

Studium tvorby defektů při zpracování plechů

David Ondrušek

Bakalářská práce
2016

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **David Ondrušek**
Osobní číslo: **T14680**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Studium tvorby defektů při zpracování plechů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární řešení na vybrané téma
2. Proveďte analýzu tvorby defektů u konkrétních výrobků ve firmě MRB Sazovice
3. Proveďte vyhodnocení získaných výsledků a návrh na jejich odstranění

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucí práce.

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

8. ledna 2016

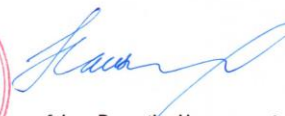
Termín odevzdání bakalářské práce:

20. května 2016

Ve Zlíně dne 3. února 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 17.5.2016



.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělčně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlédnutí veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlíáde k větší výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce je studium tvorby defektů při zpracování plechů a navržení vhodných doporučení, které by tyto defekty odstranily. Bakalářská práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část popisuje základní pojmy z oblasti tváření kovů, především ohýbání rovinných dílů. V praktické části je proveden experiment, jehož snahou je určit příčinu vzniklých vad při ohýbání plechů. Výstupem práce je zhodnocení získaných poznatků a následné návrhy na případné zlepšení, nebo úplné odstranění problému vznikajícím během výroby.

Klíčová slova: ohýbání, praskání, tvářecí maziva

ABSTRACT

The aim of the bachelor thesis is to study of defects in sheet metal processing, and to propose suitable recommendations that would eliminate these defects. The bachelor thesis is divided into theoretical and practical part. The theoretical part describes the basic concepts of metal forming, especially sheet parts bending. The practical part includes an experiment, which is attempts to determine the cause of defects emerge during bending. Outcome of this work is the evaluation of the knowledge gained and subsequent proposals for possible improvement or complete elimination of the problems arise during production.

Keywords: bending, defects, forming lubricants

Rád bych touto cestou poděkoval paní doc. Ing. Libuši Sýkorové, Ph.D. a panu Ing. Alexanderu Čapkovi, za ochotu, vstřícný přístup a cenné rady při zpracování bakalářské práce.

Dále patří poděkování zaměstnancům firmy MRB Sazovice, zejména paní Zdence Růžičkové, za pomoc při vypracování praktické části bakalářské práce a poskytnutí všech materiálů a informací potřebných během experimentu.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 STRUKTURA KOVOVÝCH MATERIÁLŮ	11
1.1 DEFORMACE.....	12
1.2 PŘEMÍSTOVÁNÍ VRSTEV ATOMU - VZNIK DEFORMACE	13
1.2.1 Amorfní způsob posuvu	13
1.2.2 Translační a složitý skluz	13
1.2.3 Meziablokový průběh plastické deformace	14
1.2.4 Dvojčatění	14
1.2.5 Mezikrystalový průběh plastických deformací	14
1.3 VLIV VELIKOSTI ZRNA A STEJNORODOSTI STRUKTURY NA DEFORMACI	14
1.4 NEDOKONALOSTI SKUTEČNÉ MŘÍŽKY	15
1.4.1 Bodové poruchy	15
1.4.2 Čárové poruchy	15
1.4.2.1 Hranová dislokace.....	16
1.4.2.2 Šroubová dislokace	16
1.4.2.3 Burgesova smyčka	17
1.4.2.4 Hustota dislokací.....	17
1.4.2.5 Vznik dislokací	18
1.4.2.6 Pohyb dislokací.....	19
1.4.3 Plošné poruchy	20
2 TVÁŘENÍ	21
2.1 HODNOCENÍ TVAŘITELNOSTI.....	22
2.1.1 Zkouška krutem.....	23
2.1.2 Zkouška ohybem	23
2.2 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ TVÁŘENÍ	23
2.2.1 Materiál	23
2.2.2 Nástroj	24
2.2.3 Maziva	24
2.2.4 Vliv rychlosti deformace	24
2.2.5 Vliv teploty na tváření.....	25
2.2.5.1 Tváření oceli za studena	25
2.2.5.2 Tváření za částečného ohřevu.....	25
2.2.5.3 Tváření oceli za tepla.....	25
3 OHÝBÁNÍ	27
3.1 NEUTRÁLNÍ OSA	27
3.2 MAXIMÁLNÍ A MINIMÁLNÍ POLOMĚR.....	29
3.3 DEFEKTY PŘI OHÝBÁNÍ.....	30
3.3.1 Praskání materiálu	30
3.3.2 Tvorba vln	31
3.3.3 Odpružení	31
3.4 VÝPOČET OHYBOVÉ SÍLY A PRÁCE.....	33
3.4.1 Výpočet pro ohyb tvaru V	33
3.4.2 Výpočet pro ohyb tvaru U	34

3.5	DÉLKA POLOTOVARU	35
3.6	DRUHY TECHNOLOGIÍ PŘI OHÝBÁNÍ.....	35
3.6.1	Rozdělení podle poloměru zakřivení.....	35
3.6.2	Rozdělení podle stroje.....	36
3.6.3	Rozdělení podle způsobu ohýbání.....	37
II	PRAKTICKÁ ČÁST	41
4	CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	42
5	ÚDAJE O ZPRACOVÁNÍ EXPERIMENTU	43
5.1	POPIS VÝROBKU, JEHO PARAMETRY A POŽADAVKY NA KONEČNÝ PRODUKT.....	43
5.2	POPIS TECHNOLOGICKÝCH PODMÍNEK	45
6	DEFEKTY VZNIKLÉ PO OHYBU	47
6.1	NÁVRHY NA ODSTRANĚNÍ PRASKÁNÍ.....	48
6.2	STANOVENÍ MINIMÁLNÍHO POLOMĚRU OHYBU	49
6.3	VHODNOST MATERIÁLU	50
6.3.1	Zkouška tahem	50
6.3.1.1	Průběh tahové zkoušky	52
6.3.1.2	Dopočet potřebných údajů	54
6.3.2	Vyhodnocení materiálů na základě ohýbání	55
6.4	VLIV ORIENTACE VLÁKEN	56
6.4.1	Vliv orientace vláken - zkouška	56
6.5	ZMĚNA TVARU VÝŘEZU V MÍSTĚ OHYBU	58
6.6	OHÝBÁNÍ S POUŽITÍM MAZIV	59
6.6.1	Popis použitých maziv	60
6.6.2	Příprava experimentu	60
6.6.3	Vyhodnocení experimentu použití maziv	62
7	ZHODNOCENÍ NÁVRHŮ NA ODSTRANĚNÍ DEFEKTŮ NA ZÁKLADĚ EXPERIMENTU	64
7.1	DALŠÍ NÁVRHY NA ODSTRANĚNÍ DEFEKTŮ	65
	ZÁVĚR	66
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	67
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	70
	SEZNAM OBRÁZKŮ	73
	SEZNAM TABULEK.....	75
	SEZNAM PŘÍLOH.....	76

ÚVOD

Ohýbání je jednou z metod plošného tváření, která je ovlivněna mnoha faktory. Účelem je požadovaná změna tvaru působením vnějších sil. Tento proces ovlivňuje mnoho faktorů, které mohou způsobit určité problémy během procesu. Nejčastěji se vyskytují v podobě zvlnění, či praskání materiálu. V tomto konkrétním případě se jednalo pouze o vyřešení problému způsobující defekty v podobě prasklin v místě ohybu.

Bakalářská práce je rozdělena na část teoretickou a část praktickou. Teoretická část je rozdělena do několika kapitol. V první z nich jsou popsány základní pojmy z oblasti struktury kovových materiálů a především vliv vnitřní struktury kovového materiálu na tváření. Další kapitolu tvoří popis procesu tváření, jeho hodnocení a vliv určitých faktorů na jeho průběh. Poslední kapitola teoretické části je věnována samotnému ohýbání, jeho různým druhům technologií, výpočtům a v neposlední řadě popisu možných defektů během zpracování materiálu.

Na základě znalostí z teoretické části bylo možné přistoupit k části praktické, která byla zpracována ve firmě MRB Sazovice. Tento podnik se zabývá kompletní výrobou plechových součástí, především bezpečnostních dveří s požární odolností, plechových lepených dveří a zárubní všech typů, včetně povrchových úprav.

Hlavní náplní bylo zanalyzovat defekty výrobku z kovového materiálu vzniklých během procesu ohýbání na ohraňovacím lisu. Nejprve bylo nutné zjistit veškeré informace o výrobku, technologických podmínkách a také o samotných defektech. V dalších krocích se provedly potřebné výpočty a zkoušky na zjištění příčiny vzniku vad. Posledním krokem bylo shrnout výsledky experimentu a dle jeho výsledků navrhnout opatření, které by odstranilo vznikající problémy v podobě prasklin materiálu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 STRUKTURA KOVOVÝCH MATERIÁLŮ

Každá látka, ať už se jedná o skupenství pevné, kapalné nebo plynné, je tvořena shlukem atomů a molekul jednoho nebo i více prvků, které pak tvoří sloučeniny. Jednotlivé atomy nebo molekuly jsou v případě amorfni látky navázány neuspořádaně. V případě krystalických látek jsou vazby uspořádány do mřížky určitého tvaru.

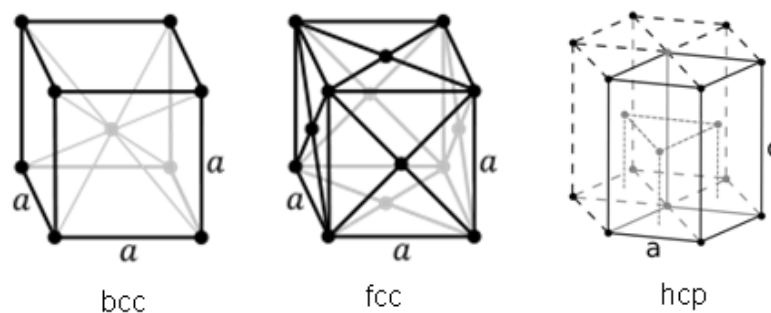
Všechny kovy a jejich slitiny jsou krystalické a jejich prostorové uspořádání, respektive prostorová struktura mřížka je rozdělena do dvou typů krystalografických soustav, kubické a hexagonální. Tyto krystalografické soustavy se u kovů objevují celkem ve třech modifikacích, které jsou:

- kubická (krychlová): a) BCC - prostorově středěná,
b) FCC - plošně středěná,
- hexagonální (šesterečná) - HCP - těsně uspořádaná.

Oproti základnímu uspořádání atomů kubické soustavy, kde je v rozích krychle (8 atomů), má prostorově středěná krychlová mřížka (BCC = body centered cubic) jeden atom uprostřed krychlové struktury (celkem 9 atomů).

Dalším typem krychlové soustavy je plošně středěná krychlová mřížka (FCC = face centered cubic). Ta se vyznačuje tím, že každá stěna krychle má navíc jeden atom uprostřed (celkem 14 atomů).

Hexagonální soustava (HCP = hexagonal close packed) je tvaru šestibokého hranolu, který má v podstavách po 7 atomech a ještě 3 atomy uvnitř hranolu (viz obrázek). [1, 2, 3, 4]



Obr. 1. Kubické a hexagonální soustavy. [5]

Druh krystalové soustavy značně ovlivňuje tvárnost. U kubické, prostorově centrované mřížky atomy tvoří roviny se čtyřmi, až pěti atomy podle toho, zda se jedná o úhlopříčné

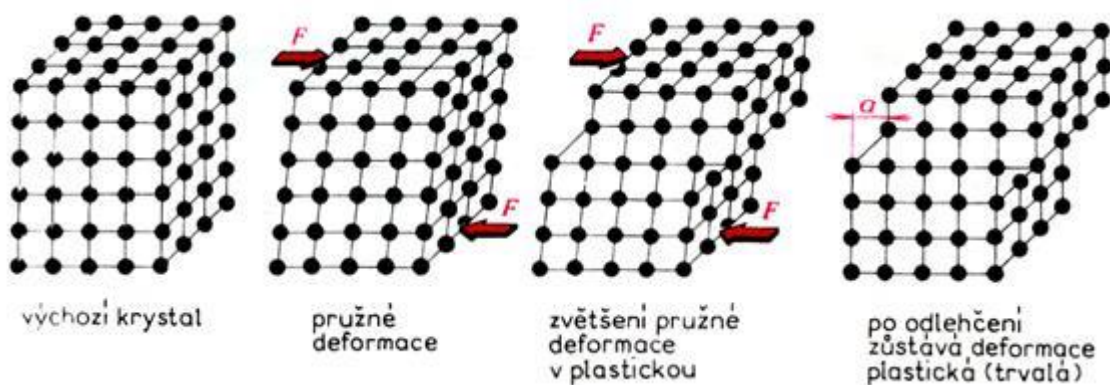
nebo rovnoběžné roviny se stěnou mřížky. Tyto roviny mohou být skluzovými, ale především nastává skluz ve směru úhlopříčném. Kovy s BCC mřížkou mají velkou plastičnost, protože skluz může vzniknout i ve třech rovinách současně. Patří mezi ně železo α a δ , molybden, wolfram, vanadium a jiné.

Díky uspořádání atomů v kubické, plošně středěné mřížce může skluz nastat především v úhlopříčném směru ke stěnám mřížky, které obsahují 6 atomů. Proto mají kovy s FCC mřížkou velkou plastičnost a tím pádem jsou velmi významné pro tváření. Nejběžnější z nich jsou například měď, zlato, stříbro, olovo, hliník a železo v modifikaci γ .

Krystaly s hexagonální mřížkou je skluzu dosaženo pouze v rovinách rovnoběžných se základnou. Proto je malá šance, že zrna budou vhodně orientována, aby nastal skluz a následná plastická deformace. Hrozí také porušení soudružnosti zrn, které mají svislou osu téměř rovnoběžnou nebo kolmou ke směru působící vnější síly. [6]

1.1 Deformace

Deformace je definována jako změna tvaru krystalické mřížky vlivem působení síly, která se na venek projevuje jako změna tvaru deformovaného tělesa, aniž by vznikly nežádoucí vady materiálu, trhliny. Z fyzikálního hlediska se deformace dělí na pružnou a plastickou deformaci.



Obr. 2. Pružná a plastická deformace. [7]

Pružná deformace je taková, že když na těleso přestane působit síla, která deformaci způsobila, vrátí se zpět do původního tvaru. To je způsobeno tím, že velikost napětí nedosahuje takové hodnoty, aby byla dosažena mez kluzu deformovaného materiálu.

Plastická deformace je oproti tomu změnou tvaru, která přetrvává, i když na těleso přestane působit deformační síla. Aby nedošlo ke křehkému lomu materiálu, musí plastická deformace vznikat při určitém napětí a termomechanických podmínkách. Plastickou deformaci vždy doprovází deformace elastická (pružná), která má vliv na konečný tvar, přesnost a také na vnitřní napětí požadovaného výrobku. [1]

1.2 Přemístování vrstev atomu - vznik deformace

Plastickou deformaci je možné vyvolat difuzním pohybem atomů nebo pohybem dislokací. Difuze je pouze doprovodná fáze tváření, protože i přes schopnost vytvořit velkou plastickou deformaci, by byla doba trvání příliš velká.

Podstatou plastické deformace je přemístování skupin atomů vůči sobě. Tento pohyb se opakuje a přidává do děje další skupiny atomů. Způsoby těchto pohybů jsou rozděleny do následujících skupin:

- amorfni způsob posuvu,
- translační a složitý skluz,
- meziblokový průběh plastické deformace,
- dvojčatění,
- mezikrystalový průběh plastických deformací. [6]

1.2.1 Amorfni způsob posuvu

Amorfni způsob posuvu atomů, jak už vyplývá z názvu, nepřemísťuje celé skupiny, ale pouze jednotlivé atomy. Přemístění je prostorově neuspořádané a neusměrněné pohyby atomů, kde není dána posloupnost pohybu z hlediska času. Deformační odpor závisí na deformační rychlosti a hydrostatickém tlaku. [1, 6]

1.2.2 Translační a složitý skluz

Translační skluz tvoří základ plastické deformace a vyskytuje se pouze v počáteční fázi malé plastické deformace. Skupiny atomů se pohybují postupně za sebou, jedná se tedy o periodický pohyb, který si lze představit jako matematickou funkci sinus. Usměrněný pohyb vyvolá další dislokace a tím rozvoj deformace tak, že se celý materiál dostane do plastického stavu.

Složité skluz vzniká z translačního skluzu při rozvíjení plastické deformace. Typické vlastnosti složitěho skluzu je změna krystalografické orientace některých částí, čímž se mění mechanické a fyzikální vlastnosti krystalu. Další z nich je ztráta rovinnosti pásma skluzu způsobena větší deformací. Také vznikají ve skluzových pásmech poruchy mřížky, které značně snižují plastické chování jednotlivých zrn. [6]

1.2.3 Meziblokový průběh plastické deformace

Při plastické deformaci se jednotlivé krystaly rozdrobí na bloky, jejichž hranice se vzájemně pootočí o malý úhel a tak se stanou zdrojem plastické deformace. Rozdrobením krystalů na jednotlivé bloky se vytvoří vhodné podmínky pro velké plastické deformace, v případě uzdravování hranic bloků. Každý tento blok se deformuje jako samostatný krystal a při součtu malých deformací jednotlivých bloků je celková deformace krystalu velká. [1]

1.2.4 Dvojčatění

Tvorba krystalových dvojčat je pro plastickou deformaci významnou, ale vzniká pouze u některých kovů jako měď, zlato, železo atd. Dvojčatěním rozumíme proces, při kterém se nevratně mění tvar krystalu, například při tuhnutí krystalů minerálů a solí, nebo působením vnější síly při určité koncentraci napětí. Pravděpodobnost vzniku narůstá s klesající teplotou a zvyšující rychlostí silového působení. Snadno vznikne při působení při rázu vnější síly. [1,6]

1.2.5 Mezikrystalový průběh plastických deformací

Průběh deformace je možný pouze u polykrystalů, protože její podstatou je vzájemný posuv jednotlivých zrn vůči sobě v místě hranice. Tato deformace nabývá pouze malých hodnot a schopnost další deformace je brzy vyčerpána. To vede k mezikrystalovému zkřehnutí kovu a může nastat porušení soudružnosti kovu. [1,6]

1.3 Vliv velikosti zrna a stejnorodosti struktury na deformaci

Chování kovů při tváření ovlivňuje ve velkém měřítku velikost zrna a strukturní stejnorodost. Čím je zrno menší, tím se jeho deformační odpor zmenšuje a zlepšují se tak plastické vlastnosti. První příznaky deformace jsou patrné na povrchu zrn, které jsou oproti jádru zrna měkčí. Pokud je struktura materiálu stejnorodá, v rámci velikostí a tvarů zrn, plastické vlastnosti jsou lepší než u různě velikých zrn. Totéž platí i o stejnorodosti chemické a mecha-

nické. Přítomnost mechanických vad, jako jsou trhliny či dutiny v materiálu zhoršují tvařitelnost. Chemická nesejnorodost může zvyšovat vnitřní pnutí v materiálu, které je nežádoucí. Jeho odstranění se provádí homogenizačním žíháním. [6]

1.4 Nedokonalosti skutečné mřížky

Ve struktuře materiálu se mohou vyskytovat nedokonalosti, které ji dělají odlišnou oproti pravidelnému geometrickému uspořádání atomů. Důsledkem je změna mechanických i fyzikálních vlastností materiálu. Tyto poruchy se dle geometrického tvaru a uspořádání rozdělují takto:

- bezrozměrné - bodové: a) vakance,
b) intersticiály,
- jednorozměrné - čárové: a) hranová dislokace,
b) šroubová dislokace,
- dvourozměrné - plošné: a) hranice podzrn,
b) hranice zrn,
c) vrstevné chyby. [8]

1.4.1 Bodové poruchy

Bodové poruchy jsou nejjednodušší poruchy krystalové mřížky. Rozdělují se na vakance a intersticiální atomy. Značně ovlivňují fyzikální i mechanické vlastnosti.

Vakantní místa se vyznačují neobsazeným uzlem v krystalové mřížce. Při zvýšené teplotě se může přemisťovat, protože není nijak vázaná.

Opačným případem vakance je intersticiála. Částice s krystalické mřížky se vlivem dodání dodatečné energie vytrhne ze svého místa a přemístí se. Vznikne tak oblast s přebytkem atomu. [8]

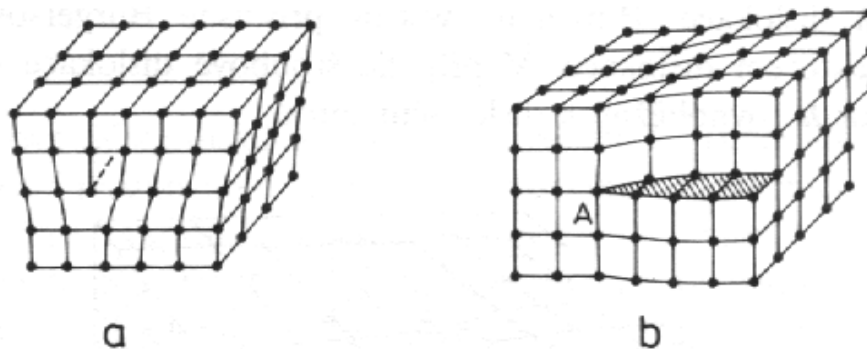
1.4.2 Čárové poruchy

Dislokace je vnitřní porucha krystalických mřížek způsobená vysunutím atomů a porušením pravidelného uspořádání mřížky. Základem této teorie je, že skluz mezi dvěma sousedními atomovými rovinami nezpůsobí pohyb všech atomů jednotlivé roviny současně, ale že se uskutečňuje poruchami atomové mřížky, která je charakteristická určitou pohyblivostí.

Velikost napětí, při kterém je krystal deformovaný viditelnou rychlostí, se nazývá kritické smykové napětí při kluzu. Vlivem působení menšího napětí než kritické smykové napětí při skluzu vzniká pouze pružná (elastická) deformace a ne plastická. Napětí potřebné k pohybu atomů v mřížce určují nejen vlastnosti materiálu, ale také řada vad, které ovlivňují hodnotu skluzového napětí na jejich překonání. Především se jedná o nečistoty, vzájemné protínání dislokací a při polykrystalickém kovu hlavně hranice zrn. [1, 9]

V rámci řešení problematiky tváření kovů jsou jednorozměrné čárové poruchy velmi významné a rozdělují se dvou podskupin. Konkrétně to je:

- hranová dislokace,
- šroubová dislokace.



Obr. 3. a) hranová dislokace, b) šroubová dislokace. [10]

1.4.2.1 Hranová dislokace

Takto vzniklá porucha krystalové mřížky je způsobena tím, že mezi roviny mřížky se vloží rovina další tak, aby zasahovala pouze do určité části, která se nazývá skluzová rovina. Na obrázku je tato hranice, neboli skluzová rovina, naznačena přerušovanou čarou. To bude znamenat, že v místě nad hranicí přerušované čáry bude mít krystalická mřížka o jeden atom navíc na každý řádek. [1]

1.4.2.2 Šroubová dislokace

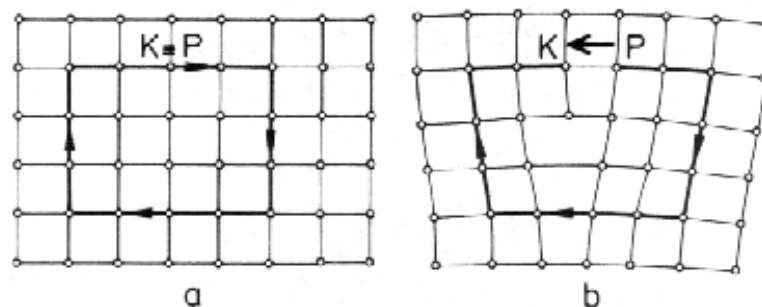
Šroubová dislokace je podobná hranové dislokaci. Podobně jako v jejím případě je krystalická mřížka rozdělena skluzovou rovinou. Jedna z takto rozdělených částí se posune o jednu meziatomovou vzdálenost a poté se molekuly opět spojí. [10]

1.4.2.3 Burgesova smyčka

Burgesovou smyčkou rozumíme křivku, která spojuje atomy v krystalické mřížce. Burgesova smyčka, která je vedena přes atomy krystalické mřížky, kde se neobjevují žádné dislokace, bude tvořit uzavřený okruh vektorů. V opačném případě, kdy se v mřížce objeví dislokace a stejnou křivku napasujeme na tuto oblast, nebude již uzavřena. V místě od bodu počátku křivky po její konec vznikne vektor, který tyto body spojí. Takový vektor se nazývá Burgesův.

Oblast místa bez poruch mřížky a oblast s dislokací odděluje dislokační čára. V případě, že je Burgesův vektor kolmý na dislokační čáru, jedná se o hranovou dislokaci, v případě že je s ní rovnoběžný a zároveň kolmý na směr pohybu, jde o dislokaci šroubovou.

V reálných případech se hranové a šroubové dislokace kombinují a dislokační čára má různé tvary. Proto je výhodnější charakterizovat dislokace pomocí její hustoty. [1, 7]



Obr. 4. Burgesova smyčka a) bez poruchy, b) s poruchou. [10]

1.4.2.4 Hustota dislokací

V reálném krystalu se nenachází jen jedna dislokace, ale mnohem více. Hustotu dislokací je nutné znát z důvodu určení vlastností materiálu pro jeho další zpracování. V případě, že tváříme kovové materiály, hodnota hustoty dislokací roste, tím i deformační odpor a dochází ke zpevnování. To je v některých případech nežádoucí, jako je právě tváření. V jiných situacích, kdy je naopak potřeba pevnost zvýšit, lze použít metodu ozařování proudem elektronů. Princip metody spočívá ve vyrážení některých atomů z rovnovážných poloh a vytvoření defektů jako jsou vakance, či intersticiální atomy.

Hustota dislokací je celková délka dislokačních čar v určitém objemu. Tento vztah je dán vzorcem:

$$\rho = \frac{L}{V} \quad (1)$$

kde: ρ - hustota dislokací [cm^{-2}],

V - objem krystalu [cm^3],

L - délka dislokačních čar [cm].

Ve skutečnosti je hustota pouze informační veličinou pro představu dislokací. Struktura dislokací je dána velikostí a směry Burgesových vektorů a charakteristikou dislokačních čar. Tvářením kovu se počet dislokací zvyšuje a tím i odpor deformování. Dislokace můžeme využít i při zvyšování pevnosti materiálů, kdy proudem elektronů zvýšíme počet poruch. Princip je takový, že některé atomy se z mřížky dostanou z rovnovážné polohy a tím vyvolají její poruchy. Je tedy patrné, že teorie dislokací se může uplatnit i při vývoji vysokopevnostních ocelí. [1, 8, 10]

1.4.2.5 Vznik dislokací

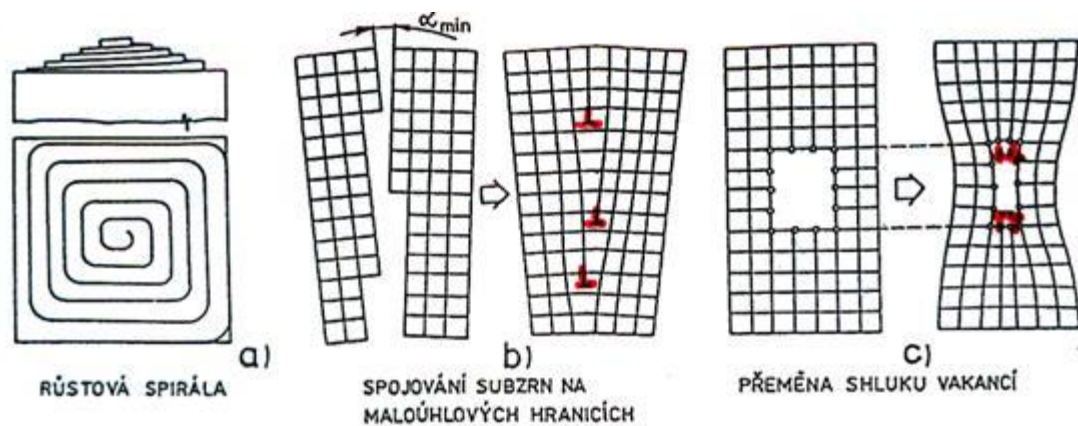
Při deformaci se dislokace dostanou skluzem až na hranici zrn krystalu, ale proces deformace nepřestane. Důvodem je vznik nových dislokací v průběhu deformace. Dislokace vznikají několika způsoby:

- krystalizací kovů,
- při růstu zrn do bloků,
- při přeměně vakancí na dislokace,
- z Frankových-Readových zdrojů,
- v oblasti vysokých napětí v případě vzniku ostrých trhlin.

Krystalizace kovů dokazuje existenci dislokace hlavně díky růstové spirále, kterou je možné pozorovat na povrchu krystalů. Při uspořádání stavebních elementů do tvaru spirály vzniká šroubová dislokace, při které bude vždy na povrchu krystalu výstupek, na něm se intenzivně budou ukládat atomy. Přidání dalších atomů do spirály umožní nepřetržité narůstání dalších vrstev atomů na plochu krystalu.

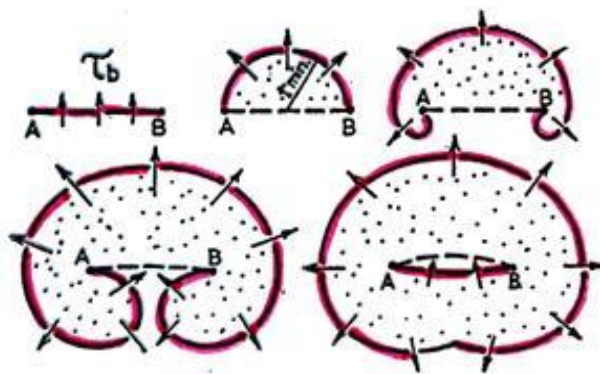
Při růstu zrn do bloků může vzniknout hranová i šroubová dislokace. Z obr. 4 b) vyplývá, že dislokace vzniká na hranici mezi jednotlivými subzrny.

Vlivem zvyšování koncentrace vakancí, současně roste riziko vzniku dislokace. Takové koncentrace vakancí jsou zapříčiněny růstem teploty a tím se i podporuje následná tvorba jejich shluků. [1]



Obr. 5. Vznik dislokací a) krystalizací kovů, b) růstem zrn do bloků, c) přeměnou vakancí na dislokaci. [7]

Frank-Readův zdroj dislokací popisuje jejich vznik při plastické deformaci. V průběhu plastické deformace hustota dislokací roste a postupují až na povrch materiálu. Průběh takto vzniklých nových dislokací popisuje obr. 5. První stádium přímočaré dislokace se působením smykového napětí začne ohýbat a následně roste délka dislokační křivky a její poloměr křivosti. V poslední fázi se dislokační čára rozdělí na dvě části. Vnější část je uzavřená a postupuje k povrchu krystalu nebo zrna, čímž uskuteční elementární děj plastické deformace. Vnitřní část se opět dostane do původní polohy a znovu tak může zopakovat ten jistý popsany děj. [1, 7]



Obr. 6. Frank-Readův zdroj vzniku dislokace. [7]

1.4.2.6 Pohyb dislokací

Pohyb dislokací je možný skluzem nebo difuzí. Skluzový pohyb uskutečňuje napětí v krystalické mřížce v rovině skluzu dané směrem Burgeseho vektoru a dislokační čáry. Vzniká nepatrnými pohyby atomů v mřížce tak, že se nemění jejich konfigurace (v průběhu pohybu

různých atomů). Pohybem dislokací se v oblasti skluzové roviny vytváří určitá konfigurace atomů. Rychlost pohybu dislokací závisí hlavně na velikosti působící síly, na typu krystalické mřížky, na vazbách mezi atomy a také na množství ostatních poruch, které se ve mřížce nachází. Nejvyšší možná rychlost pohybu dislokací může být rovna rychlosti šíření zvuku v krystalu.

Při pohybu dislokace difuzí jde o pomalý pohyb intersticiálních atomů nebo vakancí. Z oblasti přebytku atomů se intersticiální atom z hrany roviny odpoutá a přesune se do místa naopak s nedostatkem atomů, vakance. V obou případech se dislokace pohybuje ve směru přebytečné roviny kolmo na skluzovou rovinu. Reálná mřížka ale vykazuje mnoho poruch, které jim kladou odpor při přemísťování. Shluky atomů v okolí dislokace způsobují zbrzdění pohybu a jsou jednou z příčin ostrého přechodu (resp. poklesu deformační křivky na mezi skluzu). Ostrý přechod zmizí odstraněním intersticiálních prvků kyslíku a dusíku z materiálu, které způsobují jeho stárnutí. Pohyb dislokací je dále brzděn na hranici zrn, kde nahromaděné dislokace omezují jejich posun do doby, dokud koncentrace napětí spolu s působícím napětím nedosáhnou meze skluzu vedlejšího zrna. [1, 11]

1.4.3 Plošné poruchy

Plošné poruchy jsou poruchy složitější, z důvodu zasažení větší části oblasti ve struktuře. Jedná se o vady vrstvených chyb, hranici podzrn a zrn.

Porucha vrstvených chyb se projevuje porušením pravidelného sledu poloh rovin krystalové struktury. V neporušené struktuře se roviny na sebe vrství v určitém pořadí a jsou na sebe vázány vzájemnými silami. Tato plošná chyba dokáže ovlivnit pohyby dislokací při plastické deformaci kovů.

Hranice podzrn tvoří rozmezí mezi oblastmi, jejichž krystalové mřížky se v rámci orientace liší jen málo. Z toho důvodu jsou na hranici nahromaděny hranové dislokace mezi sousedícími podzrny.

Hranice zrn jsou přechody mezi oblastmi, kde jejich orientace liší více než u hranic podzrn. Je tedy hranicí s velkým úhlem, která se vyznačuje vysokou koncentrací poruch, ať už bodových, nebo čárových. Jelikož se jedná o výrazné porušení struktury krystalové mřížky, značně ovlivňuje vlastnosti kovu. Jednou z nich je koroze, která přednostně probíhá na hranici zrn. Dokáže také zamezit pohybu dislokací, což je základním mechanismem při plastické deformaci. [8]

2 TVÁŘENÍ

Tváření je technologický proces, při kterém měníme tvar výchozího polotovaru na požadovaný tvar působením sil tak, aniž by byl materiál odebírán. Cílem přetvoření polotovaru je požadavek na tvar a ve většině případů i zlepšení mechanicko-fyzikálních vlastností.

Technologie tváření je rozdělena podle toho, který stav napjatosti převládá. V případě objemového tváření dochází ke změně tvaru v celém objemu a dochází tak i k značné změně průřezu oproti původnímu stavu.

Druhý stav nastává s převahou rovinné napjatosti, jedná se tedy o tváření plošné. Je definováno jako proces, při kterém se dosahuje požadovaná změna tvaru bez změny tloušťky průřezu výchozího materiálu, nejčastěji plechu. Dělí se do několika oblastí:

- ohýbání,
- tažení,
- stříhání. [12]

Na začátek je třeba popsat některé pojmy jako pružná deformační schopnost, plastičnost a také technologická tvařitelnost.

Pružná deformační schopnost popisuje účinek pružných, plastických deformací na těleso. U kovových materiálů jsou charakterizovány příslušnými moduly, mezi které patří modul pružnosti v tahu a tlaku E , modul ve smyku G a Poissonova konstanta m , která je podílem poměrného prodloužení k jejímu příčnému zkrácení.

Plastičnost se rozumí schopnost vytvoření trvalé změny tvaru tělesa za působení vnějších sil. Způsobuje tak změnu vnitřní stavby materiálu a tím nastanou poruchy krystalografické struktury. Těleso, které změni svůj tvar a následně si změnu udrží, i když vnější síly dále nepůsobí, jedná se o plastické těleso. Pokud se vlivem působení vnějších sil poruší soudružnost látky bez výrazných plastických deformací, jedná se o vlastnost zvanou křehkost. Zda nastane křehkost či plastičnost závisí na stavu napjatosti, teplotě a na rychlosti deformování.

Technologická tvařitelnost je definována jako schopnost využít velké plastické deformace, aniž by byla porušena soudružnost materiálu. Jinými slovy se od tvářeného kovu za daných podmínek očekávají vlastnosti, aby bylo možné vytvořit tvarové a rozměrové změny materiálu bez porušení jeho soudružnosti. [6]

Deformační odpor σ_D je definován jako součet přirozeného deformačního odporu a pasivních odporů, z nichž nejvýznamnější je tření. Přirozený deformační odpor σ_p závisí na pevnosti kovu a na faktorech, které pevnost ovlivňují. Jde o velikost deformace, její rychlost a teplotu tvářeného materiálu.

Pro dosažení deformace je nutno tento odpor překonat. Jeho konkrétní hodnota se spočítá dle vzorce:

$$\sigma_D = \sigma_p \cdot m \cdot w \cdot z \cdot v \quad (2)$$

kde m je vliv tření a geometrie vzorku [-],

w - odlišnost poměrné rychlosti deformace [-],

z - vliv nerovnoměrného rozložení napětí [-],

v - změna stavu napjatosti [-]. [12]

Stav napjatosti vyjadřuje mechanické podmínky plastické deformace. Vyjadřují ho tři normálová napětí, které působí jednotlivě v osách x , y a z . Jejich velikosti nabývají kladných, záporných nebo nulových hodnot. Zároveň pro ně platí zákon zachování objemu, který udává, že součet všech složek hlavních poměrných deformací v tvářeném materiálu je roven nule, jinými slovy řečeno, že jedna z hlavních deformací se rovná součtu zbývajícím dvou. [12]

2.1 Hodnocení tvařitelnosti

Z definice technologické tvařitelnosti je patrná důležitost dodržování určitých požadavků na proces i samotný materiál. Proto je nutné se nejprve zaměřit na plastické vlastnosti materiálu při různých stavech napjatosti a deformační rychlosti a také určit vhodnou teplotu a rychlost tváření, při které má tvářený materiál co nejmenší deformační odpor.

Nalezení vhodných podmínek tvařitelnosti je obtížné z důvodu náročného posouzení plastičnosti materiálu za různých podmínek. Proto se v praxi využívá technologických zkoušek, které popisují pravděpodobnost chování při tváření. Tyto zkoušky nejsou zcela objektivní, protože se při nich technologie pouze napodobují. Odlišné geometrické poměry, rozměry a tvary použitého vzorku způsobují jinou velikost napjatosti a tím i plastičnost.

Mezi nejrozšířenější metody hodnocení technologické tvařitelnosti patří mechanické zkoušky, které popisují vlastnosti materiálu při daných podmínkách tváření. Mezi jednotlivé

metody patří zkouška tahem, krutem, ohybem a tlakem. V rámci řešení problematiky ohýbání plechů je významná hlavně zkouška krutem a ohybem. [6]

2.1.1 Zkouška krutem

Tato zkouška se provádí za zvýšené teploty a většinou je k zjištění tvařitelnosti použita pouze tato. Princip spočívá ve zkrucování zkušební tyče a vyhodnocení se provádí pomocí počtu cyklů, které vzorek vydržel. Vzorek bývá tyč o průměru 6 až 15,9 mm a teplotní rozmezí je od 800 do 1350°C. Výsledky zkoušky udávají poměrně přesnou představu o plastických vlastnostech při tváření. [6]

2.1.2 Zkouška ohybem

U zkoušky ohybem se používají dvě metody, statická a dynamická. U statické má síla klidný průběh, oproti tomu dynamická využívá rázového účinku síly. Oba typy zkoušky určují plastické vlastnosti z maximální hodnoty úhlu ohybu, kterého bylo dosaženo až do vzniku trhliny. Jednou z nejpoužívanějších je vrubová rázová zkouška, pomocí které se posuzuje vzhled místa lomu na vzorku a tím i plastičnost materiálu. [6]

2.2 Faktory ovlivňující tváření

2.2.1 Materiál

Důležitým faktorem pro správný výsledek tváření je vhodná volba materiálu. Nejvhodnější jsou chemicky čisté kovy, ty se ale z důvodu požadavků na vlastnosti materiálu nepoužívají. Nahrazují je slitiny různých kovů, u kterých je třeba omezit množství příměsí zhoršující jejich tvařitelnost. Také přítomnost dalších fází ve struktuře působí na tváření negativně. Proto je třeba jejich množství snížit na co nejmenší hodnotu. Plastičnost ovlivňuje i stejnorodost struktury, co se týká velikosti zrn. Struktura se stejně velkými zrny se vyznačuje lepší plastičností než ta se zrny různě velkými. Nepříznivé vměstky a chemická nestejnoro- dost zvyšují vnitřní pnutí a to se odstraňuje v některých případech žíháním.

Jak už bylo zmíněno v kapitole 1, kovy s FCC mřížkou vykazují velkou plastičnost a jsou pro tváření vhodné. Jedná se například o měď, zlato, stříbro, olovo, hliník a železo v modifikaci γ . [6]

2.2.2 Nástroj

Dle zvolené tvářecí technologie a podmínek technologického procesu je třeba vhodně zvolit tvářecí nástroj. Materiál, ze kterého je nástroj zhotoven, závisí na druhu tvářecí technologie. Požadavkem je, aby si zachoval stálost a nedocházelo k opotřebení, které by mohlo vést například k zdrsnění povrchu a tím k zvýšení tření mezi nástrojem a polotovarem.

Při tváření za tepla je nutné vzít v úvahu, že nástroj musí být schopen odolat vysokým teplotám. Nevhodně zvolený materiál pro jeho výrobu by mohl vést k popraskání povrchové vrstvy nástroje a zanechávat tak stopy na výrobku, které ovlivňují koeficient tření. [6]

2.2.3 Maziva

Maziva mají za úkol zmenšit tření, které klade odpor při tváření. Tím se sníží spotřeba energie, zvýší deformační účinnost a sníží opotřebovávání nástroje a tím se i prodlouží jejich životnost. Maziva se používají při tváření za studena i za tepla.

Vrstva maziva musí mít dostatečnou tloušťku a skládá se z pevně přichycených a volných molekul. Pevné molekuly maziva musí být schopny udržet se na povrchu nástroje i na povrchu tvářeného materiálu a mezi nimi se nachází vrstva volných molekul zvaná jako olejový film, díky které je umožněno kapalinné tření.

Aby bylo mazivo schopné udržet se na daném kovu, je podstatné, aby byly vlastnosti maziva vhodné pro konkrétní materiál. Vhodné vlastnosti mají molekuly mastných kyselin a jejich soli, podobný účinek má i roztavené sklo. Mezi další patří například grafit a strojní olej, které díky dobré snášenlivosti vyšších teplot jsou vhodné i pro tváření za tepla. [6]

2.2.4 Vliv rychlosti deformace

Rychlost deformace je definována jako přírůstek deformace za jednotku času. Je závislá na teplotě deformace. V případě deformování za nízkých teplot, rychlost téměř neovlivňuje průběh deformace. V opačném případě, kdy teplota roste, roste i vliv rychlosti deformace. Jde o první derivaci deformace podle času:

$$\epsilon' = \frac{v_n}{T} \quad (3)$$

Kde v_n je rychlost pohybu tvářecího nástroje [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

T - čas [s]. [12]

2.2.5 Vliv teploty na tváření

Tváření lze rozdělit dle různých kritérií. Jedním z nich je rozdělení technologického procesu tváření podle teploty zpracování. Důvodem jsou vlastnosti kovů a slitin, které se vlivem teploty mění. Při vyšších teplotách má většina z nich lepší plastické vlastnosti a deformační odpor je menší.

Tvářecí teplota se posuzuje podle toho, jaké nároky jsou na mechanické vlastnosti výrobku kladeny. Rozdělují se do tří skupin, výrobky bez zvláštních nároků, s malými nároky a s vysokými nároky na mechanické vlastnosti a velikost zrna. [6, 12]

2.2.5.1 *Tváření oceli za studena*

Tváření za studena se provádí za teplot, které jsou mnohem nižší než teplota rekrystalizace tvářeného materiálu. Obecně musí být teplota nižší nebo rovna 30 % z teploty tavení materiálu. V průběhu tváření dochází k zpevňování materiálu a tvoří se deformační struktura. Zpevněním se zvyšuje mez pevnosti a kluzu a zároveň klesá tažnost. Zpevnění je ale nerovnoměrné. Kromě zpevnění je dalším důsledkem tváření za studena zvýšení odporu proti opakovanému tváření, až úplné vyčerpání schopnosti materiálu pro další plastickou deformaci. Obnovení deformačních schopností je možné pouze ohřátím materiálu, rekrystalizací, kterou získá materiál strukturu jako před tvářením.

Tvářením za studena lze dosáhnout přesně požadovaných rozměrů, avšak je nutností použít velké tvářecí síly a tvárnost materiálu je omezena. Také lze docílit lesklého a hladkého povrchu. [1, 13, 14]

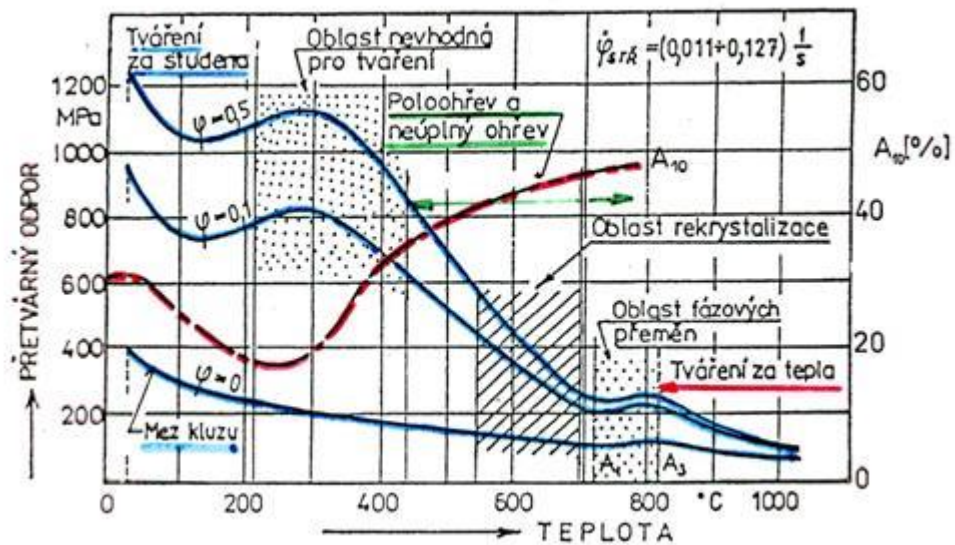
2.2.5.2 *Tváření za částečného ohřevu*

Tváření za částečného ohřevu, neboli poloohřevu, nastává při dané teplotě, která aktivuje pohyb dislokací a snižuje jejich hustotu ve struktuře. Teplota musí být těsně pod teplotou rekrystalizace a proto i v tomto případě, podobně jako u tváření za studena, dochází k deformačnímu zpevnění materiálu. U nízkouhlíkových ocelí se při teplotě 200°C zvýší tažnost přibližně o 20 až 30 % oproti tažnosti v případě tváření za studena. [13, 14]

2.2.5.3 *Tváření oceli za tepla*

Teplota při tváření za tepla musí být vyšší než teplota rekrystalizace. Obecně by měla teplota dosahovat alespoň 70 % z teploty tání tvářeného materiálu.

Díky tomu, že se materiál nezpevňuje, postačí na přetvoření menší síly, v některých případech může být přetvárná síla až desetkrát menší než u tváření za studena. Výhodou je také možnost opětovného obnovení a dynamického zpevnění struktury. Při použití materiálu, který má nějaké vady, jako jsou trhliny a bubliny, se tyto defekty odstraní právě díky teplotě tváření. Naopak nevýhodou jsou náklady spojené s ohřevem materiálu a tepelné namáhání nástroje či stroje. Tváření za tepla také nepříznivě ovlivňuje tvarovou a rozměrovou přesnost a kvalitu povrchu, který je oduhličený. [1, 13, 14]



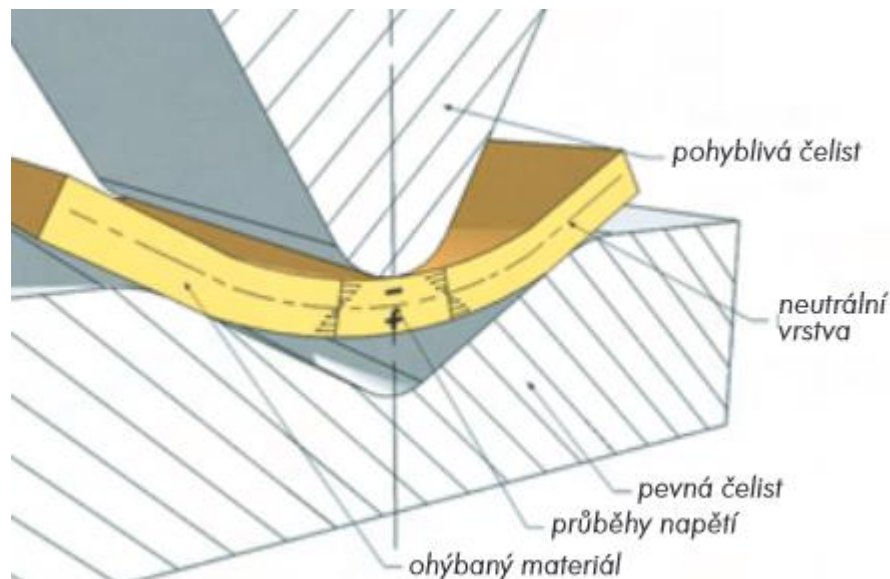
Obr. 7. Způsoby tváření podle teploty. [7]

3 OHÝBÁNÍ

Ohýbání je jednou z metod plošného tváření a jeho podstatou je získat požadovanou změnu tvaru působením vnějších sil. Mezi tyto síly patří ohybová síla a ohybový moment. Ohýbání je trvalá, pružně plastická deformace, jejíž hlavním znakem je změna tvaru osy tvářeného výrobku. Zpravidla se zmenšuje poloměr zakřivení až na hranici jeho minimální hodnoty, v opačném případě, kdy se poloměr zakřivení zvětšuje, dochází k rovnání. Ohyb je vhodnější provádět v příčném směru orientace vláken, protože při ohýbání ve směru orientace vláken je minimální poloměr ohybu větší a tím i vznik vad nastává při větším poloměru, než je možné dosáhnout právě ve směru příčném.

Rozhodující parametr při ohýbání je napětí v tahu. Jejich maximální hodnoty musí být vždy menší, než je hodnota pevnosti v tahu daného materiálu.

Proces lze aplikovat na plechy, trubky a jiné profily. Tento tvářecí proces se ve většině případů realizuje za studena, ale v některých případech, kdy máme materiály tvrdé a křehké, ohýbáme za tepla. Mezistupněm mezi tváření za tepla a za studena je tváření při poloohřevu. [1, 14, 15, 16]



Obr. 8. Ohýbání a průběh napětí. [17]

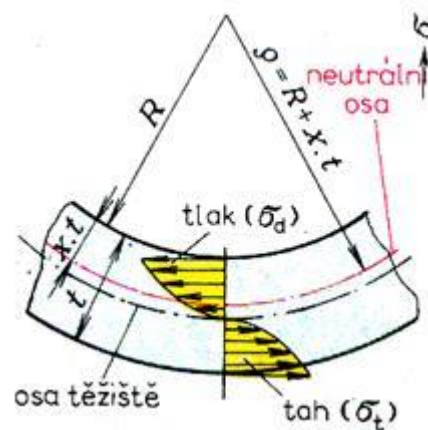
3.1 Neutrální osa

Při ohybu se vrstvy kovu na vnitřní straně zkracují v podélném směru a ve směru příčném se naopak prodlužují a napětí v této vrstvě je tlakové. Naopak na vnější straně ohybu se vrstvy v podélném směru prodlužují a v příčném zkracují a napětí je tahové. Přechod mezi

těmito vrstvami tvoří neutrální vrstva. V tomto místě přechodu nepůsobí na vlákna materiálu žádné napětí, takže velikost neutrální osy je i při deformování stále stejně velká, mění se pouze její tvar a poloha, která se odvíjí od poloměru ohýbání. Na počátku je poloha neutrální osy ve středu průřezu, ale v průběhu tváření se pohybuje ve směru vnitřní strany ohybu. V případě velkého poloměru ohybu se poloha neutrální osy téměř nemění a vychýlení roste s klesajícím poloměrem. Polohu neutrální vrstvy musíme znát, abychom určili rozměry polotovaru. Největší deformace a napětí jsou na povrchu polotovaru a směrem k neutrální ose materiálu se zmenšují.

Neutrální osa tedy ohýbaný materiál rozděluje do 3 pásem:

- pásmo pružných deformací okolo neutrální osy,
- pásmo trvalého prodloužení - na vnější straně ohybu vlivem tahu,
- pásmo trvalého napěchování - na vnitřní straně ohybu uvnitř vlivem tlaku. [1, 14, 15, 18]



Obr. 9. Rozložení napětí a poloha neutrální osy. [18]

Výpočet poloměru zaoblení neutrální osy s ohledem na šířku plechu se vypočítá dle následujícího vztahu:

$$r = \left(R_o + \frac{t}{2} \right) \cdot z_z \cdot z_r \quad (4)$$

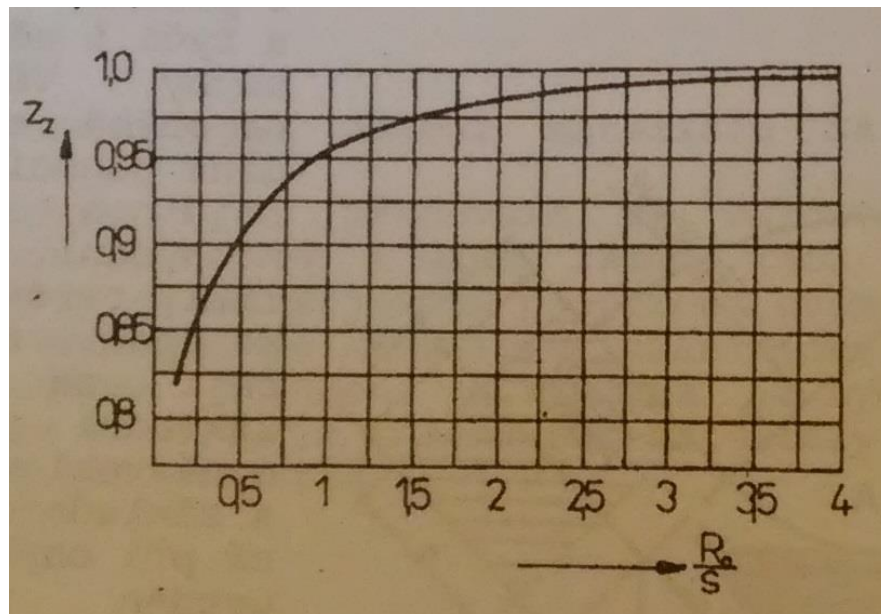
kde t je tloušťka plechu [mm],

R_o - poloměr ohybu [mm],

z_z - součinitel ztenčení [-],

z_r - součinitel rozšíření průřezu [-].

Součinitel ztenčení je dán poměrem tloušťky průřezu po tváření, vůči původnímu rozměru tloušťky materiálu. Závisí na velikosti úhlu ohybu, tření mezi materiálem a nástrojem, tvárnosti materiálu a stupni deformaci. Jeho hodnota se dá určit z příslušného diagramu závislosti R_o/t na z_z , pomocí ní a hodnoty původní tloušťky materiálu je možné dopočítat tloušťku plechu po tvářecím procesu. Na obr. 20 je ukázka diagramu, pro ohýbání měkké oceli pod úhlem 90° . Analogicky součinitel rozšíření je poměr šířky materiálu po tváření vůči původnímu rozměru šířky. [16]



Obr. 10. Příklad diagramu pro určení součinitele ztenčení. [16]

3.2 Maximální a minimální poloměr

Minimální poloměr ohybu R_{min} závisí na anizotropii a plastičnosti materiálu, úhlu ohybu a technologii, kterým je vytvořen, na rozměrech polotovaru, jako je tloušťka a šířka a také na kvalitě povrchu. Zmenšení poloměru pod jeho mez by vedla k porušení materiálu na vnější tahové straně. Hodnotu minimálního poloměru lze určit dle normy ČSN 22 7440 nebo výpočtem podle vztahu:

$$R_{min} = \frac{t \cdot (1 - \varepsilon_C)}{2 \cdot \varepsilon_C} \quad (5)$$

kde t je tloušťka plechu [mm],
 ε_C - mezní prodloužení [-].

Maximální poloměr na vnitřní straně ohybu R_{max} musí být takový, aby došlo v krajních vrstvách ohýbaného průřezu k plastické deformaci. Hodnota maximálního poloměru je dána podmínkou, kterou popisuje vztah:

$$R_{max} = \frac{t}{2} \cdot \left(\frac{E}{Re} - 1 \right) \quad (6)$$

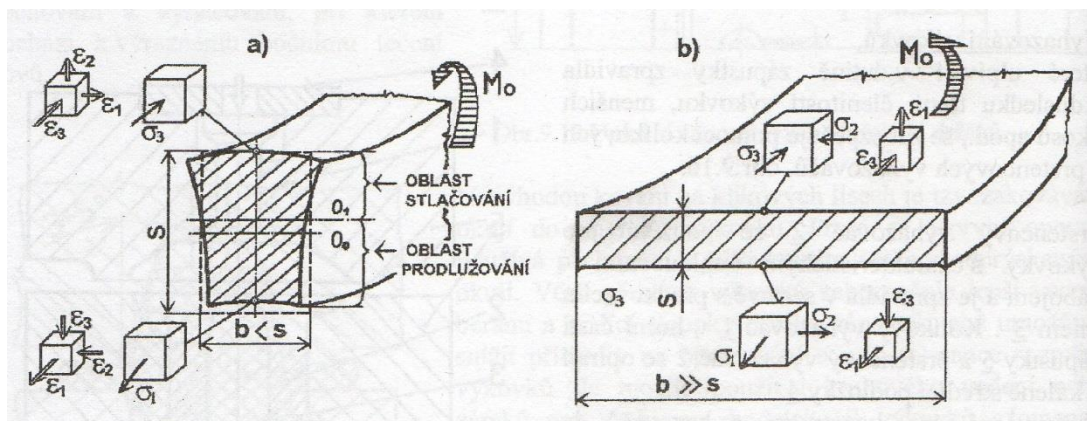
kde t je tloušťka materiálu [mm],

E - modul pružnosti v tahu [MPa],

Re - mez kluzu materiálu [MPa]. [14,16]

3.3 Defekty při ohýbání

Ohýbání je proces, při kterém může nastat mnoho technologických problémů. Jsou způsobeny mnoha faktory a projevují se nepříznivým stavem ohýbaného výrobku na konci procesu. Hovoříme o defektech materiálu, které se nejčastěji objevují v podobě praskání, tvorbě zvlnění, deformaci průřezu a odpružení. Snahou je defektům předcházet různými metodami, jako je správná volba polotovaru, technologického postupu a podmínek ohýbání. [1,18]



Obr. 11. Napjatost a deformace při ohybu tyčí a širokých pásů. [14]

3.3.1 Praskání materiálu

Při zvětšování ohybu vlivem zpevnování materiálu vzrůstá na vnější straně ohybu tahové napětí. Při překročení kritické hodnoty minimálního poloměru ohybu se naruší soudružnost materiálu a na povrchu vnější strany ohybu vzniká trhlinka, která se dále šíří do materiálu. Tento problém je možné vyřešit žiháním, kdy takto upravený materiál snese při stejné tloušťce materiálu menší poloměr ohybu než materiál ohýbaný za studena.

Dalším faktorem na praskání materiálu má vliv orientace vláken ve struktuře. Plechové součástky je třeba ohýbat v kolmém směru orientace vláken. Když není možné umístit hranu

ohybu tímto způsobem, minimální úhel natočení od vláken je 30° . Nerovnosti a trhliny na povrchu tahové části podporují další praskání. Proto by se měli ohýbat tak, aby otřep s příčnými trhlinami byl na straně stlačování. [1]

3.3.2 Tvorba vln

Vzniká při ohýbání předmětů s tenkými stěnami, které se mohou zvlítnout v oblasti působení tlaku. Důvodem defektu je přetvárná práce, která na zkrácení délky stěny musí dosahovat větších hodnot než práce, která vede ke zvlítnutí materiálu.

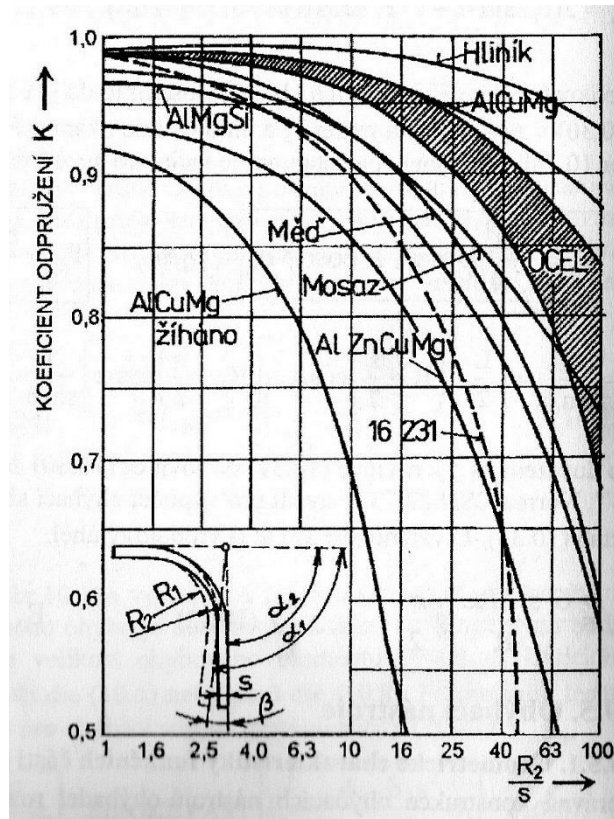
Tvorbě vln při ohybu lze zabránit použitím dodatečné podélné tahové síly, nebo bočním přitlačením materiálu k nástroji.

Druhý způsob se používá při ohýbání ploch profilů na výšku. Tvářený materiál je omezen plochami nástroje ze všech stran. Tento způsob je používán při práci na ohýbačkách, kde se v tvářecích kladkách utváří profil na ohýbání materiálu. [1]

3.3.3 Odpružení

Ohýbané těleso se částečně vrací do původního stavu, jako bylo před přetvořením. Tento stav se nazývá odpružení, které je zapříčiněno oblastí plastické deformace v okolí neutrální osy tvářeného materiálu. Při ohýbání má značný význam a projevuje se jako odchylka, které roste zároveň s rostoucí délkou ramen. Velikost odpružení je ovlivněno druhem materiálu, poloměrem ohybu a druhem použité technologie ohýbání. U součástí s velkým poloměrem ohybu ($R/t > 20$) se neurčuje úhlová odchylka, ale změna poloměru. [16,18]

Velikost odpružení je možné určit z diagramu daného materiálu, nebo výpočtem. Obě metody jsou jen orientační.



Obr. 12. Diagram koeficientu odpružení. [14]

Vztah pro přibližný výpočet odpružení β pro V ohyb:

$$\operatorname{tg} \beta = 0,375 \cdot \frac{l_v}{k \cdot t} \cdot \frac{Re}{E} \quad (7)$$

Vztah pro přibližný výpočet odpružení β pro U ohyb:

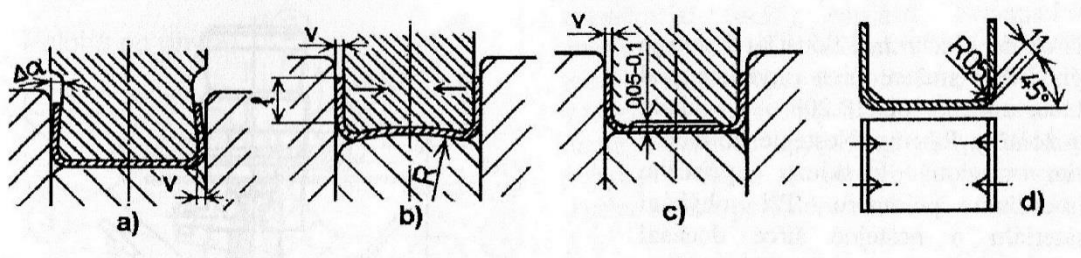
$$\operatorname{tg} \beta = 0,75 \cdot \frac{r_m + r_p + 1,2 \cdot t}{x \cdot t} \cdot \frac{Re}{E} \quad (8)$$

Kde l_v - vzdálenost opěr ohybnice [mm],
 r_m - zaoblení hrany ohybnice [mm],
 r_p - zaoblení hrany ohybníku [mm],
 t - tloušťka plechu [mm],
 x - koeficient polohy neutrální osy[-],
 Re - mez kluzu ohýbaného materiálu [MPa],
 E - modul pružnosti v tahu [MPa]. [16]

Zabránit odpružení lze několika způsoby:

- úhel ohybu se zvětší o úhel odpružení, který získáme výpočtem nebo z diagramu,
- podbroušením ohybníku, obr. 13. a),

- zaoblením ohýbadla či vyhazovače v místě kontaktu s materiálem, obr. 13. b),
- kalibrací, která se provádí zvýšením tlakové síly lisu na konci cyklu, obr. 13. c),
- vytvořením žeber a prolisů, obr. 13. d). [14, 16, 18]



Obr. 13. Metody k odstranění odpružení. [14]

3.4 Výpočet ohybové síly a práce

Protože při zohlednění veškerých faktorů je výpočet ohybové síly a práce velmi složitý a specifický pro jednotlivé technologie a podmínky ohýbání, jsou výpočty uvedené níže zjednodušené.

V praxi se používají normy, které stanovují teoretické údaje na výpočet a konstrukci ohýbaadel. Normy obsahují všeobecné údaje o ohýbání, vzorce diagramy a tabulky potřebné ke konstrukci nástrojů. [1]

3.4.1 Výpočet pro ohyb tvaru V

Polotovar ohýbaný do tvaru V se považuje za nosník na dvou podpěrách ve vzdálenosti l a zatížený silou F_o uprostřed.

$$M = \frac{F_o \cdot l}{4} = W \cdot R_m \cdot (1,3 + 0,8\varepsilon) = (1,3 + 0,8\varepsilon) \cdot \frac{b \cdot t^2}{6} \cdot R_m \quad (9)$$

Po vyjádření síly:

$$F_o = \frac{4 \cdot (1,3 + 0,8\varepsilon) \cdot b \cdot t^2 \cdot R_m}{6} \quad (10)$$

$$W = \frac{b \cdot t^2}{6} \quad (11)$$

kde W je modul odporu průřezu [mm^3],

R_m - pevnost v tahu [MPa],

ε - poměrné prodloužení v tahu [-],

b - šířka materiálu [mm],

t - tloušťka materiálu [mm].

Síla F_0 je třeba zvětšit o tření mezi polotovarem a pracovními částmi ohýbadla. Ta dosahuje hodnoty $1/3 F_0$. Celková síla tedy bude:

$$F = F_0 + 0,3F_0 = 1,3F_0 \quad (12)$$

Pokud současně uvažujeme o kalibraci materiálu, je třeba přičíst sílu F_v :

$$F_v = S \cdot q \quad (13)$$

kde S je plocha vyrovnávaného materiálu [mm^2],
 q - specifický tlak na vyrovnání [MPa].

Pak celková síle se bude rovnat:

$$F_l = 1,3F_0 + F_v \quad (14)$$

Ohýbací práce se vypočítá ze vzorce:

$$A = o \cdot F_l \cdot h \quad (15)$$

kde $o = 1/3$ je opravný koeficient [-],
 F_l - maximální síla při ohýbání [N],
 h - zdvih ohýbadla [mm]. [1]

3.4.2 Výpočet pro ohyb tvaru U

Výpočet ohýbací síly pro tvar U:

$$F = (1 + 7\mu) \cdot \frac{b \cdot t^2 \cdot R_m}{\beta \cdot t} \quad (16)$$

kde b je šířka polotovaru [mm],
 t - tloušťka polotovaru [mm],
 R_m - mez pevnosti v tahu [MPa],
 β - poloměr ohybu [mm],
 μ - součinitel tření [-].

Práce je vypočítána dle vztahu:

$$A = k \cdot F \cdot h \quad (17)$$

kde F je ohýbací síla [N],
 h - zdvih ohýbadla [mm],
 $k = 2/3$ - koeficient průběhu sil [-]. [18]

3.5 Délka polotovaru

Délka rozvinutého polotovaru se určuje ze součtu délek rovných úseků výrobku a délek neutrálních os v místech ohybu o určitém poloměru. V případě tenkých plechů se délka neutrální osy od délky povrchu liší jen nepatrně, ale pokud jde o plechy s větší tloušťkou, je výpočet této délky důležitý pro správnost konečného výpočtu.

Nejprve musíme zjistit x , což vyjadřuje koeficient polohy neutrální osy a je dán poměrem vnitřního poloměru ohybu a tloušťky materiálu (R/t). Poté je možné získat hodnotu poloměru neutrální osy, pro jejíž výpočet je zaveden vztah:

$$r = R + x \cdot t \quad (18)$$

kde R je vnitřní poloměr ohybu [mm],
 x - koeficient polohy neutrální osy [-],
 t - tloušťka plechu [mm]. [14]

Délku ohnutého úseku l_o pak vypočítáme ze vztahu:

$$l_o = \frac{\pi \cdot (180 - \alpha)}{180} \cdot r \quad (19)$$

kde α je úhel ohnutého úseku [°],
 r - poloměr neutrální osy [mm]. [16]

3.6 Druhy technologií při ohýbání

Technologie ohýbání se volí podle různých kritérií. Ohyb se dá vytvořit volně, v pevném nástroji, nebo na zařízeních jako jsou lisy nebo válcové zařízení. Záleží na požadovaném poloměru zakřivení, na druhu použitého stroje či nástroje a také na zvoleném technologickém způsobu ohýbání. [1, 15]

3.6.1 Rozdělení podle poloměru zakřivení

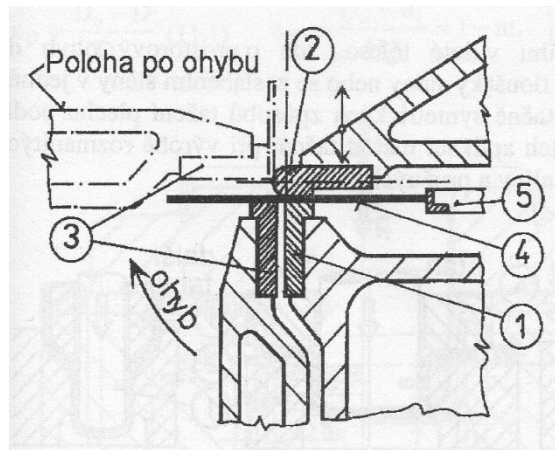
Při ohybu s požadavkem na malý poloměr vzniká v materiálu velké napětí. Tím pádem vzniká velká plastická deformace (ohýbání do úhlu). Naopak u ohybů s velkým poloměrem nejsou deformace a napětí tak velké, hovoříme o ohýbání do oblouku. [18]

3.6.2 Rozdělení podle stroje

Ohýbání lze podle způsobu vytvoření ohybu rozdělit do tří podskupin:

- ohyb na ručních strojích,
- ohyb na lisech,
- ohyb na válcích.

Ohýbání za pomoci ručního stroje se provádí u rozměrnějších (delších) polotovarů. Na pevný rám se upevní pomocí svěrací lišty polotovar. Otočením pohyblivé čelisti se polotovar ohne (navine) okolo zaoblení na svěrací liště. Doraz zajišťuje správnou polohu vytvořeného ohybu od některé z hran ohýbaného polotovaru. [14]



Obr. 14. Ruční ohýbačka. [14]

Pozice částí na obr. 12 jsou: 1 - pevná lišta, 2 - svěrací lišta, 3 - pohyblivé čelisti, 4 - polotovar, 5 - doraz pro polotovar.

Ohyb na lisech se provádí pomocí pohyblivé čelisti, která přímočarým vratným pohybem zajíždí do pevné čelisti. Mezi nimi se nachází tvářený materiál, který po dokončení operace získá tvar podle tvářecího nástroje. Pohyb čelisti je zabezpečen nejčastěji mechanickým nebo hydraulickým lisem. [1]

Při ohýbání na válcích jsou nástrojem samotné válce, které vykonávají otáčivý pohyb a tak vytváří požadovaný tvar.

Rozeznáváme dvě metody ohýbání na válcích, příčné a podélné ohýbání. Pomocí technologie podélného ohýbání lze vytvářet například profily různých tvarů, které díky své konstrukci mají za použití stejného množství materiálu lepší mechanické vlastnosti než rovné

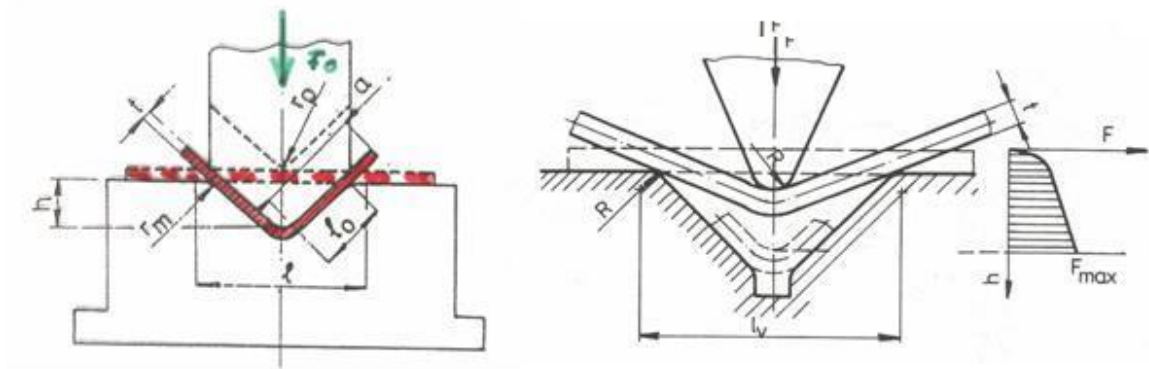
plechy. V praxi je rozšířenější příčné ohýbání, jako je zakružování, rovnání a podobně. [1, 19]

3.6.3 Rozdělení podle způsobu ohýbání

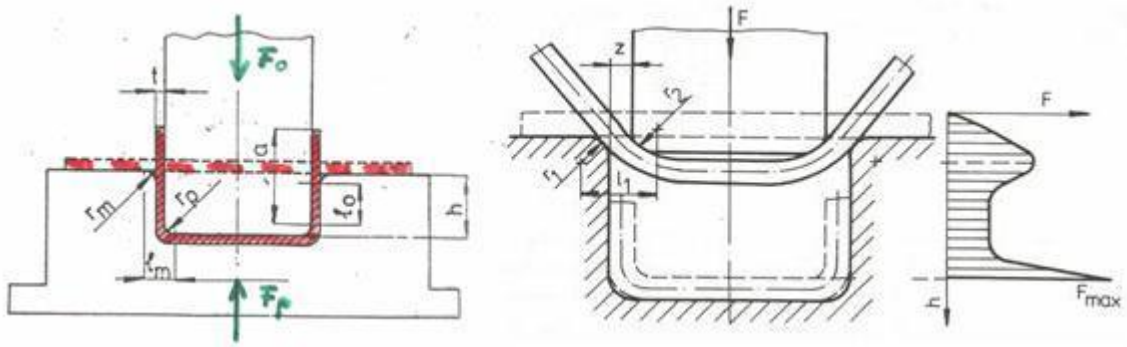
Pomocí určitých nástrojů a strojů lze vytvářet ohyby o různých parametrech. Polotovary určené k tváření ohybem mohou být různé, od plechů různé tloušťky a materiálu, přes trubky konvenčních průřezů až po různě tvarované profily. Výrobků vytvořených ohýbáním je ve strojírenství nepřehledné množství a každý z těchto výrobků si žádá jiný postup práce a zvolenou technologii výroby. Pro popis jednotlivých metod poslouží následující rozdělení. Jedná se o metody:

- prostý ohyb,
- rovnání,
- ohraňování,
- zakružování,
- lemování,
- drápkování,
- obrubování,
- navíjení,
- profilování
- pomocí plastického prostředí.

Prostý ohyb - v případě plošného tváření jde o přetvoření rovinné plochy v plochy, které jsou vůči sobě různě orientované. Jedná se o základní metodu tvorby ohybů, v mnoha případech vytvořených metodou ručního ohýbání. Prostý ohyb se nejčastěji využívá k vytvoření ohybu tvaru U, tvaru V, nebo jejich kombinací. [15, 18]



Obr. 15. Ohyb do tvaru V. [18]



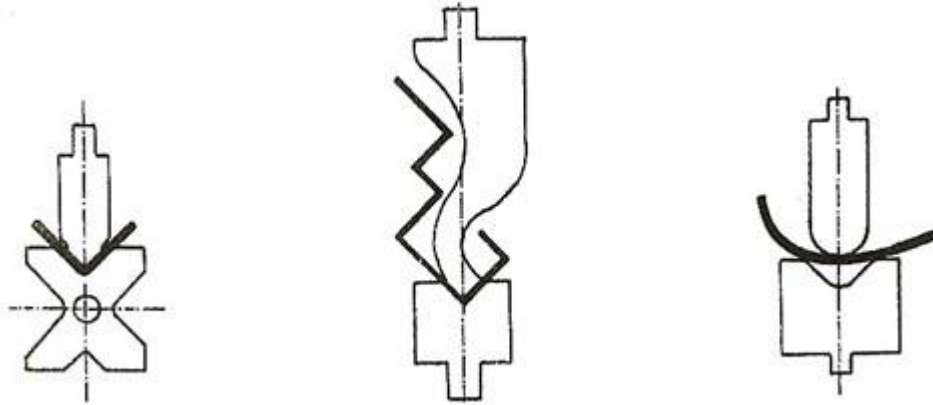
Obr. 16. Ohyb do tvaru U. [18]

Rovnění - ve většině případů slouží tato technologie jako dodatečná, která odstraní nepříznivé deformace, které vznikly při předchozích operacích zpracování. Rozlišuje se rovnání ruční a strojní.

Ruční rovnání se provádí kladivem, kdy jeho úderů okolo vypukliny na tenkém plechu zajistí zánik vypukliny. Tato metoda vyžaduje určité schopnosti a zkušenosti.

U strojního rovnání plechů existují dvě metody. Mezi rovnacími tvarovými válci, nebo v nástrojích na lisech. Na rovnacích válcích se rovnají převážně dlouhé nábalý plechu ve svitcích. Menší výrobky, jako jsou výstřižky z plechů, se rovnají za pomoci lisů. Desky, nebo čelisti lisu mohou být hladké, mnohabodové nebo bradavkové. Tlaky u hladkých čelistí musí dosahovat vyšších hodnot, ale můžeme rovnat i několik kusů najednou, ať už na sobě nebo vedle sebe. Mnohabodové a bradavkové čelisti způsobují rovnoměrné rozložení síly a součástka je tak vyrovnávána v obou směrech. Na povrchu takto vyrovnávané součásti jsou patrné stopy po výstupcích na čelistech. [16, 20]

Ohraňování - je metodou ohýbání na jednoúčelových, tzv. ohraňovacích lisech, jež fungují na stejném principu jako ohýbání v nástroji na běžném lisu. Slouží k vytváření různých profilů z polotovaru, který je v tomto případě pás plechu. Maximální délkový rozměr konečného výrobku je omezen šířkou ohraňovacího lisu, která bývá většinou 3 až 4,5 metru, v některých případech dosahuje 6 až 9 metrů. Na jeden zdvih se udělá jeden ohyb. Složitější profily se ohýbají postupně a mezi jednotlivými ohyby se může s polotovarem různě pohybovat a otáčet dle požadavků na výsledný tvar výrobku. Moderní CNC lisy umožňují nastavit potřebnou sílu pro danou operaci a tím i eliminovat odpružení. [18, 19, 21]



Obr. 17. Ohýbání na ohraňovacím lisu. [19]

Zakružování - je metoda, kdy postupným ohýbáním mezi hladkými válci z rovinného plechu lze vytvořit plochu válcovou, nebo kuželovou. Podle polohy válců rozdělujeme zakružovací stroje na symetrické a asymetrické, podle počtu těchto válců pak na dvou, tří a více-válcové.

V případě použití tvarových kotoučů namísto válců, lze zakružovat i tvarované profily. Pro tuto aplikaci se používají převážně tříválcové nesymetrické zakružovačky. Důvodem je zachování tvaru průřezu profilu, kdy je díky tomuto uspořádání kotoučů pevně zafixován a nemá tendenci se bortit nebo rozevírat. [15, 16]

Lemování - vytvoření lemu na výrobku většinou slouží k zpevnění okraje, zvýšení tuhosti, z důvodu odstranění ostrých hran, nebo slouží jako přípravek na následné vytvoření spoje. Nejjednodušší je tvorba přímého lemu. Oproti tomu, vytvoření vypuklého nebo vydutého lemu doprovází několik problémů.

Vypuklý lem je problematické vytvořit z důvodu přebytku materiálu. Přetvoření vyvolá tlakové napětí, které vede k napěchování přebytečného materiálu a tím i k zvětšení tloušťky plechu v okraji lemu, nebo vytvoření vln. Zvýšením měrného tlaku lze tvorbu vln do určité míry omezit.

Vydutý lem je oproti vypuklému přesně naopak doprovázen nedostatkem materiálu. Při přetvoření vzniklé tahové napětí zapříčiňuje zmenšování tloušťky plechu, které v krajních mezích může zapříčinit trhliny v okraji lemu, kde je tahové napětí největší. [16]

Drápkování - je metodou pro získání spojení plechů tak, že přehnuté kraje plechů, vytvořené většinou lemováním, do sebe zapadnou a společně se ještě ohnou. Tak vytvoří pevný spoj. Drápkování se dá provádět pomocí jednoúčelových strojů, jako jsou speciální lisy. [1, 15]

Obrubování - takto lze dosáhnout vyztužení okraje rovinné či prostorové plochy, které slouží k zlepšení jakosti okraje výrobku. Tato operace se vykonává na speciálně konstruovaných strojích - obrubovačkách. [1]

Navíjení - je technologická operace, při které výchozí polotovár, který je upevněn v nástroji se postupně tlačí na jeho povrch a tak získává tvar shodný s tvarem použitého nástroje. Metoda slouží nejen k ohýbání rovinných částí, ale také k tváření různých profilů. Především pomocí navíjení drátů na trny se vyrábí pružiny. [1]

Profilování - neboli stáčením na lisech, se postupným ohýbáním pásy plechu přetváří na profily o určitém průřezu. Průřez může být otevřeného i uzavřeného tvaru. Jedná se o spojitý proces, kdy pás plechu projíždí mezi tvarovými válci nebo kotouči a utváří tak konečný tvar profilu. Jelikož se jedná o kontinuální proces, délka konečného profilu je omezena pouze délkou pásu plechu. [18]

Plastické prostředí využívá k tváření pryžových materiálů nebo kapaliny. Jedná se o tvářecí metodu, jejíž výhodami jsou univerzálnost a jednoduchost výroby nástroje, které vedou k nízkým nákladům. Mezi nejrozšířenější metody tváření plastickým prostředím patří Hydroform, Marform, Guerin a jiné. [12]

PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem praktické části bakalářské práce bylo zanalyzovat a navrhnout řešení problému praskání materiálu při ohýbání určitých výrobků. Konkrétně to jsou výrobky z plechů vyrobené z oceli o tloušťce 4, 6, 8 a 10 mm.

Bakalářská práce byla zpracována ve firmě MRB Sazovice s.r.o. Proces ohýbání se provádí za pomoci hydraulických ohraňovacích lisů značky Trumpf.

Praskání způsobuje zvýšení nákladů na výrobu kvůli pracnému a časově náročnému způsobu opravování, který spočívá ve vyvaření praskliny v materiálu a následuje broušení. Snahou a hlavním úkolem práce bylo odstranění úkonu svařování prasklin tak, že by k nim vůbec nedocházelo. Proto se práce zaměřuje na několik řešení, které by mohly vést k zefektivnění procesu a tím i urychlení celé výroby určitého produktu. Několik návrhů bylo prakticky vyzkoušeno ať už přímo v provozu firmy, nebo na zařízení mechanických zkoušek v prostorách laboratorního centra fakulty technologické, včetně následného vyhodnocení funkčnosti pro daný účel.

5 ÚDAJE O ZPRACOVÁNÍ EXPERIMENTU

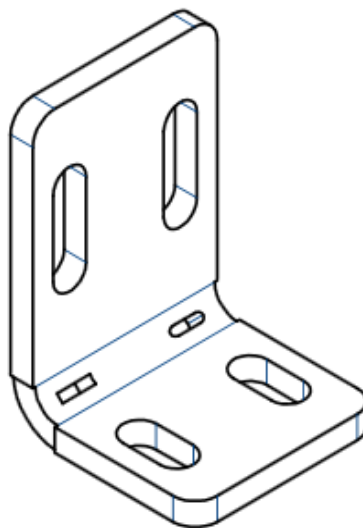
Praktická část byla vypracovávána ve firmě MRB Sazovice s.r.o. Firma existuje od roku 1990 a zabývala se klempířskou a zámečnickou výrobou. Později se také zaměřila na výrobu bezpečnostních, protipožárních dveří. V dalších letech se nabídka rozšířila o zpracování plošných kovových i nekovových materiálů, zejména se jedná o metody dělení materiálu pomocí vodního paprsku, laseru a také zpracování plechů a profilů pomocí svařovací metody MIG a TIG.

V roce 2010 bylo uvedeno do provozu další výrobní středisko v Kroměříži. Jeho specializace je především laserové opracování trubek, jeklů a profilů. Také je zde používána technologie 3D laseru pro opracovávání plechových výlisků, rozměrných profilů a polotovarů.

Nynější provoz dokáže nabídnout kompletní výrobu plechových součástí, jako jsou již zmíněné bezpečnostní dveře s požární odolností, plechové lepené dveře a zárubně všech typů, včetně povrchové úpravy. [22]

5.1 Popis výrobku, jeho parametry a požadavky na konečný produkt

Pro analyzování tvorby defektů při zpracování plechů byl vybrán výrobek z plechu o tloušťce 6 mm, jehož tvar je znázorněn na obrázku (Obr. 18). Jednalo se o dva druhy materiálů, jejichž označení bylo dle technického listu od dodavatele stejné a to S235JRG dle normy DIN EN 10025, ale každý z nich měl jiné hodnoty v procentuálním obsazení prvků a také měl odlišné mechanické vlastnosti.



Obr. 18. Tvar výrobku. [25]

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]	N [%]	Nb [%]	V [%]	Ti [%]	Mo [%]	B [%]
0,1200	0,0090	0,6500	0,0180	0,0140	0,0500	0,0040	0,0020	0,0010	0,0010	0,0070	XXX

Obr. 19. Obsahy prvků prvního materiálu. [25]

Re [MPa]	Rm [MPa]	A80 [%]	A5 [%]
296,0	436,0	XXX	35,3

Obr. 20. Mechanické vlastnosti prvního materiálu. [25]

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]	N [%]	Nb [%]	V [%]	Ti [%]	Mo [%]	B [%]
0,1700	0,0100	0,5250	0,0100	0,0200	0,0320	XXX	XXX	XXX	0,0190	XXX	XXX

Obr. 21. Obsahy prvků druhého materiálu. [25]

Re [MPa]	Rm [MPa]	A80 [%]	A5 [%]
336,0	483,0	XXX	30,8

Obr. 22. Mechanické vlastnosti druhého materiálu. [25]

Polotovary obou materiálů je mořený plech o rozměrech 3000 x 1500 x 6 mm, ošetřen konzervačním olejem Daminol. Tento olej neslouží jako mazivo při tváření, ale pouze jako ochranný přípravek materiálu vůči korozi při skladování. Samotné výrobky se vypalují pomocí laserového zařízení pro pálení obrysu dílu od výrobce Trumpf, typ TruLaser 5030.

Vytvořený požadovaný tvar výrobku se následně ohýbá na ohraňovacím lisu tak, že je vytvořen ohyb o úhlu 90°. Rádus tohoto ohybu je dle technického výkresu 6 mm. V místě ohybu jsou vytvořeny technologické otvory (zářezy) kvůli přerušení materiálu v místě ohybu. Je to dáno tím, že pokud by se v blízkosti osy ohybu nacházel otvor, např. pro šroub nebo otvor se závitem, docházelo by vlivem ohýbání materiálu k deformaci otvoru. Podle domluvy se zákazníkem se tento technologický otvor může nechat bez úprav, nebo se může zavařit a vybrousit tak, aby nebyl viditelný.



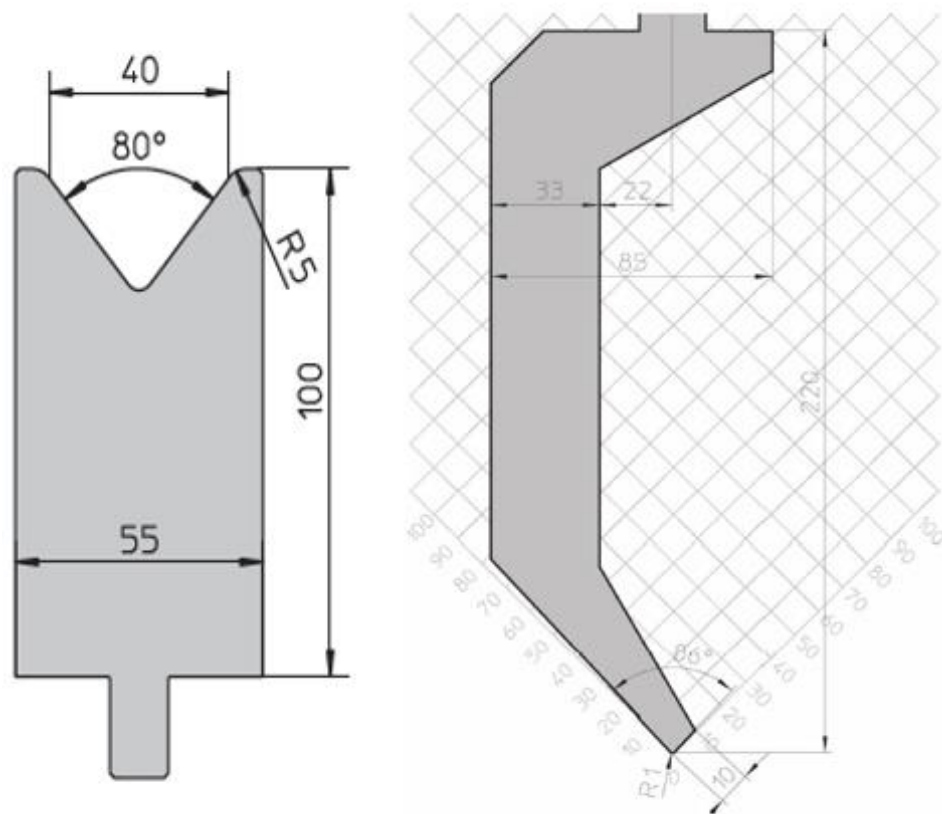
Obr. 23. Deformace otvoru umístěného v těsné blízkosti osy ohybu. [Zdroj: vlastní]

Při ohýbání není použito žádného maziva mezi polotovarem a tvářecími lištami. Konečný výrobek musí splňovat požadavek na svařitelnost a v poslední fázi produkce je broušen a lakován.

5.2 Popis technologických podmínek

Operace ohýbání se provádí ve výrobní hale za běžných teplot na hydraulických ohraňovacích lisech značky TRUMPF. Dle tvaru a velikosti dílců se následně volí konkrétní typ, v případě tohoto dílce nejčastěji Trumpf TruBend 5130. Maximální síla vyvinutá strojem dosahuje 1300 kN a dokáže s ní ohnout polotovar o délce až 3230 mm. Tvářecí, neboli pracovní rychlost konkrétního typu se pohybuje v rozmezí $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ až $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, ve zrychleném chodu $220 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Toto zařízení je obsluhou ovládáno pomocí dotykového ovládacího panelu, který dokáže graficky zobrazit simulaci dané operace.

V případě provedení experimentálního ohýbání vzorků byl k dispozici stroj TRUMPF Trumabend V50. Toto zařízení dokáže vyvinout sílu ohybu o 500 kN a maximální délka polotovaru, který je schopen ohnout, dosahuje 1275 mm. Nástroj použitý při operaci byl zvolen dle rozměrů výrobku a požadovaného tvaru a úhlu ohybu. Jednalo se o spodní lištu typu EV028W40 a horní OW200/S, v obou případech se jednalo o nástroje od stejného výrobce jako je ohraňovací lis.



Obr. 24. Nástroje použité při experimentu. [24]

Sílu ohýbání si stroj dopočítává sám prostřednictvím ovládacího systému na základě tloušťky, délky a šířky polotovaru. Byla nastavena na hodnotu 180 kN. Vlivem odpružení musí pak pracovník u prvních kusů ze série sílu doladit, aby bylo dosaženo přesně požadovaného tvaru u dalších kusů. Rychlost tváření pak byla stanovena dle zkušeností pracovníka na $6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

6 DEFEKTY VZNIKLÉ PO OHYBU

Při ohýbání různých výrobků, především z plechu o tloušťce 6 mm, 8 mm a 10 mm, docházelo k praskání materiálu v místě ohybu na vnější, tahové straně. V dosavadních případech byly tyto defekty vyhodnocovány kontrolou, která shledala výrobky nevyhovujícími a již neopravitelnými, nebo jako nevyhovující ale opravitelné. Opravení defektu spočívalo ve vyvaření prasklin a následném broušení. To samozřejmě prodražuje výrobu tím, že je nutné provádět další operace a zároveň zvyšuje dobu výroby.



Obr. 25. Defekty na různých výrobcích. [25]

Aby tyto vady nevznikaly a tím pádem se nemusely opravovat, bylo navrženo několik opatření, které by mohly napomoci s řešením problému. Některé z nich byly posuzovány i na základě experimentálního měření.

6.1 Návrhy na odstranění praskání

V první řadě bylo potřebné stanovit veškeré vlastnosti materiálu, tvářecího procesu a podmínek, při kterých se tváření provádělo. Veškeré náležitosti byly uvedeny v předchozích kapitolách, takže bylo možné určit nejpravděpodobnější příčiny praskání materiálu při vytváření ohybu. Následujícími návrhy na změnu podmínek při ohýbání by se měly tyto defekty úplně odstranit, nebo alespoň snížit jejich koncentraci v materiálu. Jelikož byly některé z těchto návrhů řešeny i experimentálně, jsou popsány v následujících kapitolách. Jednalo se o tato možná řešení problému:

- dodržení minimálního poloměru ohybu,
- materiálovou vhodnost,
- orientaci vláken ve struktuře materiálu,
- úpravu tvaru technologického výřezu v místě ohybu,
- možnost použití tvářecích maziv.



Obr. 26. Připravené tvary vzorků pro experiment. [Zdroj: vlastní]

Na experiment byly firmou MRB Sazovice s.r.o. poskytnuty veškeré potřebné vzorky. Přes 70 zkušebních výrobků pro analýzu chování materiálu při ohýbání při různě definovaných podmínkách, jako je druh materiálu, orientace vláken struktury, použití maziv a úprava tvaru výřezu v místě ohybu. Dalších 40 zkušebních vzorků se testovalo na zařízení mechanických zkoušek pro zjištění vlastností materiálů v tahu.

6.2 Stanovení minimálního poloměru ohybu

V první řadě bylo potřeba ověřit, zda je dle teorie tváření (ohýbání) možné takto specifikovaný ohyb vytvořit pro danou tloušťku plechu. Proto byl vypočítán minimální poloměr ohybu pro tloušťku polotovaru 6 mm, který způsoboval největší problémy při ohýbání a pro který známe poloměr ohybu z výkresu, který byl k dispozici.

Výpočet minimálního poloměru ohybu dle vztahu (5),

kde tloušťka plechu $t = 6$ mm,

mezní prodloužení materiálu (pro %C = 0,12) $\varepsilon_{C1} = 0,353$ je:

$$R_{min} = \frac{t \cdot (1 - \varepsilon_C)}{2 \cdot \varepsilon_C} = \frac{6 \cdot (1 - 0,353)}{2 \cdot 0,353} = 5,5 \text{ mm} \quad (5)$$

mezní prodloužení materiálu (pro %C = 0,17) $\varepsilon_{C2} = 0,308$ pak:

$$R_{min} = \frac{t \cdot (1 - \varepsilon_C)}{2 \cdot \varepsilon_C} = \frac{6 \cdot (1 - 0,308)}{2 \cdot 0,308} = 6,74 \text{ mm} \quad (5)$$

Jelikož poloměr ohybu dle výkresu výrobku byl roven 6 mm, v případě ohýbaného dílce z materiálu o obsahu uhlíku 0,12% byla tato podmínka dle výpočtu dodržena. Tudiž faktor minimálního poloměru může být dále posuzován jako neovlivňující.

V případě materiálu s obsahem uhlíku 0,17% vyšel dle výpočtu poloměr 6,74 mm, což konstrukce výrobku neumožňuje a jde tedy o možnou příčinu tvoření trhlin. Možným řešením problému je v případě tohoto materiálu zvětšení poloměru ohybu nad hranici minimálního, což znamená změnu nástrojů ohraňovacího lisu. Změnu nástroje nebylo možné vyzkoušet, protože by musel být zakoupen. Z toho důvodu není navržené řešení možné prakticky ověřit. V případě jeho zakoupení by nastal problém s manipulací s nástroji, kdy by musely být vyměňovány, což by vedlo k prodlužování a tím i zároveň k prodražování výroby.

6.3 Vhodnost materiálu

Dalším podstatně ovlivňujícím faktorem pro ohýbání je zvolený materiál. Pokud nevyhovuje daným požadavkům, jeho záměna za jiný pro získání lepších výsledků během tváření je nevyhnutelná. V našem případě se jednalo o materiál S235JRG dle DIN EN 10025. Problémem bylo, že s tímto označením byli k dispozici dva zcela odlišné materiály, co se týká obsahů příměsových prvků i mechanických vlastností. Jejich parametry odpovídají hodnotám na obrázcích Obr. 18. a Obr. 20.

Jak už vyplývá z tabulky hodnot obsahů prvků, materiál s vyšším obsahem uhlíku bude mít horší vlastnosti při tváření. Důsledkem zvyšování obsahu uhlíku je rostoucí materiálová pevnost a tvrdost a naopak klesající jeho tvárnost a houževnatost.

Pro komplexnější posouzení byla prakticky provedena mechanická zkouška tahem pro oba materiály. Druhým krokem bylo vytvořit skutečné dílce a ověřit jejich vhodnost přímo ve výrobě, kde se opět oba materiály porovnávali po ohnutí do požadovaného tvaru výrobku na ohýbacím lisu.

6.3.1 Zkouška tahem

Aby bylo možné lépe stanovit chování materiálu při tváření, byla provedena zkouška tahem. Zkoušku tahem popisuje technická norma ČSN EN ISO 6892-1 (Kovové materiály - zkouška tahem - část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty).

Dle normy byly zhotoveny zkušební vzorky o rozměrech předepsaných normou v počtu 20 kusů pro každý z obou materiálů (10 vzorků pro orientaci vláken rovnoběžných se silou působení trhacího zařízení, 10 vzorků pro orientaci kolmou k síle působení trhacího zařízení). Rozměry zkoušených vzorků byly zvoleny tak, aby byl rozměr v souladu s normou a zároveň aby trhací zařízení dokázalo zkušební tělísko přetrhnout.

Výpočet rozměrů:

dáno: $F_{\max 1} = 20 \text{ kN}$,

$F_{\max 2} = 50 \text{ kN}$,

$R_{m1} = 436 \text{ MPa}$,

$R_{m2} = 483 \text{ MPa}$,

$k = 5,65$

(hodnoty R_{m1} a R_{m2} jsou dány údaji z technického listu materiálu).

Výpočet průřezu:

$$S_{1max} \leq \frac{F_{max1}}{R_m} = \frac{20\,000}{436} \leq 45,87 \text{ mm}^2 \quad (20)$$

$$S_{2max} \leq \frac{F_{max2}}{R_m} = \frac{50\,000}{483} \leq 103,52 \text{ mm}^2$$

V případě materiálu s obsahem uhlíku 0,12% byl zvolen obdélníkový průřez o rozměrech 3 x 10 mm (průřez $S_1 = 30 \text{ mm}^2$), který splňuje podmínku maximální velikosti průřezu. Pro tento materiál bylo zvoleno dle velikosti průřezu zařízení značky Zwick Roell, typ Materialprüfung 1456. Jedná se o univerzální zařízení pro mechanické zkoušky materiálů. Největší síla, kterou konkrétní stroj dokáže vyvinout je 20 000 N.

Materiál s obsahem uhlíku 0,17% měl opět průřez tvaru obdélníku, ale o rozměrech 6 x 10 mm (průřez $S_2 = 60 \text{ mm}^2$). Jiná tloušťka materiálu byla dána polotovarem, který byl k dispozici. Kvůli většímu průřezu bylo zvoleno zkušební zařízení značky Shimadzu, označení AG-IC, které dosahuje hodnoty síly 50 000 N, aby mohly být zachovány veškeré rozměry zkušební vzorku (mimo tloušťku).

Další rozměry zkušebních vzorků se v závislosti na druhu materiálu již nelišily, protože byly voleny tak, aby vyhovovali rozměrům dle normy a zároveň aby jejich rozměry pro oba materiály byly totožné kvůli jednodušší výrobě.

$$L_{o1} \geq k \cdot \sqrt{S_1} = 5,65 \cdot \sqrt{30} = 31 \text{ mm} \quad (21)$$

$$L_{o2} \geq k \cdot \sqrt{S_2} = 5,65 \cdot \sqrt{60} = 44 \text{ mm}$$

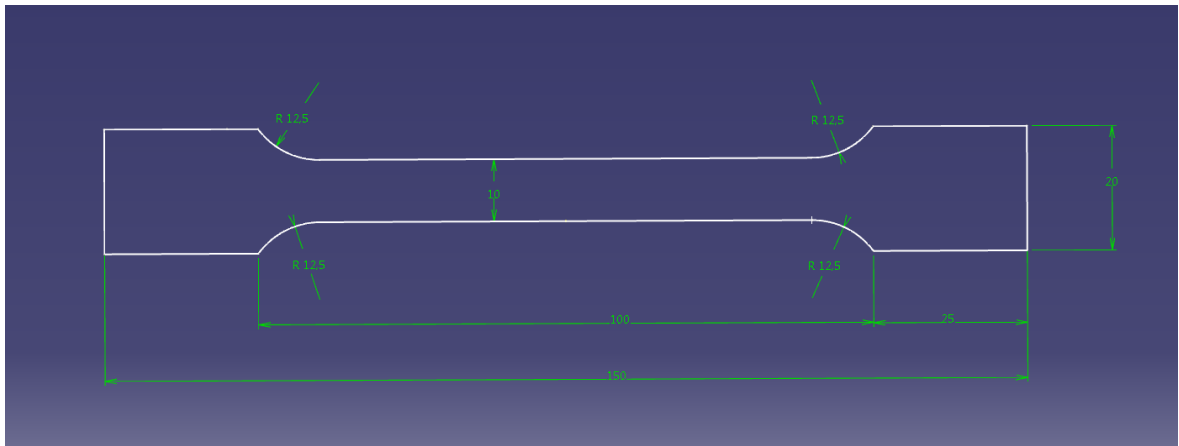
Zvoleno $L_{o1} = L_{o2} = 50 \text{ mm}$

$$L_{c1} \geq L_{o1} + 2 \cdot \sqrt{S_1} = 50 + 2 \cdot \sqrt{30} = 61 \text{ mm} \quad (22)$$

$$L_{c2} \geq L_{o2} + 2 \cdot \sqrt{S_2} = 50 + 2 \cdot \sqrt{60} = 66 \text{ mm}$$

Zvolen rozměr $L_{c1} = L_{c2} = 100 \text{ mm}$

Rádus mezi zkušební částí a částí pro uchycení ve stroji byl zvolen $r = 12,5 \text{ mm}$. Tyto a další rozměry jsou znázorněny na obrázku Obr. 27.



Obr. 27. Tvar zkušebního tělesa o tloušťce 3 mm a 6 mm. [Zdroj: vlastní]

6.3.1.1 Průběh tahové zkoušky

Po zadání veškerých známých parametrů do softwaru zkušebních zařízení byly připravené tělíska postupně upínány mezi čelisti. Výsledky získaných hodnot pro dané materiály jsou uvedeny níže v tabulkách.

Naměřená data pro materiál s obsahem uhlíku 0,12%

Tab. 1. Hodnoty pro materiál s %C = 0,12 a vlákny rovnoběžnými s vektorem síly. [Zdroj: vlastní]

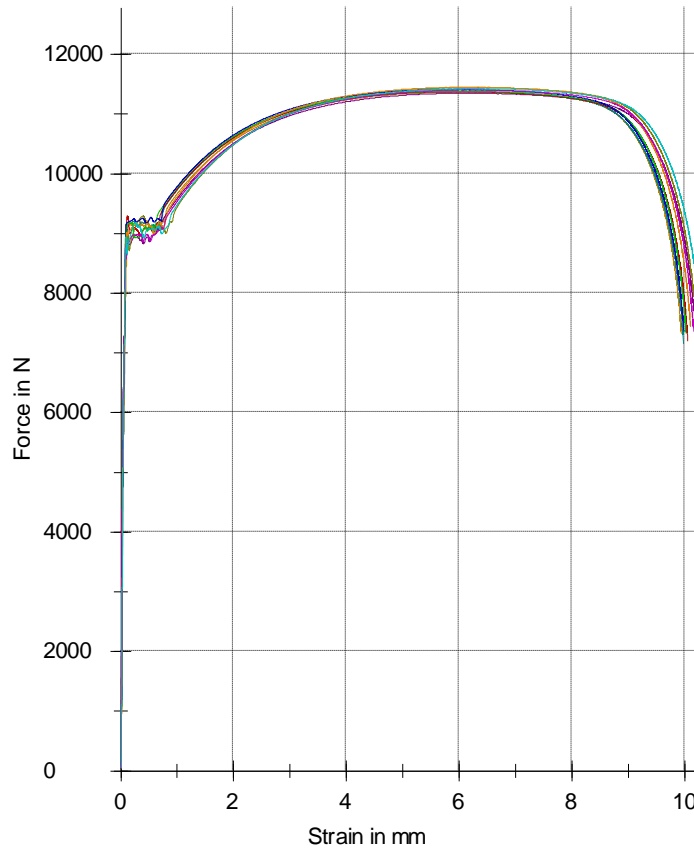
	E	F _{max}	F _{break}	Δl	A při F _{max}	A při F _{break}
n = 10	[MPa]	[N]	[N]	[%]	[Nmm]	[Nmm]
\bar{x}	145000	11400	7430	24,1	60394,6	103865,1
s	29200	46,4	185	1,1	2655,09	4339,8

Tab. 2. Hodnoty pro materiál s %C = 0,12 a vlákny kolmými na vektor síly. [Zdroj: vlastní]

	E	F _{max}	F _{break}	Δl	A při F _{max}	A při F _{break}
n = 10	[MPa]	[N]	[N]	[%]	[Nmm]	[Nmm]
\bar{x}	135000	11400	7320	25,2	64871,3	108366,7
s	16600	33,7	91,4	0,3	1700,5	1249,3

Hodnota směrodatných odchylek u většiny výsledků je poměrně vysoká, což značí velkou odlišnost naměřených hodnot. Pro určení meze pevnosti v tahu byla potřebná pouze hodnota

maximální síly F_{\max} , u které měla odchylka malou hodnotu vůči výsledku, takže se její hodnota v průběhu měření příliš nelišila.



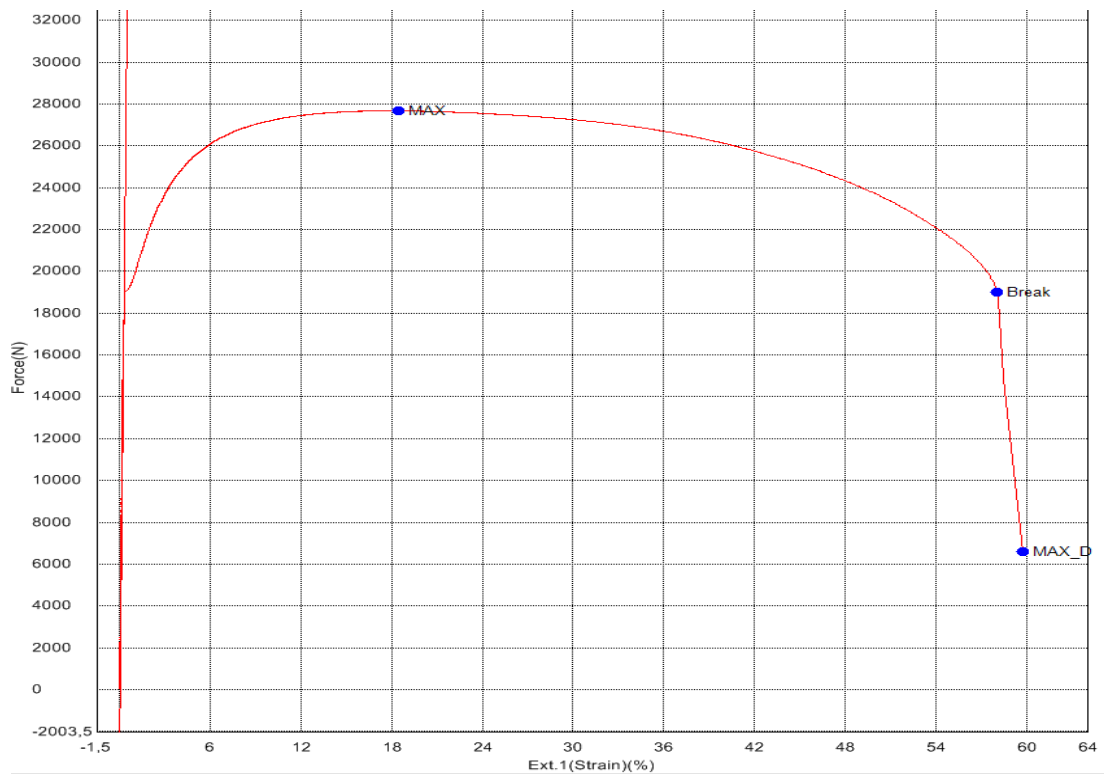
Obr. 28. Závislost prodloužení na zatěžující síle. [Zdroj: vlastní]

Naměřená data pro materiál s obsahem uhlíku 0,17%

Tab. 3. Naměřené hodnoty. [Zdroj: vlastní]

	F_{\max}	F_{break}
n = 4	[N]	[N]
\bar{x}	27714,2	19477
s	54,5	1367

Z přiložených tabulek hodnot je patrné, že v případě měření na zařízení Shimadzu bylo výsledků měření méně, ale pro zjištění meze pevnosti v tahu zcela postačily. Také počet měření byl nízký, ale pro daný účel postačil, kdy se pouze jednalo o kontrolní změřeni hodnot daných materiálovým listem.



Obr. 29. Závislost prodloužení na zatěžující síle. [Zdroj: vlastní]

6.3.1.2 Dopočet potřebných údajů

Úpravou vztahu (20) získáme vzorec pro výpočet meze kluzu v tahu R_m stanovený podle naměřených hodnot na zkušebních zařízeních. Jelikož plech, ze kterého se vzorky vyřezávaly, nemá tloušťku přesně 3 mm a 6 mm, bylo nutné rozměry přeměřit a přepočítat obsah průřezu k získání přesnějšího výsledku:

Dáno: $F_1 = 11400\text{N}$,

$b_1 = 2,98\text{ mm}$,

$b_2 = 5,9\text{ mm}$,

$h_1 = h_2 = 9,85\text{ mm}$.

$$S_1 = b_1 \cdot h_1 = 2,98 \cdot 9,85 = 29,35\text{ mm}^2 \quad (23)$$

$$S_2 = b_2 \cdot h_2 = 5,9 \cdot 9,85 = 58,12\text{ mm}^2$$

$$R_{m1} = \frac{F_1}{S_1} = \frac{11400}{29,35} = 388,4\text{ MPa} \quad (20)$$

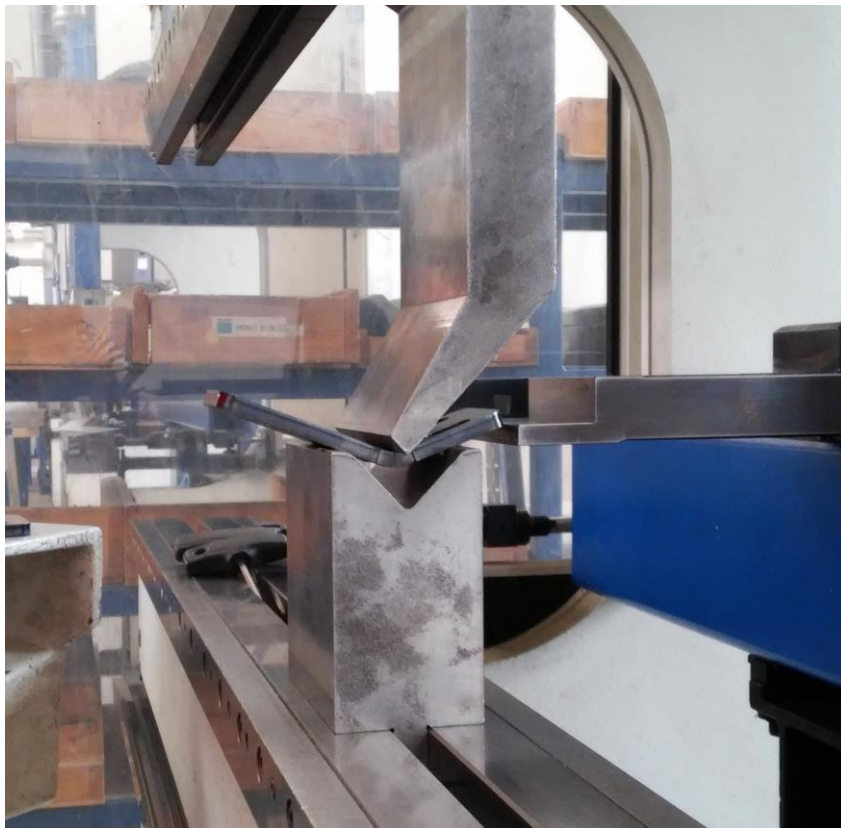
$$R_{m2} = \frac{F_2}{S_2} = \frac{27714,2}{58,12} = 476,84 \text{ MPa}$$

Materiál s obsahem uhlíku 0,12% podle naměřené meze pevnosti v tahu vykazoval nižší hodnotu než dle technického listu. Pro tento případ je naměřená hodnota výhodnější z důvodu lepší tvárnosti a tím menší pravděpodobnosti výskytu prasklin při ohýbání. U materiálu s obsahem uhlíku 0,17% je naměřená hodnota velmi podobná údajům z materiálového listu.

Z této podobnosti naměřených hodnot a hodnot z materiálových listů plyne, že zkoušky mechanických vlastností materiálu byly provedeny správně.

6.3.2 Vyhodnocení materiálů na základě ohýbání

Pro posouzení vhodnosti materiálů používaných při výrobě bylo kromě tahové zkoušky provedeno zkušební ohýbání problémových výrobků. Pro tento případ byly vyzkoušeny dva soubory vzorků dle druhu materiálu. Každý ze souborů obsahoval 10 kusů vzorků pro každý z materiálů. Tento počet zcela postačil pro posouzení vhodnosti daných materiálů kvůli značným rozdílům v jejich chování.



Obr. 30. Ohýbání dílu na ohraňovacím lisu. [Zdroj: vlastní]

V případě použití materiálu s vyšším obsahem uhlíku (0,17%) vznikaly v ohybu praskliny v prostoru mezi výřezy. Praskliny vznikaly dle očekávání na vnější straně ohybu a jejich šíření a rozsah měl dle parametrů vzorku specifický průběh. Z experimentu je patrné, že i v případě vhodně zvolené orientace vláken materiálu vůči ohybu není zamezeno vzniku prasklin a tudíž žádný z výrobků nevyhovuje.

Oproti tomu materiál s obsahem uhlíku 0,12% a při vhodně zvolené orientaci vláken nevykazoval žádnou míru poškození v podobě praskliny a tím byl posuzován jako vyhovující.

Z výsledků je patrné, že obsah prvků, dle teorie především obsah uhlíku, značně ovlivňuje chování materiálu při tváření. Obsahy prvků dle výsledků ale nejsou jediným důvodem, proč jeden materiál praskal a druhý nepraskal. Proto se experiment v dalších krocích zabýval i ostatními faktory, které jsou podrobněji popsány v následujících kapitolách.

6.4 Vliv orientace vláken

V této části bylo zapotřebí zjistit, zda materiál nepraská kvůli špatné orientaci vláken k ose ohybu. Jak už bylo zmíněno v teoretické části v kapitole 3, právě jejich orientace má značný vliv na chování materiálu při tváření. Výhodnější je ohyb provádět v kolmém směru orientace vláken. Pokud v některých případech není možné dodržet, je zde zvýšené riziko tvorby trhliny na povrchu tahové části, které může postupovat do celého objemu ohýbané části. Zda se problém s orientací vláken vyskytuje i v tomto konkrétním případě bylo potvrzeno již v kapitole (6.3 Vhodnost materiálu). Pro podrobnější popis byla provedena následující zkouška.

6.4.1 Vliv orientace vláken - zkouška

Pro zkoumání vlivu orientace vláken ve struktuře byly zvoleny dva způsoby:

- orientace vláken rovnoběžná s osou ohybu,
- orientace vláken kolmá na osu ohybu.

Jak už předpověděla teoretická část, vliv orientace vláken má značný vliv na chování materiálu při tváření. Pro testování byly k dispozici čtyři skupiny vzorků. Skládaly se vždy z kombinace jednoho materiálu a jednoho směru orientace vláken.

První skupina z materiálu s obsahem uhlíku 0,12% a orientací vláken rovnoběžnou s osou ohybu (skupina vzorků E) vykazovala porušení jak v okrajích výrobku v místě osy ohybu,

tak v blízkosti výřezu. Prasklina zasahovala do poloviny tloušťky materiálu a její rozsah určuje výrobek jako nevyhovující, ale opravitelný technologií svařování.

Při stejné orientaci vláken struktury vykazoval podobné chování i materiál s obsahem uhlíku 0,17% (soubor vzorků C). Prasklina proběhla v celé délce ohybu a prostupovala materiálem téměř v celém objemu. Výrobek byl tedy shledán jako nevyhovující a již neopravitelný.



Obr. 31. Praskliny obou materiálů při rovnoběžné orientaci vláken s osou ohybu; zleva: materiál s obsahem uhlíku 0,17% a materiál s obsahem uhlíku 0,12%. [Zdroj: vlastní]

Do další skupiny vzorků patří opět materiál s obsahem uhlíku 0,12%, vlákna orientovaná kolmo na osu ohybu (skupina vzorků F). Po dokončení této série nebyly shledány žádné objemové praskliny, ani praskliny na povrchu vnější strany ohybu. Tento soubor se projevil jako nejvhodnější, především proto, že jako jediný vyhovoval požadované kvalitě bez nutnosti provádět další operace na opravení.

V poslední skupině se jednalo o ocel s obsahem uhlíku 0,17% a orientací vláken kolmé k ose ohybu (soubor vzorků D). V místě mezi technologickými výřezy nebyly viditelné žádné defekty, ale na okraji výrobku, kde má materiál malou šířku, se praskání projevilo. Řešením by mohlo být posunutí výřezů více ke středu výrobku a tím získání širší stěny, podobně jako mezi otvory, kde se praskání neprojevilo. Rozsah defektů byl vyhodnocen jako opravitelný.



Obr. 32. Výrobky obou materiálů při orientaci vláken kolmo k ose ohybu; zleva: materiál s obsahem uhlíku 0,17% a materiál s obsahem uhlíku 0,12%. [Zdroj: vlastní]

Orientace vláken válcovaného plechu značně ovlivňuje proces ohýbání. V případě dílu, který byl k dispozici, je možné orientaci zvolit dle potřeby. Dle experimentu se potvrdila výhodnost kolmé orientace vláken vůči ose ohýbání, kdy rozsah poškození materiálu byl značně menší, či žádný, v závislosti na použitém druhu materiálu.

Jelikož se tato problematika týká i výrobků složitějších tvarů, kdy je vytvořen například dvojitý ohyb, měli by být pro obě ohýbané části stejné podmínky. Nejčastěji se rovinný tvar výrobku umísťuje na pás plechu tak, aby úhel mezi orientací vláken a osou jednoho i druhého ohybu svíral stejný úhel.

6.5 Změna tvaru výřezu v místě ohybu

Dle technického výkresu jsou na výrobku dva otvory, jejichž středy prochází osu ohybu. Tyto otvory jsou technologického charakteru a slouží k přerušení materiálu z důvodu zamezení deformace otvorů v blízkosti osy ohybu.

Otvory jsou obdélníkového tvaru o rozměru 3 x 9 mm. Jelikož se jedná o přerušení materiálu s ostrými přechody, které jsou přímo v místě největšího namáhání, vyskytuje se v těchto místech zvýšená koncentrace napětí. Zvýšená koncentrace napětí způsobí u kovu větší náchylnost k tvorbě praskliny právě v místech s ostrým přechodem. Z tohoto důvodu vyplynul

návrh na odstranění ostrých přechodů mírnou úpravou tvaru výřezu. Jeho délka 9 mm zůstala zachována včetně šířky, pouze se vytvořil rádius o velikosti 1,5 mm, aby zaoblil hrany.

Pro zhodnocení byly opět použity různé soubory výrobku, ať už z materiálu s obsahem uhlíku 0,12% a výřezu s ostrými a zaoblenými hranami, tak z materiálu o obsahu uhlíku 0,17% taktéž pro oba tvary výřezu. Experiment ukázal, že v případě obdélníkového tvaru se v jeho oblasti vyskytovalo více prasklin menšího rozsahu. Oproti tomu u oválného otvoru vznikla jedna prasklina, zato delší a s větší hloubkou. Výsledkem změny tvaru byl dle úvahy zcela opačný výsledek, kdy změna tvaru výřezu vedla ke zhoršenému chování materiálu při ohýbání. V případě materiálu s obsahem uhlíku 0,12% se vliv tvaru drážky nijak neprojevoval a materiál ani v jednom z případů nepraskal. Vliv tvaru výřezu na rozsah praskání je patrný na obrázku (Obr. 33).



Obr. 33. Oválný výřez (vlevo), obdélníkový výřez (vpravo). [Zdroj: vlastní]

6.6 Ohýbání s použitím maziv

Posledním z návrhů na eliminování či úplné odstranění vzniku vad, které byly provedeny i prakticky, byla aplikace speciálních tvářecích olejů. Použití mazacího prostředku by mělo omezit případné tření mezi nástrojem a polotovarem a tím i zmírnit, nebo zcela odstranit jeho praskání. Tření může negativně ovlivňovat proces již od doby, kdy vrchní nástroj ohý-

bacího lisu přitlačí výrobek na spodní lištu. Následným dotvarováním dochází v místech dotyků k posouvání materiálu po spodní liště nástroje, což může mít za následek zvýšené tření a vznik povrchového pnutí na výrobku, které dále může vést k prasklinám.

6.6.1 Popis použitých maziv

K dispozici bylo na výběr z více druhů maziv vhodných ke tváření železných kovů od firmy Total, ze kterých se určily dva. Snahou bylo nalézt právě ty nejvhodnější pro danou problematiku a zároveň se zohledňovala jejich odlišnost, aby byly snáze vyhodnocovány samotné rozdíly výsledků experimentu mezi díly, u kterých byly použity. V případě podobnosti vlastností olejů by nebylo možné objektivně posoudit rozdíl a tím ani správně vyhodnotit praktické měření.

Konečný výběr maziv z produkce firmy Total byl z řady tvářecích olejů s označením Martol, konkrétně:

- Total Martol EV 45,
- Total Martol Soluble 130.

Total Martol EV 45 je olej s obsahem chlóru vhodný pro tváření za studena, jehož hlavní předností je schopnost samovolného odpařování při běžných teplotách. To znamená, že u výrobků po tváření není operace odmašťování tak náročná, nebo zcela odpadá. Proto je také výhodný pro použití u výrobků, kde je předpokladem mít povrch po tváření čistý, například kvůli povrchovým úpravám. Viskozita je udávána při teplotě 20 °C hodnotou 2,8 mm²·s⁻¹. [23]

Druhým olejem, který byl k dispozici je Total Martol Soluble 130. Jedná se o vodou ředitelnou emulzi vhodnou pro tváření za studena. Hlavní výhodou je schopnost mazat a zároveň chladit. Ke snížení její spotřeby je možné ředit vodou. Viskozita při teplotě 40 °C má hodnotu 130 mm²·s⁻¹. [23]

6.6.2 Příprava experimentu

Pro experiment byly soubory vzorků A až F rozděleny do dalších podskupin podle toho, zda byly ohýbány bez maziv, nebo s mazivem a o jaký druh maziva se jednalo. Poté bylo označení takové:

- 1 - ohýbání bez použití maziv,
- 2 - ohýbání za použití maziva Total Martol EV 45,
- 3 - ohýbání za použití maziva Total Martol Soluble 130.

Díky tomu vznikly nově vytvořené skupiny vzorků, které kombinují druh maziva s použitým druhem materiálu, různou orientací vláken materiálu a tvarem technologického výřezu. Toto rozdělení je pro lepší názornost vyobrazeno na obr. 32.



Obr. 34. Skupiny vzorků dle druhu maziva, typu výřezu a orientace vláken struktury.

[Zdroj: vlastní]

Na tyto nově vzniklé soubory skupin připravených vzorků bylo použito odpovídající mazivo. Olej byl nanesen za pomoci štětečků, kdy se aplikovala rovnoměrná vrstva na vnější, tahovou stranu ohybu, především do míst dotyku materiálu se spodní tvarovou lištou ohraňovacího lisu. Tato technologie nanášení byla zvolena na základě malého počtu ohýbaných kusů.

V případě zavedení maziv do výroby, kde se zpracovávají výrobky ve velkých sériích, by bylo vhodnější maziva aplikovat metodou nástřiku. Olejový povlak vytvořený tímto způsobem by zajišťoval ještě rovnoměrnější rozptření a zároveň tenčí vrstvu, což by vedlo k úspoře použitého maziva a tím i snížení nákladů. V případě použití olejové emulze maziva

Martol Soluble 130 by další úspory maziva vznikly díky možnosti jeho ředění vodou. Další výhodou takového aplikování je značná úspora času vedoucí k dalšímu zlevňování výroby.

6.6.3 Vyhodnocení experimentu použití maziv

Vybrané tvářecí oleje byly aplikovány pouze na materiál s obsahem uhlíku 0,17%, protože u druhého zkoumaného materiálu s nižším obsahem uhlíku a při vhodně zvolené technologii ohýbání, se problém s výskytem prasklin již neprojevoval. Chování vzorků bez použití tvářecího maziva bylo popsáno v předchozích kapitolách, a proto bylo úkolem je porovnat s vzorky ohýbanými za použití maziv. Pro tento experiment byly z důvodu komplexnějšího výsledku zvoleny výrobky jak s kolmou i rovnoběžnou orientací vláken vůči ose ohybu, tak výrobky s oválným i obdélníkovým tvarem technologického výřezu.



Obr. 35. Vliv použití maziv (zleva: ohýbáno bez maziva, Total Martol EV 45, Total Martol Soluble 130). [Zdroj: vlastní]

Při vyhodnocení výrobku vyhotoveného z materiálu o obsahu uhlíku 0,17% bez použití maziva vykazovalo určitou míru poškození. Po aplikaci tvářecího oleje Total Martol EV 45 na vzorek se stejnými parametry bylo zjištěno, že místa a rozsah vzniklých defektů jsou totožná s výrobkem ohýbaného bez maziv. Stejný výsledek byl dosažen i v případě použití maziva Total Martol Soluble 130. Tento výsledek je patrný i na přiloženém obrázku (Obr. 35).

Oproti tvářecím procesům, jako je například hluboké tažení, není plocha kontaktu nástroje a materiálu v tomto případě tak velká v porovnání s velikostí výrobku, aby ovlivnila vznik defektů v podobě prasklin. I když je na výrobku patrná stopa od spodní tvářecí lišty ohraňovacího lisu, její velikost značí, že nedocházelo k velkým posuvům výrobku po hranách nástroje. Z experimentu je tedy patrné, že defekty u výrobků nevznikaly důsledkem tření, takže aplikace tvářecích maziv pro tento konkrétní případ se nejeví jako řešení na jejich odstranění.

7 ZHODNOCENÍ NÁVRHŮ NA ODSTRANĚNÍ DEFEKTŮ NA ZÁKLADĚ EXPERIMENTU

Jako první bylo prověřeno, zda je možné ze zkoumaných materiálů vytvořit výrobek požadovaného tvaru dle výkresu. Jelikož se jednalo o jednoduchý ohyb, výsledek byl posouzen na základě výpočtu minimálního poloměru ohybu. V případě prvního materiálu (s obsahem uhlíku 0,12%) byla hodnota dodržena, ale druhý materiál dle výpočtu nesouhlasil. Problém s minimálním poloměrem nebylo možné odstranit, protože by to znamenalo změnu nástrojů ohraňovacího lisu, v tomto konkrétním případě i jeho zakoupení.

Z výsledků získaných pomocí experimentů vyšlo, že největší vliv na ohýbání dílů z tlustých plechů má druh použitého materiálu, který má předepsané množství obsažených prvků. Problém nastává u materiálů, které mají normou dány pouze maximální a minimální hodnoty množství daných prvků, takže se s každou dávkou vyrobeného materiálu mohou hodnoty lišit. Experiment poukázal na značné rozdíly v chování dvou materiálů během ohýbání a to takové, že pro daný účel vyhovuje pouze jeden materiál, který měl i mimo jiné hodnoty obsahů prvků také nižší obsah uhlíku.

Další podstatnou příčinou praskání materiálu byla špatně zvolena orientace vláken struktury materiálu, která vzniká při výrobě plechů metodou válcováním, kdy směr válcování určuje orientaci struktury. U zkušebních vzorků s orientací vláken rovnoběžnou s osou ohybu vznikaly praskliny v případě obou materiálů. Oproti tomu u vzorků, kdy byla orientace vláken kolmá k ose ohybu, se praskliny objevily pouze u materiálu, který byl shledán jako nevhodný již svým podílem obsažených prvků.

Na výrobku jsou vytvářeny technologické otvory, které slouží k tomu, aby se nedeformovaly otvory umístěné v těsné blízkosti osy ohybu. Otvory mají obdélníkový tvar, proto bylo jedním z návrhů jej změnit na tvar oválný z důvodu odstranění ostrých přechodů, které by mohly způsobovat větší náchylnost k porušení materiálu. Výsledkem ale bylo ještě horší chování materiálu v podobě rozsáhlejších prasklin materiálu, takže návrh na změnu tvaru výřezu byl vyhodnocen jako nevhodný.

Posledním návrhem na odstranění defektů, který byl prakticky vyzkoušen bylo použití tvářecích maziv. Tvářecí maziva jsou vhodná především pro tvářecí operace, jako je například hluboké tažení, kdy vzniká mezi nástrojem a tvářeným materiálem velké tření, ale jejich použití je možné aplikovat i pro proces ohýbání. Zvoleny byly dva druhy maziv z řady tvářecích olejů od firmy Total. Při porovnání dílů s použitím maziva a bez něj bylo zjištěno, že

v tomto konkrétním případě nijak neovlivňují tvorbu defektů v podobě prasklin. Tento výsledek je dán tím, že při ohybu nevzniká tak velké tření mezi nástrojem ohraňovacího lisu a materiálem, které by muselo být pomocí olejů eliminováno.

7.1 Další návrhy na odstranění defektů

Kromě návrhů na odstranění defektů výrobku, jako byly změny v technologii výroby či změny v konstrukci výrobku, jsou dalšími možnými návrhy i jiná opatření. Patří mezi ně například vstupní kontrola materiálu. V případě, kdy označení materiálu stanovuje pouze maximální a minimální množství obsažených prvků, by bylo vhodné materiál před zavedením do výrobního procesu otestovat. Průběh této zkoušky by byl stejný s postupem z praktické části, kdy byla provedena zkouška mechanických vlastností materiálu pomocí tahové zkoušky. Pomocí které by se získaly parametry polotovaru, na jejichž základě by se určila vhodnost dané série materiálu porovnáním s hodnotami materiálu, který v předchozích aplikacích nezpůsobil vznik prasklin.

Dalším ovlivňujícím faktorem je tvářecí rychlost. Vysoká rychlost může negativně ovlivnit konečný produkt, proto by mohlo její snížení napomoci s řešením problému. Její změna, konkrétně snížení, by mohla být nápomocná v řešení dané problematiky. Tento faktor nebyl v rámci praktické části prověřen.

Posledním návrhem ke zlepšení výsledného produktu je úprava polotovaru před jeho zpracováním. Tepelné úpravy materiálu jsou aplikovány z důvodu zlepšení vlastností pro následující operaci. V případě tváření (ohýbání) by bylo vhodné zvolit žíhání rekrytalizační, kdy je při určité teplotě ohřevu odstraněn vliv zpevnění materiálu z předchozí operace tváření za studena. V rámci řešení tohoto případu nejsou tepelné úpravy materiálu realizovatelné, kvůli zvýšení nákladů na výrobu způsobené zavedením dalšího procesu do výrobního cyklu.

ZÁVĚR

Bakalářská práce na téma Studium tvorby defektů při zpracování plechů byla vypracována na základě zadání firmy MRB Sazovice. Tato práce se soustředila na vyřešení problému v podobě praskání materiálu během ohýbání dílů z tlustých plechů pomocí ohraňovacích lisů.

Cílem bakalářské práce bylo seznámení s problematikou tvorby defektů při zpracování plechů. Teoretická část bakalářské práce se zabývala základními pojmy z oblasti struktury kovových materiálů a jejím vlivem na tváření. Samotnou kapitolu tvořila problematika ohýbání, která zahrnovala popis různých technologií procesu, výpočty určující jeho parametry a také tvorbu možných defektů během zpracování výrobků touto metodou.

Na základě faktů, které byly popsány v teoretické části byl proveden experiment ve firmě MRB Sazovice. Hlavním úkolem bylo zanalyzovat problematiku ohýbání včetně veškerých parametrů procesu a na základě těchto informací navrhnout opatření, které by vedly k odstranění tvorby defektů. Po získání veškerých dostupných informací bylo navrženo několik konkrétních opatření, jako je ověření vhodnosti materiálu, vliv orientace struktury materiálu, tvar technologických výřezů v místě ohybu a nakonec možnost použití tvářecích maziv během procesu ohýbání.

Výsledky experimentu ukázaly jako nejvíce ovlivňující faktory při ohýbání materiálovou vhodnost a orientaci vláken jeho struktury. V případě návrhu na změnu tvaru technologického výřezu bylo výsledkem, že ohýbaný vzorek vykazoval ještě větší rozsah poškození v podobě prasklin materiálu, než v případě tvaru doposud používaného. Posledním návrhem bylo použití tvářecích maziv během ohýbání, které odstraňují problém tření během tváření. Výsledek prokázal, že v případě ohýbání analyzovaných výrobků nemají maziva vliv, protože v průběhu ohybu nedochází k velkému tření mezi nástrojem a tvářeným materiálem, které by bylo třeba odstranit. Je tedy patrné, že defekty vzniklé na výrobku nejsou způsobeny zvýšeným třením.

Dle zhodnocení praktické části lze považovat za řešení problému používání materiálu s vhodnými parametry pro tváření a také volit výhodnou orientaci směru vláken vnitřní struktury materiálu vzniklé při výrobě plechového polotovaru metodou válcováním.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BLAŠČÍK, František. *Technológia tvárnenia, zlievárenstva a zvarania: celoštátna vysokoškolská učebnica pre stroj. fak. vys. škôl*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1988.
- [2] Struktura kovů. In: *Informační systém Masarykovy univerzity* [online]. Brno, 2005 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: http://is.muni.cz/el/1431/jaro2005/C2800/konzervatori1_Kovova_vazba.pdf?lang=en
- [3] Symetrie krystalů. In: *Vysoká škola chemicko-technologická* [online]. Praha, 2008 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/ach/crystchem/Symmetry.pdf>
- [4] Krystalografické soustavy. In: *Periodická tabulka* [online]. [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/krystalografie.html>
- [5] Cubic Atom and Crystal Structures. In: *Science and Education Publishing: From Scientific Research to Knowledge* [online]. 2014 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <http://pubs.sciepub.com/ijp/2/6/11/index.html>
- [6] POČTA, Bohumil. *Základy teorie tváření kovů: učebnice pro hutnické fakulty*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1966.
- [7] Technologie tváření kovů. In: *Katedra strojírenské technologie* [online]. Liberec [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm
- [8] LUKOVICS, Imrich. *Konstrukční materiály a technologie*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1992. 273 s. Učební texty vysokých škol.
- [9] Reálný krystal. In: *Učebnice.Krynicky* [online]. 2010 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: http://www.ucebnice.krynicky.cz/Fyzika/2_Molekulova_fyzika_a_termika/4_Pevne_skupenstvi/2403_Realny_krystal_Typy_vazeb/2403Vysledky_Realny_krystal_Typy_vazeb.pdf
- [10] IX. Poruchy krystalových struktur. In: *Krystalografická společnost* [online]. [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <http://www.xray.cz/kryst/str09a.htm>
- [11] Fyzikální základy vědy o materiálu. In: *Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity* [online]. Brno, 2013 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/>

- [12] KŘÍŽ, Rudolf. *Strojírenská příručka*. Sv. 8: V - Tváření. W - Výrobky ze slinovaných prášků. X - Výrobky z plastů. Y - Svařování součástí. Z - Protikorozní ochrana materiálu. 1. vyd. Praha: Scientia, 1998. 255 s. ISBN 8071830542.
- [13] BEROUN, Stanislav. Technologie tváření kovů. In: *Katedra vozidel a motorů* [online]. Liberec, 2009 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1886>
- [14] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [15] NOVOTNÝ, Jiljí. *Technologie I: (slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy)*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01420-7.
- [16] DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4747-9.
- [17] Akademie tváření: Ohýbání. *Průmyslové spektrum*. 2010, 2010(7).
- [18] Technologie plošného tváření – ohýbání. In: *Katedra strojírenské technologie* [online]. Liberec [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/07.htm
- [19] Výroba tenkostěnných profilů. In: *Ústav kovových a dřevěných konstrukcí* [online]. Brno, 2012 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: http://server.kdk.fce.vutbr.cz/Frvs/414_2012/vyroba.htm
- [20] Technologie plošného tváření - rovnání. In: *Katedra strojírenské technologie* [online]. Liberec [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/08.htm
- [21] Co znamená ohraňování plechu? In: *Ohraňování plechu: CNC zpracování plechu v průmyslu* [online]. [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <http://www.ohtanovaniplechu.cz/#pouziti>
- [22] Firma. MRS Sazovice [online]. Sazovice, 2014 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.mrb.cz/onas>

- [23] Průmyslová maziva a speciální produkty. In: *Total* [online]. Praha, 2014 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: http://www4.total.fr/Europe/Czech/prumyslovy_katalog_2014_nahled.pdf
- [24] Ohraňovací nástroje. In: *Trumpf* [online]. Rakousko, 2010 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: http://www.cz.trumpf.com/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/DAM/cz.trumpf.com/PDF/Katalog_BW.pdf&t=1463157696&hash=342d4e612967d71f629334184cf271bb
- [25] Interní dokumentace firmy MRB Sazovice

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ρ	Hustota dislokací [cm^{-2}].
V	Objem krystalu [cm^3].
L	Délka dislokačních čar [cm].
σ_D	Deformační odpor [-].
σ_P	Přirozený deformační odpor [-].
m	Vliv tření a geometrie vzorku [-].
w	Odlišnost poměrné rychlosti deformace [-].
z	Vliv nerovnoměrného rozložení napětí [-].
v	Změna stavu napjatosti [-].
ϵ'	Rychlost deformace [m/s].
v_n	rychlost pohybu tvářecího nástroje [m/s]
T	Čas [s].
z_z	Součinitel ztenčení [-].
z_r	Součinitel rozšíření průřezu [-].
ϵ_C	Mezní prodloužení [-].
l_v	Vzdálenost opěr ohybnice [mm].
r_m	Zaoblení hrany ohybnice [mm].
r_p	Zaoblení hrany ohybníku [mm].
x	Koeficient polohy neutrální osy [-].
Re	Mez kluzu ohýbaného materiálu [MPa].
E	Modul pružnosti v tahu [MPa].
F_0	Zatěžující síla [N].
F_v	Kalibrační síla [N].
W	Modul odporu průřezu [mm^3].

R_m	Pevnost v tahu [MPa].
ε	Poměrné prodloužení v tahu [-].
S	Plocha materiálu [mm ²].
q	Specifický tlak na vyrovnání [MPa].
o	Opravný koeficient [-].
F_l	Maximální síla při ohýbání [N].
b	Šířka [mm].
t	Tloušťka polotovaru [mm].
β	Poloměr ohybu [mm].
μ	Součinitel tření [-].
A	Práce [N·mm].
F	Ohýbací síla [N].
h	Zdvih ohýbadla [mm].
k	Koeficient průběhu sil [-].
R	Vnitřní poloměr ohybu [mm].
l_o	Délka ohnutého úseku [mm].
α	Úhel ohnutého úseku [°].
r	Poloměr neutrální osy [mm].
F_{max}	Maximální síla vyvinutá strojem [N]
F_{break}	Síla potřebná k přetržení vzorku [N]
L_o	Měřená délka zkušebního tělesa [mm]
L_c	Celková délka zkušebního tělesa [mm]
Δl	Prodloužení [%]
\bar{x}	Aritmetický průměr [-]
s	Směrodatná odchylka [-]

- BCC Kubická mřížka prostorově středěná
- FCC Kubická mřížka plošně středěná
- HCP Hexagonální těsně uspořádaná mřížka
- CNC Computer Numeric Control (číslicové řízení počítačem).

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Kubické a hexagonální soustavy. [5]</i>	11
<i>Obr. 2. Pružná a plastická deformace. [7]</i>	12
<i>Obr. 3. a) hranová dislokace, b) šroubová dislokace. [10]</i>	16
<i>Obr. 4. Burgesova smyčka a) bez poruchy, b) s poruchou. [10]</i>	17
<i>Obr. 5. Vznik dislokací a) krystalizací kovů, b) růstem zrn do bloků, c) přeměnou vakancí na dislokaci. [7]</i>	19
<i>Obr. 6. Frank-Readův zdroj vzniku dislokace. [7]</i>	19
<i>Obr. 7. Způsoby tváření podle teploty. [7]</i>	26
<i>Obr. 8. Ohýbání a průběh napětí. [17]</i>	27
<i>Obr. 9. Rozložení napětí a poloha</i>	28
<i>Obr. 10. Příklad diagramu pro určení součinitele ztenčení. [16]</i>	29
<i>Obr. 11. Napjatost a deformace při ohybu tyčí a širokých pásů. [14]</i>	30
<i>Obr. 12. Diagram koeficientu odpružení. [14]</i>	32
<i>Obr. 13. Metody k odstranění odpružení. [14]</i>	33
<i>Obr. 14. Ruční ohýbačka. [14]</i>	36
<i>Obr. 15. Ohyb do tvaru V. [18]</i>	37
<i>Obr. 16. Ohyb do tvaru U. [18]</i>	38
<i>Obr. 17. Ohýbání na ohraňovacím lisu. [19]</i>	39
<i>Obr. 18. Tvar výrobku. [25]</i>	43
<i>Obr. 19. Obsahy prvků prvního materiálu. [25]</i>	44
<i>Obr. 20. Mechanické vlastnosti prvního materiálu. [25]</i>	44
<i>Obr. 21. Obsahy prvků druhého materiálu. [25]</i>	44
<i>Obr. 22. Mechanické vlastnosti druhého materiálu. [25]</i>	44
<i>Obr. 23. Deformace otvoru umístěného v těsné blízkosti osy ohybu. [Zdroj: vlastní]</i>	45
<i>Obr. 24. Nástroje použité při experimentu. [24]</i>	46
<i>Obr. 25. Defekty na různých výrobcích. [25]</i>	47
<i>Obr. 26. Připravené tvary vzorků pro experiment. [Zdroj: vlastní]</i>	48
<i>Obr. 27. Tvar zkušebního tělesa o tloušťce 3 mm a 6 mm. [Zdroj: vlastní]</i>	52
<i>Obr. 28. Závislost prodloužení na zatěžující síle. [Zdroj: vlastní]</i>	53
<i>Obr. 29. Závislost prodloužení na zatěžující síle. [Zdroj: vlastní]</i>	54
<i>Obr. 30. Ohýbání dílu na ohraňovacím lisu. [Zdroj: vlastní]</i>	55

- Obr. 31. Praskliny obou materiálů při rovnoběžné orientaci vláken s osou ohybu; zleva: materiál s obsahem uhlíku 0,17% a materiál s obsahem uhlíku 0,12%. [Zdroj: vlastní]57
- Obr. 32. Výrobky obou materiálů při orientaci vláken kolmo k ose ohybu; zleva: materiál s obsahem uhlíku 0,17% a materiál s obsahem uhlíku 0,12%. [Zdroj: vlastní]58
- Obr. 33. Oválný výřez (vlevo), obdélníkový výřez (vpravo). [Zdroj: vlastní]59
- Obr. 34. Skupiny vzorků dle druhu maziva, typu výřezu a orientace vláken struktury. [Zdroj: vlastní]61
- Obr. 35. Vliv použití maziv (zleva: ohýbáno bez maziva, Total Martol EV 45, Total Martol Soluble 130). [Zdroj: vlastní]62

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Hodnoty pro materiál s %C = 0,12 a vlákny rovnoběžnými s vektorem síly. [Zdroj: vlastní]</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 2. Hodnoty pro materiál s %C = 0,12 a vlákny kolnými na vektor síly. [Zdroj: vlastní]</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 3. Naměřené hodnoty. [Zdroj: vlastní]</i>	<i>53</i>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P1: Obrázky z experimentu

PŘÍLOHA P I: OBRÁZKY Z EXPERIMENTU

