

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Odpružení vysokopevnostních materiálů při ohýbání

Autor práce: Josef Couf

Vedoucí práce: Ing. František Tatíček, Ph.D.

Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Couf** Jméno: **Josef** Osobní číslo: **438998**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Odpružení vysokopevnostních materiálů při ohýbání

Název bakalářské práce anglicky:

Springback of high strength materials during bending

Pokyny pro vypracování:

Body k vypracování:

- 1) seznámení s problematikou výroby výrobku operací ohýbání
- 2) návrh experimentů pro realizaci určení velikosti odpružení při ohýbání
- 3) vyhodnocení provedených experimentů
- 4) závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

dle doporučení vedoucího BP

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


Ing. František Tatíček Ph.D., ústav strojírenské technologie FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Ing. Michal Valeš, ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání bakalářské práce: **26.04.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **10.08.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **10.08.2017**


Podpis vedoucí(ho) práce


Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

4.5.2017

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 28.7.2017

Josef Couf

Poděkování

Dík za vedení, pomoc při realizaci praktické části, za konzultace i za rady se zpracováním této práce patří Ing. Františku Tatíčkoví, Ph.D., ale samozřejmě i mnoha dalším lidem, na základě jejichž předchozích činností mohl být sestaven tento text.

ABSTRAKT

Teoretická část práce seznamuje čtenáře s problematikou tváření a zaměřuje se na jevy podstatné pro ohýbání. Pro výrobu velice podstatným jevem při ohýbání je odpružení. To je v práci podrobněji vysvětleno. Experimentální část práce se zabývá měřením odpružení u plechů z několika vysokopevnostních ocelí. Zkoušky v experimentální části jsou provedeny tříbodovým ohybem a ohraňováním. Je vytvořena a aplikována metoda porovnání výsledků. Jsou diskutovány možné vlivy na velikost odpružení.

Klíčová slova: ohýbání, odpružení, vysokopevnostní ocel

ABSTRACT

The theoretical part of the thesis introduces the reader to an issue of forming processes and focuses on bending essential phenomena. That kind of phenomenon, important for manufacturing, is material springback. The thesis more focuses on springback. The experimental part of the thesis deals with measuring of springback in metal sheet stripes, which are made from several high-strength steels. The three-point bend test and the edge bending test are performed in the experimental part. The results are processed using a comparison method. The possible impacts on size of springback are considered.

Keywords: bending, springback, high-strength steel

Obsah

Úvod.....	6
Tváření.....	7
Přehled vybraných technologií tváření.....	8
Termodynamické a materiálové aspekty tváření.....	9
Ohyb.....	12
Odpružení.....	16
Materiál.....	19
Statický rozbor ohybu.....	21
Ilustrativní simulace napjatosti.....	24
Návrh experimentu.....	25
Stroj použitý v experimentu.....	25
Způsoby zkoušení.....	26
Způsob vyhodnocení.....	28
Tříbodový ohyb.....	29
Ohraňování.....	30
Vyhodnocení experimentu.....	31
Vyhodnocení tříbodového ohybu.....	31
Materiály.....	31
Geometrie.....	32
Modelový případ.....	33
Vyhodnocení ohybu přes hranu.....	34
Závěr.....	35
Seznam obrázků.....	36
Seznam tabulek.....	36
Seznam použité literatury.....	37
Seznam použitých symbolů a značek.....	39
Legenda ke grafům v příloze.....	41

Úvod

Hnacím motorem technického pokroku civilizace je konkurenční boj mezi výrobními podniky, který svou intenzitou tlačí na objem výzkumu a zefektivňování výroby. Jednou z možností jak efektivizovat výrobu je velkosériovost, která souvisí s částečnou unifikací či zpodobněním vyráběného zboží. Podobnosti vyráběných předmětů nám umožňují předpovídat jejich chování na základě simulací, čímž se omezí experimentální složka výzkumu a dojde k jeho zlevnění.

Čím propracovanější teorii pro chování výrobků v daném oboru máme, tím rozličnější výrobky jsme schopni dobře nasimulovat na základě malého počtu měření. Například diferenciální přístupy stojí za nejfunkčnější teorií pružnosti, jakož i za většinou teorie mechaniky kontinua. Tato teorie pružnosti je velmi široce aplikovatelná a je dobře spodobnitelná s realitou, přičemž v mnoha běžných aplikacích si vystačíme pouze s její lineární formou.

Při tváření je jedním z podstatných poruchových jevů odpružení, neboli deformace po cíleném přetvoření, kterou se samovolně vyrovnávají napětí v materiálu. Za účelem ekonomického zefektivnění výzkumu, se provádí simulace odpružení při tváření, které ovšem pro to, aby měly vypovídající hodnotu, potřebují funkční numerický model a naměřená data, pomocí kterých transformují funkce modelu na míru danému materiálu.

Zaměříme-li se na oceli, povšimneme si, že oceli o vyšší pevnosti mají i vyšší hodnoty odpružení, než oceli o pevnosti nižší. Můžeme tedy, zahrnouce i další vlastnosti oceli, usoudit, pro jaké technologické postupy a pro jaké technické aplikace je ocel vhodná.

Podarí-li se nám úspěšně eliminovat či kompenzovat odpružení, díky jeho předvídání na základě numerické simulace a naměřených dat, budeme schopni vyrobit prvojakostní výrobek obdobné tvarové složitosti z ocelí s velice odlišnými hodnotami odpružení. Naproti této snaze jde hledání materiálu s co nejnižším odpružením i při vysoké hodnotě meze pevnosti.

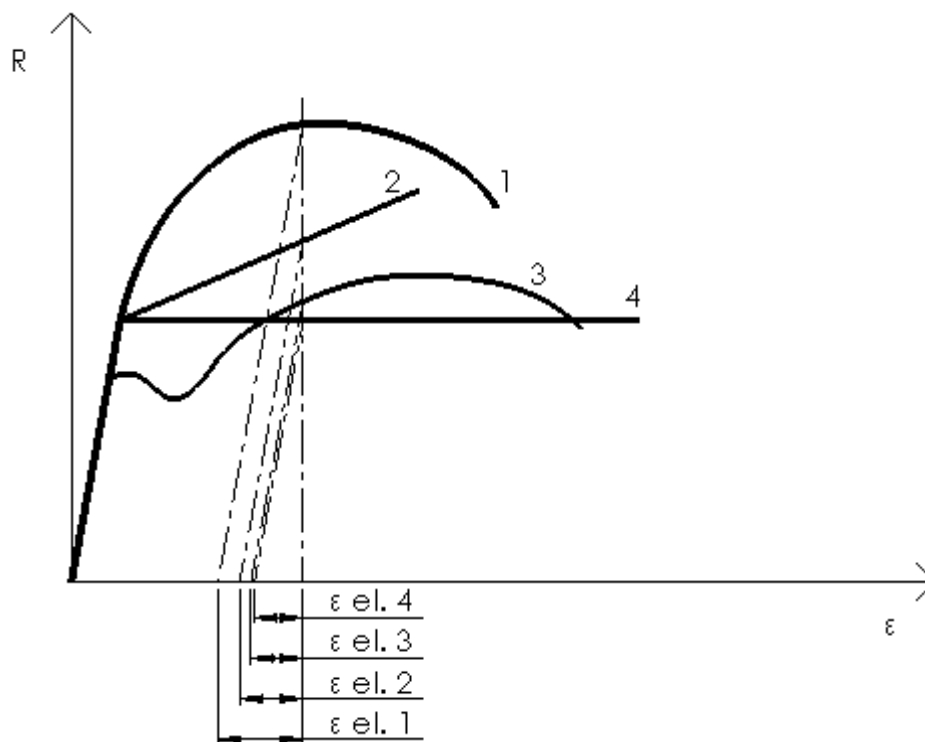
Vývoj směřuje ke schopnosti vyrábět výlisky z pevnějších ocelí, což s sebou nese i snížení nároků na objem použitého materiálu, při zachování požadované pevnosti konstrukcí (možnost volit konstrukce z tenčích prvků). Dlužno ovšem dodat, že to bezprostředně neznamená ani ekologičtější chování výrobních podniků, ani levnější výrobky, protože pevnější oceli obsahují více legur, které jsou dražší než železo a k jejich dobývání je užíváno složitějších chemických procesů.

Konkrétním příkladem uplatnitelnosti umu nahrazování materiálů pevnějšími je automobilový průmysl. Velká část karoserie automobilu je svařena z výlisků lisovaných za studena, které při výrobě odpružují a je na technologickém oddělení firmy, jak si s tímto jevem poradí. Pro účinné nastavování výrobních parametrů je nezbytně nutným prvkem zpětná vazba od hotového výrobku do technologického oddělení, kterou zajišťuje měření a statistika kvality daného výrobku.

Tváření

Tváření je proces měnění tvaru polotovaru a struktury jeho materiálu působením mechanické energie, kdy vyvolané změny v materiálu jsou nezanedbatelně nevratné - tedy tehdy - kdy odpružení materiálu nevrátí materiál do stavu před začátkem deformace v diagramu závislosti napětí na deformaci. V běžné řeči, zejména u kovů, diskretizujeme mez tvorby trvalé deformace, podle dohody a používané teorie pružnosti a pevnosti, zpravidla na mez úměrnosti nebo kluzu. Deformace menší, než deformace na stanovené mezi, považujeme za elastické, pružné, vratné, deformace větší poté za součet deformací elastických a plastických - trvalých. Díl, který v celkové deformaci zaujmou elastické deformace je pro různé typy materiálu znázorněn na obr. 1.

Dlužno dodat, že výše napsaný odstavec nezohledňuje únavu materiálu, které se tato práce nevěnuje.



Obrázek 1: Pracovní diagram: 1 - vysokopevnostní ocel, 2 - lineárně zpevňující model, 3 - měkká ocel s výraznou mezí kluzu, 4 - model bez zpevnění

Tváření rozlišujeme podle typu deformace, která při něm vzniká, na objemové a plošné. O plošném tváření mluvíme, je-li jedna složka vyvolávané deformace zanedbatelná. [1] To ovšem nutně neznamená, že totéž platí o napjatosti v materiálu. Mezi tváření objemové řadíme např. :

kování zápusťkové i volné, válcování, objemové tažení, protlačování...

Mezi technologie plošného tváření řadíme zejména zpracování plechů, tedy:

stříhání, ohýbání a rovnání, tažení s membránovou napjatostí...

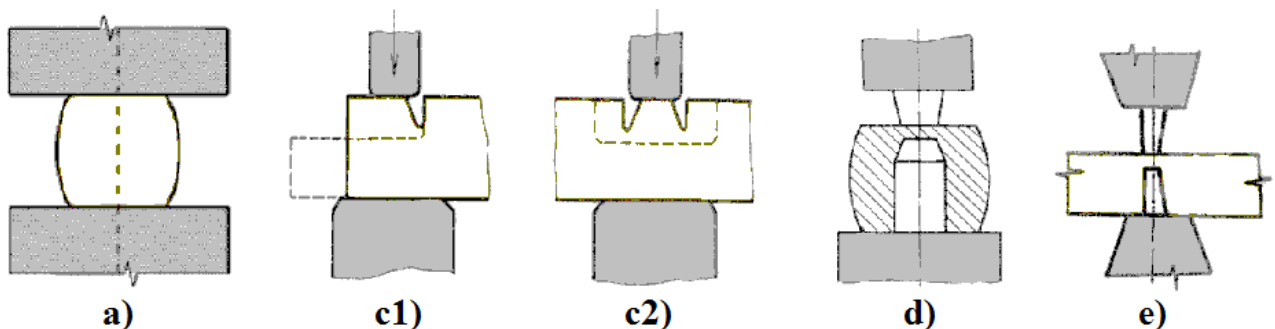
Přehled vybraných technologií tváření

Zápustkové kování umožňuje vytvářet jednoduchým postupem výkovky s velmi členitým povrchem. Oproti volnému kování je snadno automatizovatelné a s jeho pomocí se kovou velkosériově např. ramena kleští nebo klikové hřídele.

Volné kování je vhodné zejména pro kusovou a malosériovou výrobu. Nevyžaduje výrobu zápustky ale je náročnější na kvalifikovanost obsluhy. Vyznačuje se nižší přesností výroby než ostatní metody. Do volného kování spadá celá řada operací, kterými se dosahuje požadovaných tvarů výkovku, k těmto operacím patří např. pěchování, dělení, prodlužování, osazování...

Jednotlivé operace popíši na modelovém válečku [2]:

- a) Při pěchování se působí osovou silou na válec, za účelem jeho rozšíření.
- b) Při prodlužování se radiální silou válec zúžuje, přičemž se s ním postupně otáčí.
- c1) Osazování a
- c2) prosazování spočívají v naseknutí materiálu a jeho zúžení mezi záseky.
- d) Děrování lze provést na děrovacím trnu.
- e) Pro dělení, mluvíme-li o ručním kování na kovadlině, se používá utínka, což je ostrý typ babky. Babka je tvarovaný špalík zesponu opatřený trnem pro usazení.



Obrázek 2: Techniky volného kování

Válcování se děje rotačním pohybem nástrojů- válců. Podle směru rotace válců se rozlišuje podélné, příčné či kosé. Nejčastěji se válcuje na válcovacích stolicích. Vyrábí se tak plechy, bezešvé trubky a profily, jakými jsou např. kolejnice nebo různé nosné a rámové profily používané třeba ve stavebnictví. Válcování plechů je speciální v tom ohledu, že ačkoli stále mluvíme o objemovém tváření, je při něm deformace rovinná, protože šířka plechu se nemění. Dále se válcují např. závitové šrouby.

Objemovým tažením na tažných stolicích se vyrábějí zejména dráty a bezešvé trubky. Ruční tažení drátů je zastaralá technika kovovýroby, používaná historicky třeba ve šperkařství. Dnes se tažení realizuje rotujícími bubny vytahujícími drát kontinuálně. Tažení trubek [3] je realizováno

postupně, nekontinuálně. Tvarování či změna průměru trubek tažením probíhá často i za studena.

Protlačování je technologie vhodná pro měkčí materiály, protože při něm dochází k velkému tření. U ocelí se však opět jedná o způsob výroby bezešvých trubek. Oceli je před protlačováním vhodné fosfátovat pro zmenšení tření při výrobě.

Stříhat lze plechy i profily. Stříhací nože mají různá provedení. Dle použití jsou šikmé (nůžky), nebo směřují ostřími přímo proti sobě. Velké plechy se stříhají nůžkami s kotoučovými noži. Stříhání není jediný způsob dělení materiálu, v sériové výrobě je taktéž časté řezání a upichování. Mezi méně používaně patří sekání a lámání. Tyto způsoby dělení materiálu vyvolávají v materiálu komplexní napjatost i deformace.

Tažení s membránovou napjatostí může být použito pro výrobu hrnců, nebo karosérií automobilů. Často bude po tomto tažení následovat ještě přítlak pro omezení odpružení.

Rovnění často spočívá v postupném ohybání, při němž se v každém kroku zvětší poloměr ohybu na válcovací stoličce. Další možností je rovnění v lisu, mezi rovnými deskami.

Ohybání bude rozvedeno v samostatných kapitolách.

Termodynamické a materiálové aspekty tváření

Při tváření kovů můžeme dále rozlišit tváření za tepla, za poloohřevu a za studena. O tváření za tepla mluvíme, probíhá-li při teplotě vyšší než je rekrystalizační teplota tvářeného materiálu, tedy nad 0,7 termodynamické teploty tání. Tváření za studena probíhá pod 0,35 až 0,45 termodynamické teploty tání. Rekrystalizaci samotnou však kromě teploty ovlivňují ještě další faktory. Především to je rychlost a velikost deformace vyvolané v materiálu. Pro daný výrobek je ohřev buď předepsán, s ohledem na rychlost ohřevu a chladnutí, nebo kovář určí teplotu podle barvy, jak plyne z Planckova vyzařovacího zákona.

Tváření za tepla je žádoucí proces při zvyšování kvality ocelí. Při dostatečném prokování z materiálu zmizí původní dendritická struktura, která je rázy rozrušena a díky dynamické rekrystalizaci vznikne nová, jemnější, homogennější, která vykazuje lepší mechanické vlastnosti, jako houževnatost nebo tažnost avšak nižší pevnost. Pak také vzniká vláknitá struktura, která ovlivní izotropičnost.

Při tváření pod rekrystalizační teplotou má kov značně omezenější plastické vlastnosti. Čím je nižší teplota, tím pomaleji vznikají v materiálu nová krystalická zrna a tím větší měrou jsou tedy pouze deformována ta původní, což vede k vyčerpání jejich elasticity, vzniku krystalických poruch a zpevňování - jevu - se kterým se u tváření za tepla nesetkáme v pozorovatelně dlouhém časovém horizontu. Zpevňování materiálu je jedním z horních limitujících faktorů tváření za studena, který je odstranitelný žiháním. Leckdy je ale žádoucí. Spokojíme-li se s tvářením za studena, dostaneme

po jeho dokončení materiál pevnější, než jsme měli předtím, což může být výhodné. Mnohem vyšší pevnosti bychom dosahli, pokud bychom obsah dislokací v materiálu snížili na minimum například výrobou co nejdokonalejšího monokrystalu. Tvorba monokrystalu je však obtížný proces. Spolu s dalšími vlastnostmi materiálu ovlivňuje zpevňování jeho tvařitelnost, což je schopnost toho daného materiálu být úspěšně přetvářen na jakostní výkovek. Velmi pevný monokrystal by byl naprosto netvařitelný. Nejnižší pevnosti naopak dosahuje materiál vyžíhaný, blíží se totiž kritické hustotě dislokací, při které již neexistuje monokrystalická struktura, ale zároveň v materiálu není dost zpevňujících vad mřížky. Takový materiál je velmi dobře tvařitelný s nízkou pevností [2].

Tento pojem tvařitelnosti se tedy týká materiálu. Oproti tomu, mluvíme-li o technologické tvařitelnosti, musíme zahrnout i vlivy technologie, jakou používáme (není vlastností materiálu, ale procesu). [1] Zajímavým technologickým kritériem zejména u tváření za studena je mazání. Při nedostatečném mazání může docházet k trhlinám ve výrobku, přičemž pouhou změnou maziva lze výrazně snížit zmetkovitost. Technologickou tvařitelnost ovlivňuje také třeba typ kovací zápusky (velikost úkosů v ní) nebo atmosféra, která může nebo nemusí reagovat s výkovkem a ovlivňovat jeho jakost. Technologická tvařitelnost drobných, přesných ocelových výkovků za tepla na vzduchu je např. ovlivněna vznikem okujů na jejich povrchu.

Dále ještě od předchozích dvou odlišujeme tvařitelnost metalurgickou, která vyjadřuje vliv metalurgických faktorů, jako zejména teploty a rychlosti deformace. S rostoucí rychlostí deformace přitom teplota přímo souvisí. Deformační energie se totiž v materiálu mění na teplo.

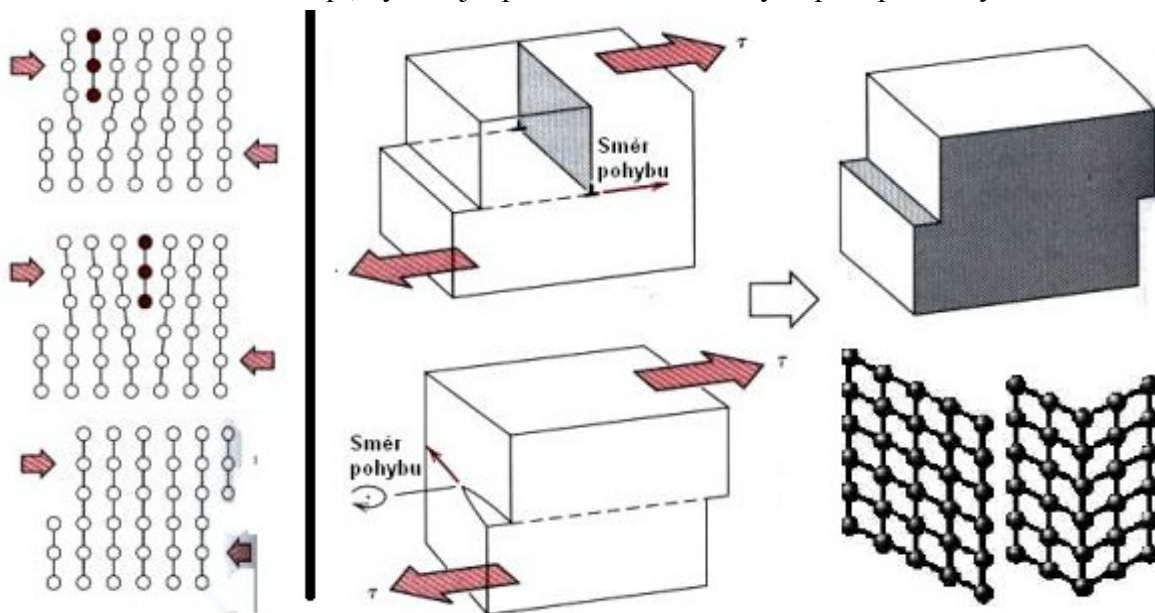
Přetvoření krystalického materiálu je umožněno změnami v krystalické mřížce. Při tváření do ní vnášíme nástrojem pnutí, která po překročení meze kluzu vyvolají porušení meziatomárních vazeb. Takto, ale i jinými mechanismy (chemicky, tepelně) vzniklé krystalické poruchy třídíme na bodové, čárové, plošné a prostorové. [2] Největší význam pro přetvoření mají ty plošné a čárové. Čárovým říkáme dislokace. Jejich pohybem - skluzem (Také se mohou pohybovat šplháním.) - se vedle dvojčatění, což je plošná vada, realizuje přetvoření v materiálu. Pohyb dislokací je usnadňován zvyšováním teploty.

Dvojčatění je posuv vrstev krystalu po sobě. Při tomto posuvu dojde k narušení meziatomových vazeb v jedné rovině mřížky a atomy jedné vrstvy se naváží na jiné atomy jiné vrstvy, než na jaké byly navázány původně (posunou se pouze o část meziatomové vzdálenosti a vytvoří pravidelnou strukturu v jiném směru, než byla původní).

Čárové dislokace mají dvě mezní podoby, z nichž jednou jsou dislokace hranové a druhou šroubové.

Při tváření za studena nejsou dislokace ovlivňovány měnícím se rekrystalizujícím materiálem a tak uvnitř polotovaru můžeme jejich zanikání oproti vznikání zanedbat. Nově vzniklé

dislokace se za studena hromadí na nepravidelných strukturách mřížky, vměstcích, hranicích zrn polykrystalického materiálu atp., vytvářejí zpevnění a vedou k vyčerpání plasticity a k lomu.



Obrázek 3: Vlevo: princip pohybu dislokací. Větší pravá část: Makroskopický projev pohybu dislokací. Vpravo dole: Ukázka dvojčatění.

Makroskopicky poté na lomových hranách rozlišíme na první pohled texturu lomu křehkého a houževnatého. U houževnatého lomu dochází k porušení materiálu vyčerpáním plasticity, u křehkého se plastické mechanismy neprojeví a energie vnesená do systému, které bude potřeba mnohem méně, bude celá použita na rychlé šíření trhliny (materiál se bude chovat, jakoby u něj plasticita byla vyčerpána již dříve). Je-li polotovár v křehkém stavu, nelze ho úspěšně tvářet. Pokud je to ekonomické, je vhodné mu zvýšit houževnatost (zvýšením teploty, tlaku okolí, rekrytalizací...) a tím i oblast tvařitelnosti.

Rekrytalizace znamená tvorbu nových krystalických zrn v materiálu. Je-li cílem zvyšovat houževnatost materiálu a tedy zjemňovat jeho krystalickou strukturu, je účelné provádět rekrytalizaci dynamickou, tedy v průběhu tváření, která zamezí tvorbě velkých krystalických zrn.

Pokud se pracovními podmínkami trefíme do oblastí tváření daného materiálu, budeme úspěšně měnit jeho tvar i strukturu. Zejména při tváření za studena, kdy nedojde ke změně struktury rekrytalizací můžeme pozorovat trvalou deformaci krystalových zrn závislou na směrech působení napětí. Zrna se protahují ve směru kladných napětí.

Jelikož se experimentální část této práce realizuje na vzorcích plechu, mohu jako příklad uvést deformaci zrn plechu ve směru válcování, v tomto případě je určení směrů kladných napětí vcelku jednoznačné.

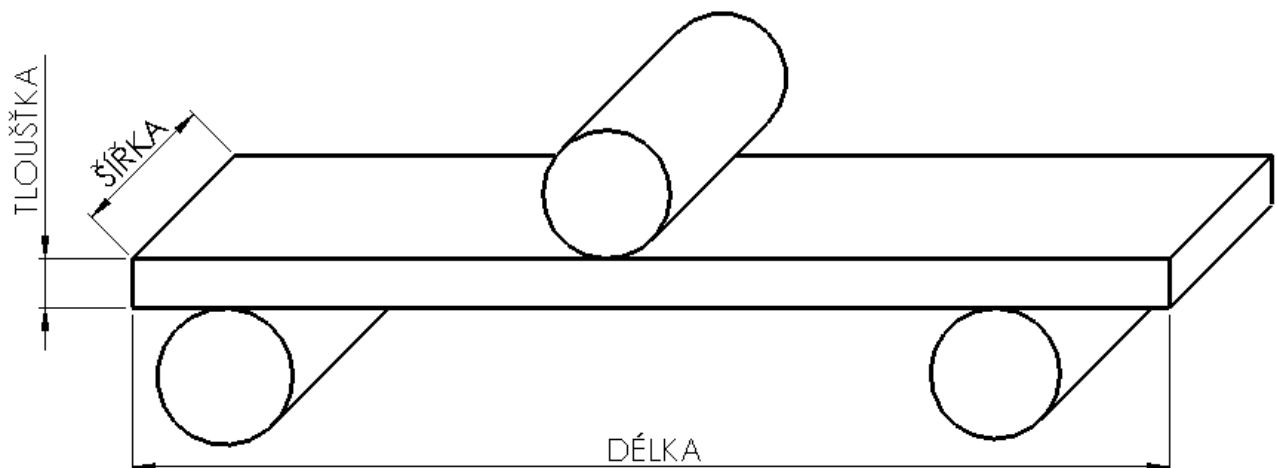
Ohyb

Směr válcování lze na vývalku rozeznat podle textury, což je makroskopický projev uspořádání jednotlivých zrn materiálu. Válcují se dlouhé profily jako kolejnice, bezešvé trubky (šikmými válci) a také třeba plechy. Vývalky jsou často určeny k dalšímu zpracování, zejména k obrábění nebo ohýbání a lisování, na které pak navazují další operace. Plechy je po vyvácování obvyklé tvářet za studena, ať už mluvíme o potravinářských aplikacích (od hrnce, přes medomet až po silo) nebo o plechy pro transformátory, rozvaděčové kryty či automobilový průmysl.

V automobilovém průmyslu se díky sériovosti výroby setkáme s velmi náročnými prostorovými výlisky. Prostorový výlisek představuje komplexní problém ohledně řešení zeslabování tloušťky materiálu a mnoha dalších faktorů včetně prostorových projevů odpružení.

Dvourozměrné ohýbání je modelově jednodušší a lépe se měří i popisuje. Mluvíme-li o ohýbání plechu, je při ohybu vytvářena více či méně ostrá hrana (u profilů bych slovo hrana nepoužíval). [4] O ostrosti hrany vypovídá poloměr ohybu, který je dán geometrií ohybníku a také vzdáleností jednotlivých míst v nichž působíme na polotovar silami- při ohybu tedy vzdáleností podpor. Protože větší rozchod podpor umožní větší pružení mezi nimi a nepřinutí materiál těsně obemykat ohybník.

Směr souosý s hranou ohybu nazvěme šířkou, kolmý směr v rovině plechu na níž dolehne ohybník délkou a směr souosý se směrem pohybu ohybníku (do materiálu) tloušťkou.

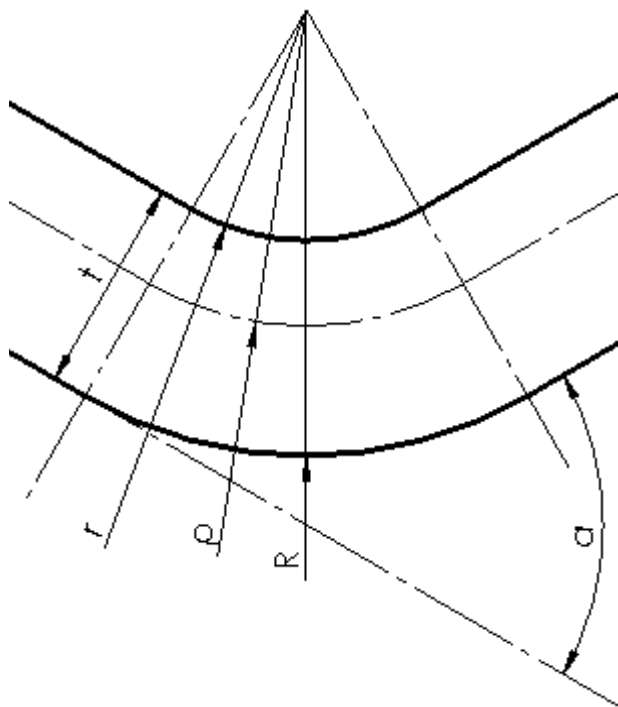


Obrázek 4: Schéma zkoušky

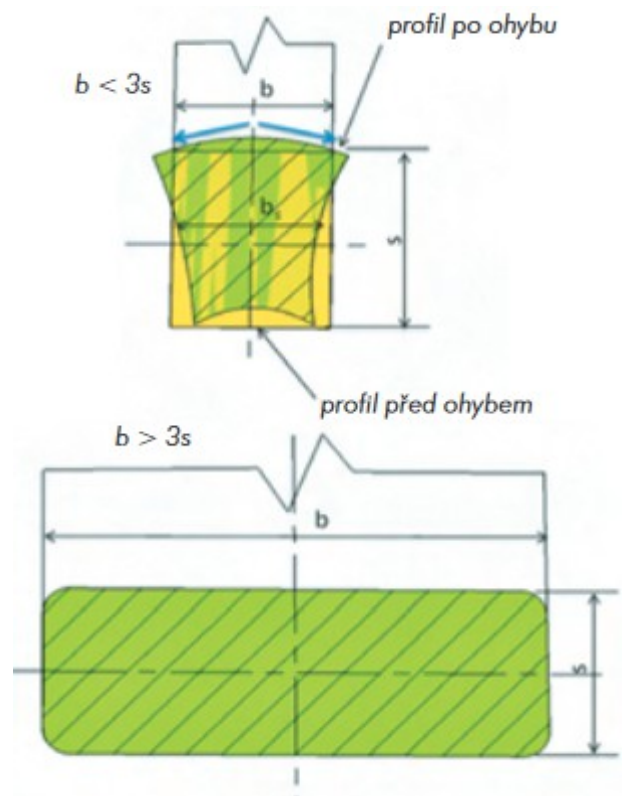
Jelikož má polotovar určitou tloušťku, zvětšuje se plynule poloměr ohybu od ohybníku na jeho protilehlý povrch. Deformace ohybem tedy zřejmě vyvolá v materiálovém průřezu rovinou tloušťky a šířky kontinuálně se měnící pnutí. Dále z mechanického rozboru situace plyne, že pro vyvolání ohybu je zapotřebí ohybový moment, nikoli jen síla (moment složený ze sil), tento

moment vždy na jednom povrchu polotovaru (u ohybníku) vyvolá tlak a na protějším, u ohybnice, tah. [5]

Z podmínky kontinuální změny pnutí a nutnosti tahu a tlaku na protilehlých površích plyne existence neutrální vrstvy v materiálu. Je to místo, kde nedochází k deformaci materiálu. Se zmenšujícím se poloměrem ohybu a zvětšující se deformací dochází k posouvání neutrální vrstvy směrem do středu zakřivení [6]. Na znalosti její polohy zakládáme výpočet délky polotovaru pro ohýbání. Jelikož v ní materiál svou délku nemění, je optimální délka polotovaru pro ohýbání rovna délce neutrální vrstvy po ohnutí. Je-li polotovar vzhledem k rovině šířky a délky symetrický, je neutrální vrstva identická s rovinou této symetrie před ohybem. Schéma ohybu včetně neutrální vrstvy je na obrázku 5.



Obrázek 5: Hlavní rozměry v ohybu: r, R - nejmenší a největší poloměr materiálu, ρ - poloměr neutrální vrstvy, t - tloušťka materiálu, α - vnější porovnávací úhel ohybu



Obrázek 6: Deformace průřezu rovinou šířky a tloušťky v závislosti na rozměrech polotovaru

Kvůli zanedbáním při výpočtech se vyplatí rozlišovat malé a velké deformace. Pro malé deformace, kdy je poměr nejmenšího poloměru ohybu ku tloušťce materiálu větší než 12 [6], tedy

$$r/t > 12$$

lze posun neutrální roviny považovat za zanedbatelný. Pro větší deformace platí

$$\rho = \frac{r+R}{2} * \frac{t_2}{t_1} * \frac{s_2}{s_1}$$

kde ρ je poloměr neutrální vrstvy, R je největší poloměr ohybu, t_1 a t_2 je tloušťka materiálu před a po ohnutí a s_1 a s_2 šířka materiálu před a po ohnutí.

Velikost deformace je omezena mezí pevnosti materiálu. Je-li meze pevnosti dosaženo, materiál se poruší (zlomí, roztrhne). Toto pevnostní kritérium transformujeme na kritérium geometrické, které je v praxi snadno měřitelné a podává konstruktérovi nástroje důležité informace. Zavádíme minimální poloměr ohybu R_{min} , který je obecně závislý na tloušťce, tvaru, povrchu, materiálu (anizotropii, plasticitě) nebo úhlu ohybu [7]. Počítá se dle vzorce

$$R_{min} = \frac{t}{2} \left(\frac{1}{\varepsilon_{max}} - 1 \right) = C * t$$

Kde konstanta C pro měkké oceli nabývá zpravidla hodnot $C \in (0,5; 0,6)$ a t značí tloušťku materiálu. Vzhledem k elastickým deformacím se zase jeví jako smysluplné zavést také maximální poloměr ohybu R_{max} , při němž už zůstanou trvalé deformace.

$$R_{max} = \frac{t}{2} \left(\frac{E}{R_e} - 1 \right)$$

Ve skutečnosti lze tyto hodnoty ještě dále empiricky upravovat např. kvůli různým vlastnostem materiálu. Očekává se např. větší náchylnost k praskání materiálu při ohybu, kdy jsou vlákna rovnoběžná se směrem šířky a větší tendence odpružovat při ohybu s vlákny ve směru délky. Právě kvůli praskání se doporučuje ohybat s vlákny ve směru délky, nebo s odklonem maximálně do 30° od tohoto směru i přes zjevnou nevýhodu většího odpružení.

Ohýbat lze např. plechy, profily, dráty, plastové výrobky apod. Při ohýbání polotovaru s šířkou menší, než trojnásobek tloušťky je nutné brát v úvahu i nedostatečnou tuhost a deformaci průřezu [8], jak je znázorněno na obr.6.

Pokud by navíc byl tvar přístřihu komplikovaný, nebo se požadovaly složitější deformace, je vhodné zaručit očištění okrajů od otřepů a zářezů, které by při zvýšení napjatosti mohly způsobit natržení materiálu. Z toho důvodu není v přístřizích ani vhodné vystřhávat nezaoblené díry nebo okrajové prvky, jako V-zářezy a to ani po ohýbání, kvůli vnitřím pnutím v materiálu a následnému namáhání za provozu výrobku. Co se týče nároků na konstrukci výlisku či ohybku, lze obecně říci, že čím méně ostrých výběrů v materiálu, tím lépe.

Ohyb může být volný - bez přidržovače - kdy se výrobek umísťuje pouze na dorazy, kolíky nebo není požadována přesnější geometrie; s přidržovačem, například následuje-li po sobě více operací, jejichž výsledky se nemají ovlivnit (umístíme přidržovač mezi místo, kde operace již byla vykonána a místo, kde ohýbáme nově), a dále například s přidavnou tahovou silou [9], či v kombinaci s dalšími způsoby zatěžování (kalibrací atp.). Dále se rozlišuje ohýbání v nástroji a bez nástroje, protože nástroj omezuje tvar celého ohybku, zatímco při ohýbání bez nástroje se ohybek mezi body, v nichž působí hlavní akční síly vyvolávající ohyb, deformuje tak, aby vyrovnával pnutí v sobě.

Do skupiny ohýbání patří např. technologie zakružování. Operace probíhá mezi nesouměrně uloženými skupinami válců po stranách polotovaru. Při průchodu drátu či plechu válcovací stolicí jsou válci zajištěny konstantní ohybové podmínky tak, že je poloměr ohybu stejný po celé délce výrobku. Jsou-li válce nerovnoběžné dochází k zakružování plechu do kužele. Zakružují se plechy na svařovaná potrubí velkých průměrů nebo i trubky samotné.

Další technologií ohýbání je ohraňování. Ohraňování na lisu je zahnutí volných konců plechu podle ohybnice, zatímco neohybané tělo je uchyceno přidržovačem. Často je poslední operací před konečným ostříhnutím. Ohraňovacím způsobem se vyrábějí z velké části skříně elektrických rozvaděčů. Zkoušku ohraňování provedu i v této práci.

Profilování plechu je postupné ohýbání spojitého plechového (např.) pásu řadou tvarovaných válců. Na jednom kusu materiálu lze tak v každý okamžik pozorovat postupné přetváření ze vstupního rovného plechu, až do finálního profilu. Proces je realizovatelný válci na profilovací trati, do níž je plech tlačěn potřebnou silou.

Navíjením se utváří například plechové svitky pro kontinuální přívod plechu do lisu. Navíjení je v principu podobné ohybání trubek, ale není třeba kontrolovat axiální deformaci výrobku na cívce. Navíjením vznikají menší deformace než zakružováním a válce okolo cívky slouží k jako podavače a vedení materiálu. Navíjení plechů probíhá často za teplot kolem 500°C, což zpomaluje chladnutí materiálu, ale urychluje výrobu.

Ohýbání trubek probíhá často rotačním způsobem -odvalem trubky v profilové kladce- která neumožní její zploštění. Trubka je oběma konci uchycena a na kladku se navíjí. Další možností je ohýbání přes profilovaný nástroj s radiusem. [10]

Lemování slouží ke zpevnění plechu, nebo k přípravě tenkých plechů pro lemové spoje. Nemusí probíhat pouze v lisu, existují i příruční, např. pneumatické lemovačky. [11]

Vedle lemových spojů se hrany plechů zpevňují a spojují drápkováním.

Volné ohýbání se uplatní při statické zkoušce ohybem, jakou realizujeme v experimentální části, jinak nebývá příliš oblíbené, zajišťuje totiž malou přesnost a velké odpružení.

Přesnost výlisku, či ohybku je ovlivňována materiálovými a konstrukčními charakteristikami. Materiálové charakteristiky souvisejí zejména s rozsahem zplastizované oblasti a mírou zplastizovanosti a tedy s odpružením. Konstrukční vlivy v sobě zahrnují rozměry a přesnost polotovaru, přesnost a opotřebení nástroje a tvarovou složitost výlisku či ohybku.

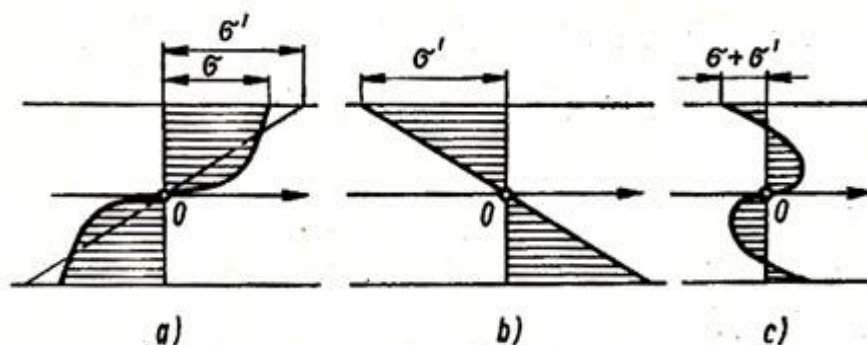
Odpružení

Při tváření kovů za studena se setkáváme s nežádoucím jevem- odpružením. To je projevem zbytkových elastických deformací akumulovaných v materiálu, k jejichž uvolnění dochází jeho odlehčením. Budeme-li uvažovat materiál, u něhož nedochází ke zpevnění, bude jeho pracovní diagram vypadat jako diagram 4 na obr. 1 v kapitole Tváření.

Zde se po dosažení meze kluzu nacházíme v oblasti plastických deformací, odpružení je konstantní a velikostně odpovídá deformacím na mezi kluzu. Meze kluzu není však v praxi dosaženo ve všech místech výrobku najednou. V daném čase se různé oblasti výrobku nacházejí v různých stádiích před nebo za mezí kluzu. Navíc kovové materiály deformací zpevňují a tak druhá část diagramu není konstanta, ale zpravidla převážně konkávní křivka s mezí pevnosti na svém maximu, jako na diagramech 1 a 3 obr. 1.

Tato křivka roste až do meze pevnosti. Pro jednoosou napjatost v prizmatické tyči platí, že po odlehčení, v libovolném bodě diagramu, se element zkoušeného vzorku vrátí po přímce o směrnici modulu pružnosti v tahu E (čerchované přímky na obr. 1), přičemž deformačně odpruží. Provedeme-li opětovné zatížení, opíše pracovní diagram přímku, po níž se předtím vrátil a dále pokračuje v původní zatěžovací charakteristice. U jiného způsobu zatěžování, jako je ohyb, ale nastane případ, že místa, která se snaží odpružit více, či méně, se narozdíl od tahu/tlaku ovlivňují a celkové odpružení je tak superpozicí všech těchto dílčích snah o odpružení. Čím komplikovanější napjatost bude do materiálu vnesena, tím komplikovanější mohou být zpětné deformace jí vyvolané.

Při obecné napjatosti, narozdíl od tahové zkoušky, nedeformujeme materiál v celém jeho objemu stejně. Z toho důvodu se v jednom okamžiku namáhání nachází každý element vzorku v jiném bodě pracovního diagramu. Ve zpevňujících materiálech bude proto i odpružení v každém elementu odlišné. Při volném ohybu se bude odpružení lišit vrstvu od vrstvy, ve vrstvách ekvidistantních od roviny šířky a délky, podle toho, v jaké tloušťce materiálu se daná vrstva nachází.



Obrázek 7: Rozložení napětí v materiálu a) vyvolané ohybem (skutečné σ a linearizované σ'), b) vyvolané odpružením, c) superpozice a) a b)

Důsledkem a důkazem může být změna geometrie dílu po odbroušení povrchových vrstev ohybku. Vlivem rozdílných tenzí k odpružení ve vrstvách nalezneme materiál po odbroušení svrchní vrstvy nový (termodynamicky) rovnovážný stav a vyrovná se se ztrátou vrstvy, která v něm udržovala určitou napjatost.

Aby výroba zajistila geometricky vyhovující, za studena tvářené díly, je možno odpružení kompenzovat větším stupněm deformace, buď ve smyslu většího ohnutí, aby díl odpružil do požadovaného stavu, nebo kalibrací - přitlačením na materiál přidavnou silou (v lisu) - čímž dojde také ke zvětšení napjatosti, ze které bude materiál odpružovat [8]. Tak lze tedy omezit odpružení ovlivněním materiálních vlastností. Dále se za účelem omezení odpružení vytvářejí na výrobcích technologické prolisy, žebrování atp., které brání nově vzniklé napjatosti deformovat výlisek, ovšem nesnižují ji.

Odpružení, jakého je po tváření za studena dosaženo je ovlivněno [12] zejména **materiálem**, jaký tváříme, ale mluvíme-li o plechu, tak i **směrem**, v jakém byl plech válcován. V daném směru jsou totiž protáhlejší krystalická zrna a v plechu je vytvořena řádkovitá struktura vměstků. Oběma těmito vlivům, materiálu i směru, přiřadíme v experimentální části konkrétní čísla. Vliv materiálů spočívá především ve vlastnostech a tvaru křivky v pracovním diagramu, tedy např. v modulu pružnosti, mezi pevností a kluzu.

Dalšími činiteli při odpružení, které budou pro všechny naše vzorky shodné jsou **tloušťka a tvar** přístřihu. Několik činitelů také zanedbáme (druhé dva), nebo v našem případě ani nevznikne důvod je uvažovat (první dva - netáhneme - ohýbáme), takovými parametry ovlivňujícími odpružení jsou:

- velikost tažné vůle a mazání nástroje
- geometrie a tlak přidržovače
- počet operací
- tvářecí rychlost

Jelikož provádíme statickou zkoušku ohybem, neuvažujeme **rychlost deformace**, protože její hodnoty jsou dostatečně malé a materiál se s nimi stihá vyrovnávat.

V neposlední řadě má na odpružení vliv **poloměr ohybu a plastizací zasažená oblast**.

Počet operací a jeho vliv na odpružení má smysl řešit při různých způsobech namáhání součástí, jelikož ale budeme každý přístřih namáhat pokaždé ve stejném směru, pouze se změnou velikosti deformace, bude se každý element v materiálu chovat stále podle jednoho pracovního diagramu.

Při plošném tváření rozlišujeme několik typů odpružení. [13] Jedná se o:

Natočení bočních stěn. Při plošném tažení přes poloměr tažnice nebo drážkou vznikne v tloušťce plechu gradient napětí, který tento typ odpružení způsobí.

Natočení příčných řezů kroutícím momentem v bočních stěnách kvůli nevhodné volbě přístřihu, nebo kvůli rozdílným třením na přidržovačích (rozdílný tlak, mazání, opracování).

Zkřivení hrany způsobené například vlivem rozdílných poloměrů, přes které je materiál tažen. Nezpůsobuje ho však moment kroutící, ale ohybový.

Zkroucení povrchu formou místních geometrických vad. Výstupky a vybouleniny podobné vyboulení plechu při ohřátí.

Úhlovou změnu.

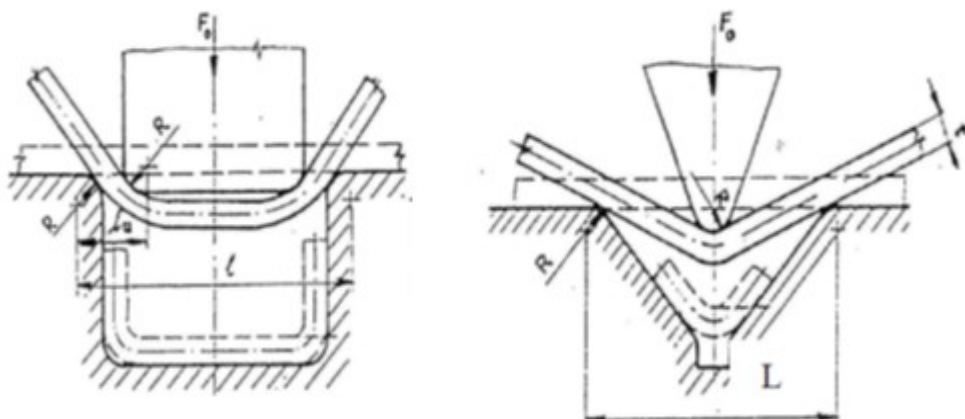
U obou zkoušek, které provedeme (ohraňovací a volný tříbodový ohyb) se budou s různou intenzitou projevovat zejména dva typy odpružení - natočení bočních stěn - které ale nesledujeme, a úhlová změna.

Úhlová změna je nejvýraznější typ odpružení u volného ohybu. Jedná se o změnu úhlu mezi dvěma stranami, mezi nimiž proběhl vzájemný ohyb. Hodnota odpružení je dobře měřitelná jako rozdíl mezi úhlem dosaženým pod zátěží a po odlehčení. Je způsobena ohybovým momentem a souvisí s ní zvětšení poloměru ohybu.

Výpočet velikosti úhlu odpružení při „V“ a „U“ ohybu se provádí podle vzorců:

Pro „V“ ohyb: $\gamma = \text{atan}\left(0,375 \cdot \frac{l}{k \cdot t} \cdot \frac{R_e}{E}\right)$ kde k značí součinitel polohy neutrální osy,
 t tloušťku materiálu a
 l vzdálenost podpor.

Pro „U“ ohyb: $\gamma = \text{atan}\left(0,75 \cdot \frac{l_m}{k \cdot t} \cdot \frac{R_e}{E}\right)$ kde l_m znamená rameno ohybu.



Obrázek 8: Schéma „U“ ohybu vlevo, „V“ ohybu vpravo

Odpružení se ale také určuje z diagramů, které jsou pro danou ocel naměřeny.

Materiál

Nahrazování hlubokotažných ocelí vysokopevnostními ($R_{p0,2} < 500$ MPa) klade vyšší nároky na omezování odpružení těchto ocelí. Jedna z možností, jak vytvořit vysokopevnou ocel s přípustnou tvařitelností je výroba dvoufázových ocelí, konkrétně feriticko-martenzitických.

Jejich výroba spočívá v přesném načasování ohřevu při žhání a v zakalení ve chvíli, kdy je v materiálu obsažen vhodný podíl feritu, austenitu, případně ještě nepřeměněného perlitu. Správně provedené žhání mezi teplotami A_{c1} a A_{c3} se nazývá interkritické a má za následek zpravidla 10% až 25% podíl tvrdého martenzitu ve tvárné feritické matici. [14] Závislost meze pevnosti R_m na relativním objemu martenzitu V_M ve struktuře je empiricky popsána vztahem:

$$R_m = 480 + 9,1 V_M$$

Při velkých podílech martenzitu však hrozí spojování jeho struktury do větších celků a křehnutí materiálu.

S dobrou tvařitelností, požadovanou po těchto ocelích, souvisí snaha co nejvíce rozšířit oblast mezi $R_{p0,2}$ a R_m . Je prokázáno, že zatímco R_m s rostoucím podílem martenzitu trvale roste, $R_{p0,2}$ je nejnižší (v závislosti na legování) mezi 10-20% martenzitu. Velký poměr mezi R_m a $R_{p0,2}$ souvisí s výrazným zpevněním materiálu, což přispívá k požadované výsledné vysoké pevnosti součástí.

Hlavními legurami ve ferito-martenzitických ocelích jsou mangan a křemík. Jejich obsah se liší dle typu výroby, která se děje buď kontinuálním žháním, nebo stacionárním žháním v pokloповých pecích. Při žhání v pokloповé peci je manipulací omezena rychlost ochlazování a je potřeba zvyšovat obsah manganu za účelem lepší prokalitelnosti. Tento způsob výroby tedy zvyšuje cenu oceli.

Vedle interkritického žhání existuje ještě metoda výroby as rolled. Oceli vyráběné metodou as rolled mají snížený obsah uhlíku a obsahy manganu a křemíku spíše pod 1%. Tyto oceli jsou svinovány do svitků při teplotách 500 – 600 °C a jsou dolegovány, zpravidla až 0,5% molybdenu, tak, aby byla potlačena přeměna na bainit a aby v nich i za těchto podmínek vznikala martenzitická struktura. [14]

Tabulka 1: Přehled vlastností použitých plechů. [15]

	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Al [%]	Nb+Ti [%]
Docol 800 DP	500-650	800-950	0,15	0,4	1,8	0,02	0,01	0,02		0,1
Dogal 780 CP	500-700	780-950	0,16	0,25	1,9	0,02	0	0,5	0,02	0
Dogal 800 DP	500-640	800-950	0,16	0,25	1,9	0,02	0	0,5	0,02	0
Dogal Roll 800	620-770	800-950	0,16	0,25	1,9	0,02	0		0,02	

V experimentech jsme použili plechy uvedené v tabulce č. 1. Rozměry tloušťky plechů jsou tolerovány podle EN 10131. [16]

V průběhu psaní této práce bylo změněno podnikové značení analyzovaných materiálů od firmy SSAB. Značení, zde uvedené je původní, pod nímž byl materiál pořízen. Zkratka CP znamená „complex phase“ a materiál s ní má menší oblast plastických deformací, než materiál se zkratkou DP. Zkratka DP je „dual phase“.

Lze si povšimnout, že od začátku kapitoly je používána značka smluvní meze kluzu, místo skutečné. Požadavkem na tyto oceli totiž je nevýrazná mez kluzu. Nevýraznou mezí kluzu se projevují uklidněné oceli, u těch ostatních vzniká na povrchu takzvaná pomerančová kůra vlivem působení obsažených oxidů a tyto oceli navíc trpí nehomogenitami. Z toho důvodu nevolíme neuklidněné oceli s výraznou mezí kluzu. Pracovní diagram oceli od meze kluzu směrem do vyšších deformací lze matematicky popsat Ludwиковým vztahem [17] [18]

$$\sigma_1 = C * \varepsilon_1^n$$

Kde C je pevnostní součinitel a n je exponent deformačního zpevnění. [19] Exponent deformačního zpevnění je tím větší, čím intenzivnější je zpevňování materiálu. Pro oceli nabývá hodnot $n \in (0,1; 0,5)$ konkrétně z přechozích experimentů provedených na Ústavu strojírenské technologie znám tento exponent pro Dogal 780 CP. Jeho zjištěná hodnota byla $n \in (0,15; 0,16)$. C je tím větší, čím větší je pevnost materiálu, pro měď nabývá hodnot kolem 50 000, pro oceli zpravidla 70 až 230. [20]

Pro oceli s výraznější mezí kluzu je vhodné užít jiný model, např. Ramberg-Osgoodův vztah.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + C * \left(\frac{\sigma}{E}\right)^n \quad [21]$$

Pracovní diagram materiálu, se stejně jako průběh zkoušky ohybem liší v závislosti na směru válcování. Exponent n je proto vhodné měřit ve více směrech, zpravidla ve směru válcování, s odklonem 45° a kolmo na směr válcování.

Anizotropie mechanických vlastností materiálu se vyjadřuje součinitelem plastické anizotropie. [22] Ten se měří při tahové zkoušce jako poměr příčných deformací a to opět v různých směrech jako exponent n . Při tahové zkoušce plechového vzorku požadujeme, aby byl součinitel plastické anizotropie r co největší. Je definován jako

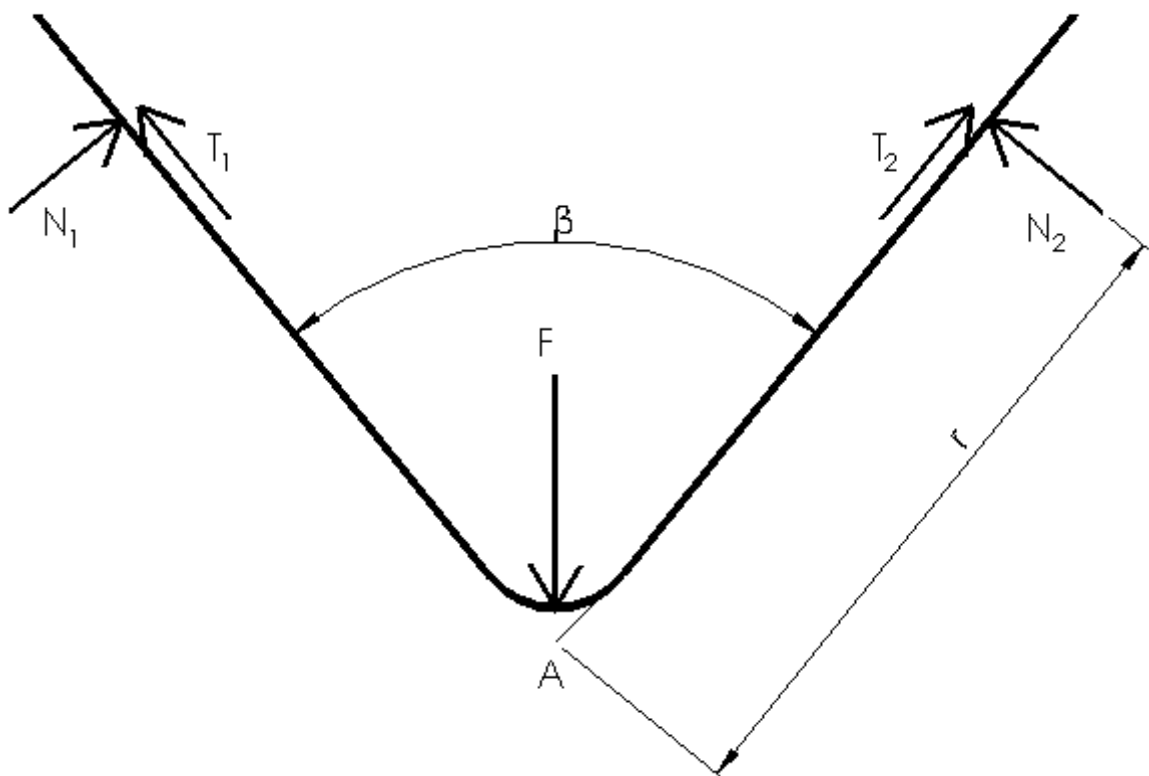
$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} = \frac{\ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right)}{\ln\left(\frac{s_1}{s_2}\right)}$$

Zde r , φ_b a φ_s je značení dle normy a $t_{1,2}$ pro tloušťku a $s_{1,2}$ pro šířku je značení sjednocené v této práci. Pokud je součinitel plastické anizotropie velký, znamená to, že tahem se příliš nezmenšila tloušťka materiálu a tedy, že materiál je možno dobře tahnout.

Statický rozbor ohybu

Seznámení s problematikou výroby ohybku nezahrnuje pouze aspekty technologické či materiálové. Na tento problém se můžeme podívat i z hlediska mechaniky, ať už mluvíme o silovém rozboru metodami mechaniky tuhých těles, nebo rozboru napětí v materiálu metodami teorie pružnosti a pevnosti. Zde se zaměřím na zjištění vztahu mezi ohybovým momentem ve zkoušeném vzorku a silou, jakou působí ohybník.

Nejprve tento silový rozbor provedu pro zkoušku tříbodovým ohybem. Pro lepší představu necht' slouží obrázek níže.



Obrázek 9: Schéma tříbodového ohybu

Na obrázku vidíme schéma křivého prutu, kterým lze při ohybu plech nahradit. Písmeno A značí myšlený bod, ke kterému bude z důvodu zjednodušení počítán „virtuální“ ohybový moment M_A . F značí sílu vnášenou do systému ohybníkem. N a T značí stranově symetrické reakce od podpor.

Nejprve napíši rovnici silové rovnováhy do směru tloušťky. μ značí koeficient tření.

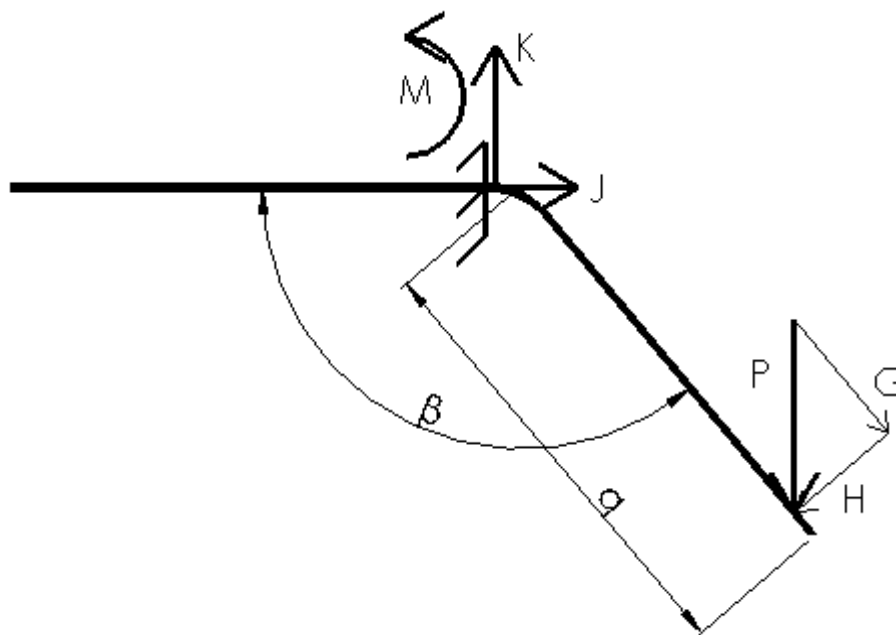
$$F = 2 * [\sin(\frac{\beta}{2}) * N + \cos(\frac{\beta}{2}) * (\mu * N)]$$

$$N = \frac{F}{2 * [\sin(\frac{\beta}{2}) + \mu * \cos(\frac{\beta}{2})]}$$

A poté spočítám, užitím metody řezu, moment k bodu A, který se velikostně téměř rovná ohybovému momentu v materiálu pod ohybníkem. Zde písmeno L značí vzdálenost podpor.

$$M_A = N * r = \frac{N * L}{2 * \sin(\frac{\beta}{2})} = \frac{\frac{F}{2 * [\sin(\frac{\beta}{2}) + \mu * \cos(\frac{\beta}{2})]} * L}{2 * \sin(\frac{\beta}{2})}$$

Obdobný silový rozbor provedu i pro ohyb přes hranu, jehož schéma vizte níže. P značí sílu ohybníku, ta je rozložena na složky G a H . q je vzdálenost mezi působištem P a protaženým ramenem ohybu, protože při výpočtu opět použiji zanedbání zakřivení při ohybu. J a K jsou reakční síly ve vetknutí, které uvažuji v místě, kde je plech upnut přídržovačem. M je reakční ohybový moment v bodě vetknutí. Mimo obrázek použiji značení M pro „virtuální“ moment v průsečíku protažených ramen plechu (dále PPRP) při zanedbávání křivosti ohýbané hrany.



Obrázek 10: Schéma ohraňování

Rovnice silové rovnováhy do směru tloušťky má podobu:

$$P = -H \cdot \cos(\beta) + G \cdot \sin(\beta)$$

$$P = -H \cdot \cos(\beta) - H \cdot \tan(\beta) \cdot \sin(\beta)$$

$$H = \frac{P}{-\cos(\beta) - \tan(\beta) \cdot \sin(\beta)}$$

Kde znaménko mínus před kosinem a tangensem je způsobeno volbou úhlu β .

Ohybový moment v PPRP je

$$M = H \cdot q = \frac{P}{-\cos(\beta) - \tan(\beta) \cdot \sin(\beta)} \cdot q = \frac{P \cdot q}{-\sec(\beta)}$$

Rozepíšu nyní ohybový moment při třibodovém ohybu.

$$M_A = \frac{F}{2 \cdot [\sin(\frac{\beta}{2}) + \mu \cdot \cos(\frac{\beta}{2})]} \cdot r$$

Zajímá mě, která zkouška je výhodnější z hlediska potřebné použité síly, při kterém způsobu zatěžování bude potřeba menší moment a i pro vyvolání stejné deformace. Ramena ohybu q a r budu považovat za stejně dlouhá (jednotková) tedy i délka trajektorie ohybníku bude stejná. Součinitel tření mezi ocelovou podpěrou a ocelovým polotovarem bez mazání je podle tabulek $\mu=0,15$. Sílu uvažuji jednotkovou.

Tabulka 2: Ohybový moment dosažený silou 1N při různých způsobech ohýbání.

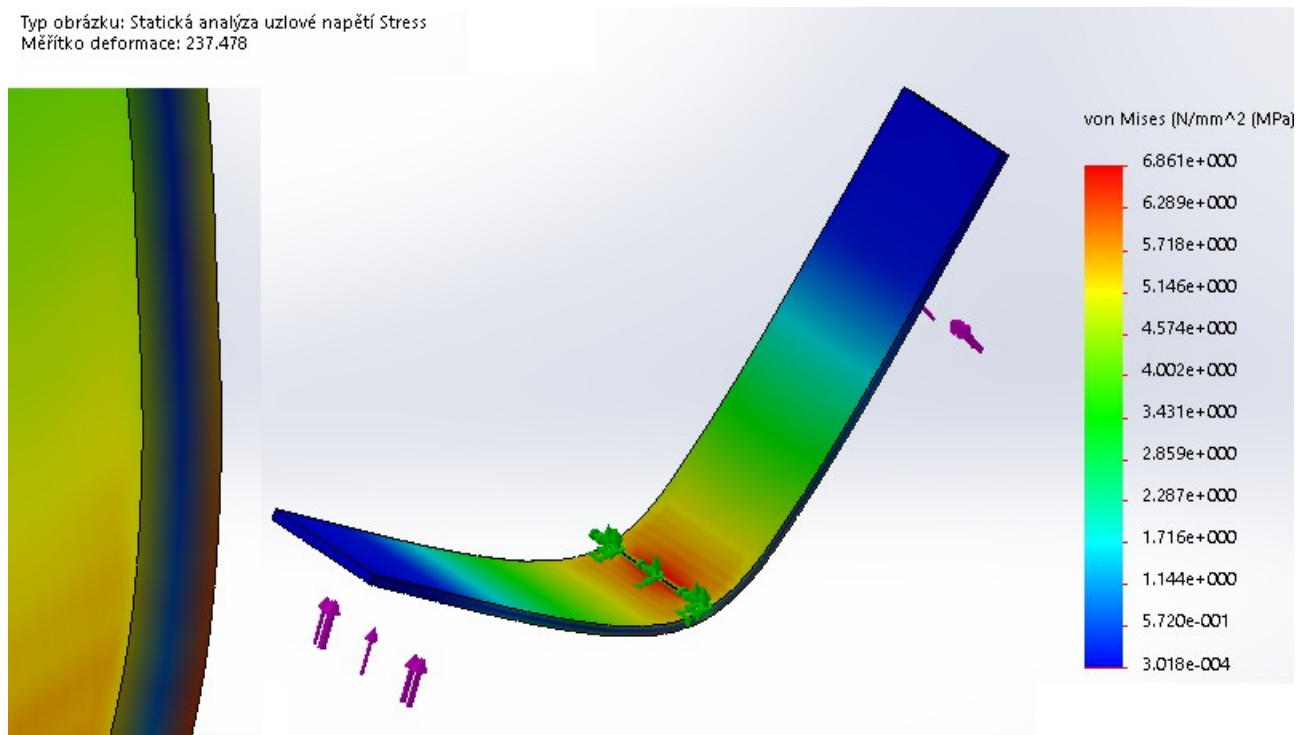
Úhel β	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
Vnější porovnávací úhel ohybu	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°
* v ohybu přes hranu	-0,94	-0,87	-0,77	-0,64	-0,5	-0,34	-0,17
* v třibodovém ohybu	1,56	1,24	1	0,9	0,79	0,72	0,65

*Moment od síly 1 N při délce ramene vzorku 1 m, kterého je (s jistým zjednodušením) dosaženo v místě ohybu, jedná se tedy o maximální moment. Hodnota uvedena v Nm.

Ilustrativní simulace napjatosti

Ohyb vyvolává v materiálu dvourozměrnou napjatost působením síly ohybníku na ohýbaný vzorek. Napětí ve třetím směru - v šířce ohybku - může být způsobeno výrobními nepřesnostmi stroje i zkoušeného vzorku, nebo jak vidíme na obrázku níže konečností vzorku. Ideální dvourozměrná napjatost totiž odpovídá předpokladu nekonečného plechu. Změny, které jsou na obrázku pozorovatelné v okolí největších napětí však vzhledem k šířce vzorku považujeme za zanedbatelné okrajové jevy. Pro ilustraci zde uvádím obrazový výstup ze simulace napjatosti, kterou jsem provedl v programu Solidworks. Jedná se o simulaci při poloměru ohybníku 10 mm, vzdálenosti středů podpor 100 mm pro materiál odpovídající parametrům plechu DOGAL 780 CP, tedy s mezí kluzu 600 MPa a mezí pevnosti 800 MPa. V simulaci je materiál prohýbán z průhybu 30 mm (což odpovídá vnějšímu porovnávacímu úhlu cca 78°) do větších hodnot průhybu. Simulace je provedena při zatížení jednotkovou silou, zobrazená napjatost je počítána podle teorie Huber-Mises-Hencky. Simulace je provedena se zatěžovací silou 1N.

Typ obrázku: Statická analýza uzlové napětí Stress
Měřítko deformace: 237,478



Obrázek 11: Ukázka rozložení napětí v simulaci zkoušky tříbodovým ohybem.

Vlevo je zvětšen detail hrany plechu, je na něm rozeznatelná modrá oblast kolem neutrální vrstvy ohybu.

Návrh experimentu

V práci se zaměřím na zjištění vlivu směru vláken (směru válcování) plechu na jeho odpružení a vzájemně porovnáám odpružení při dvou způsobech ohybání. Jelikož však nejsem schopen bezprostředně určit směr válcování dodaných plechů, omezím se na dva vybrané směry. Jeden kolmý ke směru válcování a jeden rovnoběžný, přičemž ale nevím, který je který. Pro tyto účely využiji plechy pro automobilový průmysl od firmy SSAB. Všechny plechy budou mít jednotnou tloušťku 1,5mm.

Nejprve připravíme přístřihy pro zkoušku. Šířka přístřihů musí být dostatečná, aby nedocházelo k deformacím profilu. Volíme ji 20 mm. Délka vzorků je proměnlivá. Podstatným faktorem je, aby vzorek i po maximálním prohnutí ležel na podpěrách. Delší vzorky tak budou použity při měření s menším rozchodem podpor a delší při větších rozchodech. Jedná se o obdélníkové pásy.

Stroj použitý v experimentu

Zkoušky jsou prováděny na univerzálním trhacím elektromechanickém stroji LabTest 5.100 SP1 výrobce LABORTECH s.r.o. na Ústavu strojírenské technologie, [23] který je schopen provádět zkoušky statické - tahem a tlakem - i dynamické zkoušky se stejným smyslem namáhání. Stroj je vybaven firemním softwarem Test&Motion, přes který může být ovládán, nebo přes něj lze do počítače zaznamenávat parametry zkoušky, jako síly a posuvy atd.

Software stroje umožňuje provádění zkoušek podle řady norem včetně ISO, ČSN, EN. Stroj je vyroben podle evropských norem a zajišťuje přesnost činnosti a měření při teplotách od -5°C do 40°C, relativních vlhkostech mezi 20-90% (s maximem 50% při 40°C), do nadmořské výšky 1000 metrů nad mořem. Stroj je vybaven tenzometrickým snímačem KAF 100kN o jmenovitém zatížení 100kN s třídou přesnosti 0,1% a snímačem polohy EDC – BOX220 o rozlišovací úrovni $\pm 180\ 000$ dílků. Pohon příčnicku zajišťuje servomotor SER 31122 4L 5S S0CO o jmenovitém výkonu 1 kW při jmenovitých 2250 otáčkách při zapojení do hvězdy a 2 kW a 4000 otáčkách při zapojení do trojúhelníka. Motor je řízen dnes již nevyroběnou digitální servojednotkou LXM-05 AD34N4.

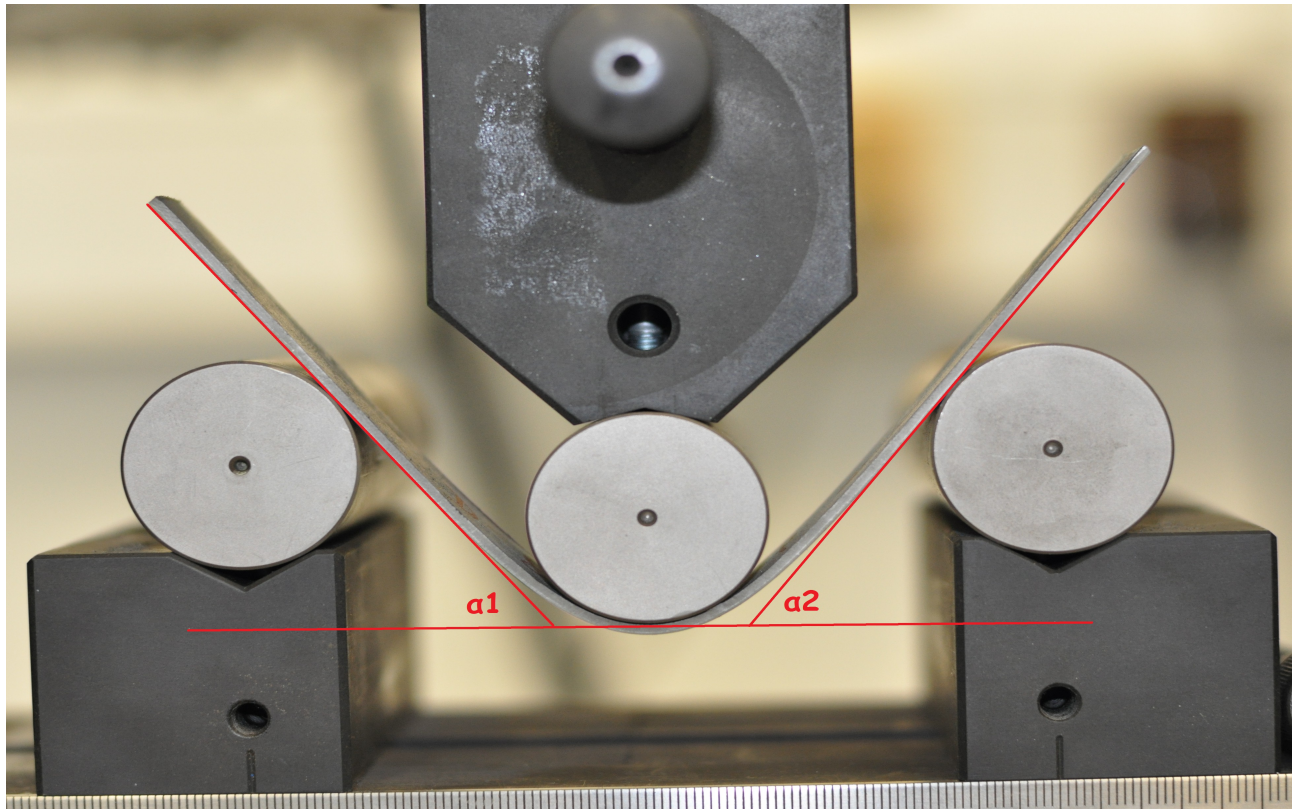
Tabulka 3: Vlastnosti zkušebního stroje.

Technické parametry:	Hodnoty:	Jednotky:
Jmenovité zatížení	100	kN
Minimální zkušební rychlost	0,001	mm/min
Maximální zkušební rychlost	600	mm/min
Návratová rychlost	600	mm/min
Přenos zatížení	0,5	%
Rozlišení polohy příčnicku	1	μm
Opakovatelnost změny	2	μm
Výška pracovního prostoru	1130	mm
Šířka pracovního prostoru	400	mm
Rozměry stroje V x Š x H	2373 x 920 x 880	mm
Hmotnost stroje	533	Kg
Tuhost rámu	$1,6 \times 10^{-6}$	mm/N
Teplota pracovního prostředí	10 – 35	°C
Vlhkost pracovního prostředí	20 – 70	%
Napájecí napětí	230	V
Příkon stroje	2200	VA

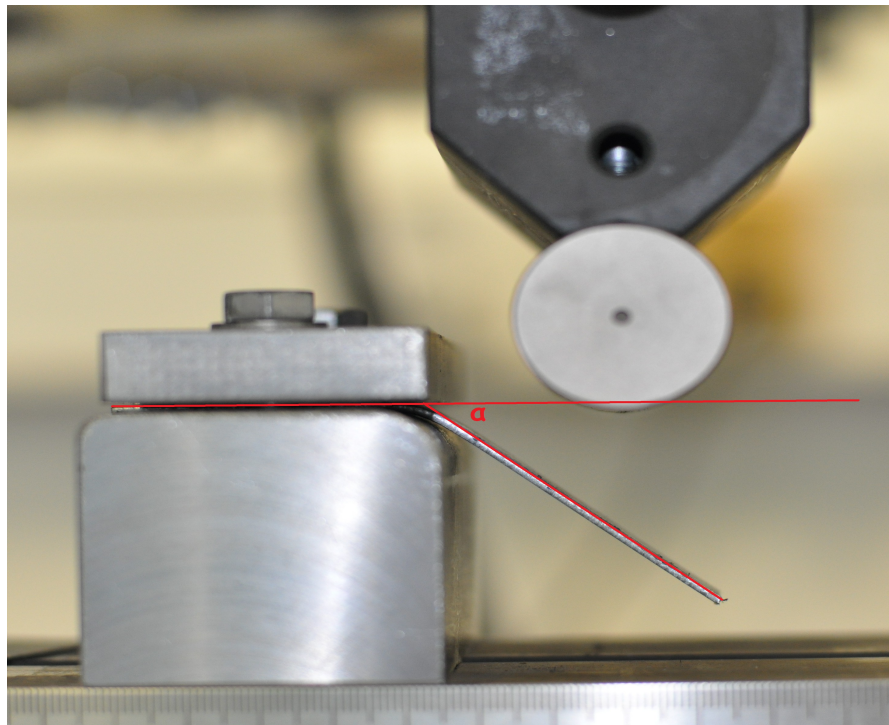
Způsoby zkoušení

Do stroje upevníme jeden ze dvou zvolených nástrojů a zajistíme požadovaným způsobem součásti nástroje.

Plech ohýbáme dvěma způsoby: přes hranu a tříbodově. Výsledky obou zkoušek jsou vzájemně porovnatelné přes úhel o jaký je materiál ohnut.



Obrázek 12: Fotografie tříbodové zkoušky s vyznačenými odměřovanými úhly, jejichž součtem vznikne porovnávací úhel. Pozn.: Poměr stran fotografie neodpovídá skutečnosti.



Obrázek 13: Fotografie zkoušky ohybu přes hranu s vyznačeným porovnávacím úhlem. Pozn.: Poměr stran fotografie nemusí odpovídat skutečnosti.

Porovnávací vnější úhel ohybu:

U ohybu přes hranu je porovnávací úhel ten úhel, o který se odchýlí ohýbaná část plechu od svého původního stavu.

U tříbodového ohybu je porovnávací úhel počítán jako součet úhlů, o které se odchýlí obě ramena plechu (nalevo a napravo od ohybníku) od vodorovné roviny.

Způsob vyhodnocení

K vyhodnocení úhlů jsme použili fotoaparát na stativu umístěný co nejkolměji k čelu nástroje. Zkreslení vyvolané nepřesně kolmým nastavením objektivu na čelo nástroje zanedbáme. Každý vzorek je ohybán několikrát a je vyfocen vždy v zatíženém stavu a ve stavu po odlehčení a odpružení. Fotografie byly sice pořízeny ve vysokém rozlišení, ale jako limitující faktor přesnosti se projeví nerovnosti plechu. Některé plechy totiž buď pocházejí ze svitků, byly prohnuty při předchozí manipulaci nebo, a to zejména, byly vlivem elastických deformací prohnuty kolem ohybníku.

Pro změření úhlu, o jaký je plech prohnut bylo zapotřebí proložit jím na fotografii přímku a zde vzniká největší díl chyb měření. Na prokládání přímky měla vliv také struktura střížné plochy zanechaná v plechu nůžkami. Při prokládání přímky okrajem plechu je dalším limitujícím faktorem zaoblení nebo ořep hrany, které vytvářejí nejasnou hranici pro umístění přímky na fotografii, toto zaoblení našťastí bylo u některých vzorků na fotografiích neznatelné.

U prvních měření jsme se potýkali s automatickým ostřením, které jsme později nahradili ručním. Ruční ostření fotoaparátu namířené na měnicí se scénérii zkoušky probíhající v konstantní vzdálenosti značně celý postup fotografování urychlilo. S automatickým ostřením byl problém namířit a zaostřit na relativně malé objekty (tenký plech a ohybník), navíc fotoaparát ostřil před každou fotografií znovu. V prvních měřeních tedy vnáší další chybu měření různé ostření fotoaparátu, odlišné na fotografii obtíženého i odpruženého vzorku.

K vyhodnocení geometrie z fotografií jsem použil bezplatný vektorový grafický program Inkscape. Při vyhodnocování úhlů program ve fotografii automaticky vytvoří vodorovnou přímku, od které úhly měří. U ohybu přes hranu se virtuální vodorovná přímka nelišila od roviny neohnutého plechu více, než bych ji byl schopen proložit ručně. Z toho důvodu, jsem vodorovnou přímku prohlásil za původní rovinu v níž se nachází plech a urychlil tím měření ohnutí plechu od této roviny.

Při vyhodnocování tříbodového ohybu na poloze virtuální vodorovné přímky nezáleželo, protože jsem měřil orientovaný úhel od této přímky k levému a orientovaný úhel od této přímky k pravému rameni ohnutého plechu. Tyto dva úhly jsem poté od sebe odečetl a získal vnitřní úhel

ohybu zatížený pouze chybou prokládání přímky v ramenech plechu, nikoliv chybou prokládání vodorovné přímky, protože ta ležela na všech fotografiích stejně. Provést ve zvoleném programu přímo měření vnitřního úhlu ohybu by bylo komplikovanější, proto jsem zvolil tuto metodu.

Vnější porovnávací úhel ohybu jsem poté stanovil jako doplňkový úhel k vnitřnímu.

Další možností měření byl výpočet geometrie pod zatížením z posuvu ohybníku, jehož polohu bylo možno přímo ukládat na počítači. Tento způsob měření ale neřeší měření v odlehčeném stavu a tak by při dvojitým způsobu měření vznikaly různé, vzájemně neporovnatelné chyby.

Mohl jsem přeměřovat vzorek posuvným měřítkem. Zde by ale byl problém s místem od kterého měřit, jelikož délková přesnost měřených vzorků byla minimální a ani jejich umístění v nástroji ve směru délky nebylo ničím vymezeno.

Jako funkční alternativa se jeví měření úhloměrem. Tato alternativa nebyla zvolena, protože prodlužuje čas na zkušebně, zatímco fotografie mohou být vyhodnoceny kdykoliv.

Tříbodový ohyb

Tříbodový ohyb realizujeme na ohybadle sestávajícím z ohybnice tvořené dvěma podporami o stejném známém poloměru 10 mm a ohybníku s různým poloměrem. Kvůli rádiusu podpor a vzájemnému pohybu ohybníku a ohybnice nebude v průběhu ohybání konstantní vzdálenost mezi podporami myšleného nosníku, jímž přístřih plechu nahradíme, ani mezi podporami a ohybníkem (nosník se bude na podpěře posouvat a opírat se o její různá místa, navíc bude ohybníkem vynucován posuv materiálu po podporách směrem dolů, čímž se myšlený nosník bude prodlužovat). Tyto délkové změny nebudu ve své práci uvažovat, protože ani při výrobě v průběhu lisovací operace neměníme geometrii nástroje. Vzdálenost podpor bude pro konkrétní každý jeden ohyb fixní a kvůli zjednodušení jí spolu s dalšími faktory (úhel ohybu, poloměr ohybníku...) nahradím obtížně zakomponovatelné proměnlivé faktory v experimentu. Při zkouškách tříbodovým ohybem na nástroji na obrázku 12 může být použito přídatného pojištění podpor proti posuvu do stran (ve směru délky), to ovšem u zkoušek v této práci nebude nutné, protože vzorky jsou dostatečně poddajné a síly potřebné pro jejich deformaci nemají, jak jsme zjistili, vliv na posuv podpor.

Zkoušku jsem provedl s různými změnami rozměrů nástroje. Na ohybnici lze stavit rozměr rozchodu podpor a měnit jejich zaoblení výměnou opěrných válečků. Na ohybníku je výměna válečku jedinou proměnnou. Konkrétní hodnoty nastavených rozměrů nástroje budou uvedeny ve výsledkové části práce.

Měřicí kamera je ostřena na podstavu ohybníkového válečku a plech je ukládán hranou do roviny podstav válečků tak, aby byl nejlépe v rovině, na níž se ostří. Všechny fotografie při obou zkouškách byly pořízeny v rozlišení 4288 x 2848 px.

Ohybník je přiveden do styku s plechem a v ovládacím systému trhacího stroje je na této pozici nastaven počátek souřadného systému stroje.

Rychlosti posuvu ohybníku do ohybnice a rychlost deformace zanedbáváme, neboť je dostatečně malá a zkoušku považujeme za statickou. Víme ale, že rychlost deformace - rychlost změny úhlu ohybu - jakou konstantním posuvem vyvoláme, konstantní není, nýbrž se chová jako goniometrická funkce.

Každý jeden vzorek plechu je prohybán několikrát. Tedy ohybník sjede dolů a ohne plech o hodnotu např. 10 mm, poté vyjede nahoru následován odpružujícím plechem vracejícím se blíže k původní pozici. Po odpružení ohybník opět jede dolů, tentokrát o 20 mm a opět se vrátí do počátku souřadného systému.

Každý vzorek je ohybán podle možností. Při určité hloubce průhybu hrozí, že se plech dotkne podstavy ohybnice, na níž jsou umístěny stavitelné podpory, a dojde k přitlaku. Tímto přitlakem by se odpružení snížilo a jednalo by se již o jiný typ zkoušky.

Dalším omezujícím faktorem je rozšiřující se ohybník nad výměnným válečkem, který se může dotknout podpor, při jejich malé šířce a opět způsobit dodatečný ohyb nebo přidržení materiálu na podporách.

Ohraňování

Ohraňování provádíme na odlišných poloměrech než třibodové ohýbání, což bohužel zkomplikuje porovnatelnost výsledků, ale pro měření nebyly k dispozici dva stejné nástroje ohraňovací a třibodový. Poloměry dostupné zde jsou 4 mm a 10 mm, u třibodového ohybu jsou poloměry ohybníku 5, 10 a 15 mm.

Tento způsob ohýbání se neobejde bez přidržovače, jehož přemontování mírně zpomaluje zkoušku. Nástroj sestává z identického ohybníku, který byl použit i u předchozí zkoušky, ohybnice má jednu podporu, do které je dvěma šrouby připevněn přidržovač. Poloměr ohybnice se mění jejím otočením o 180° na podstavě. Obrázek k této zkoušce je obrázek 13.

Kamera je ostřena na hranu plechu, protože plech a čelo nástroje nelze vlivem šroubů přidržovače umístit do jedné ostřené roviny.

Funkční váleček ohybníku musí být od ohybnice vzdálen tak, aby se tělo ohybníku, které se nad válečkem rozšiřuje, nedotklo ohybnice dříve, než bude uskutečněn maximální sesuv ohybníku omezený podstavou ohybnice, které se plech opět nesmí dotknout, protože by docházelo k vícenásobnému ohybu (přes hranu a na ohybníku).

I v tomto případě je každý vzorek ohybán postupně několikrát. Vzdálenost funkčního bodu ohybníku a ohybnice (myšlených podpor náhradního nosníku) se mění kvůli vzájemnému pohybu nástrojů i kvůli změně bodu, v níž se daná část nástroje dotýká plechu.

Vyhodnocení experimentu

Z naměřených hodnot jsem vytvořil několik grafů. Z grafů závislosti odpružení na úhlu ohybu jednoznačně plyne, že s rostoucím úhlem ohybu roste na všech měřených definičních oborech i odpružení. Veškeré vytvořené grafy jsou k nalezení v příloze. Na poslední stránce práce je legenda pro čtení v grafech.

Vyhodnocení tříbodového ohybu

Materiály

Lze si povšimnout, že většina grafů má pro různé materiály i geometrické podmínky podobný tvar. Křivka závislosti deformace na odpružení má rostoucí monotonii a její růst postupně zrychluje. Výjimkou jsou některé grafy pro ohýbání při nejmenším měřeném rozchodu podpor. Jelikož ale při rozchodu podpor 60 mm proběhla vždy jen 3 měření v řadě, považuji tuto oblast měření za zkreslenou nedostatečným množstvím naměřených dat, ale připouštím i možnost, že změřené hodnoty již obsahují nezanedbatelně velké změny velikosti oblasti, v níž docházelo kolem ohybníku k deformaci. Důvodem zvětšení oblasti, v níž dochází k deformaci, může být příliš velký poloměr ohybníku vzhledem k ostatním parametrům zkoušky. Důsledkem je nabalování ohybku na ohybník a tedy jiný charakter deformace, než ohyb skoro v jednom bodě vzorku.

U plechu **Docol 800 DP** vidíme na grafech určitý rozdíl v odpružení. Ve směru, který jsme na plechu označili 0 je odpružení v naprosté většině případů znatelně větší, než ve směru označeném 90. Podle předpokladu, že odpružení je největší, ohýbáme-li s hranou vzniknoucí ohybem napříč vláknům, lze z výsledků tohoto experimentu usuzovat, že směr 0 je směr vláken, tedy směr válcování plechu. Výsledky bohužel již nejsou tak jednoznačné u plechu **Dogal 780 CP**. Tento plech při zkoušce tříbodovým ohybem neprojevil znatelnou anizotropii, ačkoliv se na grafech jeví jako mírně více odpružující směr označený 90, je rozdíl malý, nestálý a mohl by tedy být způsoben chybou měření.

Vzorky z materiálu **Dogal 800 DP** mají v obou směrech odpružení různé a lze říci, že větší je ve směru označeném jako 90. Plechy byly tedy pravděpodobně válcovány v tomto směru.

Plechy **Dogal Roll 800** v grafech označené jako Dogal 800 DPR vykazují v grafu pro poloměr ohybníku opačný trend než ve grafech zbývajících, proto nejsem na základě experimentu schopen říci, ve kterém směru by odpružení mělo být větší.

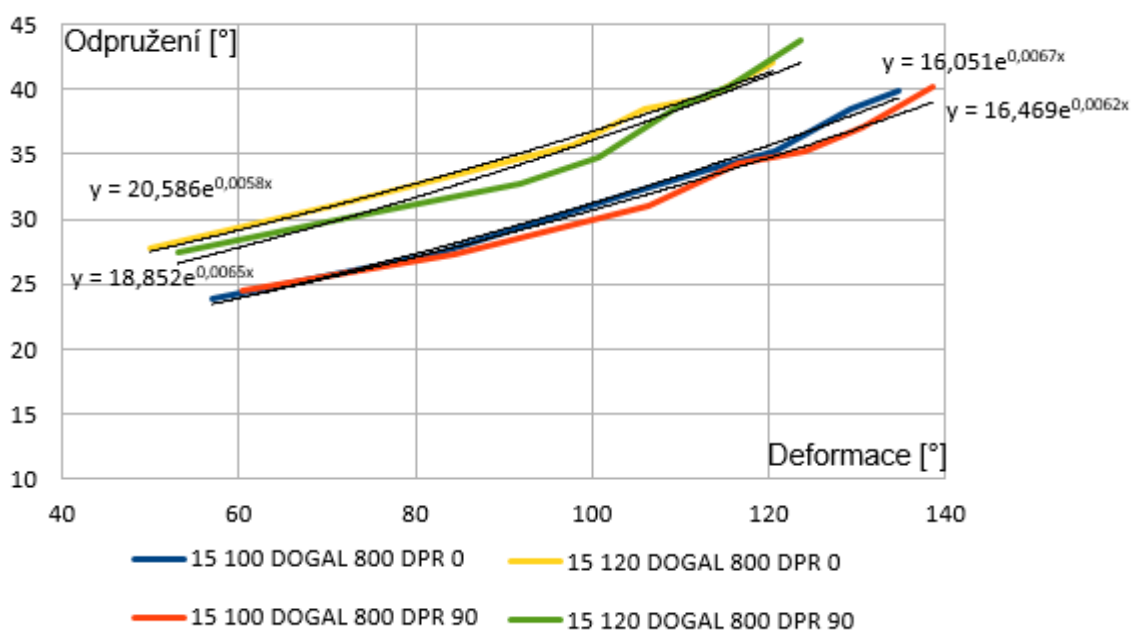
O vzorcích Dogal Roll 800 a Docol 800 DP lze říci, že výroba z nich bude zatížena výraznějším odpružením, než u plechů Dogal 780 CP a Dogal 800 DP, u kterých se odpružení projevilo v menších hodnotách.

Geometrie

Při stejné deformaci je vliv poloměru ohybníku na odpružení minimální, v jednotlivých grafech sice odchylky pozorujeme, ale s ohledem na velikost a rozmístění jednotlivých naměřených hodnot vzhledem k sobě se jedná spíše o odchylky způsobené chybou měření. Větší vliv by zaoblení vnikající části nástroje pravděpodobně mělo, pokud by se tato část více přimykala k materiálu, například při tažení.

Rozchod podpor je oproti tomu naprosto zřejmě určujícím faktorem odpružení. Rozchodem podpor regulujeme délku a tedy i tuhost zkoušeného vzorku. Čím delší vzorek je, tím výraznější je odpružení a tím rozsáhlejší oblast vzorku je zasažena deformacemi. Tyto deformace přitom ve většině objemu, ve kterém působí, ještě nepřesahly mez kluzu – jsou tedy převážně elastické namísto výsledné deformace se podílejí více na odpružení.

Z naměřených grafů lze pozorovat, že v měřené oblasti odpovídá roztažení podpor o 20 mm zvětšení odpružení o cca 5° při deformaci 90°. Při deformacích větších rozdíl v odpružení vyvolaný změnou vzdálenosti podpor mírně vzrůstá, při menších klesá.



Obrázek 14: Ukázka proložení grafu z přílohy exponenciálou. Obrázek ke kapitole „Modelový případ“.

Modelový případ

Při proložení naměřených hodnot exponenciální regresní křivkou jsem mohl kvantifikovat podobnost křivek funkcí odpružení na deformaci. Exponenciální křivku jsem zvolil z důvodu tvaru funkcí v grafech. Ty se totiž chovají obdobně, to ale nutně nemusí. [24] Pro různé materiály je tato závislost různých tvarů, nejen exponenciální, ale i lineární nebo logaritmická atd. Vzorec použitý jako šablona funkcí měřené závislosti je

$$\gamma = I * e^{W * \alpha}$$

Kde γ je hodnota odpružení v úhlových stupních.

I je konstanta závislá podle odečtu z grafů nejvíce na rozchodu podpor, ovlivňuje výšku položení křivky v grafu.

W je konstanta zřejmě závislá na poloměru ohybníku.

α je velikost deformace ohnutím uvedená v úhlových stupních.

Rozsah platnosti této rovnice je od 40° do 140° vnějšího porovnávacího úhlu. Níže jsou uvedeny průměrné hodnoty a uvažovány jsou pouze poloměry ohybníku 10 mm a 15 mm, protože pro poloměr 5 mm nemáme dostatek naměřených dat.

Tabulka 4: Konstanta poloměru ohybníku.

Poloměr ohybníku [mm]	Konstanta poloměru ohybníku W
10	0,005 až 0,006
15	0,006 až 0,007

Pro více odpružující materiály Docol 800 DP a Dogal Roll 800 platí následující tabulka.

Tabulka 5: Konstanta rozchodu podpor 1.

Rozchod podpor [mm]	Konstanta rozchodu podpor I
100	16 až 17,5
120	18,8 až 20,6

Pro méně odpružující Dogal 780 CP a Dogal 800 DP odpovídají hodnoty z tabulky níže.

Tabulka 6: Konstanta rozchodu podpor 2.

Rozchod podpor [mm]	Konstanta rozchodu podpor I
100	13,4 až 15,5 *
120	16,5 až 18,2

* u jedné křivky se objevila po proložení i hodnota 17,1; jelikož se však jedná o jediný případ, nezahrnul jsem tento výsledek do výstupní tabulky.

Co se týče rozdílů v jednotlivých směrech plechu, tyto rozdíly jsou zahrnuty v tabelovaných intervalech. Pro směr s vyšším odpružením (při ohýbání přes vlákna) je vhodné uvažovat vyšší z nabízených hodnot konstanty I . Pro rozchod 60 mm se již odpružení chová jinak a křivky tvořené naměřenými body ani nemají tak zřejmý exponenciální tvar.

Vyhodnocení ohybu přes hranu

Při ohraňování byl volen konstantní poloměr ohybníku 15 mm a konstantní vzdálenost středu ohybníku od hrany ohybnice 25 mm.

První zvláštnost, které si na grafech závislosti deformace na odpružení nelze nevšimnout je, že u některých vzorků při velkých deformacích nastal při posledním zatížení náhle výrazný úbytek odpružení. Tato náhlá změna směru čáry v grafu nastává v místech, kde byl přístřih plechu příliš dlouhý a opřel se o spodek ohybnice. Na grafu tedy vidíme vliv přitlaku na snížení odpružení materiálu. V mé práci se jedná o jev nežádoucí, neboť se jim mění typ zatížení a již se jedná o jiný typ zkoušky.

I u ohraňování stále pozorujeme výraznější odpružení plechů Docol 800 DP a Dogal Roll 800 oproti ostatním, vyskytl se však neočekávaný problém v porovnatelnosti obou zkoušek. Obě zkoušky totiž probíhaly na odlišných intervalech a jejich výsledky se jen těsně z části překrývají v oblasti mezi 50° a 60° deformace.

Hodnoty odpružení jsou naštěstí tak odlišné, že i přes tento velice špatný překryv oborů hodnot funkcí pro jednotlivé způsoby ohýbání je tento rozdíl patrný. Lineární extrapolací přímek proložených příslušnými body v grafu naměřenými pro ohraňování jsem určil přibližné hodnoty odpružení při deformaci 60°.

Pro ohyb přes hranu při poloměru zaoblení ohraňovací hrany 10 mm odhaduji extrapolací hodnoty odpružení pro Dogal 780 CP a 800 DP do intervalu (10,4°;11,8°), při třibodovém ohybu, zaoblení ohybníku 10 mm a stejné deformaci bohužel ale nemáme k dispozici data vztažená na odpovídající rozchod podpor.

Při ohraňování jsme volili vzdálenost ohybníku od podpory vždy 25 mm. Této hodnotě by při třibodovém ohýbání odpovídala dvojnásobná vzdálenost mezi podporami, tedy 50 mm. Pro získání přibližné hodnoty při deformaci 60°, rozchodu podpor 50mm atd. využijeme zjištění z grafu pro třibodový ohyb, že pro 20 mm zmenšení rozchodu podpor, se křivka odpružení posune na grafu na hodnoty o 5° nižší.

Pro rozchod podpor 50 mm, deformaci 60°, zaoblení ohybníku 10 mm odhadnu pro materiál Dogal 780 CP odpružení 11°. Při odhadu jsem využil hodnoty v grafu, korekci na rozchod podpor 10mm z 60 mm na 50 mm, tedy o 2,5° dolů a lineární extrapolaci výsledků ohraňovací zkoušky.

Odlišnosti v odpružení lze tímto způsobem určit u všech plechů. U všech měřených jsem došel k závěru, že odpružení při obou metodách je velmi podobné a jeho odchylky jsou menší, než chyba způsobená měřením a odhadem.

Závěr

V úvodu své práce jsem pomohl čtenáři zařadit problematiku, které se tato práce věnuje, do širšího kontextu a nastínil jsem některé ekonomické aspekty, které jsem použil jako odůvodnění smysluplnosti věnování se tomuto tématu, jakožto i všemu výzkumu, vývoji a velkosériové výrobě, která výzkum umožňuje.

Rozvedl jsem stručný výklad principů a teorií, které se týkají problematiky tváření a to jak po stránce technologické, tak i po stránce materiálově vědní. Zdůraznil jsem několik zajímavých faktů, se kterými jsem se třeba i sám setkal v praxi. Pokusil jsem se psát o věcech tak, jak jsem jim porozumněl a předvedl jsem čtenáři některé pojmy z oblasti tváření a tepelného zpracování. Poznatky které v práci uvádím se týkají zejména ocelí, mnohé z nich lze ale zobecnit.

Pokusil jsem se vysvětlit, jaké jsou omezující faktory této zkoušky a zmínil jsem, že výsledky této jednoduché zkoušky mohou být implementovány do složitějších modelů.

Uvedl jsem dílčí technologie ohýbání a představil podstatná fakta, která se jich týkají. Také jsem ukázal způsob výpočtu některých mezních faktorů dosažitelných při ohýbání daného materialu.

Napsal jsem několik odstavců k tématu odpružení, u kterého jsem použil vysvětlení mechaniky kontinua, proč k tomuto jevu dochází. V části tváření jsem však uvedl i předpoklady pro jiné vysvětlení. Pokusil jsem se uvést rozličné aspekty zkoušky, které by mohly odpružení ovlivnit a tyto předpoklady jsem prověřil experimentem na mnoha vzorcích s několika proměnnými parametry.

V samostatné kapitole jsem nahlédl i do materiálové problematiky, kde jsem vymezil materiály, kterých se můj experiment týká. Shrnujím význam těchto materiálů a vylíčil jejich odlišnosti mezi ostatními. Popsal jsem jejich strukturu i princip jejího vzniku a technologie kterými se provádí výroba těchto vysokopevnostních vícefázových ocelí. Uvedl jsem i modelové vztahy, které se dají použít pro simulaci pracovního diagramu těchto materiálů a uvedl, za jakých podmínek to lze provést.

A konečně v návrhu experimentu, jehož vyhodnocení předchází této shrnující části závěru, jsem popsal, jak jsem prováděl zkoušky. Popsal jsem způsob vyhodnocení těchto zkoušek a navrhl další možnosti, jak by šlo toho vyhodnocení provést. Popsal jsem odlišnosti obou typů provedených zkoušek i to, jakým způsobem spolu budou vzájemně porovnávány.

V praktické části jsem zjistil, že při ohraňování, nebo tříbodovém ohybu je odpružení prakticky stejné velikosti. Dále jsem usoudil, že jelikož stejná působící síla vyvolá při tříbodovém ohybu větší moment, je z hlediska potřebné síly výhodnější ohýbat tříbodově. Zjistil jsem, že některé ze zkoušených plechů vykazovaly anizotropii mechanických vlastností, zatímco u jiných byly rozdíly při ohýbání v různých směrech neměřitelné. Vytvořil jsem model závislosti odpružení na deformaci pro zkoušené materiály za účelem hrubé predikce jejich odpružení.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Pracovní diagram: 1 - vysokopevnostní ocel, 2 - lineárně zpevňující model, 3 - měkká ocel s výraznou mezí kluzu, 4 - model bez zpevnění.....	7
Obrázek 2: Techniky volného kování.....	8
Obrázek 3: Vlevo: princip pohybu dislokací. Větší pravá část: Makroskopický projev pohybu dislokací. Vpravo dole: Ukázka dvojčatění.....	11
Obrázek 4: Schéma zkoušky.....	12
Obrázek 5: Hlavní rozměry v ohybu: r, R - nejmenší a největší poloměr materiálu, ρ - poloměr neutrální vrstvy, t - tloušťka materiálu, α - vnější porovnávací úhel ohybu.....	13
Obrázek 6: Deformace průřezu rovinou šířky a tloušťky v závislosti na rozměrech polotovaru.....	13
Obrázek 7: Rozložení napětí v materiálu a) vyvolané ohybem(skutečné σ a linearizované σ'), b) vyvolané odpružením, c) superpozice a) a b).....	16
Obrázek 8: Schéma „U“ ohybu vlevo, „V“ ohybu vpravo.....	18
Obrázek 9: Schéma tříbodového ohybu.....	21
Obrázek 10: Schéma ohraňování.....	22
Obrázek 11: Ukázka rozložení napětí v simulaci zkoušky tříbodovým ohybem.....	24
Obrázek 12: Fotografie tříbodové zkoušky s vyznačenými odměřovanými úhly, jejichž součtem vznikne porovnávací úhel. Pozn.:Poměr stran fotografie neodpovídá skutečnosti.....	27
Obrázek 13: Fotografie zkoušky ohybu přes hranu s vyznačeným porovnávacím úhlem. Pozn.: Poměr stran fotografie nemusí odpovídat skutečnosti.....	27
Obrázek 14: Ukázka proložení grafu z přílohy exponenciálou. Obrázek ke kapitole „Modelový případ“.....	32

Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled vlastností použitých plechů.[15]

Tabulka 2: Ohybový moment dosažený silou 1N při různých způsobech ohýbání.

Tabulka 3: Vlastnosti zkušebního stroje.

Tabulka 4: Konstanta poloměru ohybníku.

Tabulka 5: Konstanta rozchodu podpor 1.

Tabulka 6: Konstanta rozchodu podpor 2.

Seznam použité literatury

- [1] PETRUŽELKA, Jiří. *Tvařitelnost a nekonvenční metody ve tváření*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2000. ISBN 80-7078-635-3.
- [2] *Technologie II*. [online]. Liberec: Doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld, 2008 [cit. 2017-07-20]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/
- [3] *Seamless Pipe Manufacturing* [online]. Luxembourg: Tenaris, 2014 [cit. 2017-07-20]. Dostupné z: <http://www.tenaris.com/en/MediaAndPublications.aspx>
- [4] HALTUF, Roman a Luděk FINDA. Akademie tváření: ohýbání. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2010, **2010**(7), 3 [cit. 2017-07-20]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/100715>
- [5] ŘEZNÍČEK, Jan. *Pružnost a pevnost I. podklady pro přednášky* [online]. Praha, 2016 [cit. 2017-07-20]. Dostupné z: <http://pruznost.unas.cz/>
- [6] KOTOUČ, Jiří. *Tvářecí nástroje*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1993. ISBN 80-01-01003-1.
- [7] DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2032-4.
- [8] MARCINIAK, Z., J.L. DUNCAN a S.J. HU. *Mechanics of sheet metal forming*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 0750653000.
- [9] EMMENS, Wilko C. a A.H. VAN DEN BOORAARD. *Incremental forming by continuous bending under tension - an experimental investigation*. IJmuiden-Enschede, 2009. Dostupné také z: <http://home.kpn.nl/i.w.c.emmens/publications.htm>
- [10] MALÝ, Jan. *Optimalizace procesu ohýbání dutých profilů*. Praha, 2016. České vysoké učení technické v Praze.
- [11] *Stroje na tváření plechu, plynové vzpěry, olejové tlumiče* [online]. Brno: Eckold, 2017 [cit. 2017-07-20]. Dostupné z: <http://www.eckold.cz/>
- [12] GARCIA-ROMEU, Maria Luisa a Joaquim CIURANA. *Springback determination of sheet metals in an air bending process based on an experimental work*. Girona, 2007. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/248252597_Springback_determination_of_sheet_metals_in_an_air_bending_process_based_on_an_experimental_work. Universitat de Girona.
- [13] TATÍČEK, František, Tomáš PILVOUSEK a Martin KUBELKA. Akademie tváření: Odpružení v plošném tváření. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011, **2011**(5), 1 [cit. 2017-07-20]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-odpruzeni-v-plosnem-tvareni.html>

- [14] PACHOLKOVÁ, Šárka a Jindřich PEŠA. Možnosti výroby dvoufázových feriticko-martenzitických ocelí v NH, a.s. In: *E-sborník konference Metal 2000*. Ostrava: TANGER, spol. s r.o., 2000, s. 8. Dostupné také z: <http://konference.tanger.cz/data/metal2000/sbornik/papers/241.pdf>
- [15] *Materiálové listy společnosti SSAB*. Dostupné také z: www.ssab.com
- [16] (426314) ČSN EN 10131. *Ploché výrobky bez povlaku a elektrolyticky pokovené zinkem nebo kombinací zinek-nikl z nízkouhlíkové oceli a z ocelí s vyšší mezí kluzu k tváření za studena - Mezní úchytky rozměrů a tolerance tvaru*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [17] JIRÁŇ, Tomáš. *Určování odpružení materiálu při V ohybu*. Praha, 2008. České vysoké učení technické.
- [18] ZÁŠKODA, David. *Zjišťování mechanických vlastností tvářených materiálů*. Brno, 2008. Vysoké učení technické v Brně.
- [19] ČSN ISO 10275 (420436). *Kovové materiály - Plechy a pásy - Stanovení exponentu deformačního zpevnění tahem*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [20] JANEČEK a CHMELÍK. Mechanické vlastnosti PL. In: *Experimentální metody fyziky kondenzovaných soustav II* [online]. Praha: CSCA, 2017, s. 35 [cit. 2017-07-27]. Dostupné z: <http://www.xray.cz/FPL146/>
- [21] RAMBERG, Walter a William R. OSGOOD. *Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters*. Washington, 1943. Dostupné také z: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19930081614.pdf>. National Advisory Comitee for Aeronautics.
- [22] ČSN ISO 10113. *Kovové materiály – Plechy a pásy – Stanovení součinitele plastické anizotropie*. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [23] CVEŠPER, David. *Verifikace součinitele plastické anizotropie a exponentu deformačního zpevnění*. Praha, 2014. České vysoké učení technické.
- [24] HONG-LIANG, Dai a Jiang HAO-JIE. A novel model to predict U-bending springback and time-dependent springback for a HSLA steel plate. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015, **2015**(11), 12. DOI: DOI 10.1007/s00170-015-7274-0.

Seznam použitých symbolů a značek

A	virtuální bod, k němuž je počítán ohybový moment
A_{c1}	čára v rovnovážném binárním diagramu
A_{c3}	čára v rovnovážném binárním diagramu
b	[mm] (v obrázku 5) šířka ohybku
C	výpočtová konstanta, upřesněno v textu
E	[MPa] modul pružnosti v tahu
F	[N] síla, jíž působí ohybník
G, H	[N] složky síly P
I	výpočtová konstanta rozchodu podpor
J, K	[N] složky reakční síly podpory
k	výpočtová konstanta, upřesněno v textu
l, L	[mm] vzdálenost podpor
l_m	[mm] rameno ohybu
M	[Nm] (v obrázku 9) reakční moment pod přidržovačem
M	[Nm] moment ve virtuálním bodě při ohraňování
M_A	[Nm] moment k virtuálnímu bodu
N	[N] reakční síla podpory
n	exponent deformačního zpevnění
P	[N] síla od ohybníku
q	[mm] rameno reakční síly k virtuálnímu bodu
r	[mm] (v kapitole: Ohyb) nejmenší dosažený poloměr ohybu na vnitřním povrchu ohybku
r	(v kapitole: Materiál) součinitel plastické anizotropie
r	[mm] (v kapitole: Statický rozbor ohybu) rameno reakční síly
R	[mm] největší dosažený poloměr ohybu na vnějším povrchu ohybku
R_e	[MPa] mez kluzu, není-li pro výpočet k dispozici, použije se $R_{p0,2}$

R_m	[MPa]	mez pevnosti
R_{max}	[mm]	maximální dovolený poloměr ohybu
R_{min}	[mm]	minimální dovolený poloměr ohybu
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
s	[mm]	(v obrázku 5) tloušťka ohybku
s	[mm]	šířka ohybku
t	[mm]	tloušťka ohybku
T	[N]	třecí síla na podpoře
V_M	[%]	objemový podíl martenzitu
W		výpočtová konstanta poloměru ohybníku
α	[°]	vnější porovnávací úhel ohybu
$\alpha_{1,2}$	[°]	vnější úhel ohybu zleva/zprava
β	[°]	vnitřní úhel ohybu
γ	[°]	úhel odpružení
$\varepsilon_{el. 1,2,3,4}$	[%]	relativní prodloužení
ε_{max}	[%]	prodloužení na mezi pevnosti
μ		součinitel tření
ρ	[mm]	poloměr neutrální vrstvy ohybu
σ	[MPa]	napětí
φ_b		logaritmická deformace ve směru šířky
φ_s		logaritmická deformace ve směru tloušťky

Legenda ke grafům v příloze

Každá čára v grafech v příloze má jasné označení, které ji přiřazuje danému experimentu provedenému v této práci. Označení pro **tříbodový ohyb** vypadá následujícím způsobem:

10 100 DOGAL 780 CP 90

První číslo značí poloměr ohb níku v milimetrech, tedy 10 mm.

Druhé číslo značí rozchod podpor v milimetrech, tedy 100 mm.

DOGAL je typ plechu podle značení výrobce.

780 je mez pevnosti v megapascalch.

CP/DP/DPR značí složení plechu. (CP – complex phase, DP – dual phase, DPR – roll, dual phase)

0/90 je směr určený před zkouškou na plechu, nejedná se o směr válcování, jelikož ten nebyl znám, ale pouze o rozlišení směru pro braní vzorků.

Pro **ohraňování** vypadá označení takto:

10 DOGAL 780 CP 90

Zde první číslo značí poloměr zaoblení hrany ohybnice, ostatní pole mají stejný význam jako u tříbodového ohybu. Prvních 5 stran přílohy jsou tedy grafy ke zkoušce tříbodovým ohybem a poslední dvě strany se týkají ohraňování.

Pozn.: Grafy byly voleny spojnicové, aby od sebe byly dobře rozeznatelné datové řady. Body v nichž jsou skutečné naměřené hodnoty jsou na každé čáře grafu vyznačeny jejím přeškrtnutím.