar. Všechny tyto informace lze také vyčíst z certifikovaného materiálového listu přímo od výrobce. (viz. Příloha 1, Tab. 2) V tomto listu jsou popsány i hodnoty mechanického namáhání, jako je mez kluzu, mez pevnosti, tažnost, kontrakce ale i hodnoty vrubové houževnatosti pro danou tavbu.

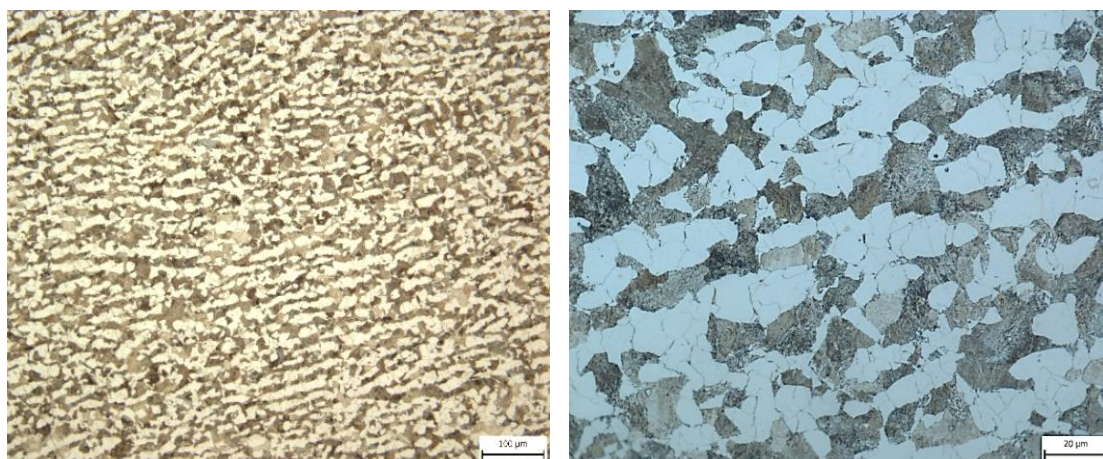
C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Al	N	Mo	V	Ti
0,31	1,50	0,62	0,018	0,024	0,03	0,20	0,02	0,02	0,0122	0,007	0,098	0,0261

Tab. 2: Přesné chemické složení materiálu 30MnVS6, zastoupení prvků v hm% [(certifikát tavby) příloha č. 1]

V případě provádění laboratorního měření je nutné odebrat vzorek pro zkoušení materiálu ze stejné tavby, jako bude používán materiál polotovaru, který bude dále zpracováván tixoformingem. Dále je nutné zjistit, zda je výchozí stav polotovaru v celém objemu homogenní a zda jsou rovnoměrně rozmístěny jednotlivé fáze apod. Analýza byla provedena tedy z více míst a nejprve byla realizována zkouška tahem za normálních teplot.

6. 3. 1. Výsledky analýzy výchozího stavu materiálu 30MnVS6

Jako polotovar byly použity válcované loupané tyče, normalizačně vyžíhané. Struktura byla feriticko-perlitická (Obr. 14). Velikost feritického zrna byla zjištěna liniovou průsečíkovou metodou a činila 3,9 μm . Pevnost oceli v tomto stavu je 771 MPa s mezí kluzu 570 MPa. Tomu odpovídá i změřená tvrdost 237 HV10 a tažností okolo 19%.

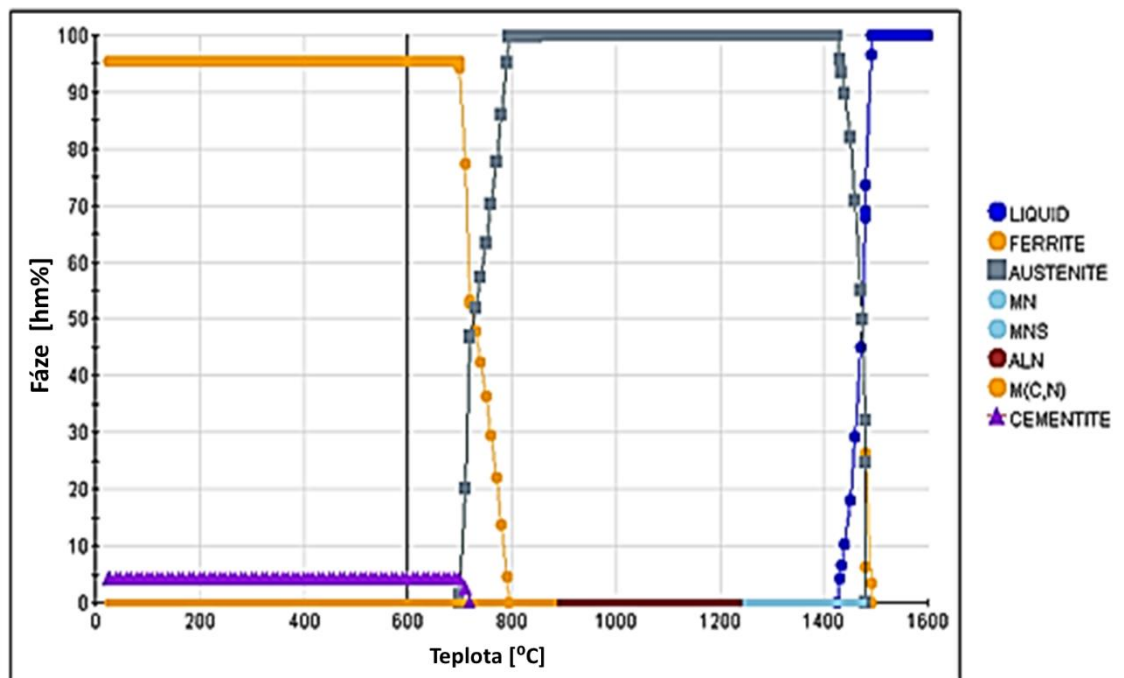


Obr. 14 : Struktura výchozího stavu oceli 30MnVS6

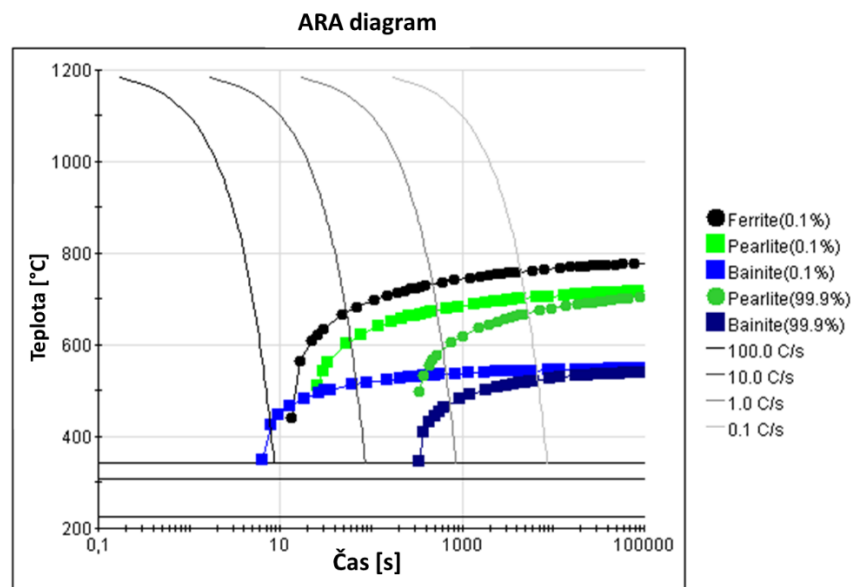
6. 4. Stanovení vhodné teploty ohřevu pomocí softwaru JMatPro pro středně uhlíkovou ocel 30MnVS6

Jednou z metod pro stanovení vhodné teploty ohřevu do semi-solid stavu je výpočet v softwaru JMatPro. JMatPro je simulační software, který počítá s širokou škálou vlastností materiálů pro slitiny používané v průmyslové praxi. Pomocí JMatPro (verze softwaru 9) je možné udělat výpočty stabilní a metastabilní fázové rovnováhy, chování materiálu při tuhnutí a jeho mechanické, termo-fyzikální a fyzikální vlastnosti, fázové transformace a chemické vlastnosti. [14] Tento software byl navržen tak, aby mohl být snad používán při každodenní práci ke snadnému určování vlastností materiálů.

V případě zvoleného materiálu 30MnVS6 byl tento software také použit. Jako vstupní hodnoty k vytvoření výpočtů dat a sestavení grafů sloužil certifikovaný materiálový list přímo od výrobce a pro konkrétní tavbu materiálu (viz. příloha č. 1). Pro zadané chemické složení byla určena závislost podílu jednotlivých fází ve struktuře na teplotě ohřevu (Obr. 15) a dále ARA diagram, na základě kterého byly navrhovány režimy ochlazování (Obr. 16).



Obr. 15: Přehled fází v závislosti na teplotě

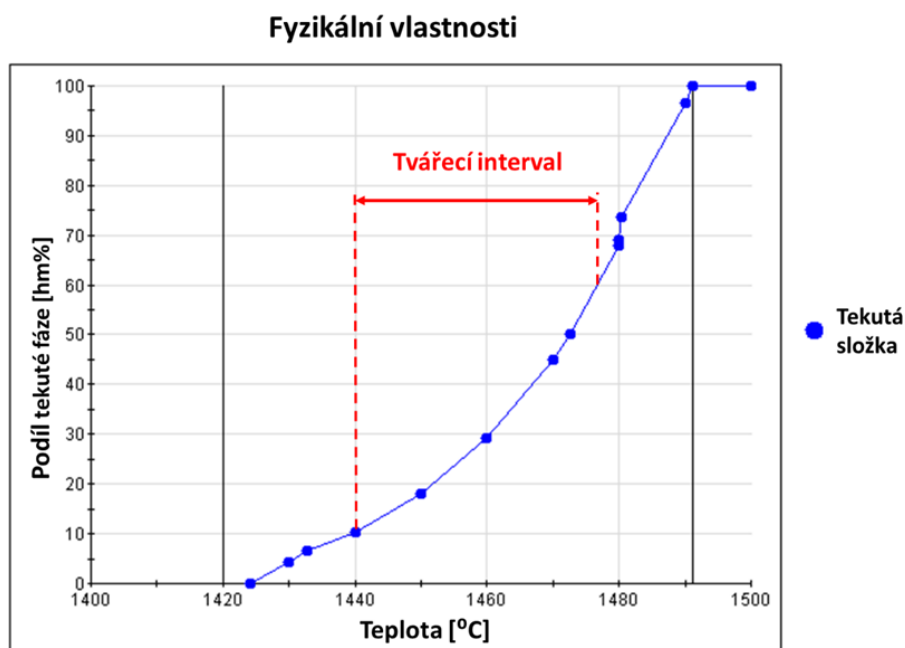


Obr. 16: ARA diagram pro určení vhodných podmínek chlazení pro návrh dalších režimů

6. 5. Stanovení parametrů pro tixofforming

Pro stanovení parametrů pro tixofforming je potřebné dobře znát fyzikální a chemické vlastnosti materiálu a jejich průběh v průběhu celého ohřevu. Pro zpracování v semi-solid stavu je nejdůležitější je šířka intervalu mezi solidem a liquidem a podíl taveniny mezi 10 – 60%. Konkrétně pro technologii tixofformingu je doporučovaný interval podílu taveniny mezi 10 – 30% [lit], (Obr. 16). Experimentálními metodami by bylo velmi časově náročné určovat tyto vstupní data a tak byl interval mezi solidem a liquidem určen na základě výpočtů v softwaru JMatPro. Thermocalc.

Z grafu je patrné, že tavení oceli 30MnVS6 začíná při 1424°C a úplnému roztavení dojde při teplotě 1491 °C. Šířka intervalu mezi solidem a liquidem je tedy přibližně 67 °C (viz. Tab. 3). Křivka je plynulá bez větších zakřivení, což je příznivé pro zpracování materiálu tixofformingem. Interval vhodný pro zpracování v semi-solid stavu leží v rozmezí 1440 – 1478°C (10 – 60% taveniny), pro tixofforming pak 1440 – 1460°C (10 – 30% taveniny). Takto úzký interval tváření klade vysoké nároky na řízení teplotního pole během zpracování, neboť již malá odchylka od zvolené teploty vede k výrazné změně podílu solidu a liquidu.



Obr. 16.: Stanovení vhodného tvářecího intervalu v semi-solid stavu pro ocel 30MnVS6

6. 6. Příprava vzorků pro odzkoušení tixoformingu na termomechanickém simulátoru

Pro odzkoušení tixoformingu pomocí termomechanického simulátoru bylo nutné připravit vzorky podle požadovaných rozměrů a to produkt s délkou 20 mm, šířkou 5 mm a tloušťkou 2mm a a dobrou kvalitou povrchu. Připraveny byly dva druhy polotovarů. Polotovary se závitovými konci (Obr. 17), které slouží pro přímé upnutí do čelistí simulátoru s aktivní délkou vzorku 16 mm a průměru 8 mm. Tyto polotovary byly použity k sérii experimentů, díky kterým bylo zjištěno vysokoteplotního chování vybraného materiálu. Jsou tedy odzkoušeny bez vlastního tvářecího zařízení. Další tvar polotovaru byl určen pro tváření v dutině formy (Obr. 18) a mají délkou 48 mm a \varnothing 6 mm. Tyto polotovary mají kuželové konce s vrcholovým úhlem $7,5^\circ$. Toto kuželové zakončení odpovídá tvaru elektrod a zajišťuje tak dokonalý přenos proudu pro ohřev a zároveň vystředění polotovaru ve formě, kvůli lepšímu uchycení ve formě.



Obr. 17: Polotovar pro zpracování bez formy



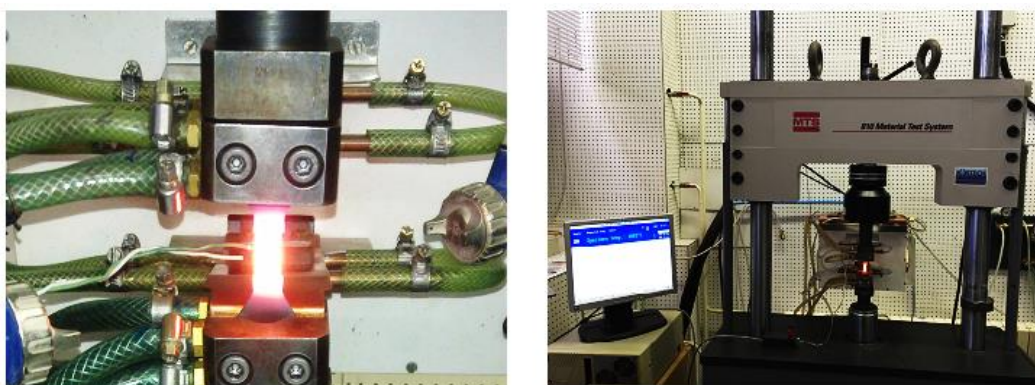
Obr. 18: Polotovar pro zpracování v dutině formy

Na tyto vyrobené polotovary byly vždy před zpracováním na stroji přivařeny termočlánky. Termočlánky byly připevněny do středové části vzorku, která při tváření představuje aktivní tvářecí oblastí. V případě oceli 30MnVS6 byl kvůli poměrně vysokým tvářecím teplotám volen termočlánek z materiálu platina-rhodium.

6. 7. Zkoušení semi-solid zpracování na závitových vzorcích upnutých přímo do čelistí simulátoru

V této fázi experimentu byla odzkoušena vhodná teplota ohřevu pro zpracování v semi-solid stavu. Dále byla pozornost věnována vlivu rychlosti ochlazování z teploty semi-solid zpracování. Pro zjednodušení celého procesu zpracování byla tato část provedena na závitových vzorcích o průměru 8 mm (Obr. 17), které byly upnuty přímo do čelistí termo-mechanického simulátoru (Obr. 19).

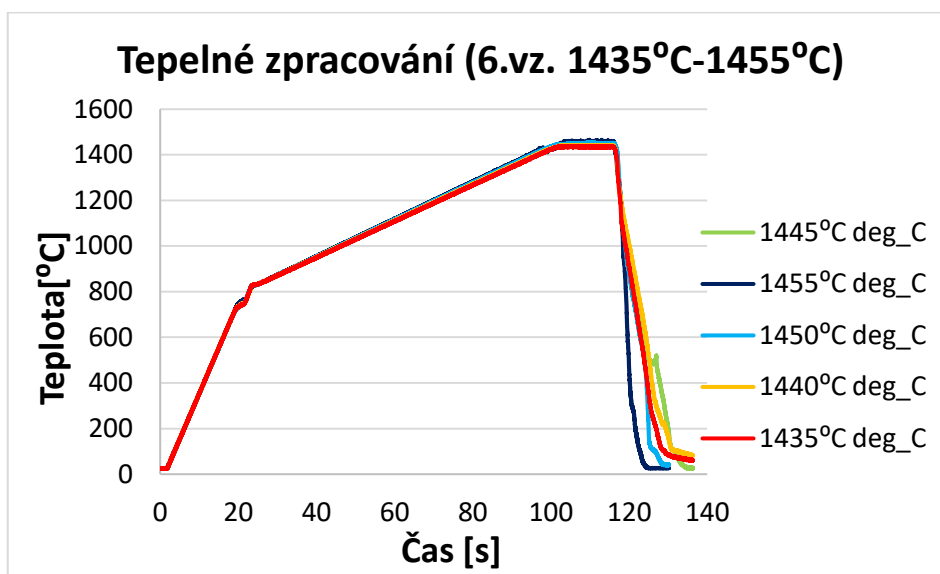
Výchozí návrhy vycházely z výpočtu v softwaru JMatPro. Zpracování bylo provedeno na termomechanickém simulátoru, který umožňuje ohřev s vysokou dynamikou. Také je vybaveno chladicím zařízením se zpětnou vazbou, což umožňuje přesně řídit nastavený průběh teplotního pole během celého experimentu. Teplota je kontinuálně snímána platinu-rhodiovým termočlánkem s frekvencí 25 kHz.



Obr. 19: Termomechanický simulátor a upnutí zkušební polotovaru do jeho čelistí

6. 7. 1 Určení vhodné teploty ohřevu

Bylo navrženo 5 režimů tepelného zpracování (RP01 - RP05) (Tab. 3). Po ohřevu na požadovanou teplotu rychlostí 12°C/s a výdrže 10 s byly vzorky chlazeny vodou až do teploty 50°C pomocí připojených trysek, doba ochlazování byla přibližně 15 – 20 s. Na základě výpočtů pomocí softwaru JMatPro byl navržen ohřev na teploty v rozmezí 1435°C až 1455°C vždy se zvýšením teploty o 5°C u následujícího vzorku. Průběhy jednotlivých experimentů jsou patrné z grafu závislosti teploty na čase (Obr. 20).



Obr. 20.: Graf průběhu zkoušek ohřevu na teploty 1435 °C až 1455 °C

Po odzkoušení režimů za různých teplot bylo provedeno metalografické hodnocení (Obr. 21 – Obr. 25) a měření tvrdosti (Tab. 3).

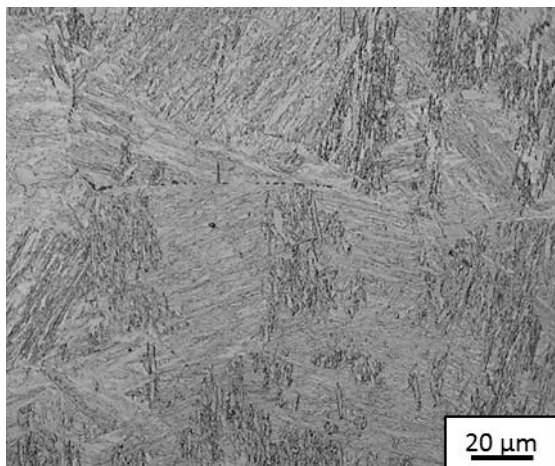
Číslo vzorku	PR_01	PR_02	PR_03	PR_04	PR_05
Teplota ohřevu [°C]	1435	1440	1445	1450	1455
HV10 [-]	543	555	555	581	594

Tab. 3: Tabulka režimů na zjištění vhodné teploty zpracování v semi-solid stavu

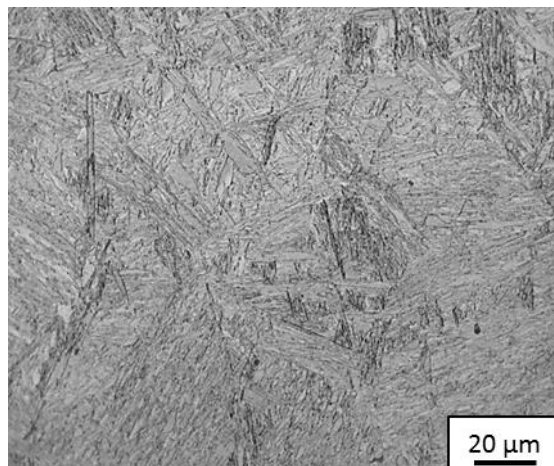
Při odzkoušení nejnižší teploty ohřevu 1435 °C byla získána smíšená základná struktura tvořena martenzitem a bainitem s tvrdostí 543 HV10. Podle výpočtu v programu JMatPro mělo být přítomno okolo 8 % tekuté fáze. Ve struktuře nebyla zjištěna klasická struktura po zpracování v semi-solid stavu, tedy polyedrická zrna austenitu a ledeburitické lamelární síťoví okolo nich. To je způsobeno zřejmě velmi nízkým obsahem uhlíku ve vybrané oceli, díky čemuž není možné stabilizovat austenit až do ochlazení na teplotu RT. Postupné zvyšování teploty ohřevu vedlo ke zvýšení podílu martenzitu, což se projevilo navýšením hodnoty tvrdosti. A při teplotě ohřevu 1455 °C byla tvrdost až 594 HV10.

Na základě dosažených výsledků byla jako nejlepší teplota ohřevu zvolena teplota 1455 °C. Při této teplotě ohřevu je vzniklá mikrostruktura tvořena směsí martenzitu a bainitu.

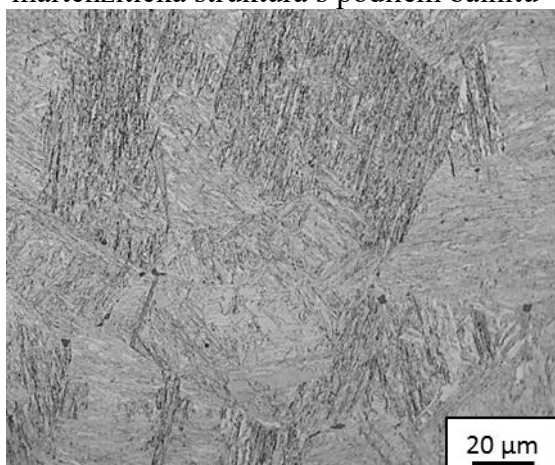
Tato teplota je nejvhodnější kvůli dostatečnému stupni natavení materiálu, a díky tomu je při následném zpracování ve formě předpokládána dobrá zabíhavost.



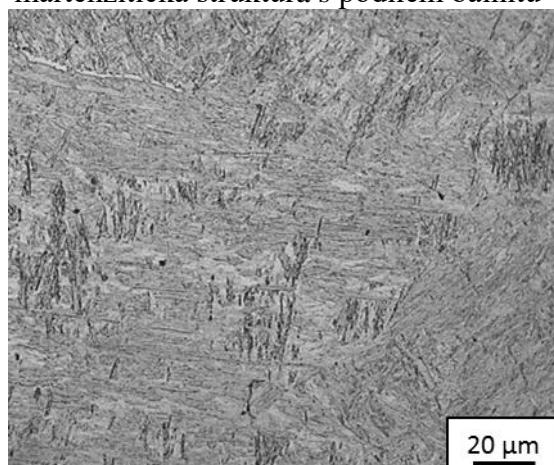
Obr. 21: RP01 – teplota ohřevu 1435°C –
martenzitická struktura s podílem bainitu



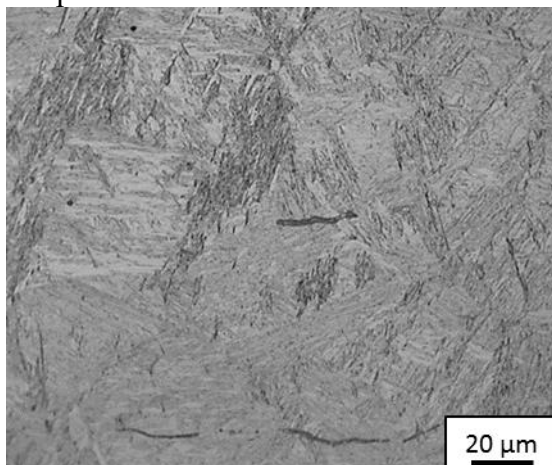
Obr. 22: RP02 – teplota ohřevu 1440°C –
martenzitická struktura s podílem bainitu



Obr. 23: RP03 – teplota ohřevu 1445°C –
martenzitická struktura s podílem bainitu



Obr. 25: RP04 – teplota ohřevu 1450°C –
martenzitická struktura s podílem bainitu



Obr. 25: RP05 – teplota ohřevu 1455°C –
martenzitická struktura s podílem bainitu

6. 7. 2. Vliv rychlosti a průběhu ochlazování z teploty semi-solid stavu na vývoj struktury

Dále bylo nutné odzkoušet proces ochlazování, který by bylo možné následně aplikovat při tváření polotovaru v zápustce formy. Bylo odzkoušeno jak ochlazování s klasickým profilem křivky tak lomené ochlazování.

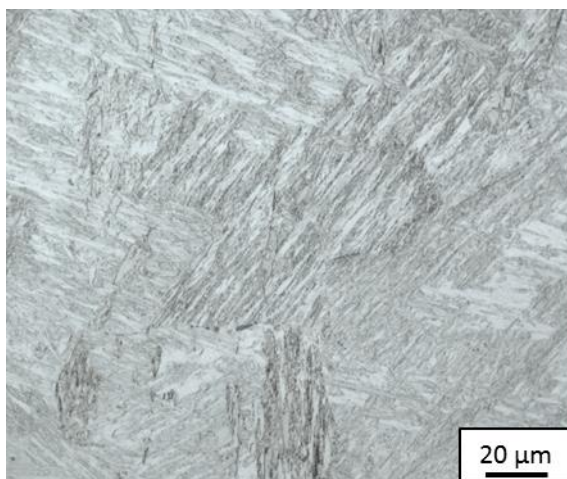
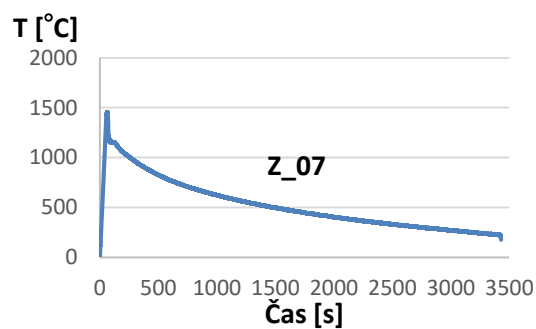
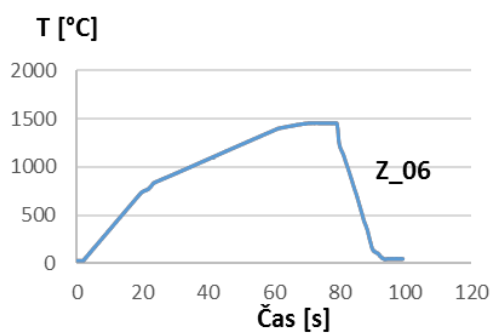
6. 7. 2. 1 Ochlazování s klasickým profilem křivky

Na základě výsledků z první části experimentu a ARA diagramu vypočteného v softwaru JMatPro (Obr. 16). Byly navrženy další režimy tepelného zpracování v semi-solid stavu. Byly navrženy dva režimy s ohřevem na 1455°C s výdrží na teplotě 10s. U režimu Z_06 bylo poté provedeno ochlazování po dobu 20s (Obr. 23a) a u režimu Z_07 bylo odzkoušeno velmi pomalé ochlazování po dobu cca. 3362s (Obr. 23b). Cílem bylo zjistit vliv doby ochlazování na vývoj struktury.

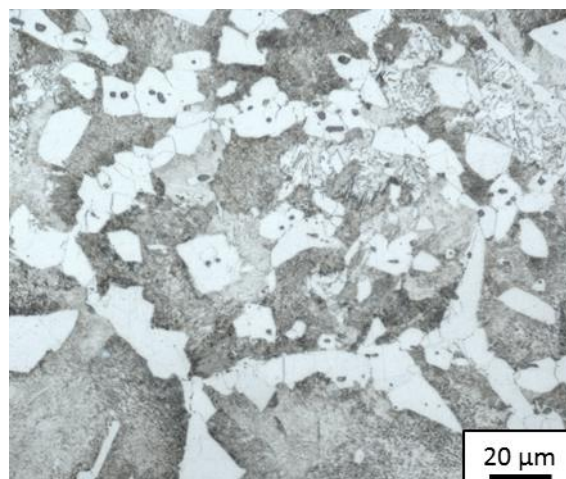
Po odzkoušení režimu Z_06 s dobou ochlazování 20 s byla opět získána martenzitiko-bainitická struktura s tvrdostí 559 HV10 (Obr. 26a). Výrazné prodloužení doby ochlazování u vzoru Z_07 vedlo i k výrazné změně charakteru struktury. Struktura byla perliticko-feritická, čemuž odpovídal i pokles hodnoty tvrdosti na 262 HV10 (Obr. 26b).

Číslo vzorku	Z_06	Z_07	Z_08	Z_09	Z_10	Z_13	Z_14
Teplota ohřevu [°C]	1455	1455	1455	1455	1455	1455	1455
Způsob ochlazování	Rychle chlazení 20s	Pomalé chlazení 3362s	Zastavení na teplotě 600°C	Zastavení na teplotě 700°C	Zastavení na teplotě 400°C	Zastavení na teplotě 480°C	Zastavení na teplotě 500°C
HV10 [-]	559	262	296	277	489	502	486

Tab. 4: Přehled odzkoušených režimů ochlazování a tváření v dutině formy



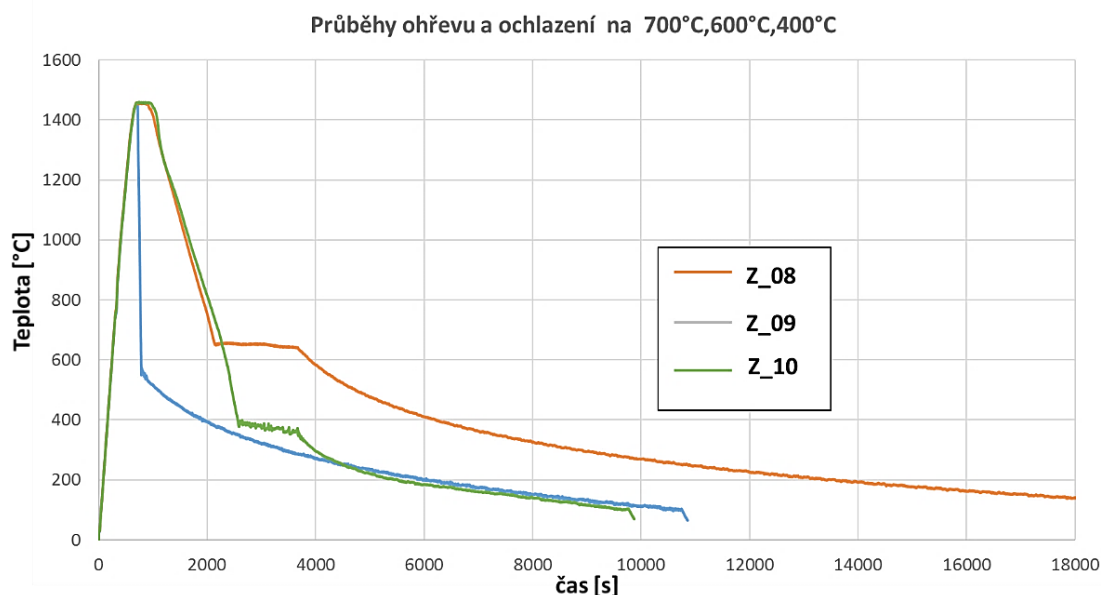
Obr. 26a: Z_06 – teplota ohřevu 1455°C – doba ochlazování 20s – mikrostruktura martenziticko-bainitická



Obr. 26b: Z_07 – teplota ohřevu 1455°C – doba ochlazování 3362s – mikrostruktura perliticko-feritická

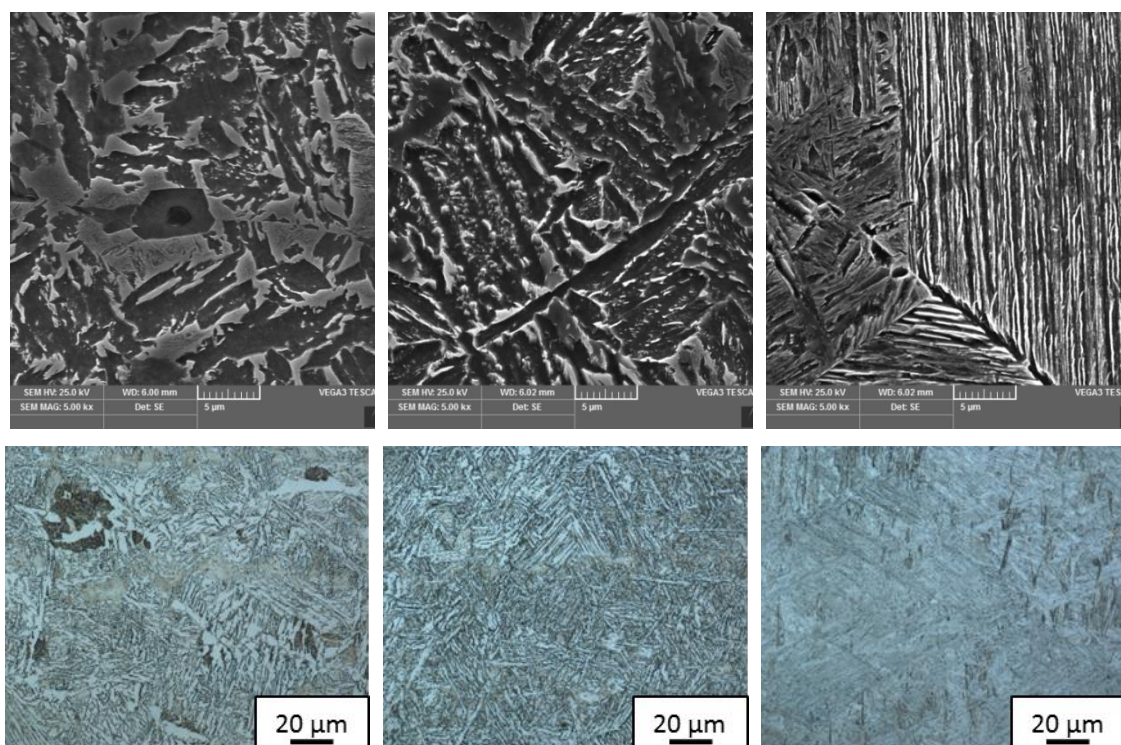
6.7.2.2. Ochlazování s lomeným profilem křivky

Další tři režimy Z_08 – Z_10 byly navrženy podobně jako dva předchozí, ale byl upraven profil chlazení. V první části byly vzorky chlazené nejvyšší rychlostí vodou a po dosažení požadované teploty (700°C, 600°C, 400°C) byly dochlazeny pozvolna na teplotu 100°C (Obr. 27). Cílem těchto tří režimů bylo získání různých struktur v závislosti na různém profilu ochlazování. Vzorky byly ohřáty na 1455° s výdrží na teplotě 10s. Touto úpravou chlazení bylo dosaženo rozdílných struktur.



Obr. 27. Křivky z reálného průběhu režimů ohřevu na 1455°C s následným lomeným chlazením

Při zastavení rychlého ochlazování na teplotě 700°C byla získána směsná struktura tvořená bainitem a malým podílem martenzitu a perlitu. Hodnota tvrdosti byla 277 HV10. Pokud došlo k zastavení ochlazování až na teplotě 600°C perlit již ve struktuře nebyl detekován a struktura byla převážně bainitická s malým podílem martenzitu. Tomu odpovídá i nárůst hodnoty tvrdosti na 296 HV10. Při zastavení ochlazování až na teplotě 400°C obsahovala struktura již vyšší podíl martenzitu a tvrdost byla 489 HV10.



Režim Z_08 - 700°C

Režim Z_09 - 600°C

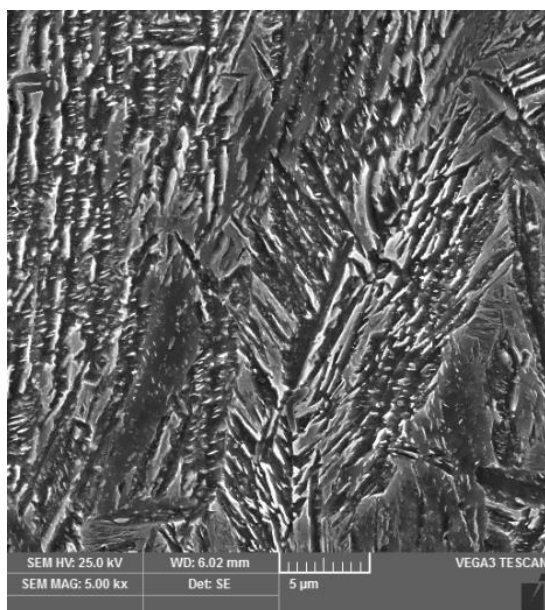
Režim Z_10 - 400°C

Obr. 28: Porovnání vývoje mikrostruktury podle teploty

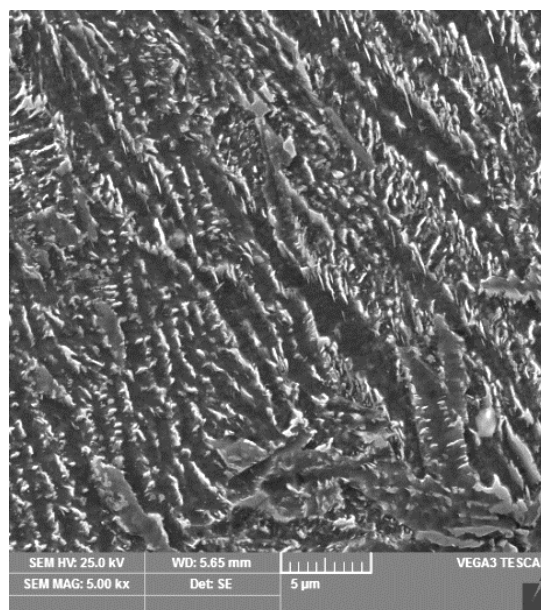
Z metalografické analýzy vyplývá, že pro dosažení nejlepší kombinace bainitu a martenzitu je nutné zastavit rychlé ochlazování vodou při teplotě 600°C.

Na základě výsledků z režimu Z_08 až Z_10 byly navrženy doplňkové režimy Z_13 a Z_14, pomocí kterých by bylo dosaženo ještě vyššího podílu bainitu. Pro návrh teplot pro zastavení rychlého ochlazování vodou byl využit výpočtový program ThermoCalc. Byly navrženy zastavení na teplotách 480°C (Z_13) (Obr. 29a) a na teplotě 500°C (Z_14) (Obr. 29b), poté byly vzorky dochlazeny pomalým ochlazováním.

Po odzkoušení těchto dvou režimů bylo na základě metalografického hodnocení a měření tvrdosti zjištěna bainitická struktura, ve které je zastoupen horní i dolní bainit a také podíl martenzitu. Tato struktura byla pro experimentální program této práce považována za nejlepší dosaženou mikrostrukturu (Obr. 29b). S tvrdostí 486 HV10.



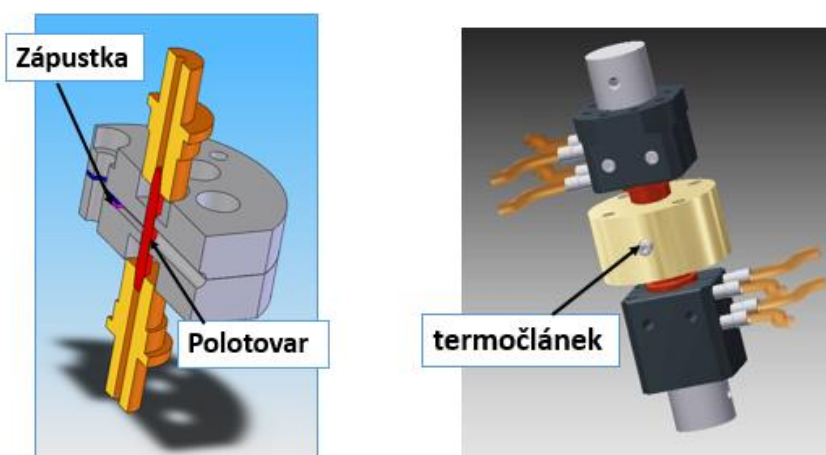
Obr: 29a: Z_13 - zachlazení na teplotu 480°C, bainitická struktura s podílem martenzitu, SEM



Obr.: 29b: Z_14 -Zachlazení na teplotu 500°C, bainitická struktura s podílem martenzitu - SEM

6. 8 Zpracování polotovarů na termomechanickém simulátoru ve formě

Po odzkoušení parametrů tepelného zpracování na polotovaru se závitovými konci, byl proveden experiment s tvářením v semi-solid stavu přímo v dutině tvářecí formy. Pro tuto část experimentálního programu byly použity vzorky s kuželovými konci (Obr. 18). Polotovar je upevněn do formy, která je namontována do termomechanického simulátoru (Obr. 30). Vlastní připevnění do stroje je přes měděné elektrody, které slouží nejenom k upevnění formy, ale i k ohřevu vzorku a vymezení jeho polohy ve formě. Přes tyto elektrody je také provedeno tvářením vzorku, tím dojde k jeho stlačení o cca. 6 mm, a tím vyplnění dutiny formy nataveným materiálem. Teplota je měřena platinum-rhodiovým termočlánkem přivařeném na tělo vzorku. Vzhledem k tomu, že ohřev je prováděn vysokofrekvenčním odporovým ohřevem začíná ve středu vzorku.



Obr. 30 – Uložení polotovaru do uzavřené dutiny formy

Tváření všech polotovarů bylo provedeno v titanové formě s vnitřní dutinou ve tvaru podélné drážky o délce 20 mm a průřezu 5x1,9 mm. S touto dutinou byla provedena optimalizace důležitých parametrů procesu.

Hlavní parametry hrající roli ve výsledném vyplnění dutiny formy a kvalitě produktu představují vedle rychlosti ohřevu a teploty ohřevu i tvářecí síla a rychlost plnění dutiny. Tvářecí sílu lze plynule měnit od 0 do 50 kN. Rychlost plnění je pak závislá od rychlosti pohybu aktuátoru stroje. Během procesu ohřevu a tváření je kontinuálně snímána teplota vzorku, síla stroje a výkon ohřevu.

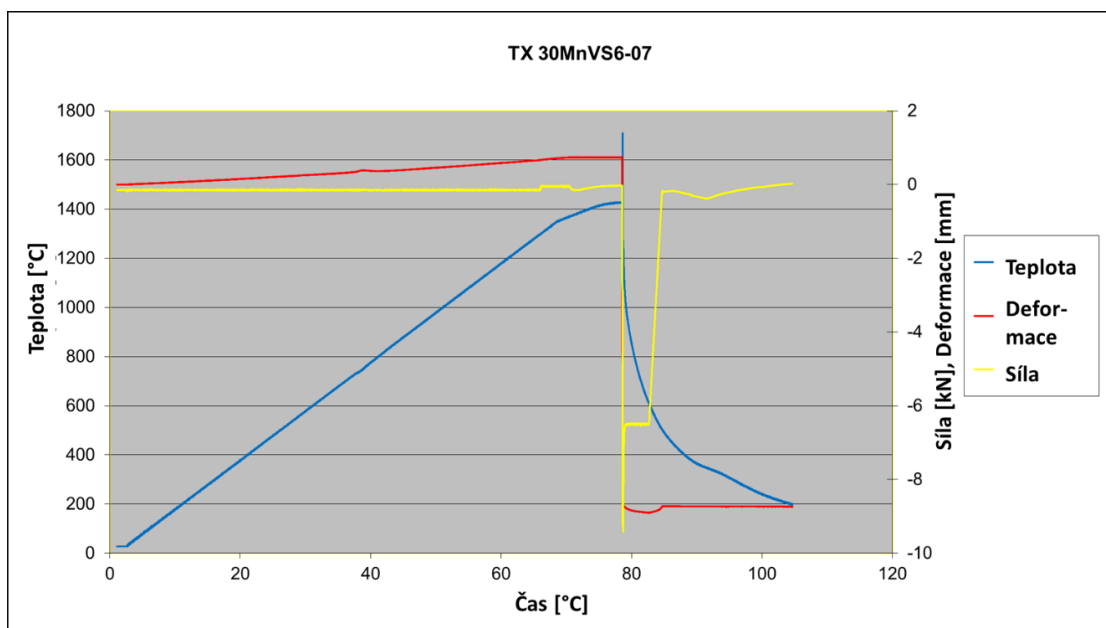
Při tomto způsobu zpracování je hlavním úkolem docílit úplného vyplnění celé dutiny formy a dosažení dobré kvality povrchu. Režimy pro toto zpracování byly navrženy na základě již odzkoušeného tepelného zpracování, bez formy na sadě závitových vzorků.

Jako teplota ohřevu byla zvolena teplota 1455°C, která byla optimalizována v první části experimentálního programu a tvářecí síla 7 kN.

Po odzkoušení prvních pokusů těchto parametrů při tváření ve formě nedošlo k úplnému vyplnění dutiny formy a získání požadovaných tvarů produktu. Analýza záznamu jednotlivých parametrů ukázala, že pravděpodobně došlo k tuhnutí materiálu před tím, než stihl vyplnit celou dutinu formy (Obr. 31).

Ze záznamu z termomechanického simulátoru je zřejmé, že byl proveden předepsaný ohřev vzorku na teplotu 1455°C. V okamžiku deformace však došlo k překmitnutí teploty až do teplot okolo 1700°C, což je způsobeno krátkodobým odtržením termočlánu od

povrchu polotovaru, a tak tento úsek grafu nelze považovat za skutečný průběh procesu. Díky tomu došlo ke krátkodobému nedodržení předepsané síly. Po dosažení požadované teploty byl polotovár tvářen silou 7 kN. Vzhledem k nedodržení předepsaných parametrů nebyla dutina formy vyplněna (Obr. 32).

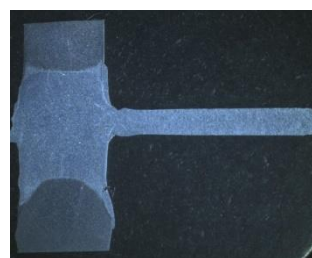


Obr. 31: Skutečný průběh režimu tváření v dutině formy

Po odladění průběhu zpracování a odzkoušení režimu s dodržnými parametry došlo k úplnému vyplnění dutiny formy (režim F_07), (Obr. 33).



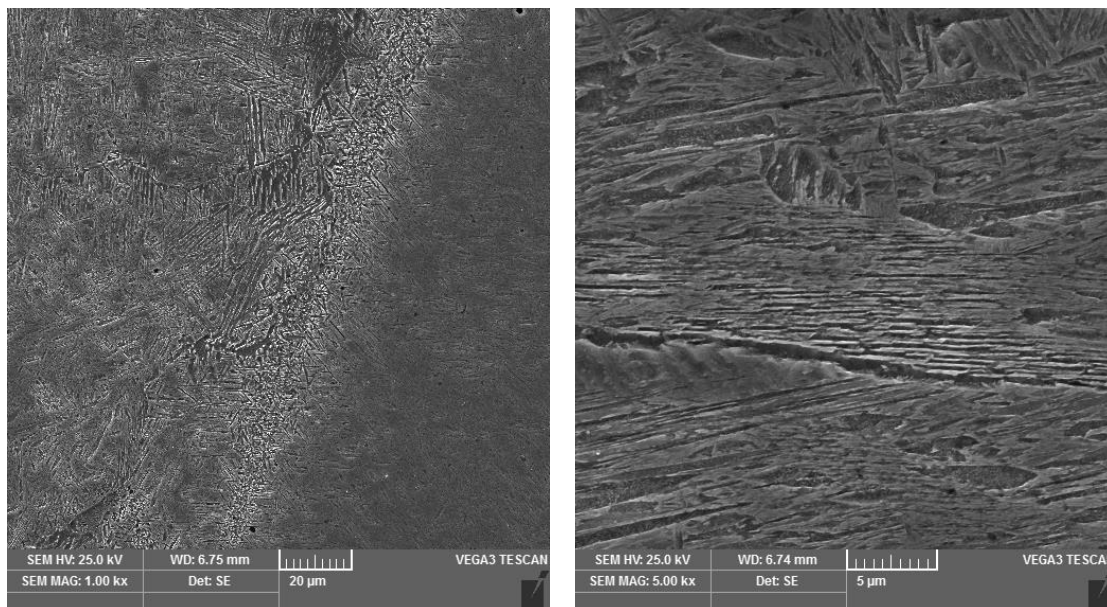
Obr. 32: Podélný řez odzkoušeným vzorkem-vpravo odzkoušený režim F_07 jen částečně vyplněná drážka



Obr. 33: Podélný řez odzkoušeným vzorkem, vlevo plně vyplněná drážka

Metaografické hodnocení režimu F_07 bylo provedeno z vyplněné části vzorku. V tomto případě byla struktura tvořena martenziticko-bainitickou strukturou s tvrdostí (Obr. 34).

Z podélného řezu je zřejmé, že k natavení došlo pouze ve středové oblasti vzorku. V přechodové oblasti byla vidět zřetelný přechod z oblasti s výskytem tekuté fáze během ohřevu. Ten byl tvořen zhrubnutím martenzitických jehlic. Po ustálení procesu směrem ke středu vzorku byla struktura zase jemnější.



Obr. 34: Vlevo přechodová oblast, vpravo oblast martenzitu

9. Diskuse výsledků

V první fázi experimentu byla odzkoušena vhodná teplota ohřevu pro zpracování v semi-solid stavu. Dále byla pozornost věnována vlivu rychlosti ochlazování z teploty semi-solid zpracování. Pro zjednodušení celého procesu zpracování byla tato část provedena na závitových vzorcích o průměru 8 mm, které byly upnuty přímo do čelistí termo-mechanického simulátoru.

Bylo navrženo 5 režimů tepelného zpracování (RP01 - RP05). Po ohřevu na požadovanou teplotu a výdrže 10 s byly vzorky chlazené vodou. Ohřev na teploty v rozmezí 1435°C až 1455 °C vždy se zvýšením teploty o 5 °C u následujícího vzorku. U všech těchto režimů bylo dosaženo směsné martenziticko-bainitické struktury s tvrdostí okolo 550 HV 10.

Na základě výsledků z první části experimentu a ARA diagramu vypočteného v softwaru JMatPro, byly navrženy další režimy tepelného zpracování v semi-solid stavu. Režimy s klasickým profilem ochlazování a s lomeným profilem ochlazování.

Byly navrženy dva režimy s ohřevem na 1455°C s výdrží na teplotě 10s. U režimu Z_06 bylo poté provedeno ochlazování po dobu 20s a u režimu Z_07 bylo odzkoušeno velmi pomalé ochlazování po dobu cca. 3362s. Po odzkoušení režimu Z_06 s dobou ochlazování 20 s byla opět získána martenzitiko-bainitická struktura s tvrdostí 559 HV10. Výrazné prodloužení doby ochlazování u vzorku Z_07 vedlo i k výrazné změně charakteru struktury. Struktura byla perliticko-feritická, čemuž odpovídal i pokles hodnoty tvrdosti na 262 HV10.

Pomocí úpravy rychlostí chlazení u režimů Z_08 - režimu Z_10 bylo cílem dosáhnout většího podílu bainitu ve struktuře a získat tak lepší mechanické vlastnosti výsledného produktu. Ohřev vzorků byl na teplotu 1455°C a následovalo prudké chazení se zastavením na teplotě 700°C, 600°C, 400°C a následné pomalé dochlazení. U všech tří režimů byl zkoumán vývoj struktury v závislosti na teplotě, na kterou byl polotovár dochlazen vysokou rychlostí. Nejlepší mikrostruktura byla pozorována u polotovaru chlazeného na 600°C, kde byla pozorována zejména bainitická struktura s tvrdostí 262 HV10, která má lepší mechanické vlastnosti než struktura martenzitická.

Při tváření polotovaru v zápustce formy pak bylo při teplotě 1455°C s deformací definovanou tvářecí silou 7kN a chlazením velkou rychlostí dosaženo opět smíšené martenzicko-bainitické struktury tvrdostí 486 HV10.

10. Závěr

V experimentální části bakalářské práce bylo provedeno odzkoušení nekonvenční nízko-
legované středně uhlíkové oceli 30MnVS6 zpracování v semi solid stavu a mini-tixoformingu. Cílem bylo odzkoušení využití této oceli pro tento typ zpracování. Experimentální program byl rozdělen do dvou částí. V první části byly odzkoušeny vhodné teploty ohřevu a rychlosti ochlazování. Pro zjednodušení procesu zpracování byly využity závitové vzorky upnuté do čelistí termomechanického simulátoru. V druhé části bylo odzkoušeno již tváření přímo ve formě určené pro technologii mini-tixoforming.

Pro stanovení vhodné teploty ohřevu do semi-solid stavu a rychlosti ochlazování bylo v prvním kroku využito výpočtového programu JMatPro. Díky tomu byla navržena série režimů pro zjištění vhodné teplota ohřevu, která byla experimentálně potvrzena na 1455°C. Tím byla ve středu vzorku získána martenziticko-bainitická struktura s tvrdostí HV10. Bylo zjištěno, že variováním rychlosti ochlazování je možné získat vedle standardních základních struktur i čistě feriticko-perlitické s tvrdostí 262 HV10 nebo směsné obsahující bainit, martenzit i perlit. Po odzkoušení parametrů zpracování bylo přikročeno k dozkoušení tváření v dutině formy na vzorcích s kuželovými konci. Po odladění podmínek zkoušky došlo k úplnému vyplnění dutiny formy a získání produktu s dobrou kvalitou povrchu. Struktura byla ve středu produktu tvořena smíšenou martenziticko-bainitickou strukturou s tvrdostí HV10.

1. Seznam použité literatury

- [1] PÜTTGEN, W., BLECK, W., HIRT, G., SHIMAHARA, H., *Thixoforming of Steels – A Status Report*, Advanced Engineering Materials, 9, No. 4 (2007), 234 – 245.
- [2] PÜTTGEN, W., HALLSTEDT, B., BLECK, W., UGGOWITZER, P. J. *Acta Mater.* 2007, 55, 1033.
- [3] ROSSO, M. *Thixocasting and rheocasting technologies*, improvements going on, *Politecnico di Torino, Department of Applied Science and Technology, C.so Duca degli Abruzzi, 24-10129 Torino, Italy.
- [4] HIRT G., KHIZHNYAKOVA L, BAADJOU R., KNAUF F., KOPP R. *Semi-Solid Forming of Aluminium and Steel-Introduction and Overview*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, ISBN: 978-3-527-32204-6.
- [5] WOLF, A., BAUR, J., GULLO, G.C. *Thixoforging*, dostupné na: http://www.cct-bw.de/veroeffentlichung_pdf/WoBa%20Massiv01%20english.pdf (30.11.2016)
- [6] KIUCHI, M. AND KOPP, R., MUSHY/*Semi-Solid Metal Forming Technology – Present and. Future*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 51, p. 653-670.
- [7] <http://www.cct-bw.de/frames/new-rheocasting.htm> (20.11.2016)
- [8] [http://www.nmfgmbh.de/en/hauptnavigation/frth/fields-of-activity/injection-molding-of-magnesium-parts/\(1.12.2016](http://www.nmfgmbh.de/en/hauptnavigation/frth/fields-of-activity/injection-molding-of-magnesium-parts/(1.12.2016)
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Semi-solid_metal_casting#Thixomolding (29.11.2016)
- [10] http://www.jsw.co.jp/en/products/mg/process_and_magnesium_thixomolding_machines.html (29.11.2016).
- [11] WOLF, A., BAUR, J., GULLO, G.C. *Thixoforging*, dostupné na: http://www.cct-bw.de/veroeffentlichung_pdf/WoBa%20Massiv01%20english.pdf](přístup 20.11.2016).
- [12] http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/tixotropie.html (25.10.2016).
- [13] Edited by HIRT G. and KOPP R. *Thixoforming: Semi-solid Metal Processing.*, pp 1 – 27, Copyright 2009 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. K GaA, Weinheim ISBN: 978-3-527-3220 4-6.

- [14] KIUCHI, M. AND KOPP, R., MUSHY/*Semi-Solid Metal Forming Technology – Present and Future*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 51, p. 653-670.
- [15] PIERRET, J.C., RASSILI, A. VANEETVELD, G., LECOMTE-BECKERS, J., WALMAG, G.. *Influence of the chemical composition on the Thixoformability of steels*, Int J Mater Form (2009) Vol. 2 Suppl 1:765–768, Springer/ESAFORM 2009.
- [16] HIRT, G., BLECK, W. , BÜHRIG-POLACZEK, A. , SHIMAHARA, H., PÜTTGEN, W. , AFRATH, C. *Semi Solid Casting and Forging of Steel*, Institute of Metal Forming (IBF), Institute of Ferrous Metallurgy (IEHK), Foundry Institute (GI), RWTH Aachen University, 52056 Aachen, Germany.
- [17] KOESLING, D., TINIUS, H. C., CREMER, R., HIRT, G., MORJAN, U., NOHN, B., WITTSTAMM, TH., WITULSKI, T. *Final Technical Report P 322/08/96/ S 24/23/95*, ISBN 3-930621-92-4, Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, Düsseldorf (1999).
- [18] SHIMAHARA, H., HIRT, G. *Proc. 9th ESAFORM Conf.*, Glasgow (2006) p. 811-814.
- [19] J.-Y. LI, SUGIYAMA S., YANAGIMOTO, J. *Mat. Proc. Tech.* 161 (2005) p. 396-406.
- [20] RONEŠOVÁ, A., MAŠEK, B., STAŇKOVÁ, H., ŠTÁDLER, C. Patent CZ c. 299758 - *Způsob manipulace s materiálem a jeho tváření při teplotě mezi solidem a liquidem*,
- [21] RONEŠOVÁ, A., MAŠEK, B. Patent USA No. 7,480,155 - *Digital Generator of Phase Shift Modulation* (20. 1. 2009)
- [22] HIRT G., KHIZHNYAKOVA L, BAADJOU R., KNAUF F., KOPP R. *Semi-Solid Forming of Aluminium and Steel-Introduction and Overview*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, ISBN: 978.
- [23] KÁŇA J, VOREL I. *Simulator of Thermomechanical Treatment of*. Vienna: DAAAM International Vienna, 2016. s. 0513-0518. ISBN: 978-3-902734-07-5 , ISSN: 1726-9679.

PŘÍLOHA č. 1

Certifikát tavby experimentálního materiálu 30MnVS6