

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská
metalurgie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vývoj nástroje pro testování účinků chlazení při zpracování plechu
metodou „Hot stamping“

Autor: **Michal Weinar**

Vedoucí práce: **Ing. Soňa Benešová, Ph.D.**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Michal WEINAR
Osobní číslo:	S17B0250P
Studijní program:	B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor:	Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie
Téma práce:	Vývoj nástroje pro testování účinků chlazení při zpracování plechu metodou „Hot Stamping“
Zadávací katedra:	Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Zásady pro vypracování

1. Technologie tažení plechu za studena a za tepla, tažení termomechanicky válcovaných plechů
2. Požadavky, kladené na taženou součást se zaměřením na automobilový průmysl
3. Metody „Hot stamping“ a „Press hardening“
4. Využití numerické simulace při navrhování režimu ochlazování v nástroji pro řízení vývoje struktury.
5. Provedení experimentálního zpracování plechu

Rozsah bakalářské práce: **30-40 stran**
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

SEMIATIN S.L. *Metalworking : Sheet forming*, Vol. 14B, ASM International, 2006., ISBN 978-0-87170-710-9

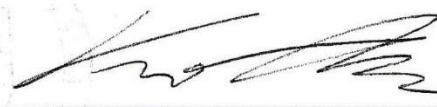
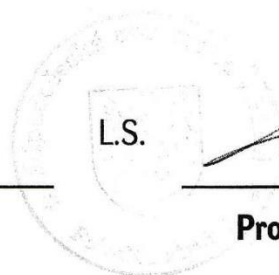
NAGANATHAN A., *Hot Stamping of Manganese Boron Steel*, Thesis of Graduate Program in Mechanical Engineering, The Ohio State University 2010.

SLOTA, Ján. *Numerická simulácia lisovania plechov*. Košice: Strojnícka fakulta TU v Košiciach, 2016. Edícia vedeckej a odbornej literatúry (Technická univerzita v Košiciach).

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Soňa Benešová, Ph.D.**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jiří Vrtáček**
Regionální technologický institut
Datum zadání bakalářské práce: **5. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2020**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



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

Prohlášení o autorství

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

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou 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 BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Weinar	Jméno Michal	
STUDIJNÍ OBOR	2301R016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Benešová, Ph.D.	Jméno Soňa	
PRACOVIŠTĚ	ZČU – FST – KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Vývoj nástroje pro testování účinků chlazení při zpracování plechu metodou „Hot stamping“.		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2020
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	90	TEXTOVÁ ČÁST	77	GRAFICKÁ ČÁST	13
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Bakalářská práce se zabývá vývojem experimentálního nástroje pro zpracování plechu metodou „hot stamping“. Cílem práce je návrh nástroje a následné provedení numerické simulace procesu tažení zmiňovanou metodou. Práce obsahuje navrženou variantu nástroje a vyhodnocení jeho tvářecích i chladicích schopností z výsledků numerické simulace provedených v softwaru DEFORM 3D metodou konečných prvků (FEM). Také obsahuje experimentální ověření tepelného zpracování plechového vzorku.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	<p>Hot stamping, 22MnB5, návrh nástroje, CAD, numerická simulace, metoda konečných prvků (FEM)</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Weinar	Name Michal	
FIELD OF STUDY	2301R016 „Materials engineering and engineering metallurgy“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Benešová, Ph.D.	Name Soňa	
INSTITUTION	ZČU – FST – KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Development of a tool die for testing the effects of a cooling system on sheet metal processing by the hot stamping.		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Material Science and Technology	SUBMITTED IN	2020
----------------	------------------------	-------------------	---------------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	90	TEXT PART	77	GRAPHICAL PART	13
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The bachelor thesis deals with the development of an experimental tool die for sheet metal processing using the hot stamping technology. The aim of the work is to design a tool die and then perform a numerical simulation of the hot stamping process. The thesis contains a proposed variant of the tool and evaluation of its forming and cooling abilities from the results of numerical simulation performed in the software DEFORM 3D by the finite element method (FEM). It also contains experimental verification of the heat treatment of the sheet metal sample.
KEY WORDS	Hot stamping, 22MnB5, tool die design, CAD, numerical simulation, finite element method (FEM)

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucí mé bakalářské práce Ing. Soně Benešové, Ph.D. za cenné rady, vstřícnost a celkovou pomoc v průběhu realizace této práce. Také bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Vrtáčkovi za věcné rady ohledně této práce, převážně pak při pomoci s konstrukčním řešením nástrojové sestavy. Poděkování patří i společnosti S.N.O.P. a.s. Klášterec nad Ohří za vstřícnost a cenné rady ohledně praktického využití metody „hot stamping“.

Obsah

1	Úvod.....	5
2	Technologie tažení plechů	6
2.1	Rozdělení tažení	6
3	Hluboké tažení	8
3.1	Nástroj	9
3.2	Stroje	12
3.3	Defekty	12
4	Hot stamping	13
4.1	Přímá metoda.....	14
4.2	Nepřímá metoda	15
4.3	Způsoby ohřevu.....	16
4.4	Nástroj	20
4.5	Nástroj s odlitými chladicími kanálky.....	24
4.6	Povlakování polotovarů.....	24
4.7	Používané druhy povlaků	25
5	Tření při tváření plechů.....	26
5.1	Koeficient tření při tažení metodou „hot stamping“.....	26
6	Tailor welded blanks	29
7	Praktická část	32
7.1	Úvod do praktické části.....	32
7.2	Nástroj	34
7.2.1	Tažník.....	35
7.2.2	Tažnice	39
7.2.3	Přidržovač	42
7.2.4	Kryt pístů a vedení	44
7.3	Plechový přístřih.....	46
7.4	Numerická simulace procesu.....	48
7.4.1	Materiálové charakteristiky 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500)	48
7.4.2	Materiál nástroje.....	53
7.4.3	Výsledky simulovaného procesu.....	55
7.5	Experimentální zpracování plechového vzorku	67
7.5.1	Výchozí stav	68
7.5.2	Stav po zpracování	69

8	Diskuze výsledků	71
9	Závěr	74
	Seznam použité literatury	75
	Seznam příloh	77

Seznam použitých zkratk a symbolů

TWB	„tailor welded blanks“
HV	tvrdost podle Vickerse
Al	chemická značka hliníku
Si	chemická značka křemíku
Q	fyzikální značka tepla [J]
R	fyzikální značka el. odporu [Ω]
I	fyzikální značka el. proudu [A]
t	označení času [s]
HRC	tvrdost podle Rockwella
HTCS	„high thermal conductivity steel“
DC	„die casting“
C	chemická značka uhlíku
P	chemická značka fosforu
Mn	chemická značka manganu
B	chemická značka bóru
S	chemická značka síry
Mo	chemická značka molybdenu
V	chemická značka vanadu
W	chemická značka wolframu
Cr	chemická značka chromu
Ni	chemická značka niklu
Ti	chemická značka titanu
Cu	chemická značka mědi
Rp	mez kluzu materiálu [MPa]
VW	automobilová značka Volkswagen
Fe	chemická značka železa
Zn	chemická značka zinku
μ	koeficient tření [-]
T _F	tahová síla tažného zařízení [N]
P	tlaková síla lisu [N]

v_{tn}	rychlost tažníku [mms^{-1}]
T_{tn}	teplota tažníku [$^{\circ}\text{C}$]
R_T	pokožová teplota [$^{\circ}\text{C}$]
F_p	síla přidržovače [N]
MIG	„metal inert gas“
ULSAB	„The Ultralight Steel Auto Body“
TOO	tepelně ovlivněná oblast po svařování
AHSS	„advanced high-strength steel“
DP	„Dual-phase“
TRIP	„Transformation-Induced Plasticity“
KMM	Katedra materiálů a strojírenské metalurgie
FST	Fakulta strojní
ZČU	Západočeská univerzita
PTC	„Parametric Technology Corporation“
SFTC	„Scientific Forming Technologies Corporation“
USIBOR 1500	obchodní název oceli 22MnB5 (1.5528)
ISO	mezinárodní organizace pro normalizaci
S_r	efektivní rychlost deformace [s^{-1}]
AISI	„American Iron and Steel Institute“
ČSN	Česká státní norma
C	označení veličiny poškození [-]
σ^*	max. hlavní napětí [MPa]
σ_{ef}	efektivní napětí [MPa]
e_{ef}	efektivní deformace [-]
e_{eff}	efektivní deformace při lomu [-]
ARA	anizotropní rozpad austenitu
M_s	„martensite start“

1 Úvod

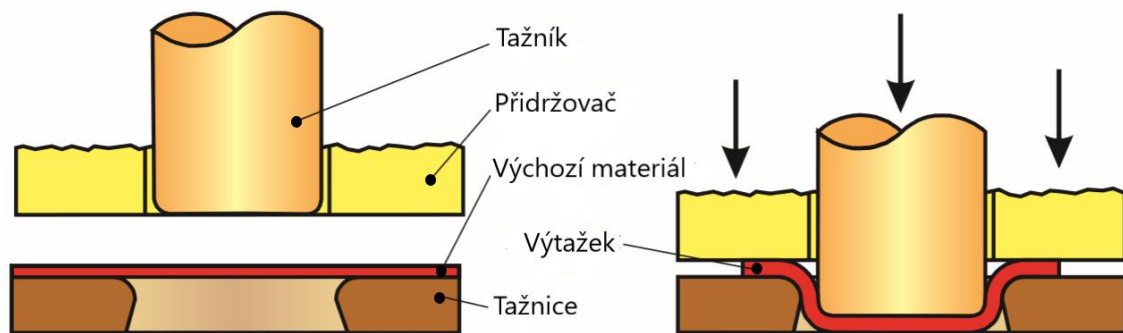
Tažení plechů spadá mezi základní strojírenské technologie výroby jak polotovarů, tak konečných výrobků. Jak s časem rostou nároky na kvalitu a rychlost produkce strojních dílu, dochází i k vývoji technologií, které dané díly produkují. Tento trend se projevuje i v technologii tažení plechů, která je hojně využívána zejména v automobilovém průmyslu pro výrobu části karoserie, ale i dílů jako jsou například výfuková soustava nebo palivová nádrž. Vývoj technologií pro tažení plechů se projevuje zejména zvyšováním produktivity a s tím souvisejícím zvyšováním automatizace lisovacích linek pro plechové díly. Se zvětšováním produktivity souvisí i snaha nalézt výhodnou výrobní technologii pro dostatečně rychlou a kvalitní produkci těchto dílů. Jednou takovou technologií je metoda tažení plechů za tepla upraveným nástrojem s integrovaným chladicím systémem – „hot stamping“.

Jak již naznačuje předchozí odstavec, tato bakalářská práce se bude zaměřovat na technologie tažení plechových součástí, konkrétně půjde převážně o zmíněnou metodu „hot stamping“. Rešeršní část se bude zabývat popisem nejen technologie jako takové, ale také rozbohem upraveného nástroje používaného v této technologii, zejména jeho chladicího systému i s rozbohem možností jeho výroby. Součástí je také kapitola zabývající se tématem „tailor welded blanks“ (TWB), což jsou svařované plechové polotovary, které jsou odpovědí na zvyšující se požadavky (hlavně mech. vlastnosti) tažených plechových dílů v automobilovém průmyslu.

Praktická část této bakalářské práce bude zaměřena na návrh prototypu experimentálního modelu nástroje pro zpracování plechu z oceli 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500) metodou „hot stamping“. Cílem praktické části je návrh tohoto modelu a jeho následné využití při numerické simulaci metodou konečných prvků. Hlavním úkolem simulací bude ověření, zdali by byl navržený nástroj schopen zpracovat plech zmíněnou metodou. Bude tedy sledována a posouzena jeho schopnost vytvarovat plechový polotovar do požadovaného tvaru a také schopnost tepelně zpracovat tento plechový díl v průběhu tažného procesu pomocí integrovaného chladicího systému. Na závěr této práce budou představeny výsledky experimentálního zpracování plechového vzorku, kde bude posouzena mikrostruktura před a také po daném zpracování.

2 Technologie tažení plechů

Obecně se touto technologií rozumí přetváření rovinných plechových polotovarů (rondelů) v prostorová – dutá tělesa. Tažení plechů se řadí mezi technologie plošného tváření, kde výchozím polotovarem je rovinný plechový přístřih. Ve velké většině případů se jedná o plechové polotovary, které při výrobě prošly procesem termomechanického zpracování. Z rovinného přístřihu se jedním nebo více tahy vytváří rotační i nerotační výtazky, anebo výtazky nejčastější v automobilovém průmyslu, a to výtazky velkých nepravidelných tvarů. Během tažení plechů nedochází k výrazné změně tloušťky materiálu, jedná se tedy o tažení bez ztenčení stěny. Tažení probíhá na lisech za pomoci nástrojové sestavy, která je obvykle tvořena tažníkem, tažnicí a přidržovačem plechu [4, 5].



Obr. 2-1: Schéma tažení [8]

2.1 Rozdělení tažení

Rozdělení dle teploty tvářeného materiálu během procesu tažení:

- tažení za tepla
- tažení za studena [5]

Rozdělení dle hloubky tažení:

- mělké tažení
- hluboké tažení [5]

Rozdělení dle tvaru výtažku

- tažení rotačních součástí
- tažení nerotačních součástí
- tažení pravoúhlých výtažků (hranatých součástí)
- tažení velkých součástí nepravidelného tvaru [5]

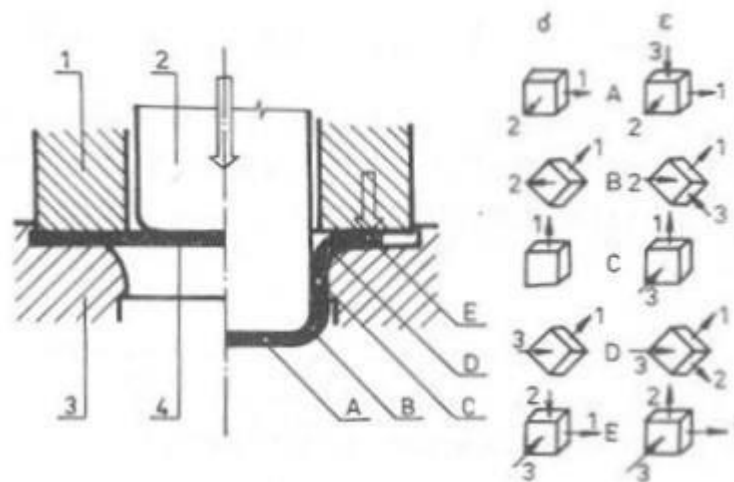
Tažené plechové díly z oblasti automobilového průmyslu se vyrábějí procesem tažení za studena i za tepla. Při tažení za studena dochází k tváření plechového přístřihu při pokojové teplotě. V tomto případě mohou vznikat poměrně velké síly způsobené třením mezi povrchy nástroje a polotovaru. Z toho důvodu se u tažení za studena využívají mnohé druhy různých maziv pro zlepšení třecích podmínek na rozhraní nástroj – výtažek. Mezi metody studeného tažení patří například hluboké tažení. V praxi se tažením za studena vyrábějí například výfukové části automobilů nebo různé typy plechových nádrží. Tažení plechů za tepla se liší zejména v tom, že plechový přístřih je ještě před deformováním zahřát na vysoké teploty. Obvykle jsou to teploty, kdy je možná rekrytalizace zrn ve struktuře materiálu. Vysoká tvářecí teplota plechů také výrazně zlepšuje plastické vlastnosti materiálu a ten je tak snadněji deformován. U těchto metod odpadá nutnost použití maziva. Tažením za tepla se velice často zpracovávají plechové díly z hliníkových slitin. U tažení ocelových výrobků pro automobilový průmysl se hojně využívá metoda „hot stamping“, která bude podrobně popisována ve čtvrté kapitole [9].

Automobilový průmysl je odvětví, kde plechové díly nacházejí široké uplatnění, proto i technologie, které tyto díly vyrábí a dále zpracovávají, jsou zde hojně používané. Z důvodu vysokých nároků na mechanické vlastnosti plechových dílů, ale i jejich cenu, dochází k velkému rozvoji různých metod tažení plechů v této oblasti. Ve většině případů záleží požadavky daného plechového dílu na potřebách zákazníka. Ten určuje nejen potřebný tvar a rozměry výtažku, ale i jeho mechanické vlastnosti. Mezi nejdůležitější vlastnosti plechových dílů pro automobilový průmysl patří pevnost a schopnost dílu odolávat dynamickému zatěžování vzhledem k tomu, že některé plechové výtažky v automobilu (zejména v oblasti podvozku) přispívají, hlavně svými tvary, k tlumení nerovnoměrností jízdy. S vysokou pevností plechových dílů souvisí i bezpečnost automobilů, jelikož většina plechových dílů v automobilech tvoří rám a zbytek karoserie. Jsou to tedy díly, které absorbují většinu energie při havárii automobilu. Jak se ve světě

zvyšuje počet automobilů, zvyšuje se i potřeba nové automobily vyrábět s čím souvisí další požadavek kladený na automobilové díly, tím je vysoká produktivita jejich výroby a plynulá výroba dílů s vysokou kvalitou. Odpovědí na stále rostoucí požadavky produktivity při výrobě nových automobilů je metoda „hot stamping“, která slučuje tváření i tepelné zpracování do jednoho tažného procesu [6].

3 Hluboké tažení

Hluboké tažení je metoda tažení plechových dílů velkých hloubek, která formuje jednotlivé díly pomocí tažníku a tažnice tak, aby nedocházelo k porušení materiálu a nevznikala vrásčitá struktura (striace). Plechový přístřih je tlačěn pomocí tažníku dovnitř formy (tažnice) odpovídajícího tvaru, zároveň je často zajištěn přídržovačem. Během tažného procesu se uplatňují různé druhy zatížení daného materiálu, proto i napjatosti a deformace se různí nejen na různých místech tvářeného materiálu ale i v čase. Na obrázku Obr. 3-1 je zobrazeno schéma napjatostí a deformací při zkoušce tažení kelímku. Složitost procesu je vidět i na této jednoduché zkoušce. Po bocích a na dně nádoby je materiál deformován tahem, v místě, kde vzniká rádius, dochází k ohybu a na okrajích přístřihu působí tlak a třecí síly. Jednoduché výtažky lze vyrobit pomocí jednoho tažného procesu, složitější se obvykle vyrábí více tahy [1].



Obr. 3-1: Schéma napjatostí a deformací při tažení kelímku [7]

3.1 Nástroj

Základní nástroj pro tažení se skládá z tažníku a tažnice. Tažník je pohyblivá část, zatímco tažnice bývá staticky připevněná k základní desce lisu. Způsoby upevnění jsou různé. Tažnice bývá často přišroubována, nalisována, upevněna upínacím kroužkem, či šroubem, ale i specifickými upínkami, nebo připevněna pájením. Tažník se upevňuje pomocí šroubů, upínací desky, či pájením. Velmi často bývá ještě součástí nástroje přidržovač, který zabraňuje vzniku vrásčitosti na vytažených stěnách součásti a napomáhá plynulosti procesu. Při použití přidržovače je velmi důležitá mezera mezi přidržovačem a tažnicí, která musí být taková, aby nedocházelo ke striaci tažených stěn. Stejně tak rádius na tažníku se liší dle požadavků daného výtažku, při špatném rádiu nástroje může dojít k natržení materiálu [1].

Tažné nástrojové matrice lze dělit na několik druhů z hlediska stavby a povahy pracovního procesu:

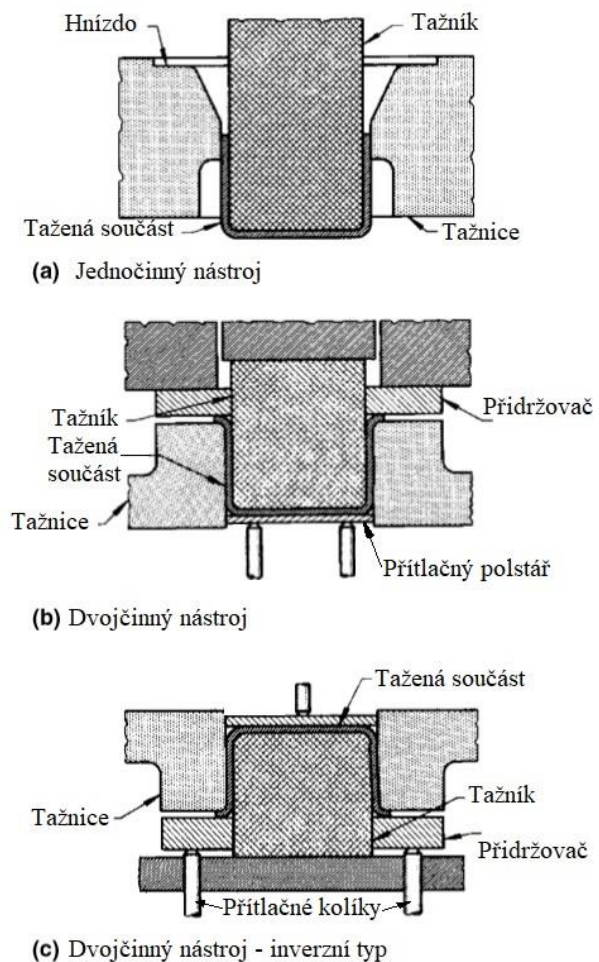
- Jednočinné matrice
- Dvojčinné matrice
- Sdružené matrice
- Postupné matrice
- Mnohonásobné matrice s převodovým mechanismem [1]

Jednočinné matrice

Jednočinné matrice jsou nejjednodušším typem tažného nástroje a skládají se pouze z tažníku (trnu) a tažnice. Pro umístění polotovaru je zde poskytnuto tzv. „hnízdo“ nebo lokátor. Plech je tlačěn tažníkem skrze tažnici a na konci je výtažek z tažníku stažen. Ohybový lem se tvoří velice jemně. Celý proces je proto prováděn nižší rychlostí tažení. Jednočinné matrice lze použít pouze tehdy, pokud je materiál vhodný k tažení i bez nutnosti použití přidržovače [1].

Dvojčinné matrice

Součástí dvojčinných tažných nástrojů je již i přidržovač polotovaru. Přidržovač umožňuje zvětšení vytažitelné hloubky a tažení přírubových součástí. Na obrázku 3-2 (b) je zobrazená dvojčinná matrice. V tomto provedení je tažnice připevněna k vrchu základní desky, tažník je připevněn k vnitřnímu skluzu a přidržovač k vnějšímu. Přítlačný polštář se používá k udržení polotovaru ve stabilní poloze oproti trnu během tažení a k vytlačení hotového výtažku z dutiny tažnice. Inverzní typ dvojčinného nástroje je zobrazen na obrázku 3-2 (c). Tento nástroj se používá zejména na jednočinných lisech. V provedení, které je zobrazeno na obrázku 3-2 (c) je tažník připevněn ke svrchní části stolu (tedy ke spodní části lisu), zatímco naopak tažnice je připevněna k vrchní části lisu, oproti variantě (b) je tedy opačné uspořádání nástrojových částí. K přítlačování přidržovače zde napomáhají přítlačné kolíky [1].



Obr. 3-2: Tři typy tažných matic pro hluboké tažení [1]

Sdružené matrice

Tyto nástroje se uplatňují, pokud je z nějakého určitého hlediska, většinou ekonomického, výhodné použití nástroje takového, aby zvládl provádět více různých operací (může například i stříhat, prostříhovat, ohýbat apod.). Sdružené nástrojové matrice se tedy skládají nejen z tažných nástrojů jako je tažník, tažnice a přidržovač, ale i jiných tvářecích nástrojů, které zajišťují zpracování dané součástí ve větším rozsahu z hlediska vykonaných operací než klasické tažné matrice. Takovéto matrice jsou obvykle unikátní pro konkrétní výrobek, jehož výrobu se snaží urychlit a zefektivnit [1].

Postupné matrice

Tento typ matrice se využívá pro tzv. „postupné formování“, kde se výsledný výrobek zpracovává v několika sekcích v řadě za sebou, které jsou všechny součástí jednoho nástroje. Vysoká cena a délka těchto nástrojů jsou obvykle příčinou toho, že tento produktivní typ nástroje se volí převážně jen u sériové, či hromadné výroby malých často skořepinových součástí. I v automobilovém průmyslu nacházejí své uplatnění, a to při výrobě plechového obložení automobilových světlometů. Postupné formování se považuje za ekonomicky přijatelné obvykle, pokud je produkce daného výrobku schopna splatit celou postupnou matici během prvního roku používání [1].

Mnohonásobné matrice

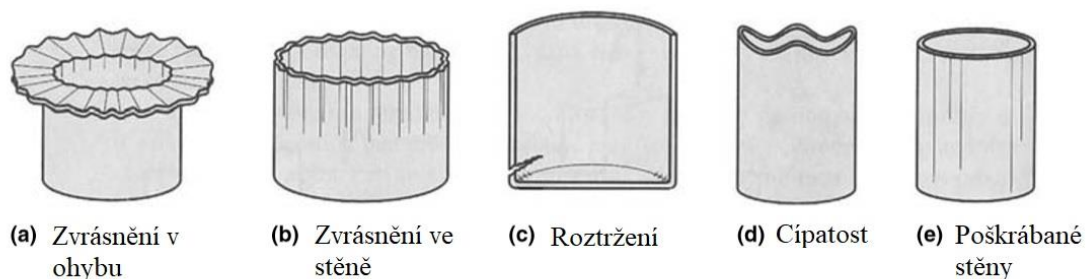
Mnohonásobné matrice s převodovým mechanismem se obvykle využívají pro sériovou a hromadnou výrobu součástí velkých rozměrů. Jedná se také o matrice, které se využívají, pokud je třeba provést více operací na dané součásti. Polotovary jsou zde přenášeny po stanovištích mechanicky pomocí převodového mechanismu. Oproti postupným maticím se vyznačují větší flexibilitou, protože polotovary zde nemusí být pevně připevněny ke skeletu matrice. Jako polotovary se zde mohou využívat i již jiným způsobem zpracované plechy, nemusí se tedy jednat o rovinné plechové přístřihy. Například olejové vany pro motory automobilů se nejprve předpřipraví v lisech se sdruženými maticemi a následně se dotvarují převodovou maticí, děrují a ořeží. Cena těchto typů nástroje je obvykle srovnatelná s postupnými maticemi. Nevýhoda oproti postupným maticím však je, že rychlost procesu bývá nižší v některých případech až o 25 %. Při volbě mezi postupnou a mnohonásobnou maticí hraje roli několik faktorů. Jedná se zejména o požadovaný objem produkce, rychlost a cenu daného nástroje [1].

3.2 Stroje

Stroje používané na tažení plechových dílů jsou nejčastěji hydraulické, či mechanické lisy. Pro většinou operací hlubokého tažení je nezbytné použití dvojčinného lisu, kvůli rovnoměrnějšímu rozložení přidržující síly během cyklu. Mezi nepoužívanější typy se řadí dvojčinný hydraulický lis. Ten je pro hluboké tažení vhodný zejména kvůli jeho konstantní tažné rychlosti, nastavení zdvihu a rovnoměrnosti upínacího tlaku. Nejvhodnější variantou dvojčinného lisu pro hluboké tažení je přímý hydraulický dvojčinný lis, který poskytuje širokou možnost volby tonážní kapacity, velkou plochu základní desky a rozsah zdvihu [1].

3.3 Defekty

Během tažného procesu může z mnoha důvodů docházet ke vzniku různých druhů vad výtažků. Jednotlivé druhy vad jsou zobrazeny na obrázku Obr. 3-3.



Obr. 3-3: Vady vznikající během tažného procesu [1]

Zvrásnění v ohybu

Jedná se o zvrásnění v místě, kde je součást ohýbána. Vytváří se jakási řada hladkých hřebenů, které se tvoří radiálně v okrajích u tažených součástí v důsledku tlakových sil [1].

Zvrásnění ve stěně

Ke zvrásnění stěny dochází, pokud se dále táhne součást, která je již zvrásněna v ohybu. Dojde tedy k vytažení těchto hřebenů do stěny součásti [1].

Roztržení

Tento druh vady se objevuje především ve spodních částech tažených součástí. Dochází zde ke vzniku velkých napětí, postupně se zužuje stěna plechu, až v některém místě dojde k porušení materiálu [1].

Cípatost

Velmi často se objevuje u součástí, které jsou z anizotropních materiálů. Kvůli plošné anizotropii může být plech v některých místech pevnější a v jiných slabší vůči deformacím ve směru tažení. To způsobuje vznik cípů u vrchu součástí. V praxi to lze ošetřit jednoduše tím, že se ponechá dostatečný přesah materiálu, aby se vzniklé cípy mohly celé odříznout [1].

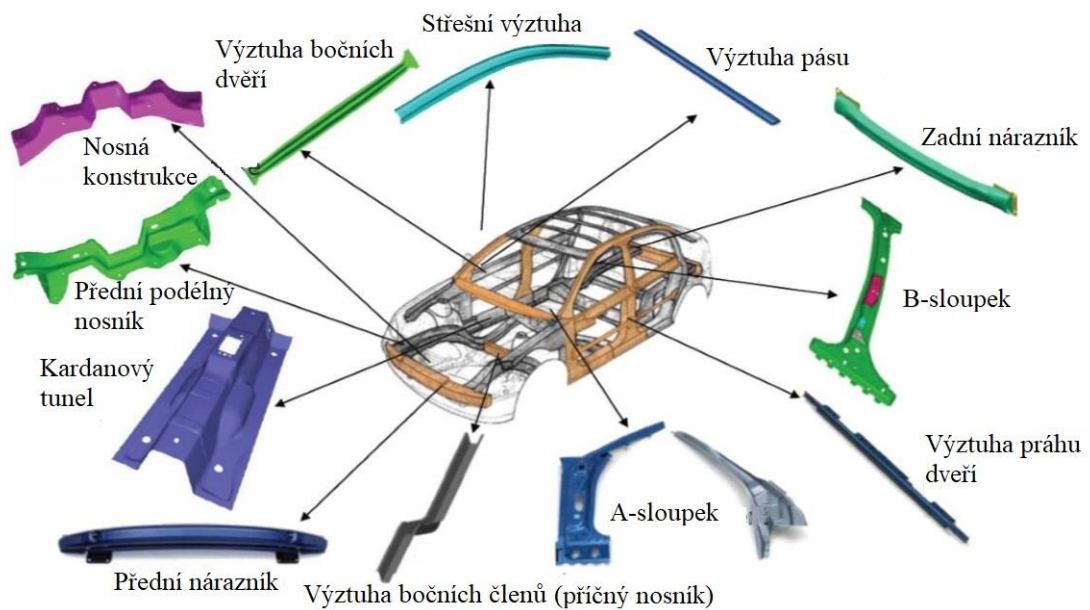
Poškrábání stěn

Tento druh vady výtažků se objevuje především z důvodu přílišné drsnosti povrchu nástroje, nebo nedostatečného mazání součásti během procesu tažení [1].

4 Hot stamping

Rostoucí nároky na bezpečnost automobilů zapříčinily mimo jiné i stálé posilování mechanických vlastností automobilových konstrukčních prvků, snižování váhy a také zrychlení procesu výroby dílů. Na základě těchto požadavků se v sedmdesátých letech minulého století začala rozvíjet nová metoda tažení plechových dílů pro automobilový průmysl, metoda tažení za tepla „hot stamping“ [2].

„Hot stamping“ nebo také jinak „press hardening“ je technologie vyvinutá v roce 1977 ve Švédsku, kde byla ovšem původně používána na výrobu dílů pro travní sekačky a pily. V automobilovém průmyslu se poprvé uplatnila prostřednictvím společnosti Saab Automobile AB, která začala metodu využívat ke zpracovávání plechů z vysoce pevné mangan-bórové oceli 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500). Velkou výhodou této technologie je, že formuje daný plech do finální podoby a současně způsobuje vytvrzení materiálu díky chladicím kanálkům zavedeným uvnitř nástroje. Výroba se týká zejména A a B sloupků do automobilů, ale i mnohých dalších plechových dílů, jak lze vidět na obrázku Obr. 4-1 [2, 10].



Obr. 4-1: Rozsah využití metody „hot stamping“ [2]

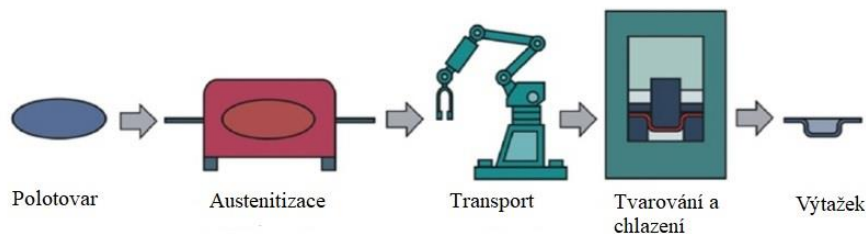
„Hot stamping“ lze provádět dvěma způsoby. Jedná se o přímou a nepřímou metodu tažení za tepla [2].

4.1 Přímá metoda

Plechový rovinný polotovár se zahřívá v peci po dobu přibližně 5-10 minut, aby došlo k austenitizaci oceli. Po ukončení ohřevu je materiál zahřátý obvykle na teploty 900-950 °C. Při této teplotě se vyjímá z pece a je dopravován do lisu. Transport trvá obvykle jen pár vteřin, ale i tak může teplota plechu klesnout pod 700 °C. Tomu se musí uzpůsobit vzdálenost pece od zpracovávajícího lisu. Takto zahřátý ocelový plech se vyznačuje velkou plasticitou, proto lze výsledného tvaru dosáhnout pouze jedním tažným procesem. Specificky tvarově upravený nástroj, který je složen z tažníku, nepohyblivé tažnice a přídržovače, následně působením tlaku zdeformuje plechový přístřih. K uvolnění dochází přibližně po půl minutě. Nástroj setrvává uzavřený ve spodní pracovní poloze z důvodu tepelného zpracování vyráběného dílu, k čemuž dochází pomocí chladicích kanálků uvnitř nástroje. Po takto rapidním zchlazení, které činí přibližně 50-100 °C/s, dojde k zakalení oceli. Získává se tedy vytvrzená martenzitická struktura oceli. Konkrétně u mangan-bórové oceli 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500) se dosahuje vytvrzení až na hodnoty meze pevnosti v tahu okolo 1500 MPa a meze kluzu 1000-1200 MPa. Následné opracování takového dílu, jako například jeho děrování, stříhání, řezání a jiné operace, je velice obtížné z důvodu tvrdosti

materiálu, avšak ve většině případů nezbytné. Vysoké mechanické vlastnosti jsou však ideální pro využití u A a B sloupků automobilů, na které je kladen důraz u zátěžových testů nových vozidel. Schéma přímé metody je zobrazeno na obrázku Obr. 4-2 [2].

Přímá metoda:

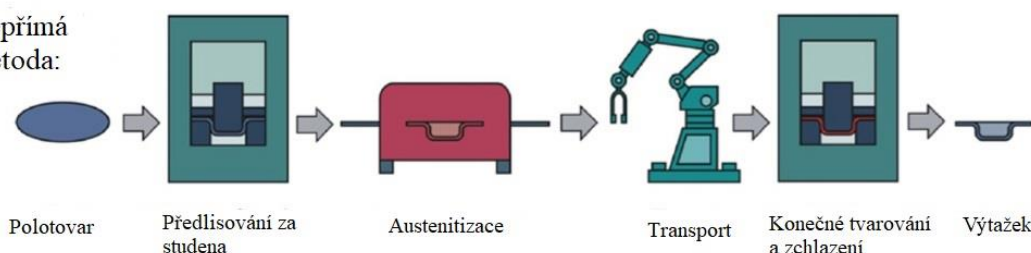


Obr. 4-2: Schéma přímé metody „hot stamping“ [10]

4.2 Nepřímá metoda

Nepřímá metoda tažení za tepla se liší v začátku procesu. Plechový přístřih se nejdříve zpracovává na lisu za studena, kde dochází k jeho prvnímu tažení až na 95 % finálního tvaru. Tento proces může být doprovázen lokálním přístřihováním, pokud je to nutné z důvodů lepšího tažení. Následně se takto zpracovaný výrobek přesune do pece, kde je zahříván na stejné teploty jako u přímé metody. Poté se tažení dokončí v lisu, který je vybaven upraveným nástrojem pro metodu „hot stamping“. Zde dojde ke konečnému vytvarování a prudkému zchlazení. Tak jako u přímé metody je cílem získat martenzitickou strukturu a dosáhnout tak lepších mechanických vlastností. Počáteční lisovací operace za studena je zařazena z důvodu rozšíření tvarovacích limitů pro velmi tvarově náročně součásti [2].

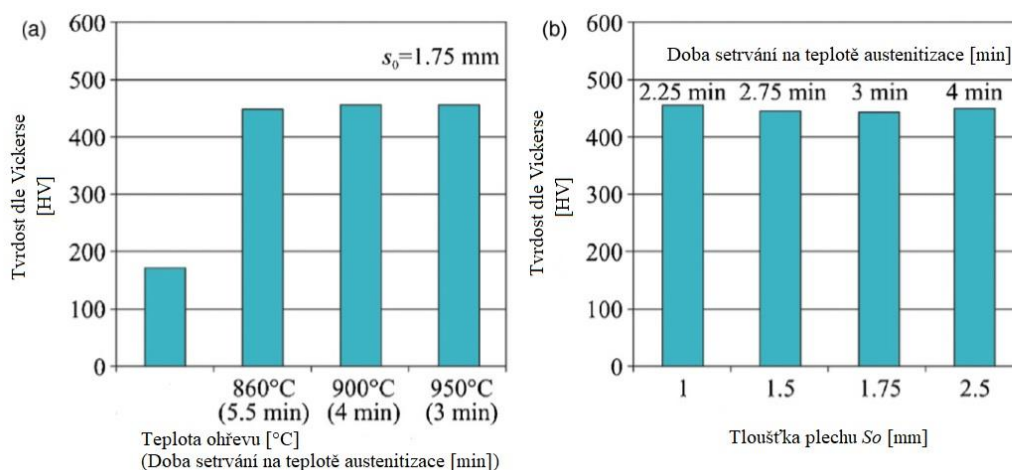
Nepřímá metoda:



Obr. 4-3: Schéma nepřímé metody hot stamping [10]

4.3 Způsoby ohřevu

Ohřev výchozího materiálu musí být takový, aby zajistil vznik homogenní austenitické struktury. To znamená, že fázová transformace musí proběhnout v rozsahu celého rondelu (přístříhu). Nehomogenity by mohly způsobit nekvalitní následné zakalení součásti, čímž by mohlo docházet k anizotropii mechanických vlastností výsledného výrobku. V roce 2008 vydali M. Merklein a J. Lechler studii, která se zabývala tím, jaký vliv mají tloušťka plechu a čas ohřevu na výslednou tvrdost zakaleného výtažku, při zpracování plechů z oceli 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500) metodou „hot stamping“. Cílem bylo zjistit optimální dobu ohřevu pro různé tloušťky plechů, aby po zakalení bylo dosaženo navýšení tvrdosti vzorku na 470 HV 10 [10].



Obr. 4-4: Vliv teploty ohřevu (a) a tloušťky plechu (b) na minimální dobu setrvání na teplotě austenitizace pro dosažení tvrdosti 470 HV 10 u oceli 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500) [10]

Výsledky této studie lze pozorovat na grafech z obrázku Obr. 4-4. Dle závěru této studie lze soudit, že optimálním řešením je setrvání doby 3 minut na teplotě 950 °C pro plech tloušťky 1,75 mm, protože u tohoto vzorku byla dosažena nejlepší struktura, kterou lze aproximovat ideální požadovanou homogenní zakalenou strukturu s tvrdostí 470 HV 10 [10].

Další zkoumání J. Lechlera z roku 2009 odhalilo, že způsob ohřevu má velký vliv na výsledné vlastnosti plechových dílů, čas i ekonomickou stránku celého procesu. Ohřev plechů může probíhat na základě tří metod. Jedná se o ohřev pomocí tepelného sálání v kontinuální peci, odporový ohřev a indukční ohřev [10].

Kontinuální pec

Ohřev pomocí kontinuální pece je hojně využívaný u metody „hot stamping“, stejně jako u mnohých jiných technologií. Rozměry a spotřeba těchto pecí je závislá na rozměrech a materiálu vstupujícího polotovaru. Například u ocelí s protikorozními Al-Si povlaky se musí zajistit zvláštní způsob ohřevu z důvodu difúze mezi povlakem a základním materiálem [10].

V současné době, jak se zvyšuje odběr výrobků zpracovaných pomocí této metody, se objevují už pecní linky s dopravníky o délkách až 40 metrů, aby se zvýšil objem výroby a urychlil celý proces. Mimo rozměrů pece je také důležitý čas ohřevu, protože ten společně s dobou uzavření nástroje při chlazení výrobku významně ovlivňuje celkový čas procesu výroby. Jak ukázala již výše zmiňovaná studie, optimální čas pro jeden polotovar tloušťky 1,75 mm jsou 3 minuty při teplotě 950 °C. Jelikož jiné nastavení by mohlo způsobit vznik nevyhovující struktury po zakalení, je tedy snaha spíše o zkrácení doby, po kterou setrvává nástroj sevřený, resp. o zrychlení chlazení součásti [10].



Obr. 4-5: Kontinuální pec pro ohřev plechů, HICON® roller-hearth furnace od společnosti EBNER Industrieofenbau GmbH [11]

Odporový ohřev

Dalším možným způsobem, jak dosáhnout austenitické fázové přeměny u těchto plechů je odporový ohřev. K plechovému polotovaru jsou přitisknuty dva páry elektrod, které umožňují průchod elektrického proudu skrze výchozí materiál. Ten se začíná zahřívat díky svému elektrickému odporu. Odporový ohřev je založený na principu Jouleova zákona, který se zabývá vznikáním tepla v materiálu na základě průchodu el. proudu. Jeho matematické vyjádření lze vidět v rovnici (4.1) [10, 12].

$$Q = R * I^2 * t \text{ [J]} \quad [12] \quad (4.1)$$

Q..... Jouleovo teplo [J]

I..... elektrický proud [A]

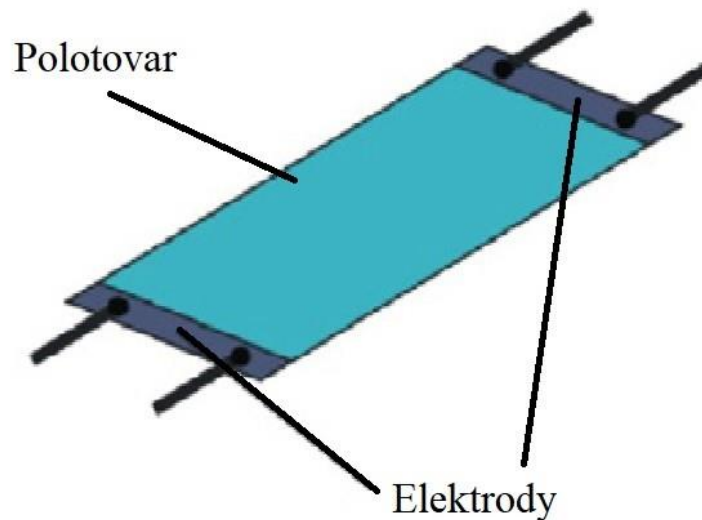
R..... elektrický odpor materiálu [Ω]

t..... čas průchodu proudu materiálem [s] [12]

Z rovnice (4.1) je vidět, že zvětší-li se elektrický odpor materiálu plechu, pak se zvýší i vznikající teplo. Zvýšení elektrického odporu může způsobit špatná kvalita povrchu (přílišná drsnost). Takže pokud máme výchozí polotovar, který má horší kvalitu povrchu na některých místech oproti zbytku, může docházet k místnímu přehřátí, což způsobí nehomogenity ve struktuře po zakalení [10].

Dalším problémem u odporového způsobu ohřevu jsou rozměry a geometrie polotovaru. Například přílišná délka jednoho rondelu (přístřihu) může způsobit také nestejněměrné zahřívání materiálu, což může opět způsobovat nehomogenity ve struktuře. Stejně tak složitá geometrie přístřihu by mohla způsobit tento jev. Odporový ohřev nepatří mezi nejrozšířenější metody využívané v praxi, kvůli tomuto vysokému počtu nevýhod [10].

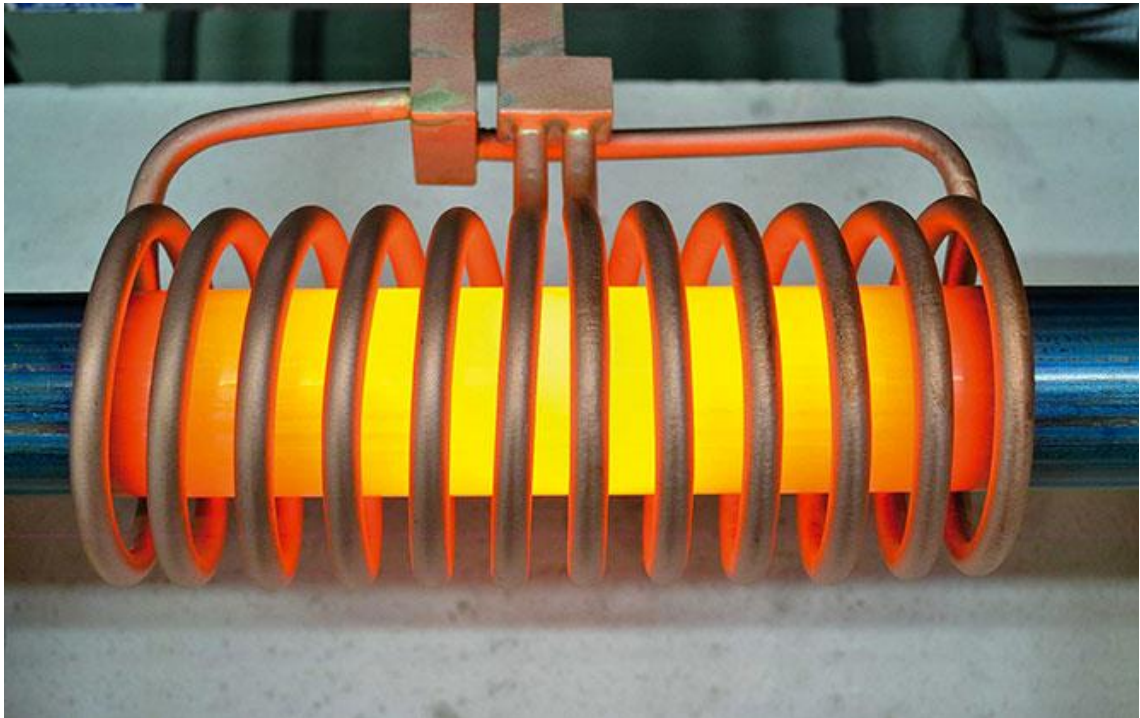
Odporový ohřev:



Obr. 4-6: Schéma odporového ohřevu plechového polotovaru [10]

Indukční ohřev

Posledním používaným způsobem austenitizace přístřihů je indukční ohřev. Jde opět o metodu, kde se využívá průchodu elektrického proudu materiálem k vytvoření potřebného tepla. Tentokrát však elektrický proud neprochází přímo materiálem zpracovávaného plechu, ale skrze k tomu přizpůsobenou cívku. Tento způsob je hojně využíván pro kalení různých součástí, a to nejen konkrétně pro metodu „hot stamping“. U zahřívání indukcí je velmi důležitý tvar induktoru (cívky). Musí být takový, abychom dosáhli homogenního zahřátí celého plechu. Budeme-li tedy mít cívku, která je rozměrově uzpůsobená konkrétnímu polotovaru, je jasné, že její použití není tak variabilní, jako například při použití kontinuální pece, která dokáže pojmout rozmanité spektrum různých rozměrů rondelů (přístřihů). Další důležitou věcí je mezera mezi cívkou a plechem. Příliš malá mezera může způsobit zaseknutí plechu, čímž se může poškodit polotovar i cívka. Velká výhoda je ovšem rychlost ohřátí u tohoto procesu, která převyšuje i využití pecí [10].



Obr. 4-7: Indukční ohřev ocelové tyče [13]

4.4 Nástroj

Po austenitizaci výchozího materiálu následuje jeho tvarování uvnitř matrice nástroje. Základním předpokladem pro dobré zformování součásti je dostatečná rychlost transportu na to, aby během něj daný plech nevychladl natolik, že již nepůjde správně zakalit [2].

Nástroj pro tažení za tepla metodou „hot stamping“ tvaruje danou součást a zároveň ji chladí. Obvykle se skládá z tažníku a tažnice, který obsahují vnitřně zabudované chladicí kanálky. Na systém chlazení se kladou velké nároky. Musí být schopný dosáhnout minimální rychlosti chlazení plechu 27 K/s, aby byla zajištěná přeměna austenitické struktury v martenzitickou. Při chlazení se uvolňuje velké množství energie. Tento integrovaný chladicí systém nástroje musí odvádět energie až do 100 kW, což vyvolává vysoké teplotní gradienty a dochází ke vzniku velkých povrchových napětí. Celkové zatížení nástroje je kombinací namáhání od teplotních gradientů a mechanického namáhání matrice nástroje při působení tlaku na součást. Z důvodu zamezení tepelných ztrát v oblasti příruby během tažného procesu je snaha o vytváření nástrojů bez přidržovače. Aby docházelo k co nejlepšímu přestupu tepla z tažené součásti do nástroje,

musí být zajištěný dostatečný tlak a také výborný kontakt stykových ploch. Všechny části nástroje musí tedy ideálně odpovídat taženému tvaru a nesmí mít přílišnou drsnost [2].

Materiál nástroje

Zásadní vlastnost nástroje pro tažení za tepla je odolnost vůči opotřebení, protože pokud se bude materiál příliš opotřebovávat během tažného procesu, může dojít k tomu že, jak se bude materiál nástroje lokálně deformovat, nebudou dodrženy některé rozměrové tolerance daného výtazku, tak jak bylo předepsáno ve výkresové dokumentaci. Materiál nástroje musí mít také dobrou tepelnou vodivost. Velice důležitý je druh a obsah legujících prvků, většina z nich sice zvyšuje tvrdost nástroje, ale také snižuje jeho tepelnou vodivost. Obvykle se pro tažení za tepla používají nástroje z tvrdých nástrojových ocelí s tvrdostí větší než 44 HRC a pevností nad 1500 MPa [2].

Dnes se již vyskytují i materiály přizpůsobené speciálně metodě tažení za tepla „hot stamping“, které tvoří kompromis mezi výrobní cenou, odolností vůči opotřebení, pevností, tvrdostí, produktivitou a schopností dosáhnout požadovaných vlastností tažené součásti. Jedná se o oceli s vysokou tepelnou vodivostí, konkrétně se využívá ocel HTCS-117, což je speciální nástrojová ocel legovaná převážně niklem, chromem a molybdenem. Dalšími vhodnými variantami jsou například HTCS-130 (vysoce tepelně vodivá ocel původně vynalezena pro nástroje na zpracování hliníku), HTCS-150 a HTCS-170 [2]. Použité názvy ocelí jsou obchodní názvy od španělské společnosti Rovalma S.A., která se specializuje na vývoj a produkci nástrojových ocelí pro různé aplikace [2, 14].

HTCS® -130 DC

Ocel HTCS-130 představuje vysokou tepelnou vodivost v kombinaci s tvrdostí (44 HRC), odolností vůči opotřebení a pevností. Tato ocel má velké využití v oblasti tepelného tváření kovů. U technologie „hot stamping“ se používá mimo jiné proto, že dokáže zkrátit dobu pracovního cyklu díky rychlému odvodu tepla. Obvykle je nástroj uzavřený pod tlakem v pracovní poloze přibližně 15 vteřin. Dobré vodivé vlastnosti této oceli zajišťují zkrácení na 4–6 vteřin. Dosahuje se tedy zrychlení a zefektivnění výroby [2]. Z hlediska chemického složení se jedná o nástrojovou ocel legovanou převážně molybdenem, wolframem a křemíkem, jak lze vidět v tabulce Tab. 4-1 [14].

Tab. 4-1: Chemické složení oceli HTCS-130 (v hm.%) [15]

C	Si	Mn	P	S	Mo	W	Cr	V	Ni	Ti	Cu
0,31	0.17	0.16	<0.005	<0.003	3.1	1.85	0.08	<0.003	0.08	<0.003	0.10

Vzhledem k tomu, že nástrojem v průběhu jednotlivých operací prochází velké množství tepla, zohledňuje většinou výrobce těchto ocelí při popisu mechanických vlastností i vliv zahřátí nástroje.

Konkrétně pro HTCS-130 uvádí Rovalma S.A. v katalogu následující tabulku důležitých vlastností, která zahrnuje i změnu vlastností při změně teploty (teplota dle Kelvinovy stupnice).

Tab. 4-2: Fyzikální a mechanické vlastnosti oceli HTCS-130 [14]

Vlastnosti	300 [K]	725 [K]	Jednotky
Mez pevnosti	1343	1009	MPa
Mez kluzu Rp 0,2	1328	966	MPa
Deformace	13	18	%
Hustota	8.06	7.92	g/cm ³
Modul pružnosti v tahu	210		GPa

Stejně tak zásadní tepelné vlastnosti jsou zahrnuty v tabulce Tab. 4-3.

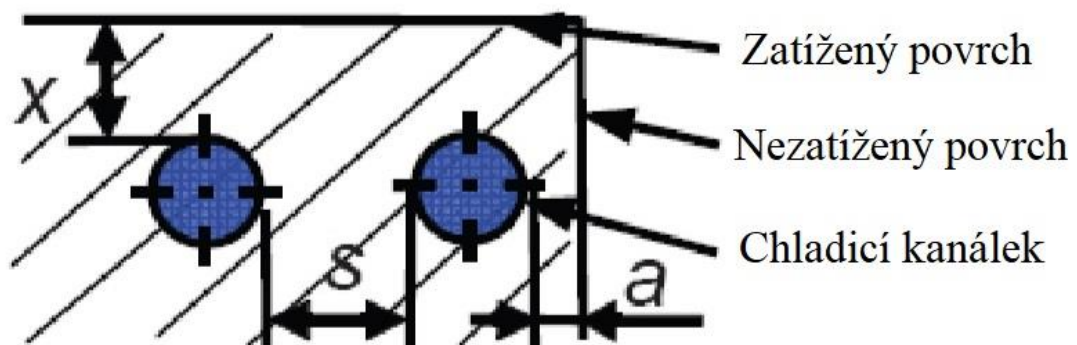
Tab. 4-3: Tepelné vlastnosti oceli HTCS-130 [15]

Teplota (°C)	Měrná tepelná kapacita (J · g ⁻¹ · K ⁻¹)	Tepelná roztažnost (%)	Teplotní součinitel délkové roztažnosti (μm · m ⁻¹ · °C ⁻¹)	Hustota (kg · m ⁻³)	Tepelná difuzivita (mm ² · s ⁻¹)	Součinitel tepelné vodivosti (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)
20	0.460	0.000	11.1	7994	15.55	57.2
100	0.484	0.094	11.7	7972	14.24	54.9
200	0.513	0.224	12.4	7941	12.49	50.9
300	0.547	0.365	13.0	7907	10.81	46.7
400	0.583	0.514	13.5	7872	9.33	42.8
500	0.630	0.669	13.9	7836	8.01	39.5
600	0.704	0.826	14.2	7799	6.68	36.7
700	0.831	0.982	14.4	7763	5.03	32.5

Chladicí systém

Chladicí systém je důležitá část nástroje, která dokáže výrazně zkrátit dobu celého procesu. Faktory, které ovlivňují přenos tepla mezi taženou součástí a nástrojem, jsou povrch nástroje i součásti a mezera mezi nimi, dále tepelná vodivost materiálu nástroje, rozmístění chladicích kanálků, druh chladiva a jeho teplota před začátkem procesu chlazení. Metodu, jak optimalizovat návrh rozložení chladicích kanálků, vymysleli v Německu H.Steinbeiss a kolektiv v Ústavu tváření a lití kovů, Technické univerzity v Mnichově [2].

Pro každý nástroj je nutné definovat důležité parametry. Jde o minimální vzdálenost mezi chladicím kanálkem a zatíženou plochou (x), minimální vzdálenost mezi chladicím kanálkem a nezatíženou plochou (a), minimální vzdálenost mezi kanálky (s), dále také velikost dostupných těsnicích zátek pro odklonění toku chladiva v kanálcích a polohu jednotlivých kanálků [2].



Obr. 4-8: Schématické zobrazení rozložení chladicích kanálků [2]

4.5 Nástroj s odlitými chladicími kanálky

Výroba integrovaného chladicího systému je velice složitá. Existuje proto snaha o nalezení jednoduché metody, jak vyrábět zabudované kanálky složitých tvarů uvnitř nástroje bez toho, aby museli být jednotlivé části skládány z několika menších částí. Toto řešení totiž snižuje celkovou tuhost nástroje. Jedna z těchto metod byla vyvinuta v Ústavu nástrojů a tváření Technické univerzity ve Štýrském Hradci (Graz) v Rakousku. Tato metoda se zabývá odléváním chladicích kanálků do formy při výrobě nástroje. Zpravidla se používá trubková kostra chladicího systému, která se umístí do formy pro odlitek nástroje, kde je následně zalita danou taveninou. Tím, že se kanálky odlíjí ve formě, odpadnou nutné operace jako je vrtání a frézování děr, které jsou nezbytné při konvenční výrobě těchto nástrojů a vzhledem ke složitosti chladicího systému i velice náročné. Urychlí se tak proces výroby nástroje a zároveň lze umístit kanálky blíže vnějšímu povrchu nástroje, čímž selepší chladicí schopnosti nástroje a zvýší se tím jeho výkon a efektivita. Dalšími významnými výhodami odlévání kanálků jsou konstrukce geometricky složitějšího systému chlazení a výroba téměř dokonalých chladicích kanálků. Během odlévání se musí ovšem věnovat pozornost některým možným defektům jako jsou třeba vzduchové bubliny mezi taveninou kovu a trubkami chladicího systému. To je pak velkým problémem, protože vzduch je tepelný izolant, a tedy teplo vede velice špatně. Zde pak samozřejmě záleží na velikosti a počtu takovýchto bublin. Většinou totiž výrazně ovlivňují chladicí schopnost nástroje, což je pro realizaci této metody tažení plechových dílů velmi podstatné [2].

4.6 Povlakování polotovarů

Povlakování plechových přístřihů ještě před zahřátím je důležité z hlediska preventivní ochrany před oxidací hotového výrobku po zpracování a zajištění dobrého povrchu výrobku. Ocel 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500) se obvykle povlakuje pomocí Al-Si vrstvy. Například společnost ThyssenKrupp Steel dodává díly z oceli 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500) pro vozy VW Passat, které jsou chráněné povlakem na bázi nanotechnologií (MBW-K ®1500 + X-TEC®). Tento povlak chrání součásti před korozi a zároveň funguje jako mazací médium během tažení. Nepovlakované polotovary se musí zahřívát v ochranné atmosféře, aby nedošlo k oxidaci a oduhličení povrchu. Problém nepovlakovaných polotovarů se projevuje při transportu z pece do lisu, během něj totiž plech přichází do kontaktu s kyslíkem ve vzduchu a může proto docházet ke vzniku vrstvy

oxidů železa, která je velmi tvrdá, a způsobuje tak velké opotřebení nástroje při tažení. Stejně tak může docházet k oduhlíčení povrchu, až do hloubky 60 μm , čemuž je téměř nemožné se vyhnout. Takovéto polotovary by se tedy museli ještě podrobit otryskávání nebo pískování, aby se zoxidovaná vrstva odstranila. Přibyly by tedy další nutná a nákladná operace, která navíc může zhoršit geometrické tolerance u takto tenkostěnných výrobků. Proto je vhodné zařadit před ohřev ještě povlakovací operaci daných přístřihů [2].

4.7 Používané druhy povlaků

Povlak na bázi Al-Si

Al-Si povlaky používané na ocelích se během ohřevu v peci transformují na tepelně odolnou Fe-Al-Si vrstvu. Aby k tomuto došlo nesmí však rychlost ohřevu přesáhnout 12 K/s, protože původní Al-Si vrstva má nízký bod tání. Tímto se tedy zajišťuje, aby nedošlo k roztavení vrstvy Al-Si dříve, než stihne vzniknout Fe-Al-Si vrstva. Také se musí zajistit vhodná doba setrvání na teplotě v peci, aby se zajistilo úplné legování povlaku. Například Usibor® 1500P od společnosti ArcelorMittal je povlakována vrstvou na hliníkové bázi, která je tlustá přibližně 23-32 μm [2].

Povlak na bázi Fe-Zn

Povlak na bázi Fe-Zn vzniká za pomoci žárového zinkování oceli, kdy se zinková vrstva během austenitizace oceli za pomoci difúze přeměňuje na vrstvu Fe-Zn. Společnost Voestalpine AG vyvinula zinkový povlak, který dokáže chránit ocel proti oxidaci a také poskytuje katodickou ochranu proti korozi. Velkou výhodou tohoto povlaku je, že korozní ochrana se zachovává i během porušení vrstvy povlaku ať už z důvodů defektních či konstrukčních. Vrstvy na bázi zinku jsou také podstatně měkčí než ty na bázi Al-Si, což vede ke značně nižšímu opotřebení nástroje. Takto ošetřené plechové polotovary se většinou zpracovávají nepřímou metodou „hot stamping“ [2].

Povlak na bázi nanotechnologií (X-TEC®)

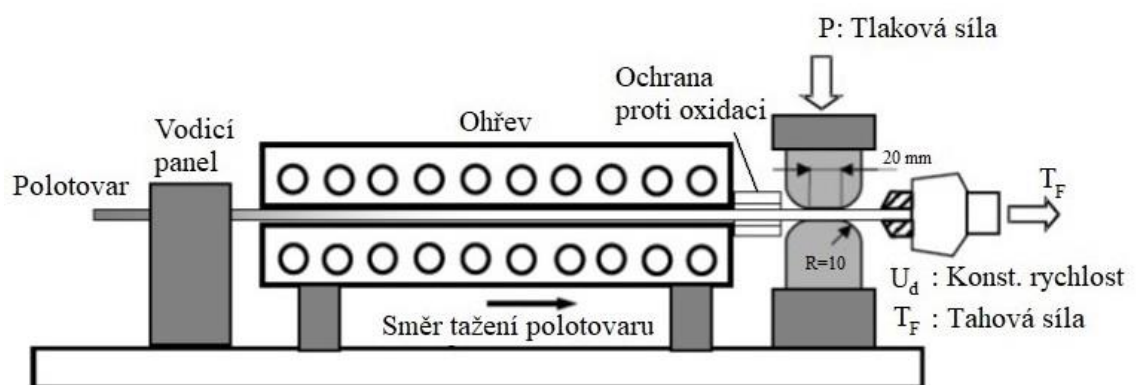
Jak již bylo zmíněno, významným vývojářem povlaků na bázi nanotechnologií je německá společnost ThyssenKrupp Steel. Nanopovlak X-TEC® se vytváří postupným naprašováním na polotovar. Tento povlak poskytuje kvalitní ochranu před korozi a zároveň zlepšuje třecí podmínky mezi plechem a maticí nástroje [2].

5 Tření při tváření plechů

Významným faktorem při tváření plechových dílů je tření. Při tažení plechu síla trnu tlačí polotovar dovnitř formy, při čemž v oblastech stykových ploch vznikají třecí síly, které ovlivňují průběh deformace materiálu. Tyto třecí síly tvoří okrajové podmínky, při numerickém modelování dané deformace. U většiny tvářecích operací je vhodné nízké tření, protože tím dosáhneme snížení velikosti vznikajících napětí v nástroji i tvářeném materiálu. Tření ovlivňuje kromě napětí také tvářecí schopnosti nástroje. Konkrétně u tažení plechů může vlivem velkých třecích sil dojít k opotřebení nástroje, což má za následek pokles kvality produktu (z hlediska geometrie a povrchu). Z důvodu malých tloušťek polotovarů má tření u tažení plechových součástí velký význam (zejména u velkých hloubek). Mezi faktory, které výrazně ovlivňují tření patří použité mazivo, průběh napětí na rozhraní nástroje a taženého materiálu, rychlost relativního pohybu mezi polotovarem a nástrojem, také drsnost povrchu, teplota a mechanické vlastnosti nástroje i polotovaru. Tření je tedy významnou součástí tažných procesů, kterou nelze zanedbat. Proto například v automobilovém průmyslu hraje tření mezi nástrojem a taženým plechem roli již při návrhu nástroje (geometrie, materiál), výběru maziva a při návrhu lisu, který bude dané součásti produkovat. Na složitosti celého procesu přidává navíc fakt, že třecí síly se v průběhu deformace materiálu mění, což je způsobeno změnou distribuce napětí uvnitř materiálu, změnou mazacích podmínek a charakteristik povrchu formy a trnu tažníku [18].

5.1 Koeficient tření při tažení metodou „hot stamping“

U metody „hot stamping“ se k měření koeficientu tření používá tahový tribosimulátor („tribosimulator“ [2]) nebo modifikovaná zkouška tažení kelímku [2].



Obr. 5-1: Schéma průběhu měření koeficientu tření pomocí tribosimulátoru [2]

Na obrázku Obr. 5-1 je schéma testovacího stroje pro určení koeficientu tření při tažení za tepla. Probíhá to tak, že polotovar z oceli 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500) se ohřeje na teplotu austenitizace pod ochrannou atmosférou tvořenou argonem. Jeden konec plechového přístříhu se sevře do čelistí tažného zařízení, které následně začne tahat konstantní rychlostí. V momentě, kdy zahřátá část plechu dosáhne místa nástrojové matrice na lisu, začne na polotovar působit konstantní tlaková síla P vyvolaná sevřením matrice nástroje. Koeficient tření se pak vypočte ze vztahu (5.1). Experiment se provádí za sucha, bez použití maziva [2].

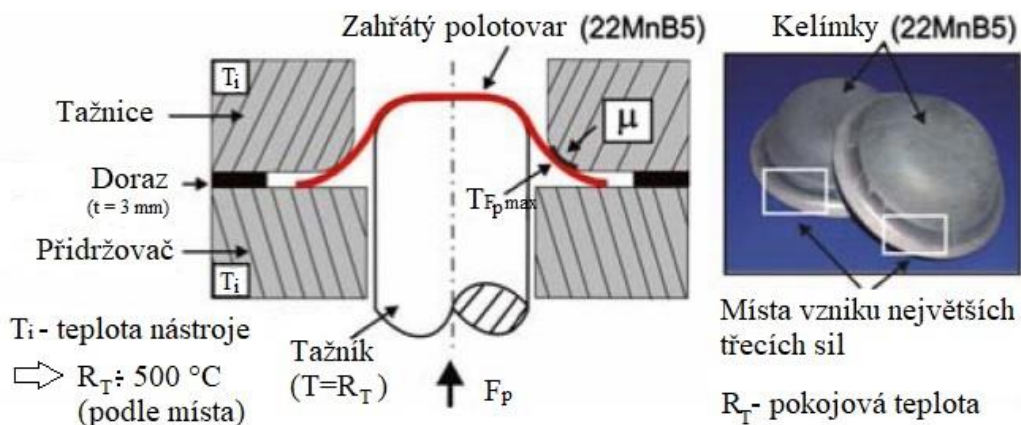
$$\mu = \frac{T_F}{P} [-] \quad [2] \quad (5.1)$$

μkoeficient tření [-]

T_Ftahová síla tažného zařízení [N]

Ptlaková síla lisu [N] [2]

Obrázek Obr. 5-2 představuje schéma již zmíněné modifikované zkoušky tažení kelímku.

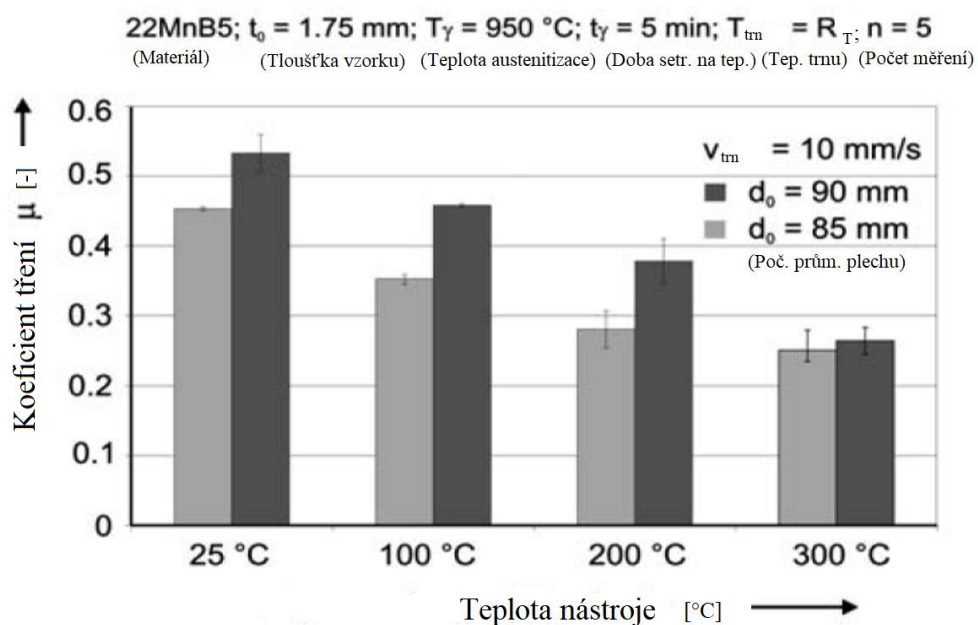


Obr. 5-2: Schéma modifikované zkoušky tažení kelímku [2]

Nástroj je upevněn v lisu, který je vybaven senzory pro měření tlakové síly F_p a síly přidržovače v průběhu zkoušky. Plechový polotovar se ohřeje v peci. Zkouška se realizuje bez přítlačné síly přidržovače v oblasti, kde se materiál ohýbá přes hranu tažnice a kde vzniká ohybový rádius. Tato zkouška se obvykle provádí při rychlosti tažníku $v_{trn} = 10 \frac{mm}{s}$ a při teplotě tažníku $T_{trn} = R_T$ (pokojová tep.). Každá kombinace

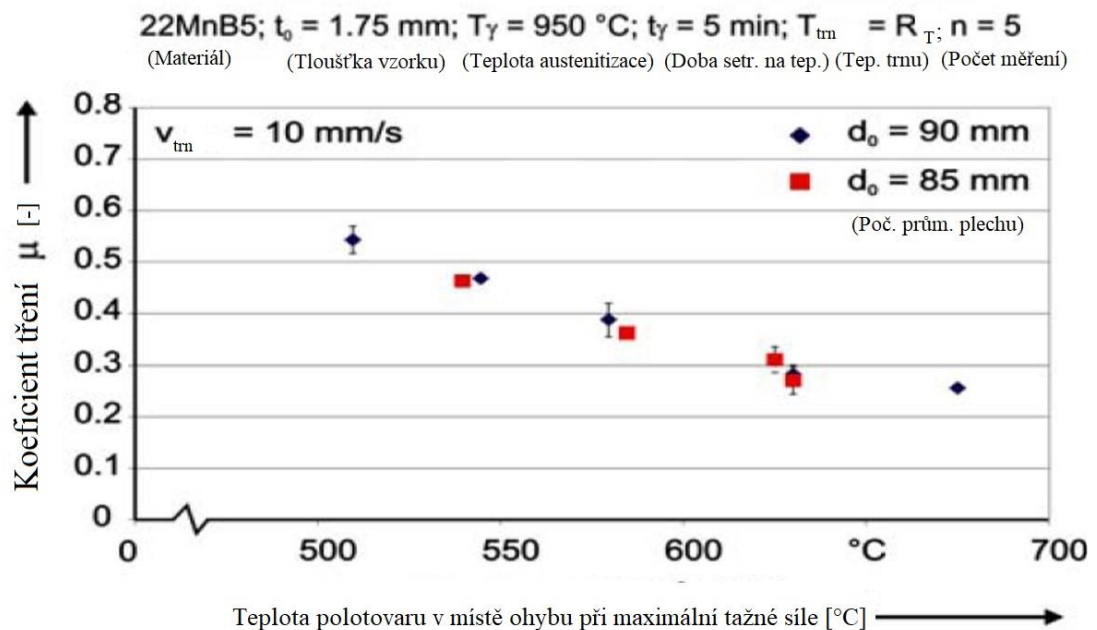
různých parametrů se testuje alespoň pětkrát ($n=5$). Výsledný koeficient tření se nakonec vypočte za použití rovnice, která slouží k odhadu maximální síly hlubokého tažení podle Siebela [2].

Na grafu Graf 5-1 je zobrazen vliv změny teploty nástroje na změnu koeficientu tření během procesu testu. Je vidět, že koeficient tření klesá se zvyšující se teplotou nástroje. Při vyšší teplotě dojde k plastickému změkčení materiálu 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500), to vede ke snížení normálových sil přenesených z objemu polotovaru na dotyková místa matrice nástroje, což způsobuje pokles koeficientu tření při růstu teploty [2].



Graf 5-1: Vliv růstu teploty nástroje na koeficient tření. [2]

Podobný projev lze sledovat i na grafu Graf 5-2, kde je zobrazena změna koeficientu tření jako funkce změny teploty polotovaru z oceli 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500) v místě dotyku s nástrojem [2].



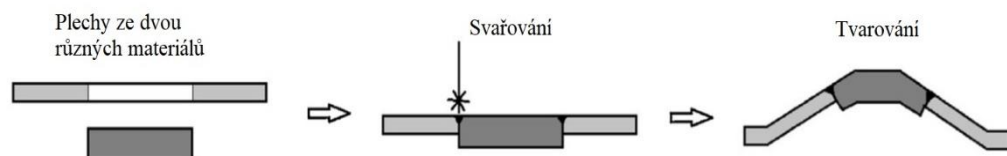
Graf 5-2: Změna koeficientu tření v závislosti na změně teploty polotovaru. [2]

6 Tailor welded blanks

„Tailor welded blanks“ jsou plechové polotovary, jejichž název lze volně přeložit jako „polotovary svařované na míru“. Jde o plechové díly, které se skládají alespoň ze dvou samostatných plechů, které k sobě byly svařeny za účelem následného zpracování (tváření). Je to hojně využívaná metoda pro přípravu plechových polotovarů na výrobu automobilových dílů z více druhů převážně vysokopevnostních ocelí [16].

Rozlišují se polotovary s lineárním a nelineárním švem, ty s nelineárním se někdy také označují jako „Engineered blanks“. Jednotlivé plechy mohou mít různé mechanické vlastnosti, jejich kombinace je tím hlavním důvodem, proč se tyto svařované plechy vyrábí. Mohou být různých tlouštěk i ošetřeny různými povlaky. V praxi nejčastějším používaným způsobem jejich svařování je svařování laserem, odporové, třecí, elektronové anebo indukční svařování. Laserové svařování zajišťuje přesné svary s minimálním tepelným ovlivněním okolí svaru. Svařování třením se použije u materiálu, které se velmi obtížně svařují, například může jít o hliník a jeho slitiny. V některých méně náročných případech lze použít i metodu MIG, která se využívá hlavně pokud jsou materiály bez problému svařitelné a není nutné používat dražších a složitějších metod. Plechy k sobě mohou být přivařeny místně (bodově) nebo kontinuálně podél celých dotykových ploch. Obecně se doporučuje využití spojitéch svarů. Ty zajišťují větší tuhost

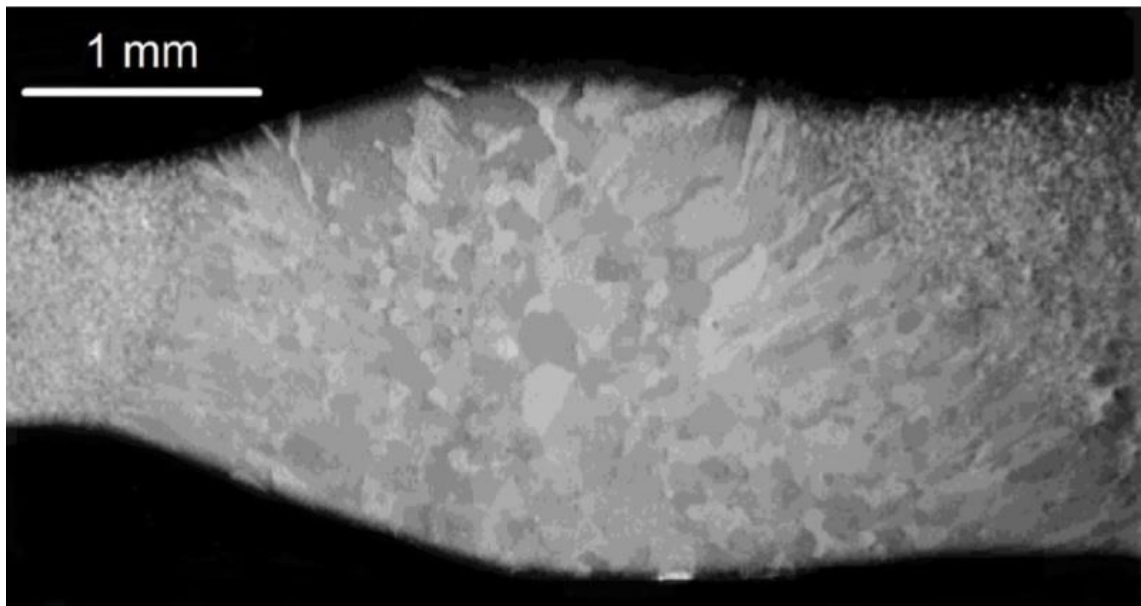
takového spoje a také zlepšují podmínky z hlediska napjatostí uvnitř svaru. Velmi podstatnou výhodou výroby dílů na způsob „tailor welded blanks“ je, mimo kombinace různých mechanických vlastností, také podstatné snížení váhy těchto dílů. V projektu „ULSAB programme Report“ z roku 2013 byl vyroben automobil z různých druhů vysokopevnostních ocelí za pomoci této metody. Jedním z výsledků bylo mimo jiné také zjištění, že daný automobil vážil o 25 % méně než původní, vyrobený konvenčním způsobem, a náklady na výrobu nepřesáhly obvyklý způsob výroby [16].



Obr. 6-1: Princip výroby polotovarů metodou „tailor welded blanks“ [16]

Vlastnosti svařeného dílu závisí na mnohých parametrech, do kterých je nutné započítat i vlastnosti daného svařového spoje. Mechanické vlastnosti, jako jsou například pevnost, kujnost a ostatní vlastnosti (např.: velikost TOO, tvárnost, aj.), jsou výrazně ovlivněny různými parametry celého spoje. Například spojovanými materiály, využitou metodou svařování, tloušťkou plechů nebo třeba vlastnostmi přídavného materiálu, je-li pro svařovací metodu potřebný [16].

Obecně lze říci, že hliníkové slitiny po svařování ztrácí pevnost z důvodu výrazné změny struktury v okolí svaru. Z původně tvářené struktury vznikne hrubozrnná litá struktura s nevhodnými mechanickými vlastnostmi, kde velikost zrn se místně velmi liší v závislosti na teplotním gradientu, který vznikl při svařování. K ovlivnění chemického složení nedojde, může ovšem dojít ke změně rozmístění legujících prvků ve struktuře. Mimo jiné může také dojít ke vzniku pórů uvnitř struktury, což opět vede ke zhoršení mechanických vlastností. U ocelí se na druhou stranu projevuje zvýšení tvrdosti a pevnosti, to závisí hlavně na obsahu uhlíku v dané oceli, na použitém způsobu svařování a na tloušťce svařovaných plechů [16].



Obr. 6-2: Makrostruktura svarového spoje dvou plechů různých tloušťek z hliníkových slitin [16]

Největší nevýhodou „tailor welded blanks“ je snížená tvárnost. Tvárnost těchto polotovarů se většinou snižuje z důvodu různých tloušťek spojovaných plechů a také kvůli chemicky i strukturně různorodé oblasti v místě svaru, kde se tenčí (slabší) plech může mírně deformovat a někdy až trhat, což má za následek pohyb svarové linie. Y. Adonyi a C. Chen, kteří dělali výzkum týkající se tvárnosti „tailor welded blanks“, našli vzájemný vztah mezi tvárností polotovarů a jejich maximální taženou hloubkou. Zjistili, že obojí souvisí s konkrétní velikostí daného svaru. Při rozšiřování metalurgicky nehomogenního svaru docházelo ke snižování tvárnosti z důvodu malé tažnosti svaru. J. Li a kol. objevili vztah mezi maximální taženou hloubkou a polohou svaru při zkoušce tažení kelímku. Bylo pozorováno, že existuje inverzní vztah mezi tvarovatelností vzorku a blízkostí svarové linie ke středu polotovarů. Dalším důležitým výsledkem bylo zjištění, že čím větší je pevnostní rozdíl mezi jednotlivými svařovanými plechy, tím menší je tvárnost celého polotovarů. Také se přišlo na to, že pokud se táhne polotovar, kde je jeden materiál výrazně slabší než ten druhý, dojde k natahování svarové linie směrem ke slabší části polotovarů, čímž se může daný svar zužovat a ztrácet tak svou pevnost [17].

Používané materiály

V současné době se touto metodou připravují plechy hlavně z vysokopevnostních (AHSS) ocelí, převážně duplexní (DP), TRIP a martenzitické vysokopevnostní oceli [17].

7 Praktická část

7.1 Úvod do praktické části

Cílem praktické části této bakalářské práce byl návrh nástroje pro zpracování plechu metodou „hot stamping“. Nástroj byl navržen pomocí softwaru PTC Creo Parametric 5.0 tak, aby rozměrově vyhovoval nosičům kovadel, které byly navrženy již dříve pro experimentální účely a jsou součástí vybavení kovacího lisu v halové laboratoři Katedry materiálů a strojírenské metalurgie FST ZČU v Plzni. Koncepce návrhu je taková, aby v případě výroby této tažné sestavy ji bylo možné namontovat na model kovacího lisu CKW 6000, který se také nachází v halové laboratoři KMM FST ZČU v Plzni. Důvod tohoto konkrétního návrhu je možnost budoucího fyzického experimentu při navázání na toto téma v diplomové práci.



Obr 7-1: Model kovacího lisu CKW 6000 na KMM FST ZČU

Součástí této části bakalářské práce je numerická simulace tažného procesu realizovaného navrženým nástrojem. Numerická simulace byla provedena metodou konečných prvků (FEM) v softwaru SFTC DEFORM 3D. K realizaci této simulace byla využita počítačová laboratoř Katedry materiálů a strojírenské metalurgie. Z důvodu simulací byl navržen i polotovár, který rozměrově odpovídá požadavkům nástroje a jehož

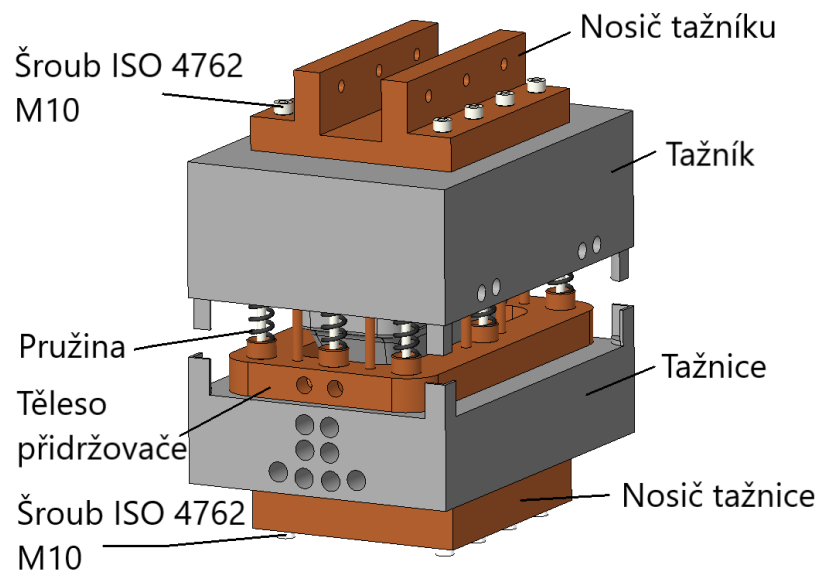
materiálem byla zvolena mangan-bórová ocel 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500), která je pro tuto metodu využívána i v praxi.

Cílem simulací bylo simulování transportu zahřátého plechu z pece do lisu, kde se sledoval pokles teplot vlivem působícího vzduchu. Dále bylo simulováno samotné tažení plechu v navržené nástrojové matici s chlazením a poté výdrž uzavřeného nástroje nezbytná k prudkému chlazení materiálu. U plechového polotovaru byla sledována zejména rychlost chlazení, aby došlo k martenzitické fázové transformaci. Dále bylo sledováno zúžení plechu a deformace v různých místech výtažku.

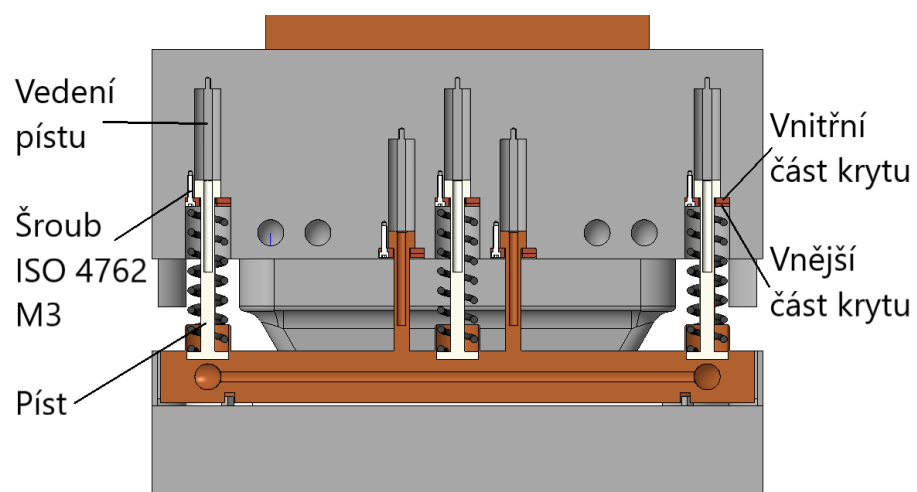
Závěr bakalářské práce se zabývá posouzením výsledků získaných z experimentálního zpracování plechového vzorku z oceli 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500). Tento vzorek byl zpracován pomocí prototypu experimentálního nástroje a modelu kovacího lisu CKW 6000 z halové laboratoři KMM FST ZČU. Cílem bylo ověření předpokladů vycházejících z numerických simulací a také samotné podstaty metody „hot stamping“, jimiž jsou vytvarování a zakalení daného plechu.

7.2 Nástroj

Navržený nástroj pro tažení plechů metodou „hot stamping“ se skládá ze třinácti různých dílů. Jedná se o pohyblivou část – tažník, dále tažnici, která se ukotví na lože lisu. Další části tvoří těleso přidržovače plechu, píst, vedení pístů a pružina, která zajistí přítlačnou sílu na vrchní plochu polotovaru. Sestava také obsahuje kryt pro píst, který se skládá z horní a dolní části. Použité šrouby jsou navrženy dle normy ISO 4762 a jedná se o závity M3 a M10 různých délek. Poslední dva použité díly jsou zmiňované nosiče pro horní a spodní část tažné sestavy. Schéma sestavy nástroje je zobrazeno na obrázcích Obr. 7-2 a Obr. 7-3.



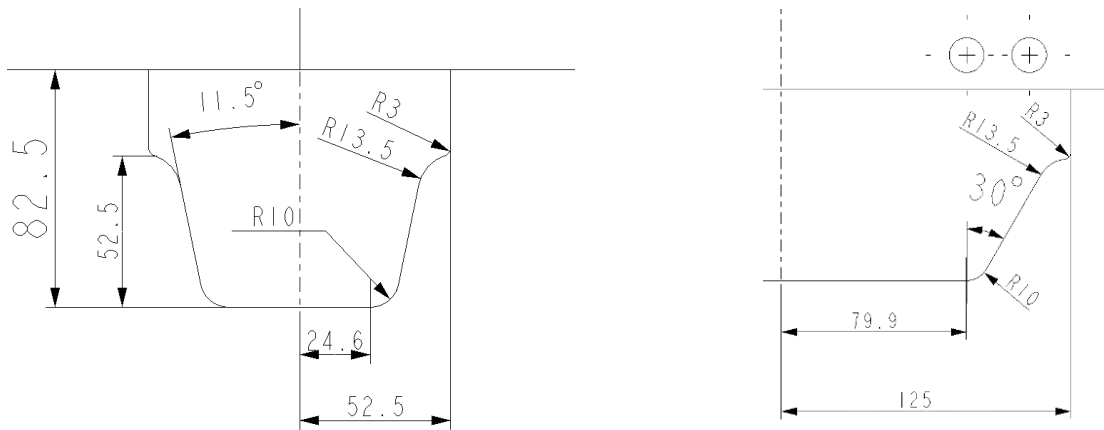
Obr. 7-2: Pohled na sestavu nástroje



Obr. 7-3: Pohled na sestavu v řezu osovou rovinou pístů

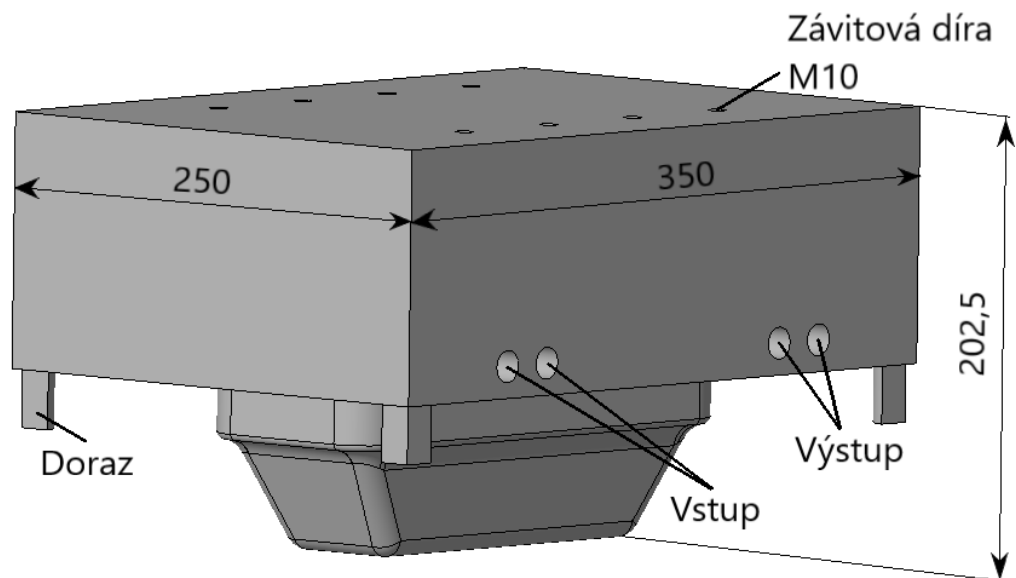
7.2.1 Tažník

Základní vnější rozměry pohyblivé části tažné sestavy neboli tažníku jsou 350x250x202,5 mm. Rozměry spodní dosedací části tažníku jsou 179,8x69,2x52,5 mm. Nad touto částí je 30 mm vysoký obdélníkový profil o rozměrech 250x105 mm, který zajišťuje spolehlivé dolehnutí plechu na povrch spodní části nástroje (tažnice). Geometrie tažníku je vidět na obrázcích Obr. 7-4 a Obr. 7-5.



Obr. 7-4 a 7-5: Geometrie příčného (vlevo) a podélného (vpravo) průřezu nástroje

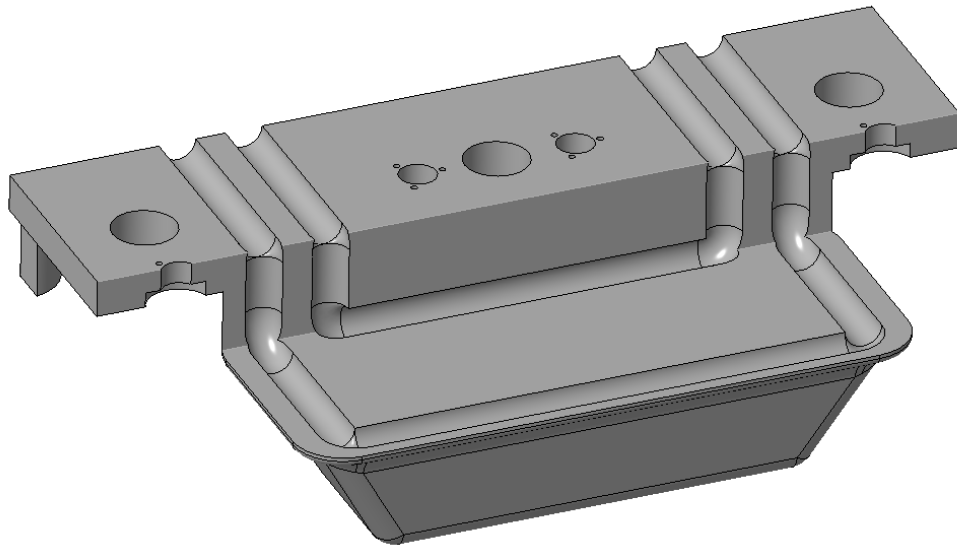
Úkosity trnu tažníku jsou 11,5° v příčném směru a 30° ve směru podélném. Tyto úkosity slouží k lepší plynulosti, usnadnění tažného procesu a zamezení sevření plechu v nástroji. V případě fyzického experimentu by napomohly i vyjmutí výtažku z matrice. Jelikož není možné tažením dosáhnout ostrých hran z důvodu velkých třecích sil a následného přetržení plechu, jsou hrany upraveny pomocí rádiusů. Zaoblení spodních hran je R10 mm. Na vrchní část tažníku je použito R13,5 mm a zaoblení hran vrchního obdélníkového profilu je R3 mm. Poloměry byly nejprve navrženy odhadem na základě literatury [2] a později upraveny do této podoby s ohledem na výsledky simulací.



Obr. 7-6: Vnější pohled na tažník

Na vrchní ploše tažníku je osm závitových děr, které slouží k uchycení do stroje. Oproti tomu na spodní ploše jsou čtyři dorazy, které slouží ke středění vzájemné polohy tažníku a tažnice a zároveň mají zamezit přílišnému zasetí nástroje do spodní části.

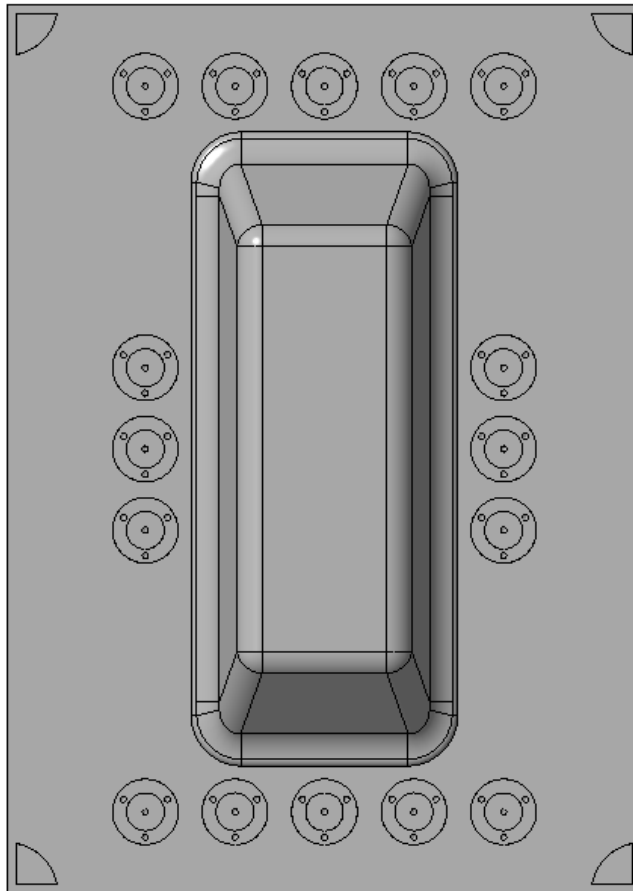
Další důležitou a pro realizaci této metody nezbytnou součástí nástroje jsou chladicí kanálky. Chladicí systém u tažníku byl navrhnout se dvěma vstupy pro chladnou vodu a dvěma výstupy pro ohřátou. Navržené otvory mají rozměr $\varnothing 15$ mm. Tento systém kanálků není příliš složitý a téměř nezasahuje do pracovní části tažníku. Tato volba byla učiněna dodatečně na základě výsledků z nevydařených simulací. Finální chlazení u tažníku sahá do hloubky 37 mm od vstupního kanálku. Objasnění tohoto návrhu bude popisováno v kapitole 7.4.3. Na obrázku Obr. 7-7 je zobrazený lomený řez chladicím systémem tažníku.



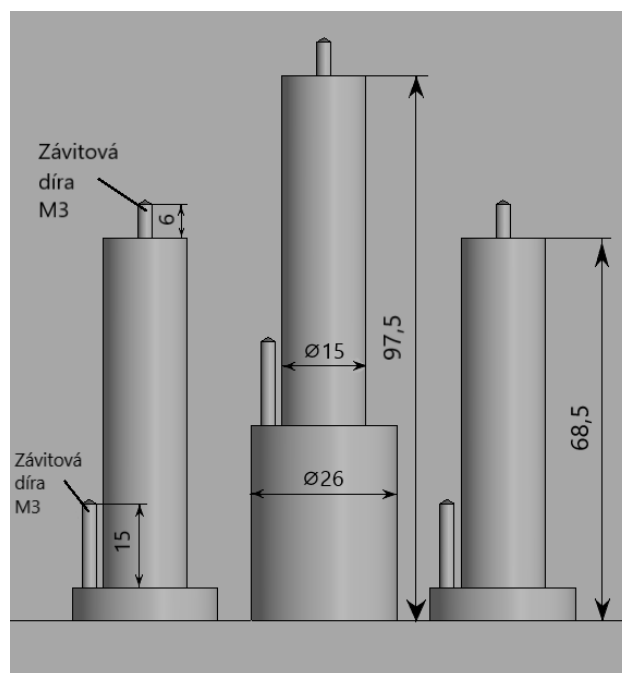
Obr. 7-7: Řez chladicím systémem tažníku

Mimo chladicí otvory také tažník obsahuje 8 otvorů o průměru 15 mm hlubokých 97,5 mm, které slouží k pohybu pístů nesoucích pružiny. Dalších 8 otvorů také o průměru 15 mm je hlubokých 68,5 mm a slouží k zajištění stálé polohy tělesa přidržovače během tažení. Na dně všech těchto otvorů jsou závitové díry M3 hluboké 6 mm, které jsou umístěné v ose otvorů a slouží k uchycení válcového vedení, které řídí pohyb pístů a tělesa přidržovače. Aby bylo možné uchycení pístů pomocí krytů, jsou otvory ve spodní části rozšířeny na $\varnothing 26$ mm. Rozšířená část těchto otvorů, také umožňuje umístění pružin, které vyvozují přitlačnou sílu přidržovače. Na dně válcové plochy $\varnothing 26$ mm jsou tři závitové díry M3 hluboké 15 mm pro uchycení pístních krytů.

Detaily otvorů pro vedení lze vidět na obrázcích Obr. 7-8 a Obr. 7-9.



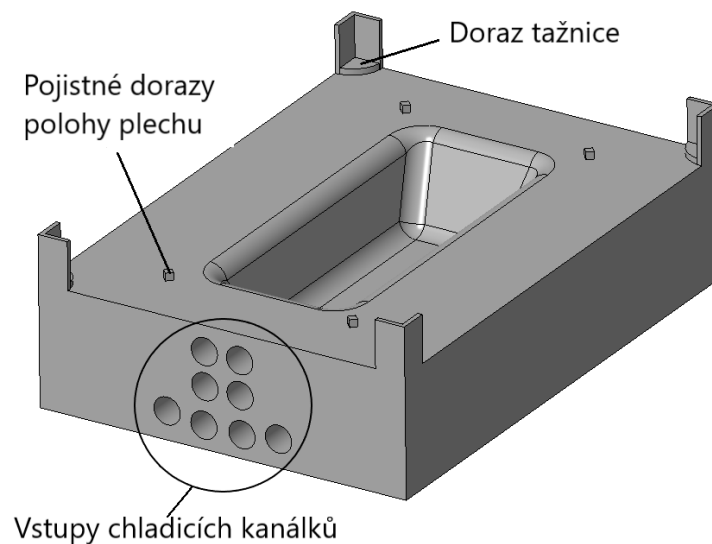
Obr. 7-8: Pohled na rozložení otvorů pro vedení



Obr. 7-9: Vnitřní detail otvorů pro písty

7.2.2 Tažnice

Tažnice tvoří statický protikus k pohyblivému tažníku. Vnější rozměry jsou 350x250x111,5 mm. Ve středu tažnice je jednoduchý dutinový profil, který společně s profilem trnu na tažníku utváří výsledný tvar výtažku. Tento profil formuje plech do tvaru uzavřené čtyřstěnné nádoby. Na spodní ploše tažnice je osm závitových děr M10 hlubokých 25 mm. Tyto díry slouží k uchycení nástroje do lisu. Na každém rohu byly vytvořeny dosedací plochy pro dorazy tažníku, aby se zamezilo přílišnému zajetí nástroje. V horizontálních směrech je mezi dorazy tažníku a dorazy tažnice vůle 0,5 mm, aby se zamezilo vzniku třecího odporu při pohybu nástroje. Na vrchní ploše tažnice jsou také umístěny čtyři malé dorazy, které zajišťují polohu plechového polotovaru na počátku pohybu nástroje.

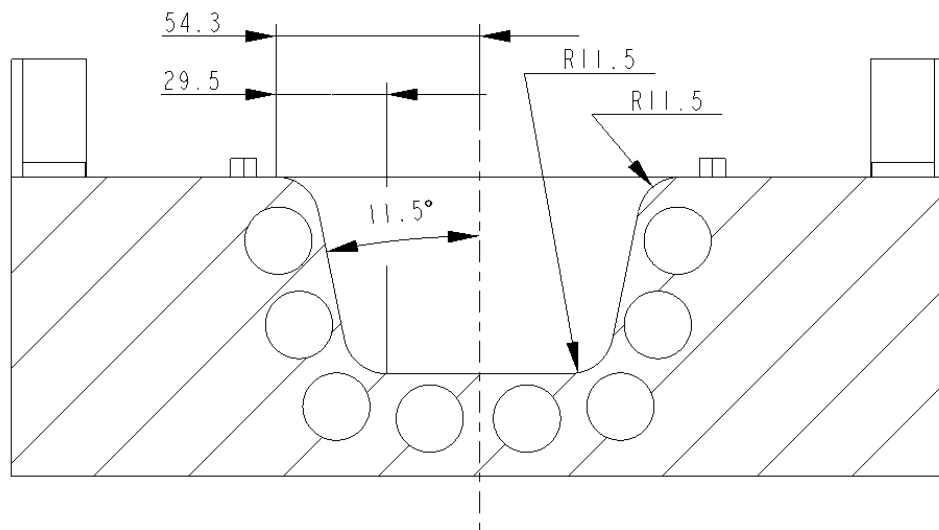


Obr. 7-10: Vnější pohled na tažnici

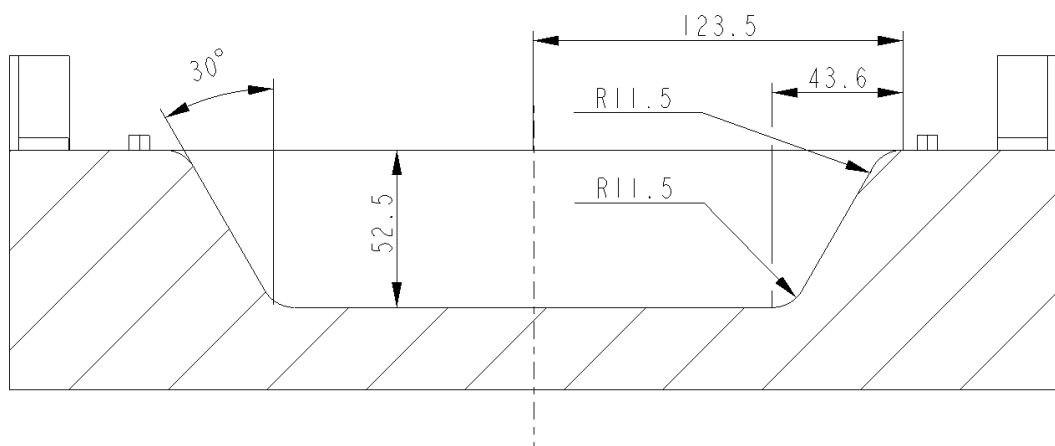


Obr. 7-11: Detail závitových děr na spodní ploše tažnice

Na obrázcích Obr. 7-12 a Obr. 7-13 je zobrazena geometrie vnitřního profilu tažnice. Z obrázků je vidět, že rádiusy i ostatní rozměry jsou oproti trnu tažníku pozměněné z důvodu potřebné vůle 1,5 mm pro plech. Rozměry dna profilu jsou zvětšeny celkem o 3 mm a jsou 182,8x72,2 mm, hloubka pak činí 52,5 mm. Vrchní vnější rádius tvořící přechod mezi dosedací plochou pro polotovar a zkosenu vnitřní plochou profilu byl navrhnout R11,5 mm, stejně tak jako vnitřní rádius u dna nádoby. Úkosy profilu jsou stejné jako u tažníku, 11,5° v příčném řezu a 30° v řezu podélném.

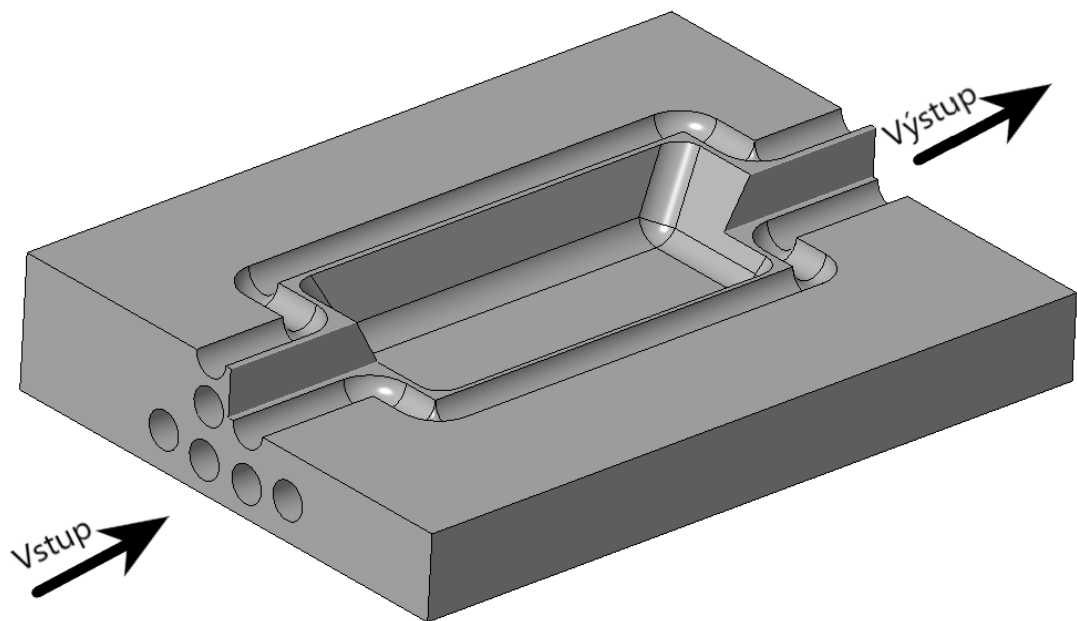


Obr. 7-12: Geometrie profilu tažnice v příčném řezu

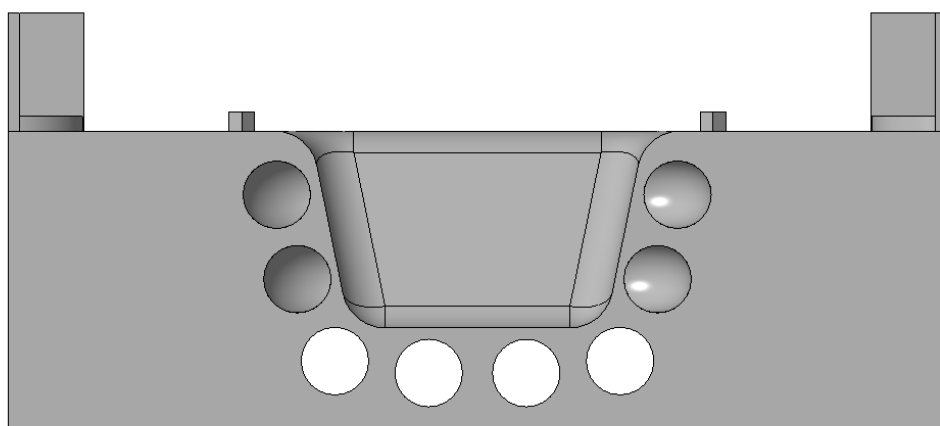


Obr. 7-13: Geometrie profilu tažnice v podélném řezu

Chladicí systém tažnice byl navržen podstatně složitější než u tažníku, a to z toho důvodu, že plechový polotovár se dotýká ploch tažnice až ve spodní úvrati nástroje, kdy je žádoucí prudké chlazení. Systém chlazení se zde skládá z osmi průchozích otvorů $\varnothing 18$ mm. Vstupy všech kanálků jsou na příčné ploše dílu, výstupy jsou pak na ploše z opačné strany. Čtyři z těchto kanálků kopírují tvar vnitřního profilu tažnice, čímž zajišťují chlazení vrchní poloviny výtažku, zejména bočních stěn a ploch, které dosedají v místech horních vnějších rádiusů. Spodní čtyři kanálky jsou realizovány pomocí rovných průchozích děr, které zajišťují chlazení dna a také vnitřních ohybů u dna nádoby.



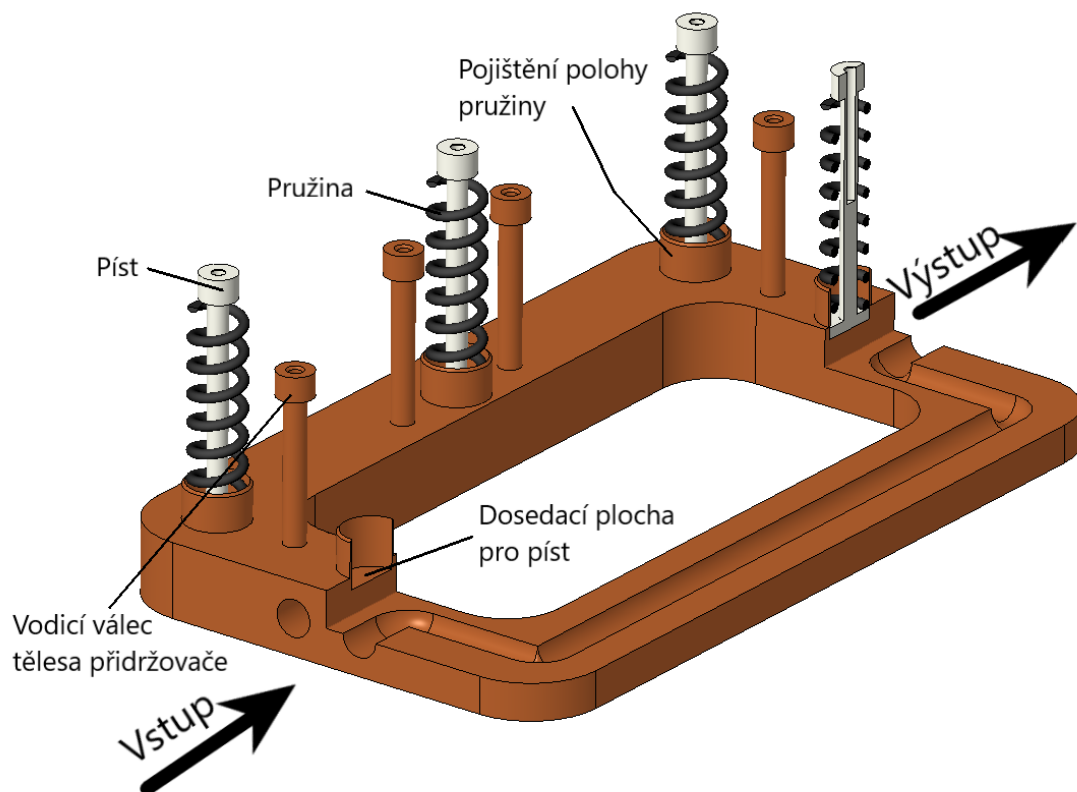
Obr. 7-14: Lomený řez vrchními kanálky



Obr. 7-15: Pohled na chladicí systém tažnice v příčném řezu

7.2.3 Přidržovač

Přidržovač je komponenta, která zajišťuje plynulé tažení plechu bez vzniku vráscitosti stěn a přehybů výtažku. Navržená komponenta se skládá z tělesa, které dosedá na plechový polotovar a jehož poloha je zajištěna vodicími válci, které se pohybují po vedení uvnitř tažníku stejně tak jako písty. Přítlačná síla tohoto tělesa je realizována pomocí osmi tlačných pružin, které jsou nasazeny na osmi pístech, pohyblivých ve svislém směru po vedení tažníku. Každá tato pružina vyvozuje v konečné úvratí sílu ve svislém směru o hodnotě 675 N. Připočteme-li sílu od tíhy celého přidržovače, je výsledná síla přidržovače 5491 N.

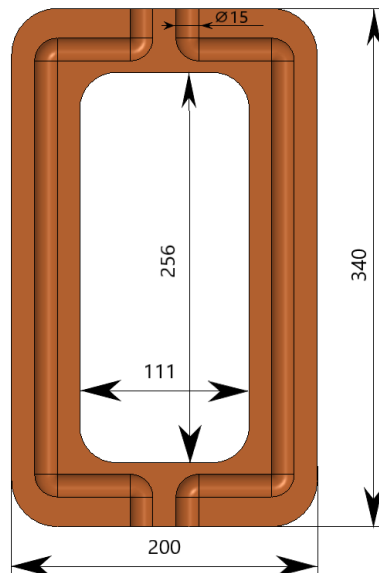


Obr. 7-16: Přidržovač plechu

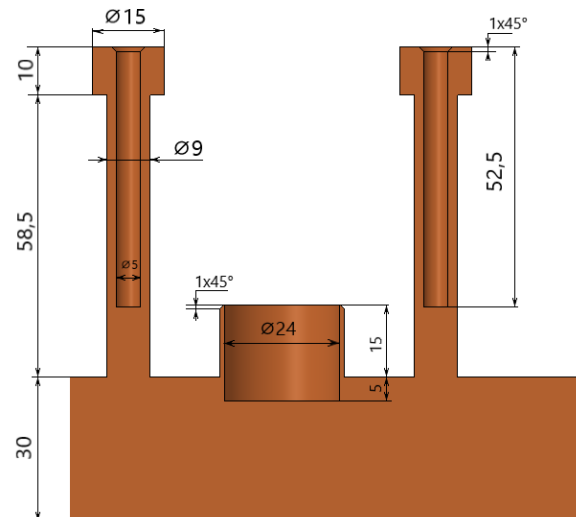
Těleso přidržovače

Vnější rozměry tělesa jsou 340x200x98,5 mm. Vodicí válce tělesa jsou vysoké 68,5 mm. Jejich rozměry jsou $\varnothing 15$ mm (hlava) a $\varnothing 9$ mm (tělo). Rozměry vnitřní výseče činí 256x111 mm. Vnitřní svislé hrany upravuje zaoblení R30 mm a vnější R24 mm. Na horní ploše tělesa přidržovače se také nachází osm válců o vnitřním průměru 24 mm a tloušťce stěny 1 mm. Tyto válce jsou hluboké 20 mm z čehož 5 mm sahá pod úroveň

vodorovného povrchu tělesa přídržovače. Válce slouží jako dosedací plochy pístů a zároveň zajišťují stálou polohu pružin vůči pístům. Pro lepší zajištění do otvorů tažníku mají sražené hrany o 1 mm pod úhlem 45°. Chlazení u přídržovače bylo navrženo jako soustava dvou kanálků velikosti $\varnothing 15$ mm, které vstupují na příčné ploše tělesa, obkrouží vnitřní výseč a vystupují na protilehlé příčné ploše.



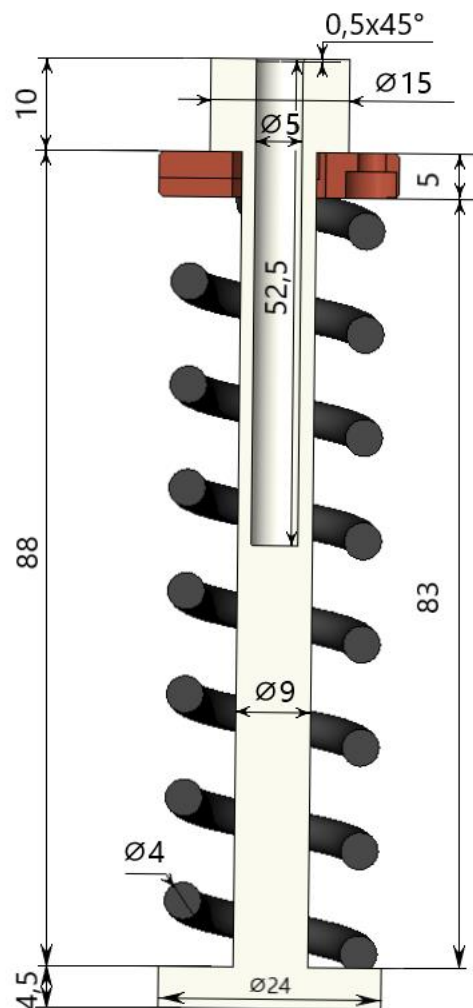
Obr. 7-17: Řez osovou rovinou chladicích kanálků



Obr. 7-18: Řez podélnou osou tělesa – detail na vodící válce

Písty a pružiny

Navržené písty jsou tvořeny třemi válcovými částmi o různých průměrech. Vrchní část (hlava) pístu je vysoká 10 mm a její rozměr je $\varnothing 15$ mm. Středová část (tělo) má rozměr $\varnothing 9$ mm a její délka je 88 mm. Poslední 4,5 mm vysoká část (pata) má rozměr $\varnothing 24$ mm. V ose pístu je vyvrtána díra $\varnothing 5$ mm a hloubky 52,5 mm, která společně s vedením uvnitř tažníku umožňuje pohyb pouze ve vodorovném směru. V modelu použitá pružina je vyrobena z drátu $\varnothing 4$ mm a její volná délka je 85 mm. Do sestavy je namontována na délku 83 mm. Každá z osmi pružin tak vyvozuje v počáteční úvratí sílu 25 N. Celková síla od přídržovače je pak 291 N na počátku procesu. Tato síla narůstá až na konečnou hodnotu 5491 N v závislosti na deformaci pružin v průběhu tažení. Pružinu téměř shodných vlastností lze nalézt v katalogu od společnosti HENNLICH. s.r.o. [25]. Při využití některé komerčně prodávané varianty tlačné pružiny by v případě realizace nástroje tedy odpadla nutnost návrhu této pružiny.

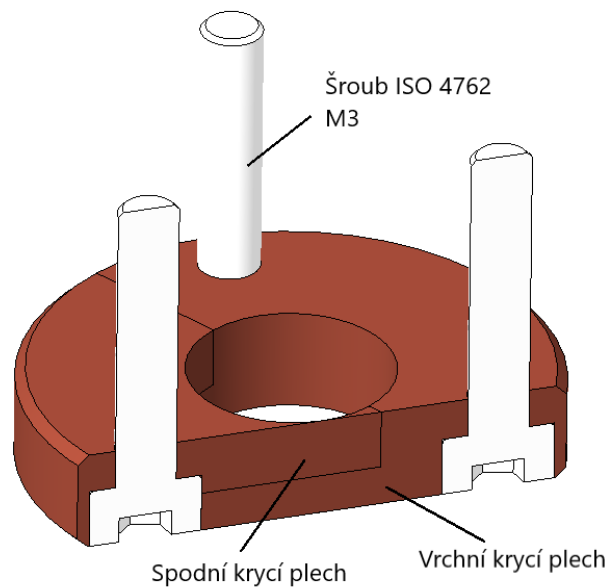


Obr. 7-19: Píst s pružinou a krytem v řezu osovou rovinou pístu

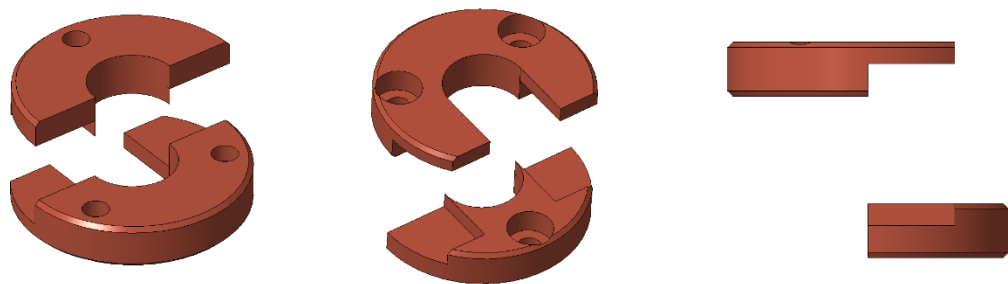
7.2.4 Kryt pístů a vedení

Kryt

Kryt pro písty je komponenta skládající se ze dvou částí, které po složení tvoří válcový kryt o rozměru $\varnothing 26$ mm s vnitřní dírou $\varnothing 10$ mm pro pohyb pístu. Obě části byly navrženy z 5 mm silného plechu s částečným vybráním ve směru tloušťky, aby bylo možné jejich složení. Tato komponenta obsahuje tři průchozí díry $\varnothing 3$ mm, kterými prochází šrouby ISO 4762 M3 dlouhé 15 mm. Tyto díry leží na kružnici o poloměru 10 mm, která je souosá s válcovou plochou krytu. Vzájemně jsou od sebe odkloněny o úhel 120° . Šrouby upevňující kryt v otvoru tažníku zajišťují polohu pístů a vodicích válců tělesa přidržovače, a omezují tak rozsah jejich pohybu ve svislém směru.



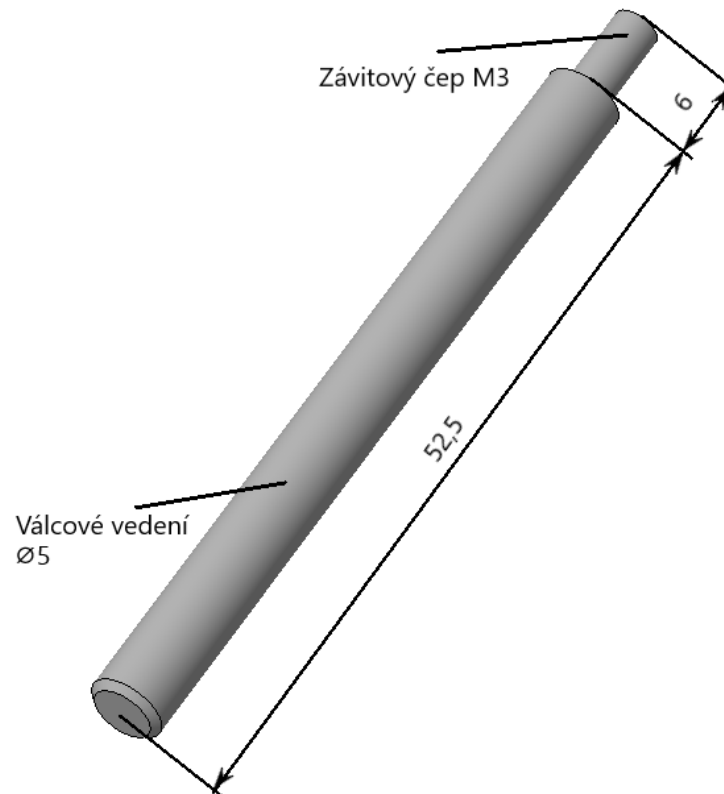
Obr. 7-20: Pohled na sestavu krytu v řezu osovou rovinou dvou sousedních děr $\varnothing 3$ mm



Obr. 7-21: Pohled na rozložený kryt

Vedení

Vedení pístů a válců tělesa přídržovače je válcová tyč o rozměru $\varnothing 5$ mm, která je dlouhá 52,5 mm a na konci disponuje 6 mm dlouhým čepem s vnějším závitem M3. Tyč je našroubována do děr v pístních otvorech tažníku a slouží k zajištění plynulého pohybu pístů i válců přídržovače ve svislém směru. Vedení lze vidět na obrázku Obr. 7-22.



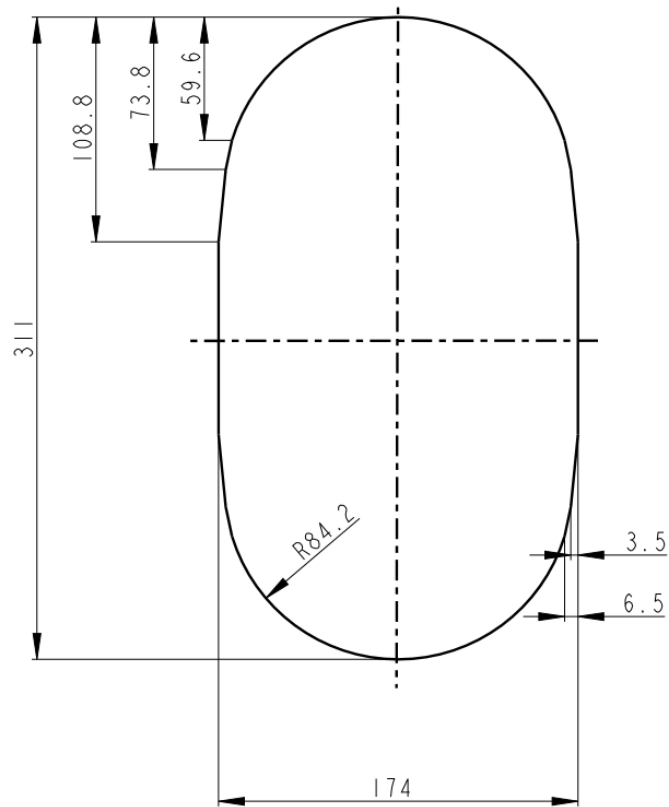
Obr. 7-22: Válcové vedení

Kompletní sestavení pístu, pružiny, krytu i vedení v počáteční poloze nástroje viz. Obr. 7-3.

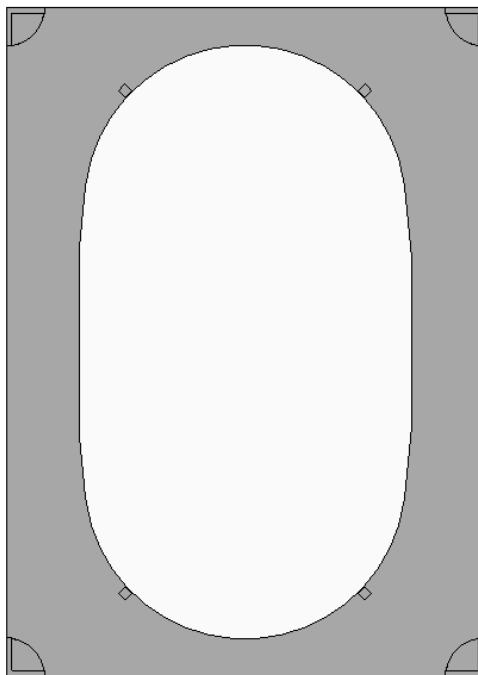
7.3 Plechový přístřih

Polotovar pro tažení byl navrhnout z 1,5 mm silného plechu. Geometrie přístřihu je vidět na obrázku Obr. 7-23. Z obrázku je patrné, že největší vnější rozměry jsou 311x174 mm. Kraje přístřihu jsou kruhového tvaru o poloměru 84,2 mm. Místo, kde přechází oblouk v rovinnou hranu, je mírně upravené, protože zde se při tažení tvoří ohyb mezi sousedními bočními stěnami nádoby. Velké množství materiálu zde způsobovalo trhání stěn z důvodu přílišného sevření přidržovačem. Tato úprava se osvědčila při simulacích daného procesu.

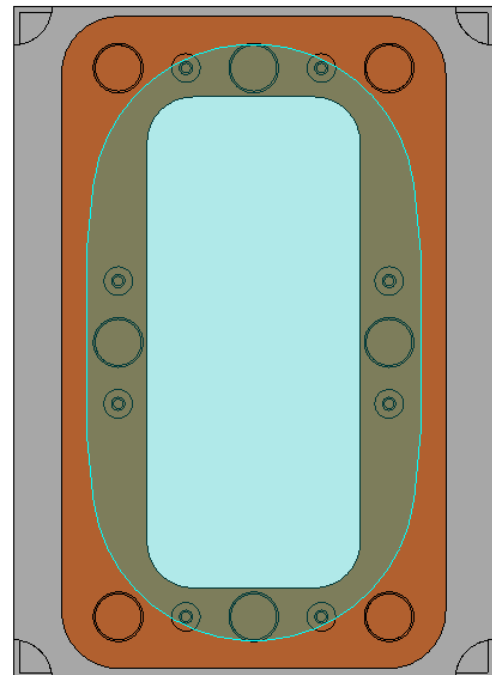
Na obrázku Obr. 7-24 lze vidět umístění polotovaru v hnízdě tažnice, které je realizováno malými dorazy. Obr. 7-25 zobrazuje plochu polotovaru uchycenou přidržovačem na počátku procesu.



Obr. 7-23: Geometrie plechového přístříhu



Obr. 7-24: Uložení přístříhu
v matrici nástroje



Obr. 7-25: Uchycení přístříhu
přidržovačem

7.4 Numerická simulace procesu

7.4.1 Materiálové charakteristiky 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500)

Materiálové charakteristiky oceli 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500) jsou jedny z hlavních vstupů, které bylo třeba zadat do programu DEFORM 3D. V následující kapitole bude popisováno chemické složení, deformační charakteristiky a tepelné charakteristiky zvoleného materiálu.

Chemické složení

Ocel obsahuje velmi malé množství bóru (0,0038 hm%), který výrazně snižuje kritickou rychlost chlazení, která je třeba k zakalení. U této oceli se tato minimální rychlost chlazení udává 27 K/s. Prvky jako mangan a chrom zvyšují pevnost v tahu. Celé chemické složení je vidět v tabulce Tab. 7-1 [2].

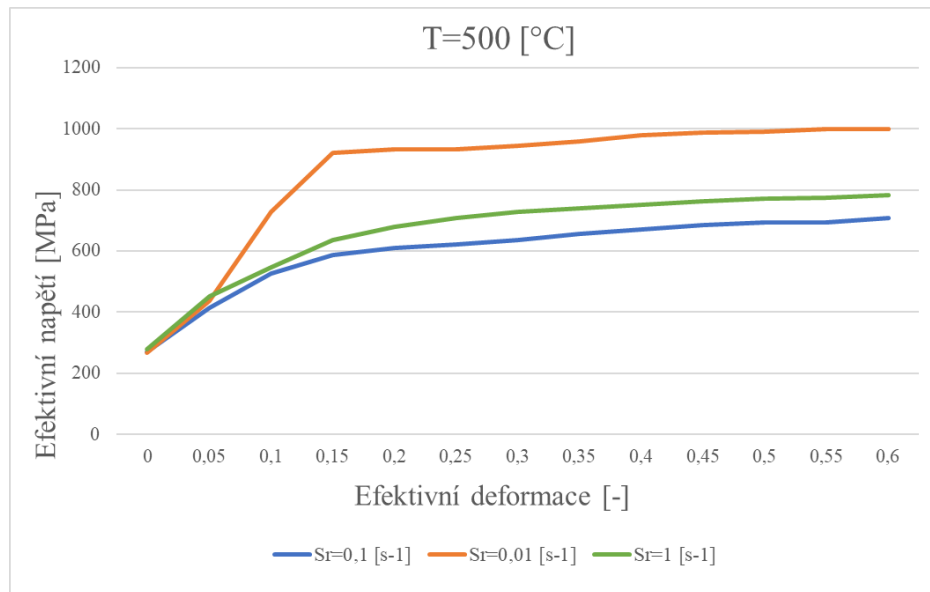
Tab. 7-1: Chemické složení (v hm%) oceli 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500) [2]

Materiál	C	Mn	Si	Ni	Cr	Cu	S	P	Al	V	Ti	B
22MnB5	0,221	1,29	0,28	0,013	0,193	0,01	0,001	0,018	0,032	0,005	0,039	0,0038

(DIN 1.5528)
(USIBOR 1500)

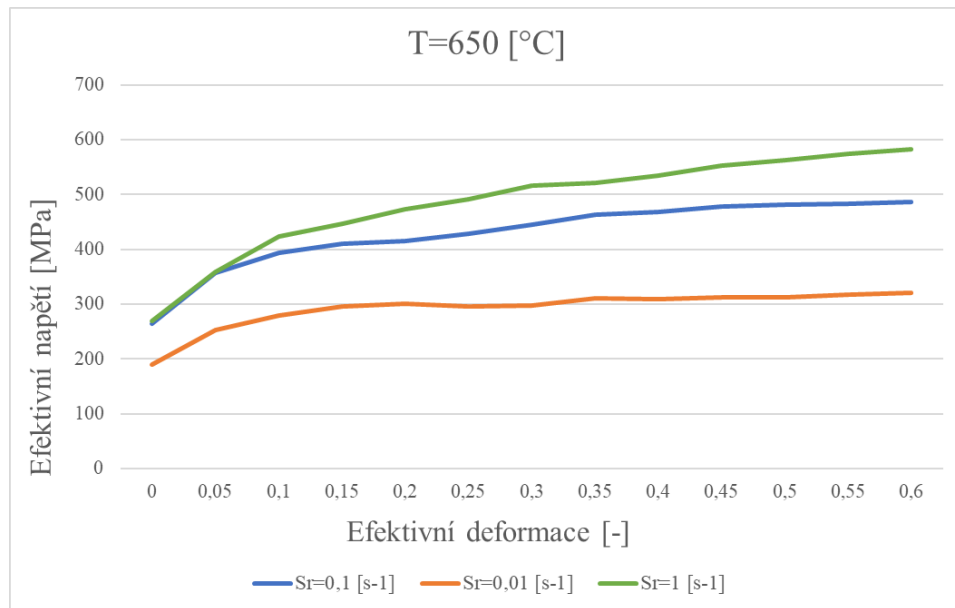
Deformační charakteristiky

Použité deformační charakteristiky v simulacích, pochází z výzkumu A. Naganathana z Ohijské státní univerzity [2]. Data vychází z výsledků mechanických zkoušek vzorku z oceli 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500) pomocí Gleeble systému [2].



Graf 7-1: Závislost efektivního napětí na efektivní deformaci pro různé efektivní rychlosti deformace (S_r) při teplotě 500 °C [2]

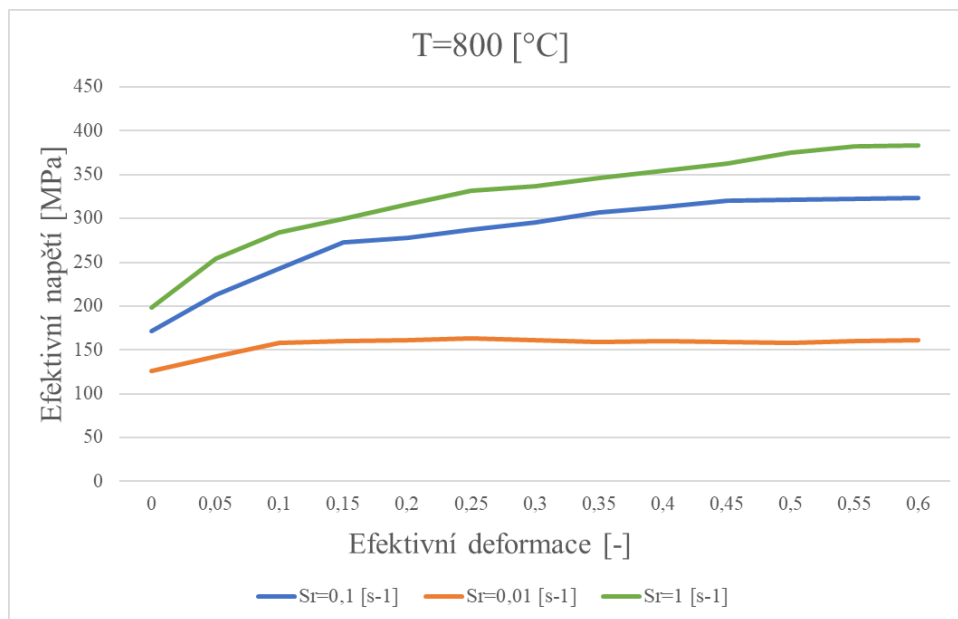
Z počátku grafu Graf 7-1 lze vidět, že čím větší je efektivní rychlost deformace (S_r), tím větší vznikají napětí uvnitř materiálu pro stejné hodnoty efektivních deformací. Při deformaci větší než 0,05 hodnoty napětí pro deformační rychlost $S_r=0,01 \text{ s}^{-1}$ prudce vzrůstají. Je to způsobeno tím, že při takto nízké rychlosti deformace začíná v materiálu při teplotě 500 °C docházet k fázové transformaci austenitu na bainit. Pro větší deformační rychlosti se toto chování nepozoruje a křivky napětí plynule stoupají s efektivní deformací [2].



Graf 7-2: Závislost efektivního napětí na efektivní deformaci pro různé efektivní rychlosti deformace (S_r) při teplotě 650 °C [2]

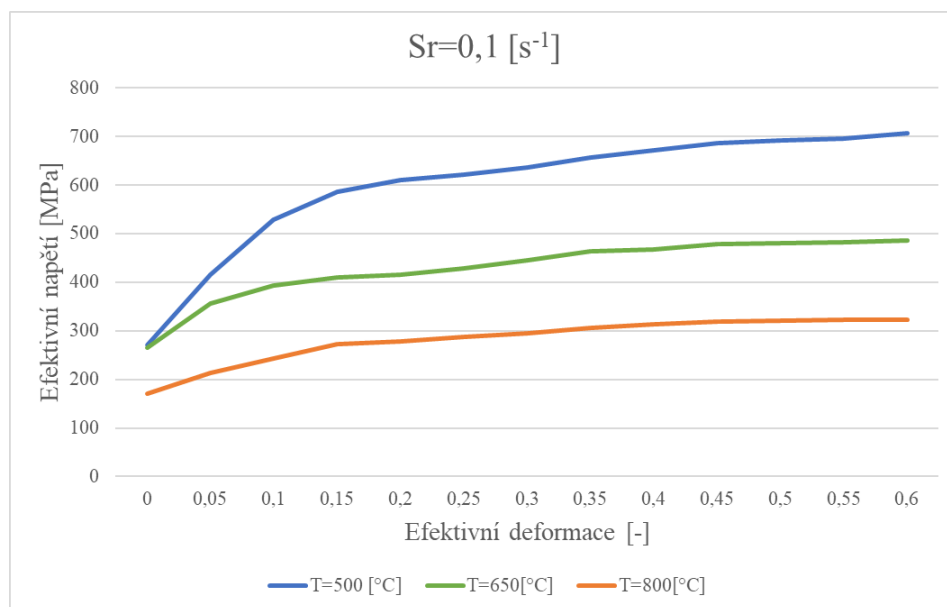
Na grafu Graf 7-2 lze vidět, že materiál má tendenci zvyšovat svůj deformační odpor při větší deformační rychlosti. Stejné chování pro různé efektivní rychlosti deformace (S_r) bylo pozorováno při teplotě 500 °C (s výjimkou $S_r=0,01 \text{ s}^{-1}$). Při porovnání s předchozí teplotou je také vidět, že při větší teplotě klesá deformační odpor. Například křivka pro rychlost deformace $S_r=1 \text{ s}^{-1}$ zde nepřesáhne ef. napětí 600 MPa, zatímco při teplotě 500 °C se vyskytují větší napětí již při deformaci 0,15 [2].

Graf 7-3 zaznamenává závislost efektivního napětí na efektivní deformaci pro tři různé deformační rychlosti při teplotě 800 °C. I zde je vidět podobné chování materiálu, kdy opět deformační odpor stoupá s efektivní deformací a zároveň je větší, čím větší je deformační rychlost (S_r). Současně lze pozorovat, že velikost vznikajících napětí je nižší než u předchozích grafů pro nižší teploty. Například křivka deformační rychlosti $S_r=0,1 \text{ s}^{-1}$ zde vůbec nepřesáhne hodnotu napětí 400 MPa, zatímco při teplotě 650 °C této křivky dosáhne při hodnotě efektivní deformace 0,1 a při teplotě 500 °C již při hodnotě 0,05 [2].



Graf 7-3: Závislost efektivního napětí na efektivní deformaci pro různé efektivní rychlosti deformace (S_r) při teplotě 800 °C [2]

Na grafu Graf 7-4 je zobrazeno porovnání efektivního napětí v závislosti na efektivní deformaci pro tři různé teploty a stejnou efektivní deformační rychlost $S_r=0,1 \text{ s}^{-1}$. Je zde dobře viditelný trend v růstu napětí při nižších teplotách materiálu. Materiál se vzrůstající teplotou snižuje svůj deformační odpor a stává se tak tvárnějším [2].

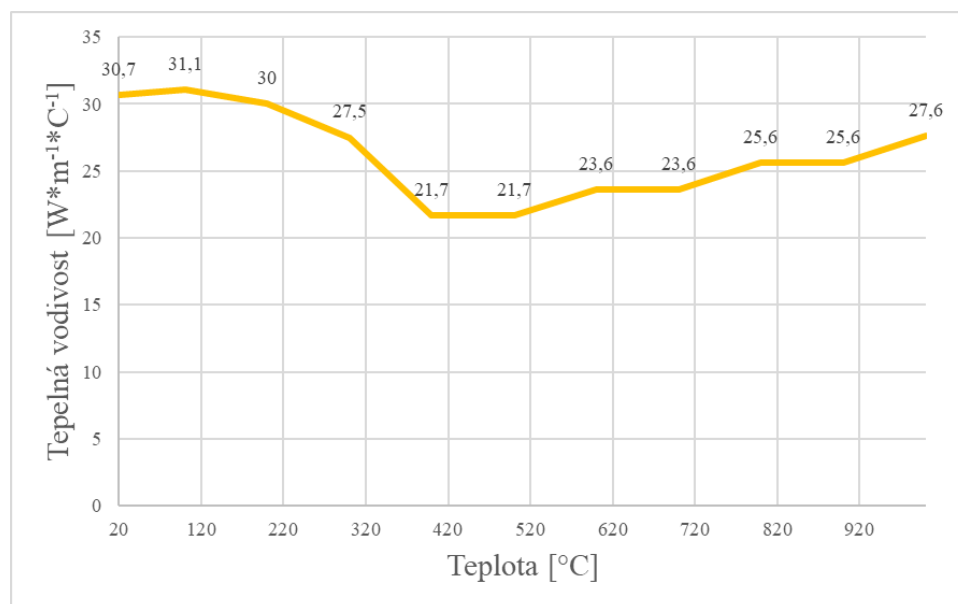


Graf 7-4: Závislost efektivního napětí na efektivní deformaci pro různé teploty při efektivní rychlosti deformace $S_r=0,1 \text{ s}^{-1}$ [2]

Tepelné vlastnosti materiálu

Vstupní tepelné charakteristiky materiálu byly získány z knihy – Sheet metal forming: Processes and Applications. Autory jsou T.Altan a A.E.Tekkaya [19].

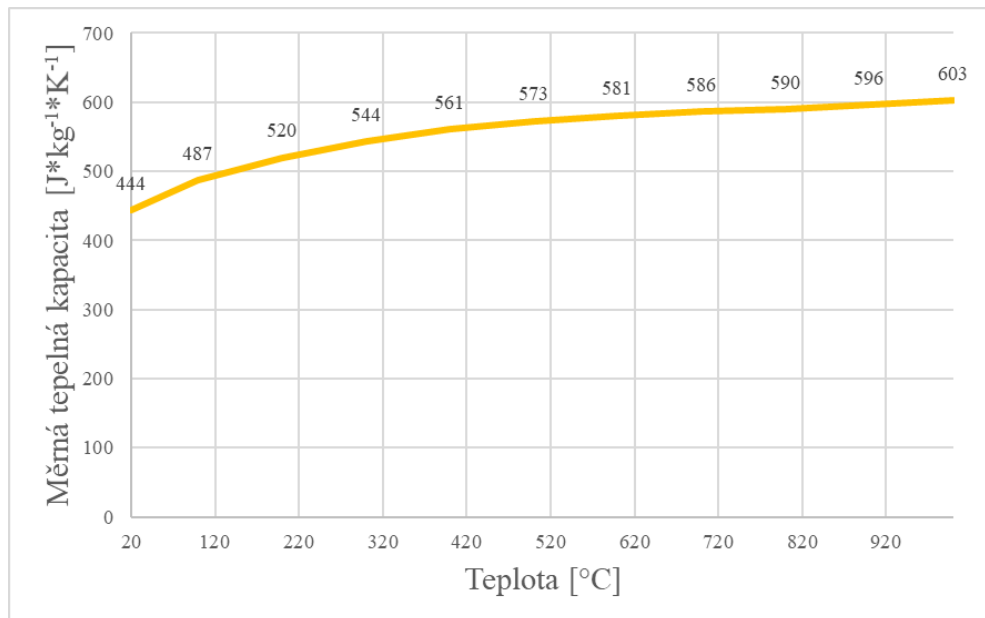
První důležitou veličinou pro provedení simulace je tepelná vodivost oceli 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500). Ta je zobrazena na grafu Graf 7-5. Z grafu je vidět, že z počátku tepelná vodivost materiálu vykazuje rostoucí tendenci až do teploty 100 °C, kde dojde ke zvratu a tepelná vodivost začne klesat. Prudké klesání pokračuje až do teplot v rozmezí 400-500 °C. Po překročení teploty 500 °C křivka začne opět stoupat až do poslední zaznamenané teploty 1000 °C, při které je hodnota tepelné vodivosti této oceli $27,6 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$. Z grafu je tedy vidět, že tepelná vodivost této oceli je výrazně ovlivněna nejenom teplotou materiálu ale i strukturou. Náhlé změny jsou způsobeny právě kvůli fázovým transformacím, které v materiálu probíhají z důvodu změny teploty. Velké zvýšení tepelné vodivosti, které je viditelné na grafu v oblasti pod teplotami přibližně 420 °C, je způsobeno fázovou transformací austenitu na martenzit (při ochlazování) [24], protože teplota počátku martenzitické transformace se u oceli tohoto chemického složení udává při hodnotě 410 °C [19, 24].



Graf 7-5: Závislost tepelné vodivosti oceli 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500) na teplotě [19]

Další veličinou použitou pro tuto numerickou simulaci byla měrná tepelná kapacita daného materiálu. Křivka popisující závislost měrné tepelné kapacity na teplotě je zobrazena na grafu Graf 7-6. Veličina je zaznamenána v rozmezí teplot 20-1000 °C

stejně tak jako tepelná vodivost. U této veličiny se nevyskytují žádné náhlé změny a měrná tepelná kapacita plynule stoupá s rostoucí teplotou. Se vzrůstající teplotou je tedy nutno dodat do materiálu více tepla, aby byl ohřát 1 kg o jeden teplotní stupeň [19].



Graf 7-6: Závislost měrné tepelné kapacity oceli 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500) na teplotě [19]

Poslední použitou tepelnou charakteristikou byla emisivita této oceli. Tato bezrozměrná veličina vyjadřuje schopnost materiálu vyzařovat teplo. Pro simulaci byla použita hodnota 0,6 [19].

7.4.2 Materiál nástroje

Materiálem všech tří hlavních částí nástroje, které jsou v kontaktu s polotovarem, byla zvolena nástrojová ocel pro tváření za tepla AISI H13 (1.2344). Chemické složení je zobrazeno v tabulce Tab.7-2 a základní mechanické a tepelné vlastnosti jsou zobrazeny v tabulkách Tab. 7-3 a Tab. 7-4 [23].

Tab. 7-2: Chemické složení nástrojové oceli AISI H13 (1.2344) [23]

Materiál	C	Cr	Mo	Si	V	Ni	Cu	Mn	P	S
AISI H13	0,32-0,45	4,75-5,5	1,1-1,75	0,8-1,2	0,8-1,2	0,3	0,25	0,2-0,3	0,3	0,3

(ČSN 19 554
1.2344) (hm %)

Tab. 7-3: Mechanické vlastnosti nástrojové oceli AISI H13 (1.2344) [23]

Materiál	AISI H13	(ČSN 19 554 1.2344)
Mez pevnosti v tahu	1200-1590	[MPa]
Mez kluzu	1000-1380	[MPa]
Youngův modul	215	[GPa]
Poissonovo číslo	0,27-0,3	[-]

Tab. 7-4: Tepelné vlastnosti nástrojové oceli AISI H13 (1.2344) [23]

Materiál	AISI H13	(ČSN 19 554 1.2344)
Teplotní roztažnost	$10,4 \times 10^{-6}$	[°C ⁻¹]
Tepelná vodivost	28,6	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]

Tepelné vlastnosti z Tab. 7-4 jsou platné pro teploty nástroje 20-215 °C [23].
Teplota 215 °C nebyla během simulace překročena.

7.4.3 Výsledky simulovaného procesu

Vstupní parametry

V tabulce Tab.7-5 je přehled všech vstupních parametrů, které byly zadány do ovládacích prvků programu. Uvedené časové parametry transportu a ochlazování byly zvoleny na základě literatury [19]. Vstupní teploty pak na základě literatury [19] a doporučení z podniku S.N.O.P. CZ a.s. Klášterec nad Ohří [21].

Tab. 7-5: Vstupní parametry simulovaného procesu [19, 21]

Rychlost tažníku	10 [ms ⁻¹]
Síla přidržovače	5500 [N]
Zdvih	52,5 [mm]
Doba transportu	6,5 [s]
Doba tažení	5.25 [s]
Doba chlazení	20 [s]
Teplota plechu	920 [°C]
Teplota nástrojů	20 [°C]
Teplota chl. kanálků	20 [°C]
Teplota vzduchu	25 [°C]
Hustota mat. plechu	7800 [kgm ⁻³]
Koeficient tření (Coulombův model)	0,15 [-]
Materiál nástroje	SAE 52100 (1.2344)

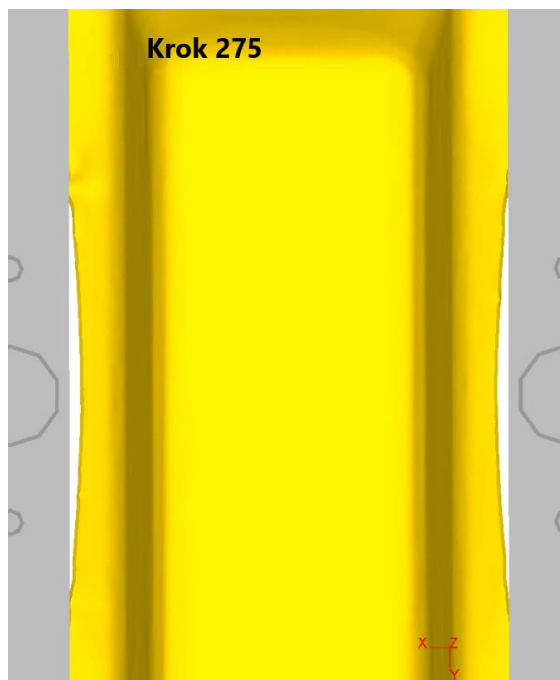
Výsledky mechanické povahy

Mezi důležité výstupy simulovaného procesu patří schopnost nástroje vytvarovat plechový polotovár do požadovaných tvarů a hloubky tažení. Na obrázku Obr.7-26 je zobrazen ISO pohled výsledného výtažku. Na první pohled lze usoudit, že navržená geometrie nástroje zafungovala dobře, jelikož nedošlo k žádným viditelným poškozením. Na jednom z okrajů jsou vidět dvě menší nepravidelnosti, které byly způsobeny vysmeknutím plechu ze sevření mezi přidržovačem a tažnicí v konečné úvratí. Potvrzuje to pohled zobrazený na obrázku Obr.7-27. Z obrázku Obr.7-28 je však patrné, že vzhledem k malé velikosti těchto přehybů by bylo možné je odstranit odříznutím okrajů.

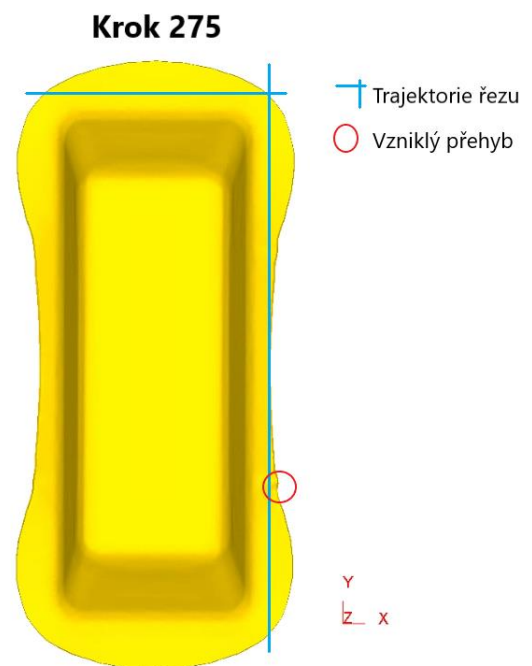
Krok 275



Obr. 7-26: ISO pohled tažené nádoby



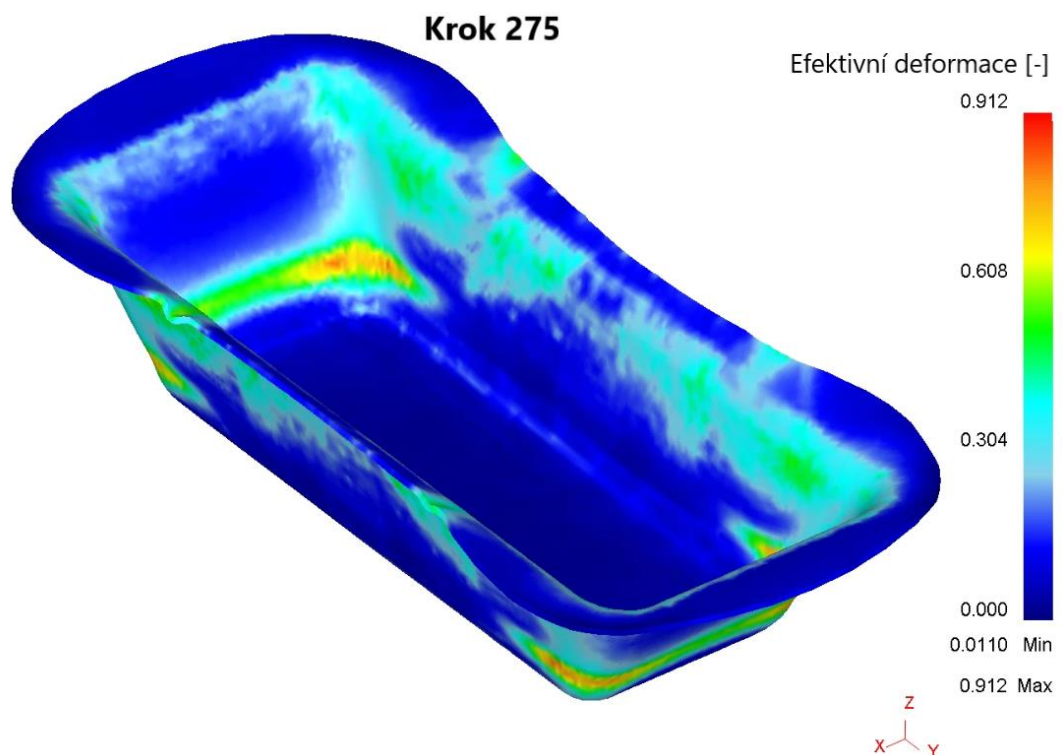
Obr. 7-27: Vysmeknutí materiálu při pohledu shora



Obr. 7-28: Návrh řešení viditelné vady

Z obrázku Obr.7-27 lze také usoudit, že po vysmeknutí byl materiál v uvolněných místech tažen dolů mnohem rychleji než v místech, které byly drženy dostatečně. Vzhledem k tomu, že viditelný přehyb vznikl na rozhraní mezi dostatečně a nedostatečně uchycenou částí plechu, lze předpokládat, že právě tato nerovnoměrnost způsobila zmíněnou deformaci.

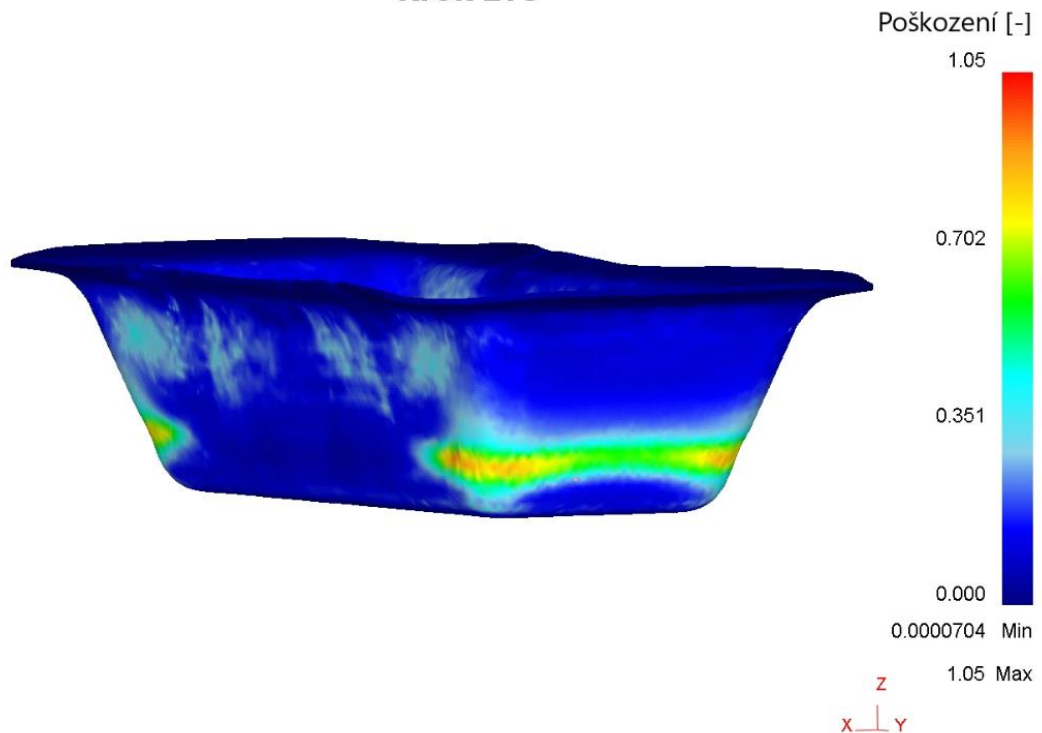
Na dalším obrázku Obr.7-29 je zobrazeno rozložení efektivní deformace materiálu po procesu tažení.



Obr. 7-29: Rozložení efektivní deformace

Z obrázku je patrné, že materiál se během tažení deformoval při pohybu přes ohyby tažnice. Největší deformace však vykazuje v rohových oblastech přibližně ve třech čtvrtinách hloubky výtažku. Obdobné výsledky pak udává rozložení poškození, které je zobrazeno na obrázku Obr. 7-30.

Krok 275



Obr. 7-30: Rozložení poškození

Poškození je bezrozměrná veličina, která představuje kritérium tvárného lomu materiálu. Program DEFORM využívá k výpočtu této veličiny Cockroft – Lathamův model, který představuje rovnice (7.1) [20].

$$C = \int_0^{\varepsilon_{eff}} \frac{\sigma^*}{\sigma_{ef}} d\varepsilon_{ef} \quad [20] \quad (7.1)$$

C poškození

σ^* max. hlavní napětí

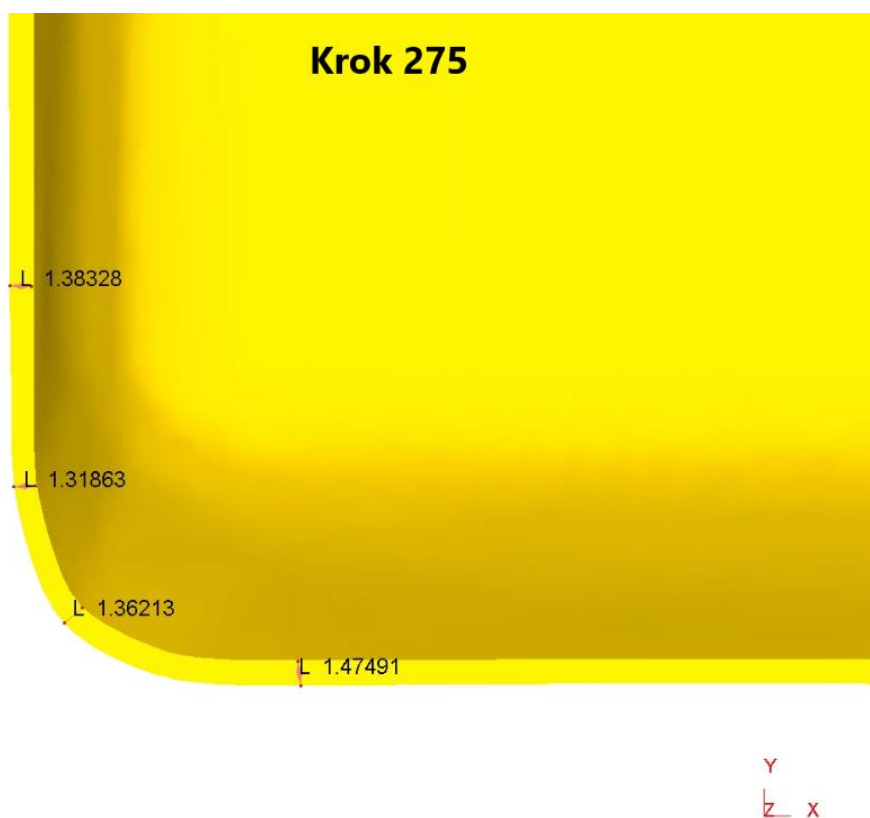
σ_{ef} efektivní napětí

ε_{eff} ef. deformace při lomu

ε_{ef} ef. deformace [20]

Poškození je počítáno jako hustota deformační energie, kterou materiál dokáže pojmout. Po překročení této hranice dojde k tvárnému lomu z důvodu vyčerpání plasticity po předchozí plastické deformaci [20].

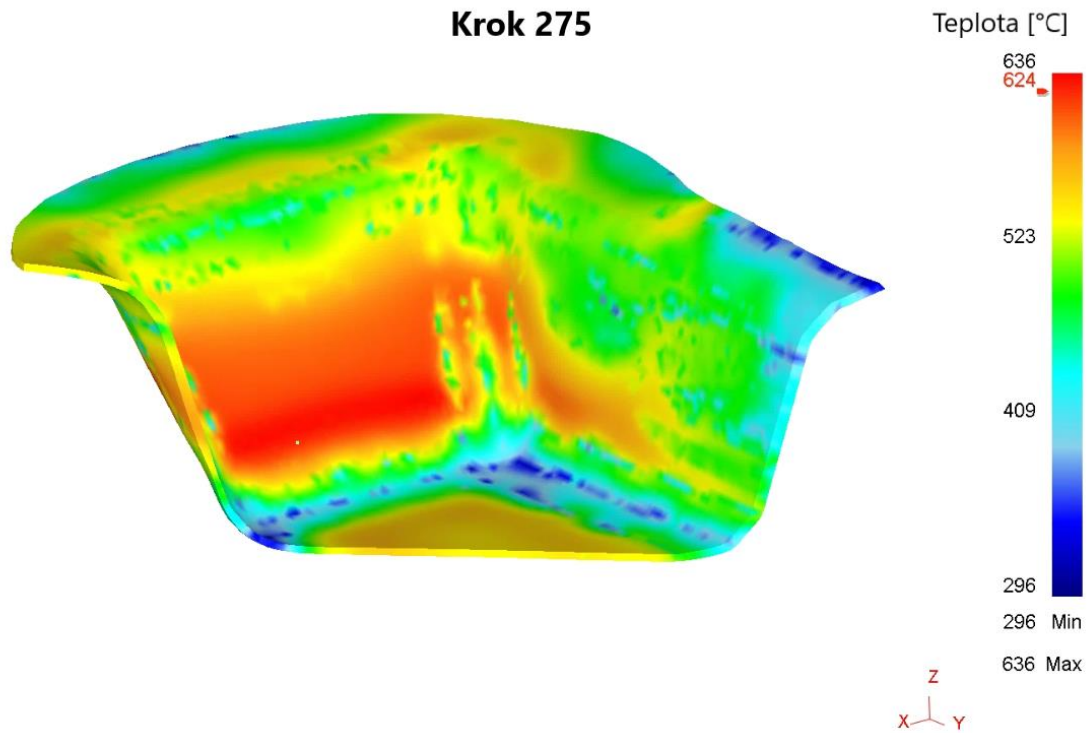
Při pohledu na nejvíce zasaženou oblast v řezu vodorovnou rovinou bylo zjištěno, že poškození se projevilo ve formě místního ztenčení ve stěnách nádoby. Nejužší části plechu se objevily v ohybových oblastech, kde tloušťka stěny klesla až na hodnotu 1,32 mm. Maximální ztenčení tak bylo 12,1 %. Žádná norma neudává konkrétní hodnotu ztenčení, která by stanovovala jasnou mez. V praxi se dovolené ztenčení plechových výtahů řídí požadavky zákazníka. Obvykle se tyto požadavky pohybují v rozmezí mezi 15-20 % maximálního ztenčení stěny [21].



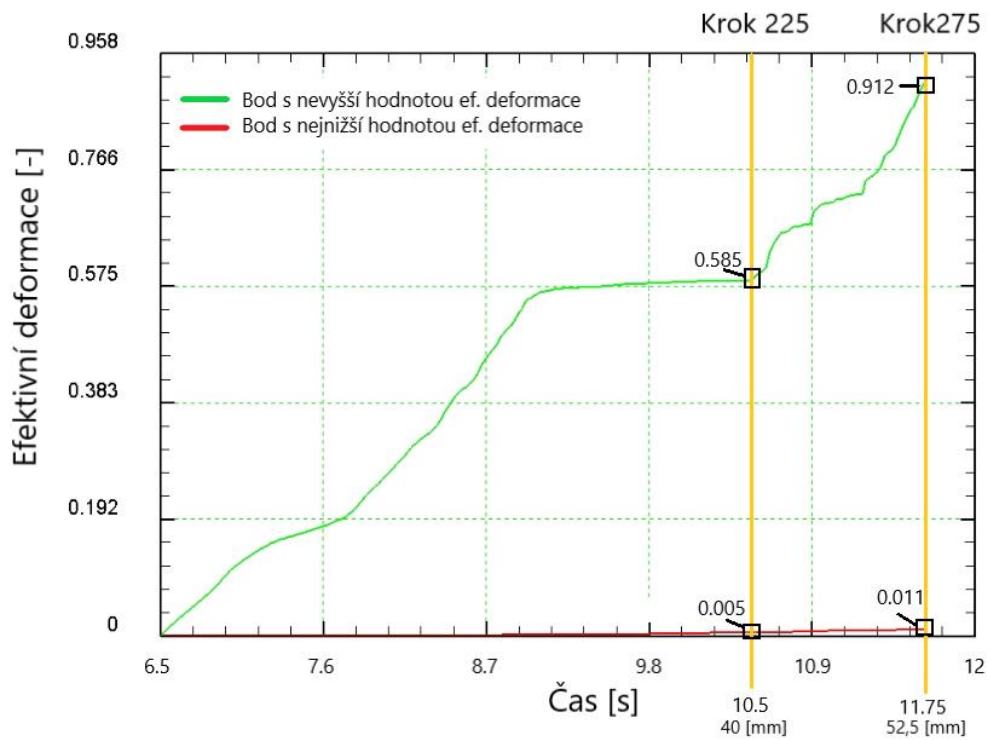
Obr. 7-31: Detail ztenčené oblasti v řezu vodorovnou rovinou

Toto ztenčení je důsledkem nedostatečného chlazení v oblasti kratších stěn, které jsou zkosené o 30°. Tím, že tyto stěny měly vyšší teploty, měly i větší plasticitu než dno a vrchní část nádoby držená přídržovačem. V nádobě se tak vyskytly tři oblasti s různými vlastnostmi – tuhé dno a vrchní okraje nádoby mezi nimiž byly stěny s velkou plasticitou. Velká část deformace se tak koncentrovala do stěn, které byly v tuto chvíli pro plastickou deformaci z hlediska deformačních vlastností vhodnější. Jak lze vidět na dalším obrázku Obr. 7-32 vysokou teplotu si kratší stěny uchovaly až do konce tažení, k čemuž zřejmě částečně přispěla i jejich samotná deformace, při které vždy vzniká teplo uvnitř materiálu. V původním návrhu sahala chlazení tažníku až téměř ke spodnímu povrchu, dno se pak

chladilo tak rychle, že docházelo k úplnému přetržení. Proto bylo chlazení upraveno (viz. kapitola 7.2.1).

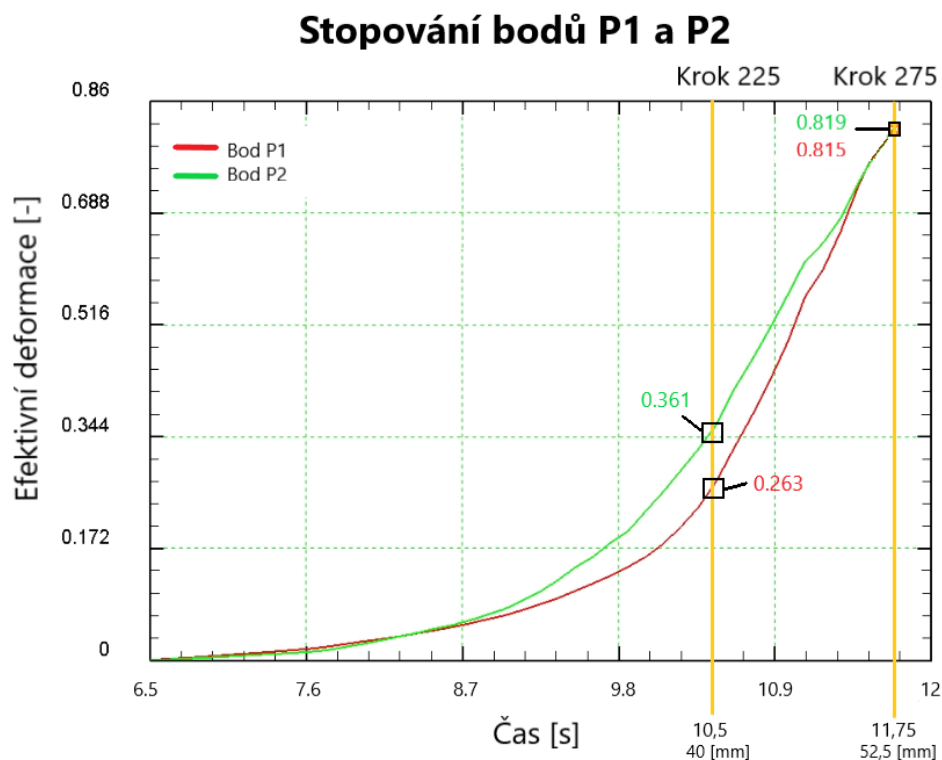


Obr. 7-32: Rozložení teploty v oblasti kratších bočních stěn a vnitřních ohybů nádoby



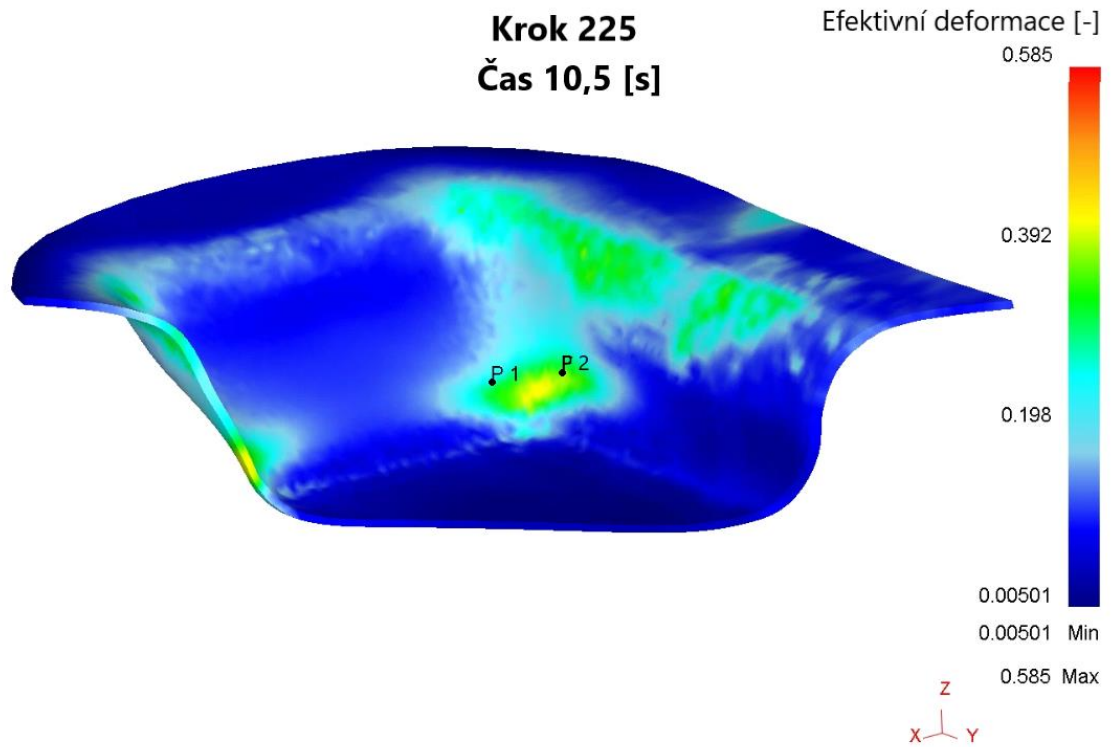
Graf 7-7: Časový průběh efektivní deformace během tažení

Z grafu Graf 7-7 je patrné, že k velkému nerovnoměrnému nárůstu deformace materiálu začalo docházet v čase 10,5 sekundy a tento jev přetrvává až do konce tažného procesu. Od počátku až do času 10,5 sekundy hodnota efektivní deformace narostla na hodnotu 0,585. Poté však během pouhé 1,25 sekundy došlo k prudkému nárůstu na hodnotu 0,912, což je téměř 1,6x násobek původní hodnoty. Čas 10,5 sekund udává polohu, kdy tažník dosáhl hloubky 40 mm z celkového zdvihu 52,5 mm. Tuto polohu pak udává čas 11,75 sekund.

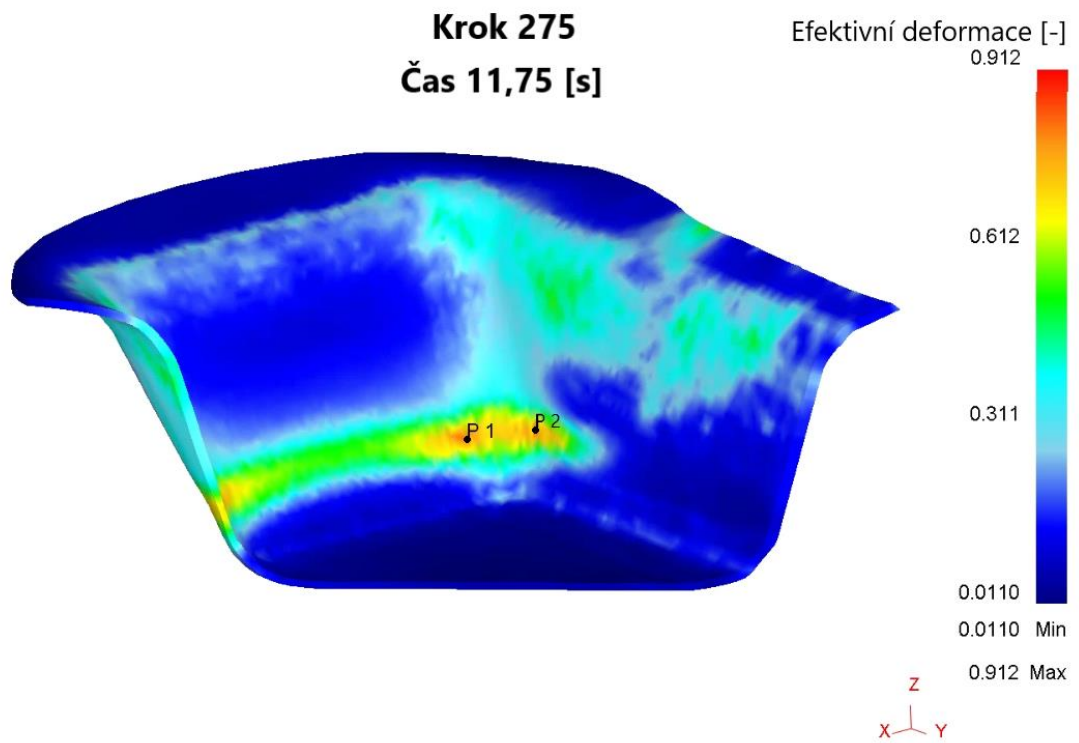


Graf 7-8: Sledování růstu efektivní deformace ve dvou bodech (P1, P2)

Graf 7-8 představuje nárůst hodnot efektivní deformace, který byl sledován pro dva body funkcí „stopování bodu“ („point tracking“). Body P1 a P2 jsou zobrazeny na obrázcích Obr. 7-33 a Obr. 7-34. Stejně jako v grafu pro celkový časový průběh efektivní deformace (Graf 7-7) i zde je vidět prudký nárůst v čase mezi 10,5 a 11,75 s. U bodu P1 byl zaznamenán nárůst z hodnoty 0,361 až na 0,819, pro bod P2 pak nárůst z 0,263 na 0,815. Oba tyto nárůsty jsou více než dvojnásobné. Lze z toho usoudit, že společně s vysokou teplotou boků je dalším důvodem částečného poškození v oblasti stěn také přílišná hloubka tažení. Výsledný výtazek je uzavřená nádoba, která nemá válcový tvar. Hloubka tažení nádob takového typu je značně omezená, hlavně kvůli složité napjatosti v oblasti ohybů dvou sousedních stěn.



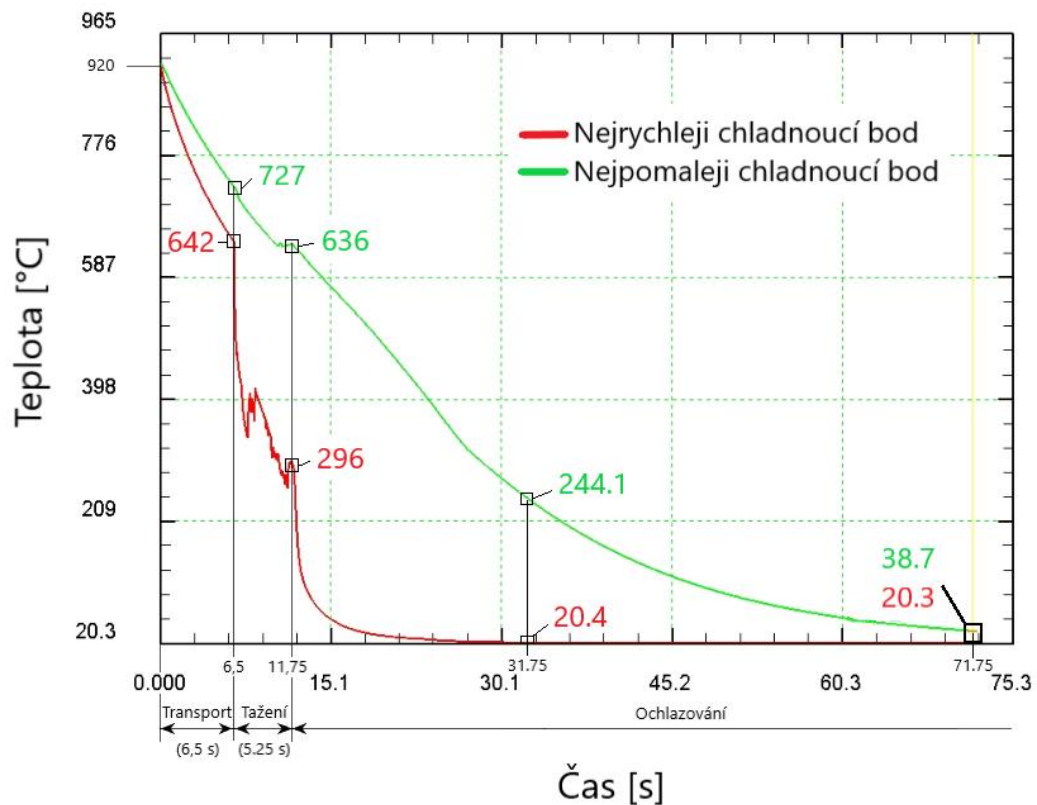
Obr. 7-33: Sledované body P1 a P2 v čase 10,5 s (40 mm)



Obr. 7-34: Sledované body P1 a P2 v čase 11,75 s (52,5 mm – konečná úvrat')

Výsledky numerického modelu tepelného zpracování

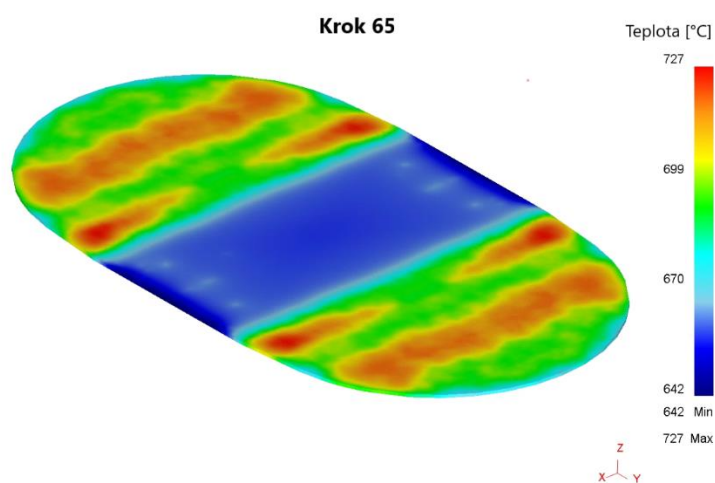
Z hlediska tepelných pochodů v materiálu byla sledována hlavně rychlost chlazení plechu v průběhu celého procesu. Celkový průběh ochlazování výtažku je zobrazen na grafu Graf 7-9.



Graf 7-9: Závislost teploty plechu na čase

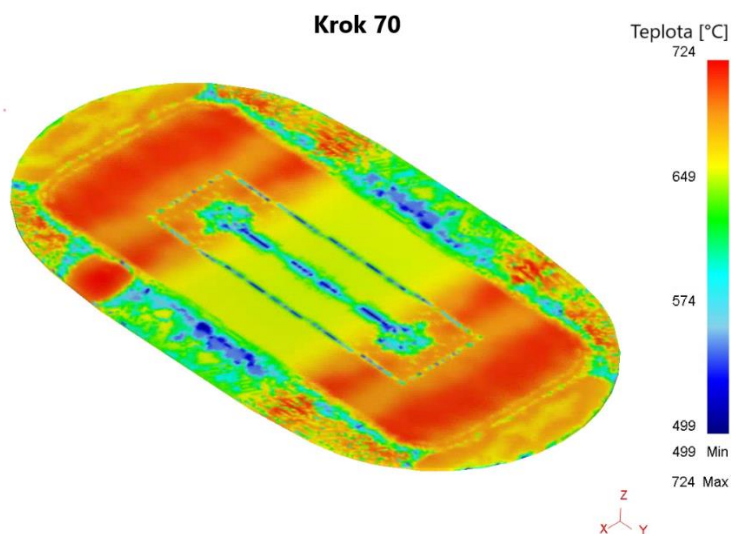
Původní teplota plechového polotovaru byla 920 °C. Z grafu je vidět, že po 6,5 sekund dlouhém transportu, kde bylo simulováno působení okolního vzduchu na polotovar, teplota rapidně klesla na rozmezí hodnot 642-727 °C. Vzhledem k tloušťce materiálu se však jedná o běžný jev. V oblasti mezi časy 6,5 a 11,75 sekund je vidět pokles ještě větší. Jedná se o oblast samotného tažení, kde prudký pokles je způsoben kontaktem materiálu nástroje s plechem. V tuto chvíli již působil chladicí systém nástroje i když zatím ne v plném rozsahu. Také jsou zde vidět mírné nárůsty teploty pro nejrychleji chladnoucí bod. Ty jsou způsobené deformací materiálu a na výslednou strukturu by neměly mít žádný zásadní vliv. Etapa chlazení v sevřeném nástroji začíná v čase 11,75 s. Potřebná výdrž sevření se různí podle typu chlazení, geometrie taženého výrobku, nástroje a také materiálu plechu i nástroje. Obecně se udává rozmezí 15-25 sekund [19].

V praxi však existují i případy, kde se výdrž pohybuje okolo hodnoty 7 sekund [21]. Platí, že po této výdrži by měla teplota materiálu klesnout do rozmezí hodnot 150-300 °C [19]. Jak lze vidět z grafu zde byla výdrž zvolená 20 sekund (čas 31,75 s). Po ní měl plech teplotu 20,4-244,1 °C, takže základní podmínka výstupní teploty by byla splněna. Pro lepší představu o chování materiálu bylo simulováno také chlazení dlouhé 60 sekund. Je vidět, že po této době (čas 71,75 s) je materiál schopný zchladnout téměř celý na pokojovou teplotu. Rozmezí teplot plechu se v čase 71,75 sekund pohybovalo mezi 20,3-38,7 °C.



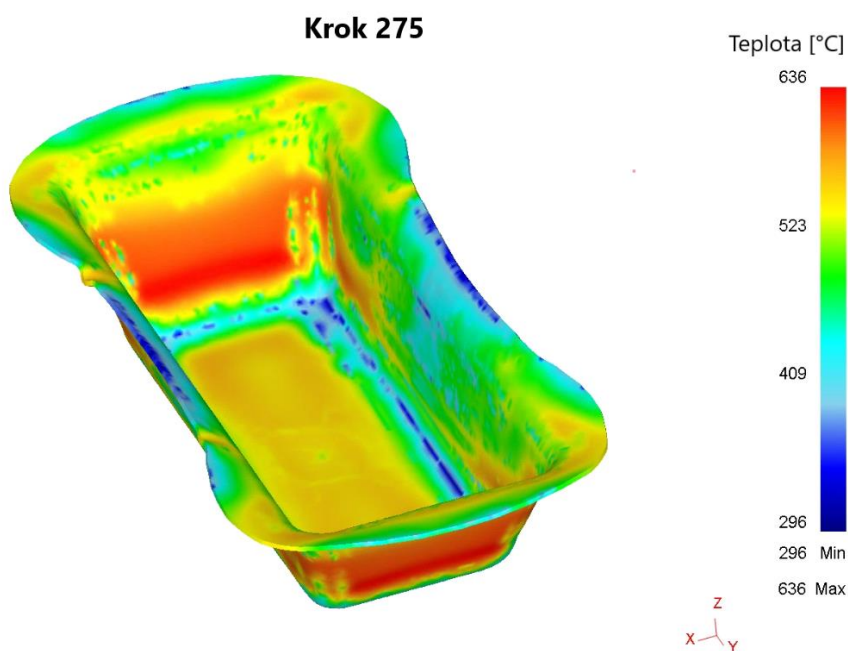
Obr. 7-35: Rozložení teploty plechového přístřihu po transportu z pece do lisu

Pro lepší představu hodnot z grafu Graf 7-9 je na obrázku Obr. 7-35 zobrazený vliv transportu na teplotu plechu.



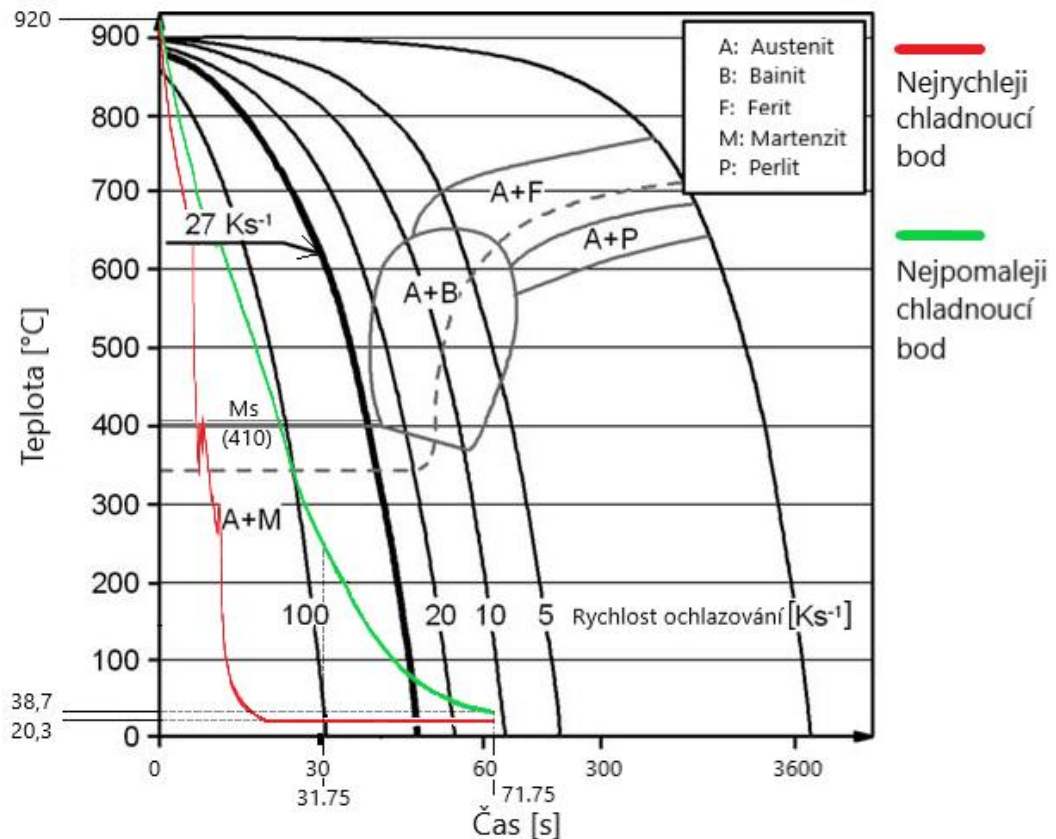
Obr. 7-36: Rozložení teploty plechového přístřihu v okamžiku kontaktu s nástrojem

Obr. 7-36 ukazuje rozložení teploty těsně po kontaktu s nástrojem (0,5 sekundy po transportu). Z obrázku jsou patrné kontaktní plochy tažníku i přidržovače s plechem. Na teplotních stupnicích z obrázků Obr. 7-35 a Obr. 7-36 si lze všimnout, že krajní hranice teploty klesla o 143 °C za pouhých 0,5 sekundy při kontaktu nástroje s polotovarem.



Obr. 7-37: Rozložení teploty výtazku na konci tažení

Obr. 7-37 zobrazuje rozložení teploty vytažené nádoby po ukončení tažení tedy v čase 11,75 s. Na tomto obrázku lze vidět jev popisovaný v předešlé kapitole, který způsobil ztenčení kratších stěn nádoby. Je zde dobře vidět, že dno a vrchní plochy nádoby v okolí přehybů přes tažnici dosahují podstatně nižších teplot než boky nádoby, které pak jsou snadněji deformovatelné.

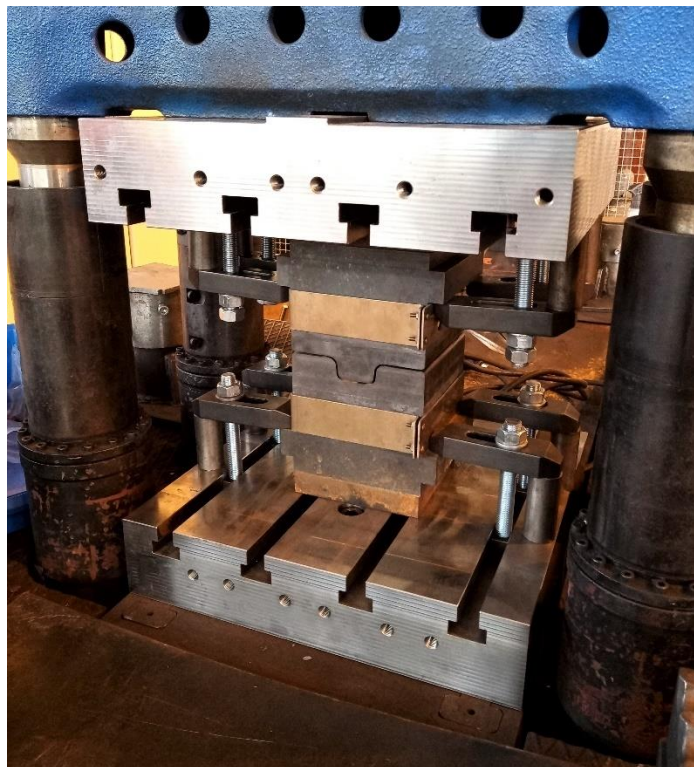


Graf 7-10: ARA diagram oceli 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500) [22] se simulovanými křivkami chladnutí

ARA diagram oceli 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500) s vloženými křivkami chladnutí dokazuje, že simulovaný proces splnil druhou zásadní podmínku pro realizaci tažení metodou „hot stamping“ a tou je zakalení dílu během tažení. Z diagramu je vidět, že simulovaný plech chladl z velké části větší rychlostí než 100 Ks^{-1} . Také je dobře viditelné, že křivky chladnutí pro nejlépe i nejhůře chlazený bod prochází oblastí vzniku martenzitu. Hraniční křivka rychlosti chlazení pro vznik martenzitické struktury je křivka 27 Ks^{-1} [2]. Rychlost chlazení simulované problematiky je větší než ta kritická, lze tedy předpokládat, že výsledná struktura by byla tvořena výhradně z martenzitické matrice s malým podílem zbytkového austenitu. Pokles rychlosti chladnutí při nízkých teplotách pod křivkou udávající teplotu počátku martenzitické transformace (M_s [24]) na výslednou strukturu nemá zásadní vliv.

7.5 Experimentální zpracování plechového vzorku

Z důvodu finanční, a především časové náročnosti na výrobu navržené nástrojové sestavy byl ke zpracování plechového vzorku použit prototyp experimentálního nástroje pro lisování plechových omega profilů z halové laboratoře KMM FST ZČU. Tento nástroj lze vidět na obrázku Obr. 7-38. Zpracovávaný vzorek byl 1,5 mm silný plechový přístřih z oceli 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500), který byl z výroby povrchově ošetřený vrstvou Al-Si.



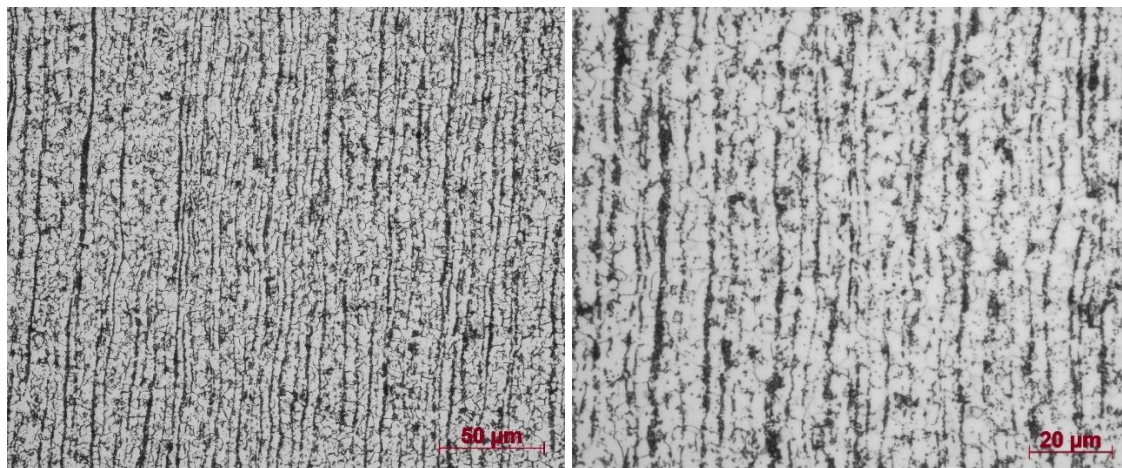
Obr. 7-38: Prototyp experimentálního nástroje pro lisování plechových omega profilů namontovaný na modelu kovacího lisu CKW 6000 v halové laboratoři KMM FST ZČU

Parametry experimentálního procesu byly orientovány na základě předešlých numerických simulací. Plechový přístřih byl zahřát tak, aby jeho teplota po vyjmutí z pece odpovídala 920 °C. Po ohřevu vzorku následoval jeho transport do matrice nástroje, který trval 6 sekund. Zde byl vzorek vytvarován a zchlazen během 20 sekund dlouhé výdrže uzavřeného nástroje.

Pro posouzení mikrostruktury byl proveden metalografický rozbor vzorku z plechu ve výchozím stavu před zpracováním na lisu a poté i vzorku ze zpracovaného plechu.

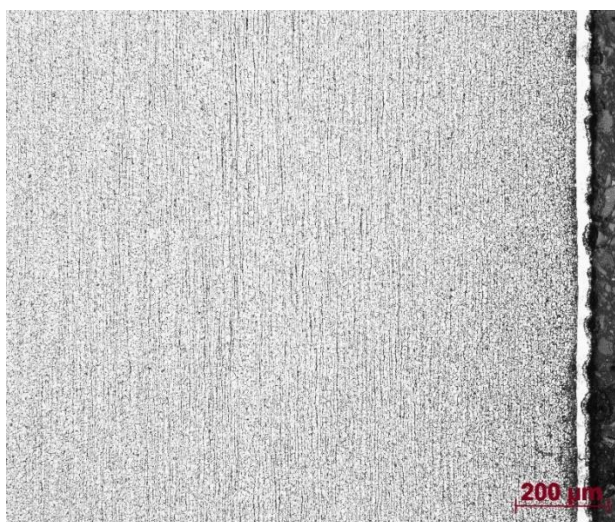
7.5.1 Výchozí stav

Na obrázcích níže (Obr. 7-39 a Obr. 7-40) jsou zobrazeny snímky mikrostruktury plechového vzorku z oceli 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500) ve stavu před experimentálním zpracováním na lisu, které byly pořízeny na světelném mikroskopu.



Obr. 7-39: Mikrostruktura 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500) ve výchozím stavu při zvětšení 500x (vlevo) a 1000x (vpravo)

Ze snímků na obrázku Obr. 7-39 je patrné, že se jedná o ocel s feriticko-perlitickou strukturou. Struktura je značně zdeformovaná z důvodu válcování při výrobě tohoto plechu. Směr deformace je zjevný podle uspořádání perlitu a protažení feritických zrn ve směru válcování (na snímcích svislý směr).

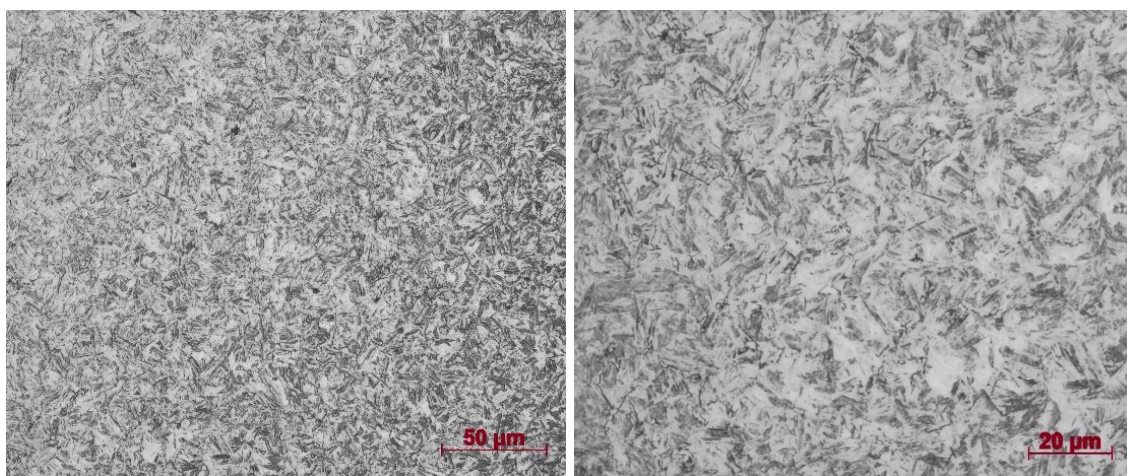


Obr. 7-40: Mikrostruktura 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500) ve výchozím stavu při zvětšení 100x

Na obrázku Obr. 7-40 je zobrazen snímek mikrostruktury tohoto vzorku při stonásobném zvětšení. Ze snímku je dobře patrná orientace zrn ve směru deformace tak jako na předešlých snímcích. Tento snímek navíc dobře zachycuje vrstvu ochranného povlaku na bázi Al-Si, který chrání materiál před oxidací v průběhu tažného procesu a také po něm.

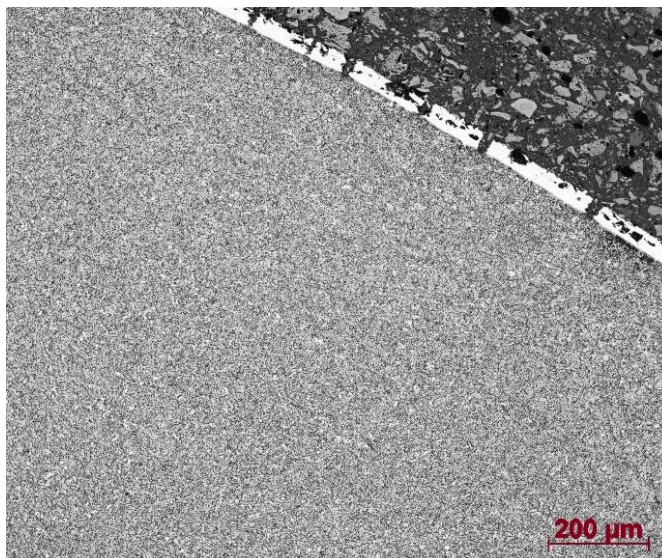
7.5.2 Stav po zpracování

Výchozí plechový přístřih byl zahříván v peci na teplotu 920 °C po dobu 10 minut, aby bylo zajištěno dobré prohřátí v celém objemu tohoto vzorku. Po vyjmutí z pece byl přemístěn do matrice experimentálního nástroje nainstalované na lisu. Na základě výsledků ze simulovaných procesů bylo předpokládáno, že teplota plechu na počátku lisování odpovídala přibližně rozmezí 600-750 °C v závislosti na konkrétním místě plechu. Po slisování zmíněného vzorku následovala 20 sekund dlouhá výdrž sevřeného nástroje, která měla zajistit zchlazení plechu do rozmezí teplot 150-300 °C [19]. Nakonec byl již zpracovaný plech vyjmut z matrice nástroje a dochlazen působením vzduchu na teplotu okolí.



Obr. 7-41: Mikrostruktura 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500) po zpracování při zvětšení 500x (vlevo) a 1000x (vpravo)

Snímky na obrázku Obr. 7-41 ukazují výslednou strukturu plechového vzorku po jeho slisování při zvětšení 500x (vlevo) a 1000x (vpravo). Ze snímků je patrné, že byla splněna podmínka tepelného zpracování plechu kalením v průběhu jeho tvarování. Výsledná struktura je tvořena martenzitickou maticí s určitým podílem zbytkového austenitu.



Obr. 7-42: Mikrostruktura 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500) po zpracování pro zvětšení 100x

Obrázek Obr. 7-42 ukazuje mikrostrukturu tohoto vzorku při zvětšení 100x. Tento snímek zachycuje rozsah tepelného zpracování, které se projevilo v celém objemu takto zpracovaného plechu.

Experimentem byl tedy potvrzen předpoklad z numerických simulací a zároveň zásadní podstata metody „hot stamping“, kterou je zakalení plechového výrobku v průběhu tažení. K dosažení tohoto primárního prvku této metody značně přispívá několik faktorů. Prvním je poměrně malá tloušťka plechu, která zajistila snadný a velmi rychlý odvod tepla z materiálu. Druhým faktorem je chemické složení oceli 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500) – viz. Tab. 7-1. Konkrétně nepatrné množství bóru přítomného v této oceli způsobuje výrazné snížení kritické rychlosti chlazení potřebné pro dosažení martenzitické struktury (27 Ks^{-1}) [2].

8 Diskuze výsledků

Cílem praktické části bakalářské práce byl návrh prototypu experimentální nástrojové sestavy pro tažení plechů metodou „hot stamping“ a následná numerická simulace tohoto tažného procesu. Numerická simulace měla za úkol ověřit schopnost nástroje vytvarovat a zároveň tepelně zpracovat navržený plechový přístřih, pro který byl zvolen materiál mangan-bórová ocel 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500). K ověření dodržení tepelného zpracování byl také experimentálně zpracován plechový vzorek z této oceli.

V první etapě praktické části byla navržena nástrojová matrice, která se skládá celkem ze třinácti různých dílů – sedm dílů navrhovaných, dva díly sloužící k uchycení nástroje do lisu, které jsou součástí výbavy halové laboratoře KMM FST ZČU v Plzni, tři různé šrouby standardizované řady ISO 4762 a pružina, kterou lze vybrat například v katalogu společnosti HENNLICH s.r.o. [25]. Prvním navrženým dílem je horní pohyblivá část tažné sestavy – tažník. Vnější rozměry tohoto tažníku jsou 350x250x202,5 mm. Jeho hlavními částmi jsou pracovní profil, který tvaruje daný plechový přístřih, systém chlazení tvořený dvěma kanálky a šestnáct svislých otvorů, které zajišťují pohyb pístů a vodicích válců tělesa přídržovače. Zmíněné písty a těleso přídržovače plechu jsou další dva navržené díly, které společně s pružinami tvoří komponentu – přídržovač plechu. Pružiny jsou předepnuty tak, že v počáteční úvratí celá komponenta vyvozuje sílu 291 N. Při následném pohybu tažníku jsou pružiny stlačovány, a v konečné úvratí nástroje pak přídržovač působí na plech silou 5491 N ve směru pohybu tažníku. Přítlačná síla na povrch plechu je nutná, aby nedocházelo ke zvrásnění stěn tažené nádoby. Mimo řešení pomocí pružin by přicházelo v úvahu také řešení pomocí hydraulických válců, které by vyvozovaly přítlačnou sílu a nahradily tak pružiny. Hydraulické válce by nahradily písty a pružiny v upravených otvorech tažníku a tlačily by také těleso přídržovače na povrch plechu. Také by bylo možné řešení, kde by se těleso vůbec nevyskytovalo a hydraulické válce by vyvozovaly sílu jen na určitá místa pomocí například menších kruhových dosedacích ploch. Dalšími navrženými díly jsou tažnice a vedení. Tažnice je nepohyblivá část nástroje s vnějšími rozměry 350x250x111,5 mm. Obsahuje osm chladicích kanálků a její pracovní profil tvoří protikus k tažníku. Vedení je válcová tyč se závitovým zakončením, která je zašroubovaná uvnitř svislých otvorů tažníku a zajišťuje plynulý pohyb pístu a tělesa přídržovače ve směru pohybu tažníku. Poslední navrženou komponentou je kryt skládající se z vnější a vnitřní části. Tento kryt

slouží k upevnění celého přídržovače k tažníku. Použité šrouby byly zvoleny s metrickými závity M3 a M10 různých délek. K uchycení do stroje byly v sestavě uvažovány nosiče kovadel, které jsou přizpůsobené k upevnění na model kovacího lisu CKW 6000 v halové laboratoři KMM FST ZČU v Plzni a nebyly tedy navrhovány v této práci. Mimo nástrojovou sestavu byl navržen také plechový přístřih, jehož rozměry jsou 311x174x1,5 mm. Rozměry jsou uzpůsobené tvaru a rozměrům nástroje.

Druhá etapa praktické části se zabývala numerickou simulací tažného procesu včetně transportu z pece do lisu a také chlazení při výdrži sevřeného nástroje. Deformační [2] a tepelné vlastnosti [19] byly použity na základě údajů z literatury. Vstupní uvažovaná teplota plechového přístřihu byla zvolena 920 °C a doba transportu 6,5 sekundy [19, 21]. Během tohoto transportu bylo simulací zjištěno, že plechový přístřih zchladl do rozmezí teplot 642-727 °C působením okolního vzduchu. Následovala simulace samotného tažení. Rychlost tažníku byla zvolena 10 mm/s a celkový vykonaný zdvih byl 52,5 mm. Doba tažení nádoby tedy činila 5,25 sekundy. Z procesu tažení bylo zjištěno, že vrchní plocha nádoby držená přídržovačem se mírně vysmekla v oblasti delších stěn výtažku. To způsobilo, že tyto stěny byly taženy dolu snadněji než ostatní dobře přichycené plochy, a proto na rozhraní mezi těmito plochami došlo k mírnému zvlnění plechu. Vzhledem k malému rozsahu vady by řešením mohlo být odříznutí okrajů tažené nádoby. Mimo to byly zjištěny deformace v oblastech kratších stěn a ohybů mezi kratšími a delšími stěnami. Tyto deformace se projeví místním ztenčením stěn nádoby. Kritické místo se ztenčilo o 12,1 % a nacházelo se na rozhraní dvou sousedních stěn nádoby. Za vzniklou vadu stěny může nedostatečný účinek chladicího systému v této oblasti. Ten způsobil, že špatně chlazené kratší stěny nádoby měly výrazně větší teplotu než rychleji chlazené dno a horní plocha chycená přídržovačem. Při tažení se tak stěny staly nejsnáze deformovatelnou částí z důvodu větší plasticity při vyšší teplotě materiálu, a proto se velká část deformace koncentrovala právě v tomto místě. Z grafu časového průběhu celkové efektivní deformace (Graf 7-7) v průběhu tažení bylo vidět, že prudký nárůst deformace se projevil ve chvíli, kdy tažník urazil dráhu 40 mm z celkového zdvihu 52,5 mm. Pomocí funkce stopování bodů v programu DEFORM 3D pak bylo zjištěno, že tento nárůst deformace zaznamenává zmíněné ztenčení stěn. Z toho bylo usouzeno, že hloubka tažení byla příliš velká pro takto zvolenou geometrii tažené nádoby. Poté byla simulována výdrž uzavřené nástrojové matrice dlouhá nejprve 20 a poté 60 sekund pro lepší představu o chladnutí materiálu. Po sloučení simulací transportu, tažení

a dvacetisekundového chlazení bylo zjištěno, že materiál plechu byl zchlazen do rozmezí teplot 20,4-244,1 °C, čímž byla splněna podmínka zpracování plechu metodou „hot stamping“, kdy během chladicí výdrže 15-25 sekund by měl být plech zchlazen na teploty 150-300 °C [19]. Tato podmínka by měla zaručit zakalení plechu z oceli 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500). Pro ověření byla následně simulována i chladicí výdrž dlouhá 60 sekund. Celková křivka chladnutí materiálu výtažku pak byla vložena do ARA diagramu (Graf 7-10) oceli 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500). Kritická křivka, která zaručuje martenzitickou fázovou transformaci u oceli 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500), je křivka rychlosti chladnutí 27 Ks^{-1} [2]. Výsledky simulací ukázaly, že rychlost chladnutí simulovaného materiálu byla větší než kritická hodnota, takže lze předpokládat, že výsledná struktura materiálu plechu by byla tvořena převážně martenzitickou maticí s malým podílem zbytkového austenitu. Oba základní předpoklady zpracování plechu metodou „hot stamping“ by tedy byly splněny, protože u simulovaného modelu ohřátého plechu z oceli 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500) bylo dosaženo požadovaného vytvarování bez větších deformačních nedostatků a zároveň s fázovou transformací austenitu na martenzit.

Poslední etapa praktické části se zabývala experimentálním zpracováním plechového přístříhu z oceli 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500). Z důvodu časové a finanční náročnosti výroby navrženého nástroje byl k experimentálnímu zpracování plechu použit prototyp experimentálního nástroje, který slouží k lisování plechových omega profilů a nachází se v halové laboratoři KMM FST ZČU. Parametry celého procesu se odvíjely od předešlých simulací. Plech byl v peci zahřát na teplotu 920 °C a následně přemístěn do matrice nástroje za krátký časový interval šesti sekund. Zde byl přístříh vytvarován a zároveň zchlazen během 20 sekund dlouhé výdrže uzavřeného nástroje v dolní úvrati. Nakonec byl proveden metalografický rozbor mikrostruktury takto zpracovaného vzorku a také plechového vzorku z totožného materiálu, který zpracován nebyl. Snímky ze světelného mikroskopu ukázaly, že původně feriticko-perlitická struktura, kterou zaznamenaly snímky u nezpracovaného plechu, vymizela a byla po ohřevu a lisování nahrazena martenzitickou strukturou s určitým podílem zbytkového austenitu.

9 Závěr

Tato bakalářská práce byla zaměřena na tažení plechových dílů se zaměřením převážně na tažení za tepla metodou „hot stamping“.

Rešeršní část práce popisovala rozdělení metod tažení plechů, metodu hlubokého tažení („deep drawing“) a detailněji pak metodu „hot stamping“ včetně popisu upraveného nástroje pro zpracování plechů touto metodou. Poslední kapitola rešerše představovala plechové polotovary zvané „tailor welded blanks“, které jsou pro tuto metodu využívány.

První etapa praktické části bakalářské práce se zabývala konstrukčním návrhem prototypu experimentálního modelu nástroje pro tažení plechů z oceli 22MnB5 (1.5528, USIBOR 1500) metodou „hot stamping“ a polotovaru rozměrově odpovídajícímu navrženému nástroji. Druhou etapou praktické části pak byly numerické simulace tažného procesu navrženého polotovaru pomocí navrženého modelu nástroje v prostředí programu SFTC DEFORM 3D. Na základě výsledků simulací bylo prokázáno dostatečné vytvarování i tepelné zpracování modelu plechového polotovaru. Praktická část bakalářské práce byla završena experimentálním zpracováním plechového vzorku ze zmiňované oceli.

Vizí do budoucna je navázání na toto téma při reálném experimentu, kde by se použila tato navržená nástrojová sestava. Vzhledem k chladicímu systému nástroje by při výrobě přicházela v úvahu možnost využití trubkového skeletu chladicí soustavy umístěného do formy nástroje při odlévání. Jinou možností by pak bylo řešení skládaného nástroje z více částí tak, aby byla možná snazší výroba chlazení uvnitř nástroje, anebo využití například technologie 3D tisku, která by byla schopna vytvořit část nástroje s chladicím systémem, která by se následně vložila a připevnila do jednoduché nástrojové matrice.

Seznam použité literatury

- [1] Semiatin S.L. *Metalworking: Sheet forming*. Vol. 14B. ASM International, 2006. ISBN-13: 978-0-87170-710-9.
- [2] A. Naganathan. *Hot Stamping of Manganese Boron Steel*. Columbus, 2010. Thesis of Graduate Program in Mechanical Engineering. The Ohio State University.
- [3] SLOTA, Ján. *Numerická simulácia lisovania plechov*. Košice: Strojnícka fakulta TU v Košiciach, 2016. Edícia vedeckej a odbornej literatúry (Technická univerzita v Košiciach). ISBN 978-80-5533-007-5.
- [4] BENEŠOVÁ, Soňa; BERNÁŠEK, Vladimír. *Technologie tváření*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014. 91 s. ISBN 978-80-261-0449-0.
- [5] Bareš, Karel. *Lisování*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1971. 542 s. ISBN 04-234-71.
- [6] Lisování a obrábění automobilových dílů. In: MM spektrum [online]. Praha: Vogel, c2020. [cit. 04.04.2020]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lisovani-a-obrabeni-automobilovych-dilu.html>
- [7] LENFELD, Petr. *Technologie tváření kovů* [online]. Liberec: Fakulta strojní, Technická univerzita Liberec, 2005. [cit. 2019-10-08]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm
- [8] *Metal forming handbook* [online]. New York: Springer-Verlag, c1998 [cit. 2019-10-09]. ISBN 978-3-642-63763-6. Dostupné z: http://dl.iran-mavad.com/pdf95/Metal%20Forming%20Handbook_iran-mavad.com.pdf
- [9] *Hot metal stamping vs. cold metal stamping* In: FAIRLAWN TOOL INC. [online]. 1232 Independence Way, Westminster, c2016 [cit. 2019-10-09]. Dostupné z: <https://www.fairlawntool.com/blog/hot-vs-cold-metal-stamping/>
- [10] Karbasian, Habib, Tekkaya A.E. A review on hot stamping. In: *Journal of materials processing technology* [online]. 2010, Volume 210, Issue 15, pages 2103-2118. cit. 2019-10-12]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401361000213X>
- [11] HICON® roller-hearth furnace facility for plates and sheets [foto]. In: EBNER Industrieofenbau GmbH [online]. Leonding, Austria, c2018 [cit. 2019-10-14]. Dostupné z: <https://www.ebner.cc/en/aluminium/plates-and-sheets/roller-hearth-furnaces/>
- [12] Jouleovo teplo. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2019-10-16]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Jouleovo_teplo
- [13] Induction Magnétique Définition [foto]. In: Polyplus [online]. Poligny, France, c2017 [cit. 2019-10-16]. Dostupné z: <https://www.polyplus.fr/chauffage-par-induction/induction-magnetique/>
- [14] HTCS®-130 DC The New Quality Standard for Die Casting Applications. In: Rovalma S.A. [online]. Rubí, Barcelona, Spain, c2020 [cit. 2019-10-22]. Dostupné z: <http://rovalma.com/products-technologies/htcs-130-dc/>
- [15] E. Kaschnitz · P. Hofer · W. Funk. Thermophysical Properties of a Hot-Work Tool-Steel with High Thermal Conductivity. In: *International Journal of Thermophysics*

[online]. 2013, Volume 34, Issue 5, pages 843-850 [cit. 2019-10-24]. ISSN 1572-9567. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10765-012-1162-8>

[16] Merklein Marion, et al. A review on tailored blanks-Production, applications and evaluation. In: *Journal of materials processing technology* [online]. 2014, Volume 214, Issue 2, pages 151-164 [cit. 2019-10-24]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013613002653>

[17] Vijay Gautam and Arvind Kumar. Experimental and Numerical Studies on Formability of Tailor Welded Blanks of High Strength Steel. In: *Procedia of Manufacturing* [online]. 2019, Volume 29, pages 472-480 [cit. 2019-10-28]. ISSN 2351-9789. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919301970>

[18] K.Seshacharyulu, et al. Understanding Friction in sheet metal forming-A review. In: *Material today: Proceedings* [online]. 2018, Volume 5, Issue 9, Part 3, pages 18238-18244 [cit. 2019-10-28]. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785318312707>

[19] ALTAN, Taylan and A. Erman TEKKAYA. Sheet metal forming: processes and applications. Materials Park, Ohio: ASM International, c2012. ISBN 978-1-61503-844 2.

[20] Benešová Soňa, et al. Počítačová simulace lomového poškození drátu v průvlacích s různým úhlem tažení – Počítačová simulace, výpočetní metody. In: *Hutnické listy* [online]. 2009, Volume 3, pages 90-94 [cit. 2020-03-24]. ISSN 0018-8069. Dostupné z: <https://www.hutnickelisty.cz/pocitacova-simulace-lomoveho-poskozeni-dratu-v-pruvlacich-s-ruzny-uhlem-tazeni/>

[21] Rozhovor s Martinem Hradilem, procesním technologem společnosti S.N.O.P. CZ a.s. Klášterec nad Ohří. Verněřov – průmyslová zóna Verne, Klášterec nad Ohří 28.2.2020.

[22] Tekkaya, A.E., et al. Thermomechanical coupled simulation of hot stamping components for process design. In: *Production Engineering I* [online]. Pages 85-89 [cit. 2020-03-25]. ISSN 0944-6524. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/245464284_Thermomechanical_coupled_simulation_of_hot_stamping_components_for_process_design

[23] H13 Tool Steel – Chromium Hot-Work Steels. In: AZoNetwork UK Ltd. [online]. Manchester, UK, c2020 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9107>

[24] Shapiro B. Arthur. Using LS-Dyna for Hot stamping. In: *7th European LS-DYNA Conference: Proceedings* [online]. Salzburg, Austria, 14th – 15th May 2009. ISBN 398099015X, 9783980990158 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://www.dynalook.com/conferences/european-conf-2009/C-II-01.pdf/view>

[25] Tlačné pružiny z pružinové oceli. In: HENNLICH s.r.o. [online]. Českolipská, Litoměřice, c2020 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <https://www.hennlich.cz/produkty/pruziny-tlacne-pruziny-162/tlacne-pruziny-z-pruzinove-oceli.html>

Seznam příloh

Příloha 1: Technická dokumentace navržené nástrojové sestavy