

Progresivní metoda výroby otvorů termálním vrtáním

Jiří Straděj

Bakalářská práce
2011

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Jiří STRADĚJ
Osobní číslo: T08570
Studijní program: B 3909 Procesní inženýrství
Studijní obor: Technologická zařízení

Téma práce: Progresivní metoda výroby otvorů termálním vrtáním

Zásady pro vypracování:

1. Teorie tváření kovů
2. Teorie a principy termálního vrtání
3. Návrh principu zkoušky pro termální vrtání
4. Vyhodnocení a rozbor zkoušek

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. Jurko,J., Lukovics,I.: **Vřtanie-technologická metóda výroby dier**, Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2007.
2. Kocman,K., Prokop,J.: **Technologie obrábění**, Akademické nakladatelství CERM, 2002.
3. Novotný,J.: **Technologie I: Slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy**, Nakladatelství ČVUT, 1999.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Josef Hrdina

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

14. února 2011

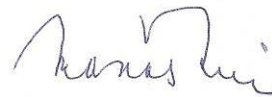
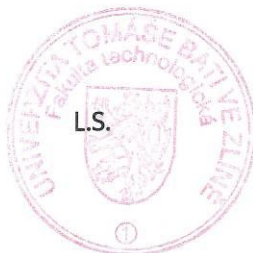
Termín odevzdání bakalářské práce:

3. června 2011

Ve Zlíně dne 6. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním 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 bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl jsem seznámen s tím, že na moji 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 – 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 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 bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem 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 Zlíně23.5.2011.....

.....*Jiří Straděj*.....

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 nevydělečně 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 nahlížení 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 vzdělávacího 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 přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato práce má za úkol odzkoušet technologii termálního vrtání a její použití v různých materiálech. Práce popisuje teorii tváření, kde jsou popsány různé metody tváření za tepla i za studena. Dále je uvedena teorie výroby otvorů, která zahrnuje speciální technologie a termální vrtání. Experimentální část se zabývá podrobným popisem technologie termálního vrtání. Dále je pak uveden popis samotného experimentu s podrobnými výsledky měření. Závěrem práce je stručné porovnání výsledků zkoušek vrtání.

Klíčová slova: teorie tváření, tváření za studena, tváření za tepla, výroba otvorů, termální vrtání

ABSTRACT

This thesis objective is to try out technology of thermal drilling and its application on various materials. Thesis describes theory of forming and various methods of both cold and hot forming are described. Also theory of holes making is described including special technologies and thermal drilling. Experimental part covers detailed description of thermal drilling technology. Furthermore the experiment itself is described together with detailed measurement results. At the end of the thesis is also short comparison of results of drilling tests.

Keywords: theory of forming, cold forming, hot forming, hole making, thermal drilling

Rád bych poděkoval panu Ing. Josefu Hrdinovi za metodické vedení, odbornou pomoc a cenné připomínky při zpracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Jirímu Šálkovi za praktickou pomoc při zpracování experimentu.

„Každý, kdo se přestane učit, je starý, ať je mu 20 nebo 80. Každý, kdo se stále učí, zůstává mladý. Je nejlepší v životě zůstat mladý.“

Henry Ford

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

Dále prohlašuji, že jsem na bakalářské/diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně23.5.2011.....

.....*Jiří Šálek*.....

Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 TVÁŘENÍ.....	13
1.1 PODSTATA TVÁŘECÍCH PROCESŮ	13
1.2 PLASTICKÁ DEFORMACE KOVŮ	13
1.3 PŘETVÁRNÁ RYCHLOST	14
1.4 PŘETVÁRNÁ PEVNOST A ODPOR	15
1.5 TVÁŘITELNOST KOVŮ	15
1.6 TVÁŘECÍ STROJE.....	16
2 TVÁŘENÍ KOVŮ ZA TEPLA.....	18
2.1 KOVÁNÍ.....	18
2.1.1 Volné kování	19
2.1.2 Zápustkové kování	20
2.2 VÁLCOVÁNÍ.....	21
2.3 PROTLAČOVÁNÍ.....	23
3 TVÁŘENÍ KOVŮ ZA STUDENA.....	25
3.1 STRÍHÁNÍ.....	25
3.2 OHÝBÁNÍ.....	27
3.3 TAŽENÍ.....	29
4 VÝROBA OTVORŮ	32
4.1 VRTÁNÍ	32
4.2 LASER	36
4.3 ELEKTRONOVÝ PAPERSEK	37
4.4 TERMÁLNÍ VRTÁNÍ	38
II PRAKTICKÁ ČÁST	40
5 STANOVENÍ CÍLŮ PRÁCE	41
6 TECHNOLOGIE TERMÁLNÍHO VRTÁNÍ.....	42
6.1 PRINCIP A NÁSTROJE.....	42
6.2 ZÁVITY.....	43
6.3 PŘÍPRAVKY PRO TERMÁLNÍ VRTÁNÍ.....	44
6.4 MATERIÁLY.....	44
6.5 PRAKTICKÉ POUŽITÍ.....	44

7	ZKOUŠKA A VYHODNOCENÍ	45
7.1	PODMÍNKY ZKOUŠKY	45
7.1.1	Použitý nástroj	45
7.1.2	Použitý stroj	45
7.1.3	Zkušební materiály	46
7.2	KONTROLA A VYHODNOCENÍ	47
7.2.1	Kontrola průměrů	48
7.2.2	Kontrola lemu	50
7.2.3	Vyhodnocení	53
	ZÁVĚR	55
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	57
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	59
	SEZNAM OBRÁZKŮ	60
	SEZNAM TABULEK	61

ÚVOD

Tématem této práce je progresivní metoda výroby otvorů termální vrtáním. Jedná se o způsob tváření, který se používá pro výrobu děr do tenkostěnných materiálů. Tato technologie spojuje tváření a vrtání otvorů.

Samotné tváření je technologická metoda s dlouhou historií. Můžeme jít zpět až do doby bronzové 2000 let před naším letopočtem v Evropě, kdy lidé pomocí volného ručního kování tvářeli bronz na nástroje, zbraně a šperky. Ovšem moderní tváření je metoda s vysokou produktivitou a hospodárností a tedy i s velkou perspektivou. Součásti vyrobené touto technologií jsou pevné a lehké a využití materiálu je velmi hospodárné, s nejmenším odpadem. Při obrábění odpadá kolem 20% až 40% materiálu, při tváření je to jen asi 5% až 10% materiálu. Navíc je výkonnost tvářecích strojů vysoká, což můžeme také zařadit mezi velké výhody. Automatizace a mechanizace výrobních pochodů je dobře proveditelná, takže se podstatně snižují výrobní náklady. [1]

Výroba otvorů má také velmi dlouhou historii, jako je vidět například z kreseb na stěnách v Údolí Faraónů, které poskytují dostatečný důkaz o tom, že již ve starém Egyptě lidé používali ruční vrtačku (princip luku). Tyto jednoduché vrtací nástroje byly používány už 2500 let před naším letopočtem. Z počátku se pro vrtání používaly poměrně primitivní stroje, ale ještě před nimi se řezný nástroj při práci přidržoval v rukou, protože mechanický posuv a upínače se tehdy ještě nepoužívaly. Práce s prvními primitivními stroji nebo v rukou vyžadovala velké umění a fyzickou sílu lidí. Dnes již můžeme pozorovat v tomto oboru plnou mechanizaci, díky které vznikla technologie termálního vrtání. Bez strojů, které by vyvinuly potřebnou sílu a otáčky, by nebylo tuto technologii vůbec možné realizovat. [2]

Takže díky spojení metody vrtání a tváření vzniká technologie poměrně laciná výrobní technologie děr. Tato technologie je oproti klasickému vrtání beztlisková a nehrozí nebezpečí zlomení nástroje. Technologie termálního vrtání je dnes velmi rozšířená.

Bakalářská práce je rozdělena na část praktickou a teoretickou. První kapitola se zabývá obecně tvářením jako takovým. Začíná částí, která se věnuje samotné podstatě tvářecích procesů. Při tváření dochází k plastickým deformacím materiálů. Další podkapitoly definují přetvárnou rychlost, přetvárnou pevnost a odpor. Dále je v této kapitole zmíněna tvářitelnost a zkoušky tvářitelnosti. Kapitulu uzavírají základní vlastnosti tvářecích strojů.

Druhá část pojednává o tváření za tepla. Popisuje tvářecí teploty, za kterých probíhá. Na-
leznete zde charakteristiku technologií kování (zápustkové, volné), válcování, protlačování.

Třetí část se věnuje tváření za studena. V této části jsou také zmíněny technologie, které
tuto technologii charakterizují. Mezi ně patří stříhání, ohýbání a tažení.

Ve čtvrté kapitole se dostáváme k výrobě otvorů. Samotný začátek pojednává o historii
výroby otvorů. První podkapitola se zmiňuje o vrtání, druhá pak o obrábění laserem a třetí
o obrábění elektronovým paprskem. Poslední podkapitola se věnuje základní teorii termál-
ního vrtání.

Celá teoretická část slouží k tomu, aby čtenář získal povědomí o základech tváření a výro-
bě otvorů, které jsou podporou pro samotnou praktickou část.

V praktické části práce se věnujeme přípravě a samotnému experimentu, kde budeme po-
rovnávat tři vybrané druhy materiálů. Zkušebními materiály bude slitina hliníku, kon-
strukční ocel 11 373 a chrómniklová ocel 17 346. Pro provedení tohoto experimentu bu-
deme kontrolovat jejich vnitřní průměr a lem. Ty hodnoty nakonec porovnáme a vyhodno-
tíme jejich vhodnost pro danou technologii.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TVÁŘENÍ

Tváření je technologický proces, při kterém se trvale mění tvar materiálu, působením vnějších mechanických sil, bez změny jeho objemu a bez porušení jeho celistvého tvaru. Tento proces může probíhat za tepla nebo za stdena. [3]

Tváření lze rozdělit na dva základní typy [4]:

- **na tváření objemové**, při němž se dosahuje změny tvaru v celém objemu značným přemístěním materiálu. Při tom dochází k velkým změnám v průřezu tělesa, které je tvářeno;
- **na tváření plošné**, kde se naopak dosahuje změny tvaru bez velkých změn průřezu. Toho se využívá například u tváření plechů.

1.1 Podstata tvářecích procesů

Každý tvářecí proces provází velké plastické deformace. Ty jsou umožněny plastickými vlastnostmi některých slitin a kovů. Podstata procesu spočívá v tom, že účinkem velkých vnějších sil, které jsou vyvolané pomocí tvářecího stroje a nástroje, dojde k trvalé změně tvaru a rozměrů tvářenců. Tyto vnější síly musí vyvolat takový stav napjatosti, aby došlo k překročení meze kluzu. Tak vznikne trvalá deformace požadované velikosti a směru aniž dojde k porušení soudržnosti. Tento mechanický děj je doprovázen fyzikálními a strukturálními změnami materiálu, které se projeví ve změnách fyzikálních a mechanických vlastností. Samotná změna tvaru se uskuteční postupným přemístěním částic kovu v jeho tuhém stavu. Tento proces má některé podobné znaky, jakými je charakterizováno tečení viskózních látek. Odlišnost je hlavně v krystalické stavbě kovů. Tváření se díky tomu označuje někdy jako plastické tečení kovů. Důležitým znakem tváření je, že se během velkých plastických deformací nemění objem tělesa. Z toho plyne, že při procesu tváření nedochází ke ztrátám materiálu. [5]

1.2 Plastická deformace kovů

Plastické deformaci kovů musí vždy předcházet deformace elastická (pružná). Plastická deformace je pohyb jednotlivých částíček kovů vůči sobě. Při tom mezi nimi nepřestává působit koheze, která umožňuje kovům jejich zpracování tvářením. Vznik plastické deformace můžeme vysvětlit dislokační teorií, což je pohyb a vznik mřížkových poruch. [5]

Rozeznáváme dva základní mechanismy deformace [1]:

- **kluzem**, kdy se vrstva atomů pohybuje z jedné strany na druhou. Během celého procesu ji tvoří vždy jiná vrstva atomů, až do doby kdy vystoupí na povrch;
- **dvojčatěním**, což se projeví přeskupením mřížek některé části krystalu. Nejdřív dojde k natočení celé mřížky z polohy pro posuv nepříznivé do polohy příznivé. Poté se tato část natočeného krystalu zdeformuje.

1.3 Přetvárná rychlost

Pod pojmem přetvárná rychlost (rychlost deformace) rozumíme přibližování dvou průřezů tvářeného materiálu, které jsou od sebe vzdáleny o délkovou jednotku.

U materiálu, zpracovávaného tvářením, není přetvárná rychlost totožná s rychlostí nástroje v $[m \cdot s^{-1}]$. Pokud označíme poměrnou deformaci dh/h , tak bude dh elementární deformace tvářeného materiálu ve směru pohybu nástroje a h [m] je výška tvářeného materiálu. Potom bude ve výsledku v_d deformační rychlost. Tento případ ovšem platí jen za předpokladu jednoosé napjatosti a pro případ petchování. [5, s. 70]:

$$v_d = \frac{dh}{h} \cdot \frac{1}{dt} = \frac{dh}{dt} \cdot \frac{1}{h} = \frac{v}{h} \quad (1)$$

V_dpřetvárná rychlost $[s^{-1}]$

v rychlost tvářecího nástroje $[m \cdot s^{-1}]$

dh elementární deformace ve směru pohybu nástroje [m]

dt doba tváření [s]

h výška tvářeného polotovaru [m]

Dosažení vyšší přetvárné rychlosti můžeme výrazně snížit strojní čas pro tváření daného výrobku. Ovšem s růstem rychlosti deformace roste také přetvárný odpor, což je důsledek omezené rychlosti průběhu rekystalizace deformovaných zrn zpracovávaného materiálu. Při teplotě tváření se pevnost materiálu rovná mezi kluzu. [5]

1.4 Přetvárná pevnost a odpor

Přetvárná rychlost je v provozní praxi nazýváno tvářecí napětí. Tímto napětím se dosáhne plastické deformace bez pasivních odporů, mezi které patří například tření. Toto napětí nám slouží jako základní jednotka při určení sil a prací potřebných k tváření. Jeho velikost je přímo závislá na druhu materiálu a teplotě tváření. Samozřejmě ji ovlivňuje také deformační rychlost a stupeň deformace. Křivky zpevnění můžeme odečíst z diagramů, které udávají závislost mezi tvářecím napětím a stupněm deformace při předem stanovené rychlosti deformace. Tato vyhodnocení v diagramech nám pomohou získat základní představy o plastických vlastnostech různých kovových materiálů. [5]

Přetvárný odpor je vlastně napětí, kterým musíme působit na plošnou jednotku stlačovaného kovu tak, aby nastalo plastické přetvoření tvářeného materiálu. Při tváření totiž působí odpor ve směru proti hlavnímu napětí je deformační nebo také přetvárný odpor, který vyjádříme v MPa. Tento odpor je závislý především na [5]:

- **deformační rychlosti;**
- **mezi kluzu;**
- **teplotě;**
- **tření;**
- **rozměrech tvářeného tělesa.**

1.5 Tvářitelnost kovů

Tvářitelnost je technologická vlastnost určující vhodnost daného materiálu ke zpracování tvářecí technologií. Jejím měřítkem je maximální velikost deformace, kterou kovový materiál snese až do doby, kdy je porušena jeho soudržnost. Tvářitelnost určitého kovu závisí vždy na teplotě, při které tváření materiálu probíhá. V neposlední řadě také závisí na napjatosti. Při vyšších teplotách se samozřejmě tvářitelnost kovového materiálu zlepšuje a rovněž se zlepšuje při trojosém tlaku na tvářený kov. [4]

Tvářitelnost různých kovů je rozdílná. K jejímu zjištění používáme nejrůznější zkoušky, které mohou být buď provozní anebo laboratorní. Z jejich názvu již vyplývá, v jakém prostředí tyto zkoušky probíhají.

Hlavní provozní technologické zkoušky tvářitelnosti, při kterých nesmí dojít k natržení materiálu, jsou [4]:

- **zkouška rozkováním**, kdy se tyč s šířkou rovnající se trojnásobné tloušťce rozková na 1,5 násobnou šířku původního průřezu;
- **zkouška děrováním**, při níž se tyč s šířkou rovnou pětinásobné tloušťce děruje průbojníkem přesně daných rozměrů. Vzniklá díra se postupně rozšiřuje trnem s úkosem 1:10 tak, aby se šířka zvětšila na dvojnásobek původní šířky;
- **zkouška děrováním s rozštěpením**, při které se tyč přesně definovaných rozměrů průřezu děruje průbojníkem. Poté se až k díře podélně rozsekne a oba konce se ohnou o 180°;
- **zkouška ohýbáním**, kdy se profilová tyč bez vrubu opakovaně ohýbá, až do doby kdy dojde k jejímu porušení;
- **zkouška pýchováním** se dělá nejčastěji na bucharu. Válcové zkušební těleso, jehož výška se musí rovnat dvojnásobku průměru, se stlačuje na nejrůznější výšky.

Laboratorní zkoušky tvářitelnosti nám dávají přesnější, číselně vyjádřené výsledky. Hlavní laboratorní zkoušky tvářitelnosti jsou [4]:

- **zkouška za tepla tahem na trhacím stroji** při malé rychlosti nebo na přerážecím kladivu zvětšenou rychlostí. Měřítkem tvářitelnosti je tažnost nebo zúžení vyjádřené v procentech;
- **zkouška ohybem** na tyči opatřené vrubem, při níž je za úkolem zjistit úhel, při kterém se začínají vytvářet trhliny;
- **zkouška kroucením**, při níž se válcová zkušební tyč zkrucuje. Počet zkrutů před porušením materiálu je mírou tvářitelnosti. Při zkoušce se zaznamenává také velikost kroucího momentu. Náhlý pokles momentu je známkou porušení soudržnosti materiálu.

1.6 Tvářecí stroje

Každý stroj je charakterizován svými specifickými technickými parametry, které určují k čemu je daný stroj vhodný. Tyto parametry mohou například určit hlavní rozměry stroje a

jeho pracovní rozsah. Mohou také stanovit největší rozměry materiálu nebo polotovaru, které jdou na stroji zpracovávat. K těm nejnámějším parametrům patří jmenovitá síla, zdvih, práce, rozměry a rozsah změny rozsahu pracovního prostoru, počet zdvihů a rychlost pracovního nástroje atp. [5]

Rozdílné typy strojů mají různé charakteristické veličiny. U lisů je to jmenovitá síla a u bucharů jde o tvářecí (rázovou) práci. Tyto veličiny tvářecích strojů jsou ve většině případů odstupňovány podle geometrické řady. [5]

K základním parametrům, které určují tvářecí stroje, patří [5]:

- **jmenovitá síla** F [N], kterou dokáže působit tvářecí nástroj na tvářený materiál. Tato síla může být konstantní nebo se mění v závislosti na dráze tvářecího nástroje v průběhu jmenovitého zdvihu;
- **jmenovitý a pracovní zdvih** je největší dráha, kterou vykonává tvářecí nástroj z jedné krajní polohy (úvrati) do druhé. Dráha, na které působí nástroj jmenovitou silou, se nazývá pracovní zdvih;
- **jmenovitá práce** je vlastně součin jmenovitého zdvihu a jmenovité síly. U mechanických lisů se setrvačnickým pohonem, závisí energie odebraná ze setrvačnicku na velikosti tvářecí síly. Z poměrného rozdílu otáček setrvačnicku před a po tváření pak můžeme určit její velikost;
- **jmenovitá rychlost** je pouze teoretická rychlost, dosažená tvářecím nástrojem při chodu na prázdno v počátku jmenovitého zdvihu. Pokud dojde ke změně této rychlosti v závislosti na zdvihu, počítá se dále se střední rychlostí tvářecího nástroje v průběhu pracovního zdvihu. V literatuře je uvedeno, že „směrné hodnoty rychlostí nástrojů tvářecích strojů jsou u hydraulických lisů $0,025$ [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] až $0,25$ [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], u klikových a výstředníkových lisů $0,3$ [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] až $0,6$ [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] u bucharů 5 [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] až 8 [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].“ [5, s. 72]. Rychlost lisovací desky je u hydraulických lisů konstantní. U jiných strojů se rychlost nemění.

K těmto parametrům nesmíme zapomenout zmínit také tuhost stroje. Ta spolu se základními parametry výrazně ovlivňuje provozní vlastnosti a vhodnost použití daného tvářecího stroje. [5]

2 TVÁŘENÍ KOVŮ ZA TEPLA

Při tváření je materiál zpevňován. Pokud ovšem začne teplota materiálu růst, pak je deformace doprovázena zotavením a rekrytalizací. Ke zpevnění materiálu, což je vnitřní pnutí v tvářené součásti, dochází velmi často. Výhodou tváření za tepla je, že při něm dochází k procesům, které toto vnitřní pnutí odstraní. [6]

Při zahřátí materiálu na teplotu, která je předem stanovená dle druhu materiálu, pak přecházejí atomy na místa rovnováhy. Tímto procesem odstraníme největší vady na krystalové mřížce, aniž bychom ovlivnili rozměry a tvar zrn. Tento proces se nazývá zotavování a je závislý nejen na teplotě, ale především době ohřevu tvářeného materiálu. [6]

Pokud bude docházet k dalšímu růstu teploty tvářeného materiálu přes teplotu zotavení, dojde k rekrytalizaci. Ta způsobí vznik nových zrn, která nahrazují zrna deformovaná. Tento jev má za následek snížení pevnosti a zvýšení tažnosti. Krystaly vznikají z nových jader, které se tvoří na rozhraní zrn. Mohou také vznikat růstem zbylých zrn. Vznikem nových pravidelných krystalů a pohlcením všech deformovaných krystalů rekrytalizace končí. Teplota, při které tváření končí je stejně důležitá jako správný ohřev k tváření. Při vysokých dokončovacích teplotách dojde ke zhrubnutí zrna. Naopak při nižších teplotách se zvyšuje vnitřní pnutí a klesá soudržnost materiálu. Nízkých teplot se využívá pro dosažení některých vlastností. Mezi ně patří průtažnost a pružnost. [6]

U perliticko-feritických ocelí nastává rekrytalizace při teplotách 700 až 900 °C. U austenitických ocelí dochází k rekrytalizaci až při teplotách okolo 1200 °C. Tyto oceli vyžadují menší deformační rychlost než oceli perliticko-feritické, protože při obvyklých teplotách se vlastně jedná o tváření za studena. [6]

2.1 Kování

Kování je jeden z nejvíce používaných způsobů tváření za tepla. Dále budeme mluvit pouze o strojním kování, protože ruční není pro naše použití vhodné. Strojní kování můžeme rozdělit na [6,7]:

- **volné kování**, kdy materiál může tlakem nebo rázovou silou volně téci, a to hlavně ve směru kolmém na působící síly;

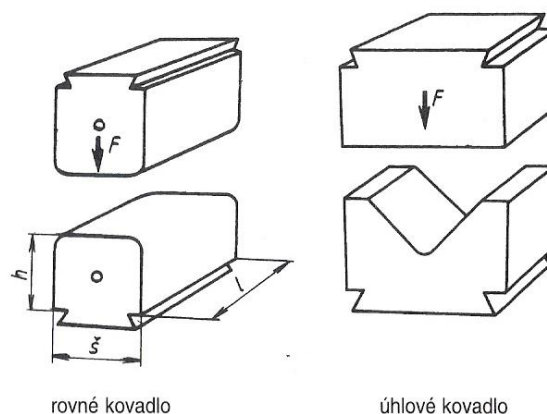
- **zápustkové kování** kdy je materiál vtačován údery nebo tlakem do kovové, většinou dvoudílné formy. Forma používaná pro kování se nazývá zápustka.

Technologie kování klade důraz na co nejmenší spotřebu materiálu při výrobě. Důležitá je také přesnost výkovku, příznivý průběh vláken, vysoká jakost výkovku a v neposlední řadě také ekonomická stránka výroby. Výroba kováním produkuje polotovary a výkovky požadovaných tvarů a rozměrů. Patří mezi klikové hřídele, ojnice a atp. Kování také pomáhá zlepšovat chemické a mechanické vlastnosti materiálu. [1]

2.1.1 Volné kování

Volné kování je metoda kování, při které se využívá jednoduchých nástrojů, přípravků a strojů. Nepřesnosti rozměrů takto vyráběných součástí jsou poměrně velké. Povrchy výkovků jsou hrubé a často nerovné. Mezi nejpoužívanější materiály patří předvalky a u větších výkovků jsou to surové ingoty. [1]

Nástroje používané pro volné kování se nazývají kovadla. Různé typy kovadel můžeme vidět na obrázku (Obr. 1). Rozeznáváme kovadlo horní a spodní. Rybinové části kovadel jsou používány k upevnění na stroji. Pro manipulaci s nástrojem slouží díry, které se nacházejí v přední části. Všechny pracovní dráhy kovadel jsou kaleny. Jsou také pootočený od svislé roviny bucharu o úhel 35 až 45 ° tak, aby bylo možno tvářet v podélném i příčném směru. Pro volné kování se také využívá nástrojů jako při ručním kování. Nejčastěji to jsou kleště a sekáče. [1]

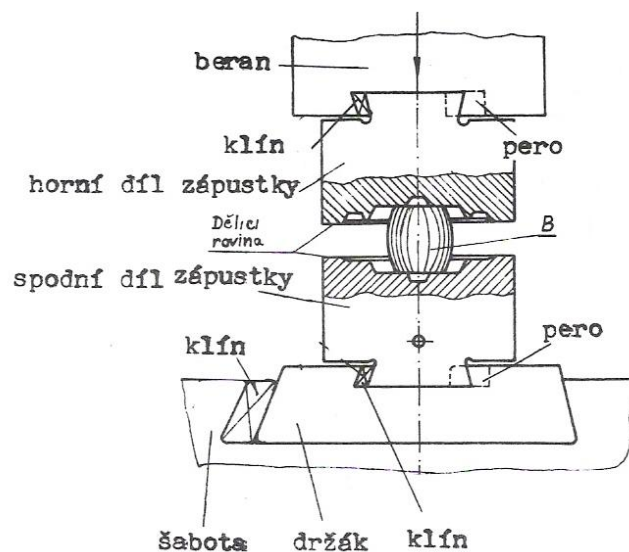


Obr. 1. Kovadla pro volné kování [1]

2.1.2 Zápustkové kování

Pro výrobu velkých počtů tvarově stejných součástí používáme kování do zápustek. Nejčastěji je to z ocelí nebo jiných tvárných slití. Samotná zápustka zpravidla dvoudílný nástroj. Jeho spodní část a horní část je opatřena dutinou, která odpovídá tvaru výkovku. Zápustky mohou být jak jednodutinové nebo postupové (několikadutinové). Obvodová drážka po obvodu slouží pro výronek. Výronek má dvě základní funkce. V první řadě pojímá přebytečný materiál a v druhé řadě ovlivňuje tok materiál v dutině zápustky. [5]

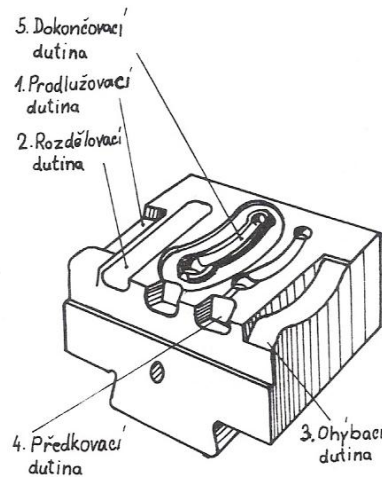
U **jednodutinových zápustek** odpovídá tvar dutiny konečnému tvaru výkovku (Obr. 2). Zápustka obsahuje také výronkové drážky. Tento typ zápustek se používá v případech, kdy je materiál nejprve předkován volným kovááním. Velmi často se používá jednodutinových zápustek pro jednoduché rotační výkovky. V tomto případě je předkovací operace přechováni. [5]



Obr. 2. Kování v jednodutinové zápustce na bucharu [5]

Používanější je metoda kování v **postupové zápustce** (Obr. 3). Té se využívá v případech, kdy nelze vykovat materiál najednou. Předkovací operace se nejčastěji volí v závislosti na složitosti výkovku. Před samotným dokončovacím kovááním následuje hned několik operací. Patří mezi ně prodlužování, zužování, rozdělování, ohýbání, tvarování a konečné předkování. První tři operace není možné provést na kovacích lisech. To je důvod proč se provádí zvlášť na speciálních kovacích strojích - kovací válce, stroje pro příčné klínové válcování, rotační kování. V postupové zápustce platí zásada, že jedním zdvihem musí být pro-

vedena v jedné dutině jedna operace. U tohoto kování však vzniká jisté nebezpečí. Může totiž dojít k zakování okují do povrchu vyráběné součásti. Musí se proto dbát na velmi pečlivé odstranění okují z polotovaru, které se provádí ofukováním. Často se takto očišťuje materiál i mezi operacemi. [5]



Obr. 3. Kování v postupové zápustce [5]

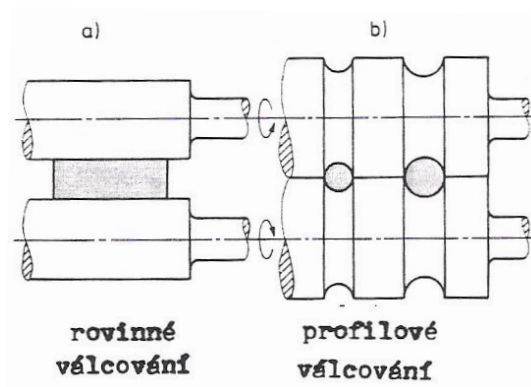
2.2 Válcování

Další velmi známou a velmi používanou metodou tváření za tepla je válcování. Válcování za tepla je proces, při kterém materiál tváří mezi ocelovými nebo litinovými válci. Může být také provedena kotouči, které jsou uloženy ve válcovací stolici. Jak bylo již zmíněno, jedná se o nejrozšířenější a nejvýznamnější způsob tváření ocelí. Tato technologie se používá k výrobě předvalků pro další válcování, bezešvých trubek a vývalků. Nejčastěji se předvalky válcují ze ztuhlých ocelových ingotů o hmotnosti až 10 tun. Ty jsou konečnými produkty oceláren. Tyto ingoty se nejprve musí prohřát na stejnoměrnou teplotu 1100 °C. Po zahřátí se z nich válcují konečné výrobky, jako jsou tyče, kolejnice, plechy, pásy, trubky apod. Na povrchu těchto výrobků vznikají okuje. K jejich odstranění se používá metoda moření nebo otryskávání. [6,1]

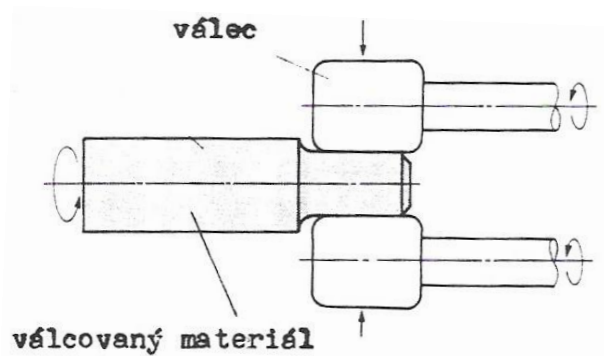
Válcování můžeme dělit podle vzájemné návaznosti jednotlivých operací na **spojité** a **nespojité**. Můžeme jej ovšem také dělit podle vzájemné polohy válců a materiálu, který prochází mezi nimi. Dle kritérií vzájemných poloh dělíme válcování na tři základní metody [3]:

- **Válcování podélné**, kdy se pohybuje vývalek mezi dvěma horizontálními válci (Obr. 4). Pohybuje se kolmo k rovnoběžným osám. Během toho mohou současně vertikální válce omezovat boční šíření. Podélné válcování patří k nejrozšířenějším způsobům tváření.
- **Válcování příčné** spočívá v tom, že se válcovaný materiál otáčí kolem vlastní osy (Obr. 5). Tato osa je rovnoběžná s osami válců, které výkovek zpracovávají. Stroje musí být opatřeny zvláštním mechanismem, který vyvolá posun válcovaného materiálu. Příčné válcování se využívá u profilů s pravidelně se opakujícími změnami ve tvaru průřezu.
- **Válcování kosé** má na rozdíl od předešlých metod mimoběžné osy. Ty se otáčejí stejným směrem. Díky tomu se válcovaný materiál otáčí a zároveň se podélně posouvá. Tohoto se často využívá při výrobě bezešvých trubek a válcovaných ocelových koulí.

Válcování probíhá na válcovacích stolicích. Podle počtu válců a stylu práce rozeznáváme stolice dvouválcové, trojválcové, univerzální a jiné. Univerzální stolice má kromě dvou vodorovných válců navíc ještě válce umístěné ve svislé pozici. Na materiál je působeno válcovací silou vždy ze všech stran. Práce ve většině případů nebývá dokončena na jedné válcovací stolici. Z tohoto důvodu bývá uspořádáno velmi často hned několik válcovacích stolic buď vedle sebe anebo za sebou. Dle mohutnosti válcovacích stolic a podle druhu předvalků dělíme tratě na blokové, hrubé, střední, jemné, na válcování drátů a na válcování plechů.



Obr. 4. Válcování podélné [5]

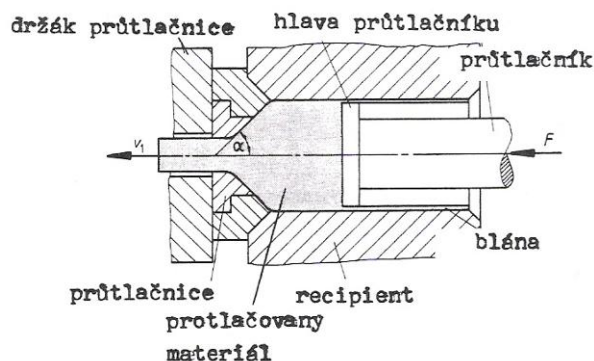


Obr. 5. Válcování příčné [5]

2.3 Protlačování

Při této technologické metodě tváření se deformuje materiál silami, které vyvolávají převážně tlaková napětí. Materiál je doslova protlačován viz obrázek (Obr. 6). Toto umožňuje zpracovávat materiál s vyšším stupněm deformace. Získané součásti mají pak výhodné mechanické vlastnosti a přesné rozměry. Podle směru pohybu nástroje a směru toku materiálu rozeznáváme několik druhů protlačování [5,6]:

- **přímé protlačování**, kdy je směr toku tvářeného kovu shodný se směrem pohybu nástroje;
- **protisměrné protlačování**, kdy jde směr toku tvářeného kovu naopak proti směru pohybu nástroje;
- **kombinované protlačování**, je vlastně kombinací dvou předešlých metod. Směr toku kovu může být jak souhlasný nebo opačný proti pohybu nástroje.



Obr. 6. Protlačování za tepla [5]

Protlačováním za tepla je možné zpracovávat materiály, jejichž tvárnost je v jiných případech omezená. Touto metodou se vyrábí profily, jako jsou tyče, trubky a výrobky, které

nelze válcovat. K samotnému protlačování se používají velmi často hydraulické lisy vertikální nebo horizontální konstrukce se silami, které mohou dosahovat až 300 MN. [5]

Protlačování se velmi často využívá pro kovy, které mají velmi špatnou tvárnost a při jiném způsobu zpracování by byly náchylné k tvoření trhlin. Mezi tyto kovy patří legované oceli a oceli s vysokým obsahem uhlíku. Metodou protlačování lze zhotovovat oceli na ventily, na valivá ložiska, žárovevné oceli na lopatky plynových a parních turbín. Pro protlačování za tepla jsou vhodné také neželezné kovy a jejich slitiny. [6]

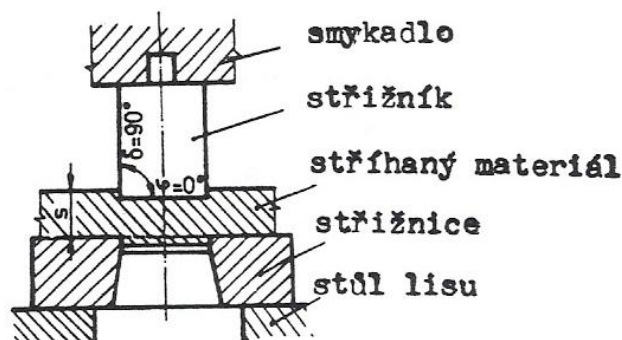
3 TVÁŘENÍ KOVŮ ZA STUDENA

Tváření za studena se velmi často nazývá lisovací technikou. Tato metoda je velmi rozšířená hlavně díky svým specifickým přednostem. Toto tváření nejlépe charakterizuje velká výkonnost, nízké náklady na výrobu, malé ztráty materiálu přes odpad a příznivé podmínky pro automatizaci. Právě tyto výhody zařadily lisování k těm nejpokrokovějším metodám pro zpracování kovových materiálů. [6]

Oproti tváření za tepla probíhá tváření za studena pod teplotou rekrystalizace a doprovodným jevem je zpevnění ocelí. Zpevnění je vlastně zvýšení pevnostních vlastností a snížení plastických vlastností, ke kterým patří tažnost a vrubová houževnatost. [3]

3.1 Stříhání

Stříhání je velmi rozšířená metoda tváření za studena. Je velmi běžné, že se na jednom výlisku či výkovku provede několik operací stříhání. Stříhání se nejčastěji provádí na stříhacím stroji (Obr. 7).



Obr. 7. Stříhání stříhadlem a děrovadlem [5]

Stříhání je ve své podstatě oddělování částí materiálu působením navzájem protilehlých řezných hran. To má za následek vyvolání smykové napětí v řezné rovině. K oddělení nikdy nedochází přesně v požadované rovině. Je to proto, že materiál má elastické vlastnosti je tvárný a smykové napětí způsobí tlak nožů na celé ploše. Z toho důvodu se stříhání bude jen podobat čistému smyku, podle toho jak moc se tlak změní ve smykové napětí. Veškeré oddělování probíhá za studena. Za tepla se používá jen výjimečně pro velké průřezy a pro materiály s větší pevností. Tvářením za studena je možné stříhat oceli do $R_m = 400$ MPa a nejrůznější druhy plechů. Nástroje se dělí podle vzájemného pohybu a konstrukce. Používají se rovnoběžné, skloněné a kotoučové nože. [5]

Proto, aby byla dosažena optimální kvalita povrchu děrovaného otvoru nebo výstřižku, musíme docílit ideální vůle mezi střížníkem a střížnicí. Vůle se odvíjí od pevnosti a tloušťky materiálu a pohybuje se od 3 do 10 % tloušťky stříhaného plechu. Čím vyšší bude pevnost, tím vyšší vůle se používají. Samotný průběh stříhání můžeme rozdělit na tři po sobě následující fáze [1, 5]:

1. **pružná deformace**, kdy materiál pružně stlačován a přitom se ohýbá. Zároveň je lehce vtlačován do otvoru střížnice. Během této fáze nedojde k přesažení meze kluzu v materiálu;
2. **trvalá deformace**, také jinak řečeno oblast plastických deformací, je fáze, kdy je střížník vtlačen do plechu a ten pak následně do otvoru ve střížnici. Při tom se vlákna kovu samozřejmě prodlužují a ohýbají, ale nedochází k jejich porušení. Během tohoto je již napětí vyšší než mez kluzu a v místě dotyku ostří se dokonce přibližuje pevnosti ve smyku;
3. **Smyková deformace** je již vlastní stříhání. Jde o konečnou fázi. Na počátku této fáze již dochází ke vzniku mikroskopických a později makroskopických trhlin. Ty se tvoří v místě při ostří střížníku a střížnice. Trhlinky probíhají ve směru čar největších smykových napětí. Dochází k velmi rychlému rozšíření trhlinek na vnitřní vrstvě, až dojde k samotnému oddělení vystříhané součásti. Nakonec je výstřižek při následném pohybu střížníku vytlačen. Kvalitu stříhané plochy a velikost síly potřebné ke stříhání, výrazně ovlivňuje vůle.

V kovárnách a lisovnách se stříhání velmi často používá na [5]:

- nařezání výchozích polotovarů. Mezi tyto polotovary patří tabule stříhané na pásy, svitky dělené na tabule nebo pásy a profily nastříhané na základní délky. Používá se taky na stříhání vývalků na základní hmotnost;
- stříhání výrobků z plechu, a to buď k přímému použití, nebo na polovýrobky, které jdou k dalšímu zpracování;
- pomocné nebo dokončovací operace. K těm patří odstříhování výroku nebo děrování blány u zápustkových výkovek.

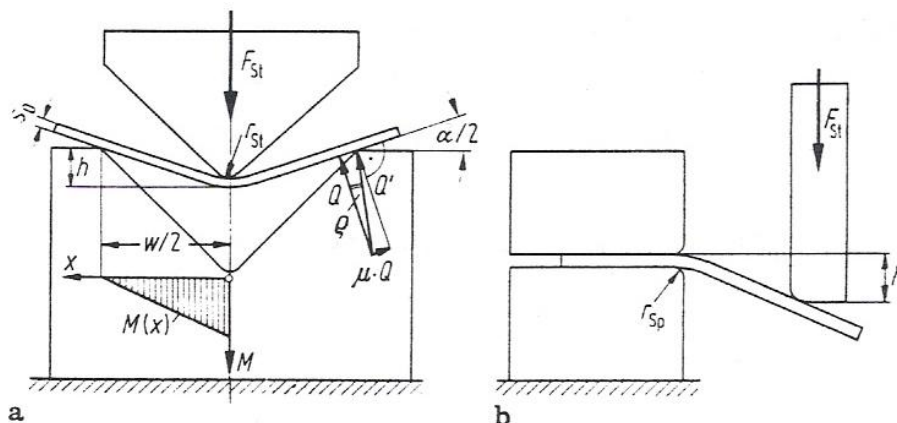
3.2 Ohýbání

Ohýbání je dalším způsob tváření za studena, při kterém je materiál plasticky deformován pod nejrůznějšími úhly. Při této metodě je nástroj ohýbadlo a výrobkem je potom výlisek. Tato technologie se svým charakterem řadí mezi plošné tváření a nejčastěji je touto metodou zpracován plech, trubky a tyčový materiál. [1]

Při ohýbání se na vnitřní straně ohybu objeví tlakové napětí. Naproti tomu se na vnější straně objeví tahové napětí. Obě tyto napětí způsobují v materiálu plastické deformace. Pokud jsou velké a kov není tvárný, tak se začnou tvořit na natahované straně trhlinky. Ve střední části průřezu součásti namáhané na ohyb jsou napětí malá a pohybují se kolem meze kluzu. V přechodu mezi tímto pásmem jsou vlákna bez napětí a bez deformací. Spojnice těchto vláken tvoří neutrální osu, která nemá žádné napětí a při ohýbání se neprodlužuje ani nezkracuje. Tato neutrální osa je posunuta k vnitřní straně ohybu a není tudíž totožná s osou těžiště součásti. U tenkých plechů není tento rozdíl až tak velký, ale při ohýbání tlustších plechů se musí vždy s tímto jevem počítat. [1, 6]

Mezi negativní jevy ohýbání patří tzv. zpětné odpružení ohýbaných součástí. Tento jev vzniká vlivem pružné deformace materiálu okolo neutrální osy. Úhel odpružení se pohybuje okolo 3 až 15°, ale vše závisí na tvárnosti materiálu, poloměru ohybu a také na způsobu ohýbání. Toto odpružení se nejčastěji eliminuje tak, že se materiál ohne více o hodnotu odpružení. Kalibrací a prolisy se dá tento problém úplně odstranit. [6]

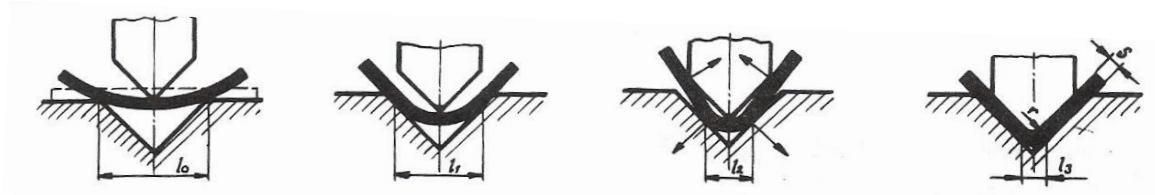
Pokud bude při ohýbání vnitřní úhel ohybu větší než rádius ohybníku, ohýbací čelisti jedná se o volné ohýbání (Obr. 8). V opačném případě jde o ohýbání v ohýbačkách. [5]



Obr. 8. Volné ohýbání [5]

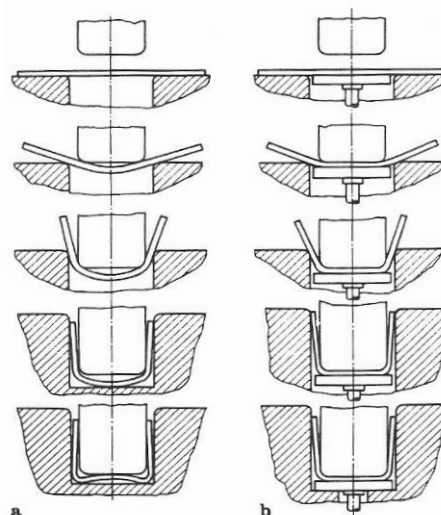
V pevné ohýbačce probíhá ohýbání až na maximální hodnotu. Ohybník sevře ohýbaný materiál k ohybnici. Mezi nejznámější způsoby ohýbání patří [5]:

- **ohýbání do tvaru V**, začíná podobně jako volné ohýbání (Obr. 9). Tvar pak odpovídá geometrii ohybníků a ohybnice. Vše už pak záleží na rádiu ohybníku, jestli je menší nebo větší než rádius ohybnice.



Obr. 9. Ohýbání do tvaru V [1]

- **ohýbání do tvaru U**, při kterém se vlivem zpevnování při ohýbání zvětšují tahová napětí (Obr. 10). Pokud je nevhodně zvolen poměr průměru a tloušťky materiálu dojde k porušení materiálu ve vnější vrstvě. Menší sklon k porušení budou mít materiály, které jsou žíhané. Velmi důležitá je také orientace vláken při ohýbání. Pokud budeme ohýbat materiál kolmo na směr vláken tak je větší šance, že dojde k jeho porušení. Při ohýbání může dojít také ke zvlnění. K tomu dochází především u tenkých plechů. Zvlnění se dá eliminovat, pokud budeme působit dodatečnou tahovou silou při ohýbání nebo přitlačením na materiál z boku.



Obr. 10. Ohýbání do tvaru U [1]

Rozdělení technologie ohýbání [5]:

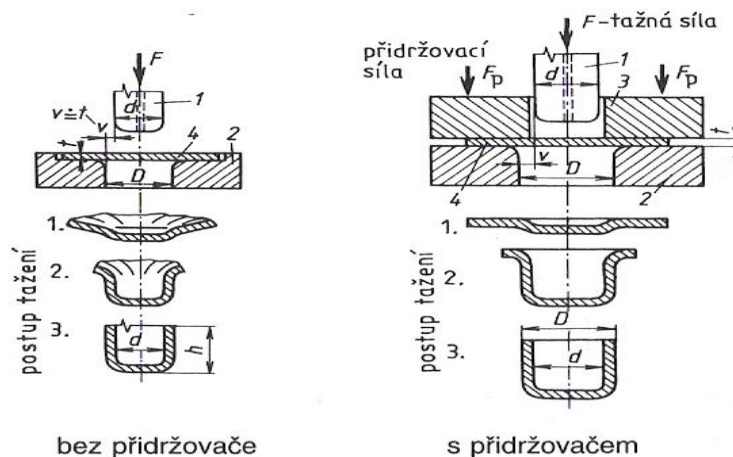
- běžné ohýbání v ruční nebo hydraulické ohýbačce;

- ohýbání na klikových či excentrických lisech;
- ohýbání ohraňováním na speciálních ohraňovacích lisech;
- zakružování v pevných nástrojích na lisech;
- lemování, které obvykle vyztužuje okraj výlisku;
- profilování, které používáme k ohýbání pásů a plechu.

3.3 Tažení

Tažení je technologický postup tváření, kdy se z rovného plechu tváří polouzavřená nádoba. Tato nádoba má obvykle rotační tvar. Výtažky se pak jen ostříhují a nijak jinak nezpracovávají. Tato technologie je pak vhodná pro sériovou a hromadnou výrobu. Plech musí mít dostatečnou tažnost. Nástrojem je tažidlo a výrobek je pak výtažek. [1]

Při tažení se přístřih protahuje mezi tažnicí a tažníkem (Obr. 11). Pokud máme vytáhnout válcovou nádobu, je přístřih kruhový (rondel). Materiál musí být vytažen ve směru poloměru a zároveň musí být stlačen ve směru obvodu. V opačném případě by se mohl materiál zvlnit. Při tažení tenkého plechu se to může stát. Vznikají přehyby materiálu a při růstu odporů se utrhne dno. Pokud poroste rozdíl mezi vnějším a vnitřním průměrem, tak musíme přemístit více materiálu. Zároveň porostou také deformace a namáhání taženého materiálu. K eliminaci zvlnění se používá přidržovač. Mezi přidržovačem a horní částí tažnice vznikne mezera, ve které může přístřih klouzat, ale nemůže se vlnit. Při pohybu zpět se přidržovač chová jako stírač. Bez přidržovače můžeme provádět tažení jen u mělkých nádob z tlustších plechů. [1, 6]



Obr. 11. Tažení bez přidržovače a s přidržovačem [1]

Tažení se ztenčením stěny probíhá jako druhá tažná operace. Vůle mezi tažníkem a tažnicí je větší než výchozí tloušťka plechu. Ovšem při tažení se ztenčením stěny je tato vůle menší než výchozí tloušťka plechu. Tím dochází k její kalibraci. Hlavní napětí jsou příznivější než v první tažné operaci a můžeme si dovolit větší stupeň. [5]

Tažení přehrnování se také nazývá jako přehrnování nebo tažení obracením. Tato metoda se provádí na dvojčinných, ale častěji na trojčinných lisech. Na jedno založení přístřihu do nástroje se na dva tahy vytáhne hotová nádoba. [5]

Žlábkování se využívá pro vyztužení výlisků nebo plechů. Různé průřezy žlábků jsou uvedeny na obrázku (Obr. 12). Samotné žlábkování se provádí pomocí speciálních nástrojů. Rozměry jsou velmi často limitovány využitím plasticity tvářeného plechu. [5]

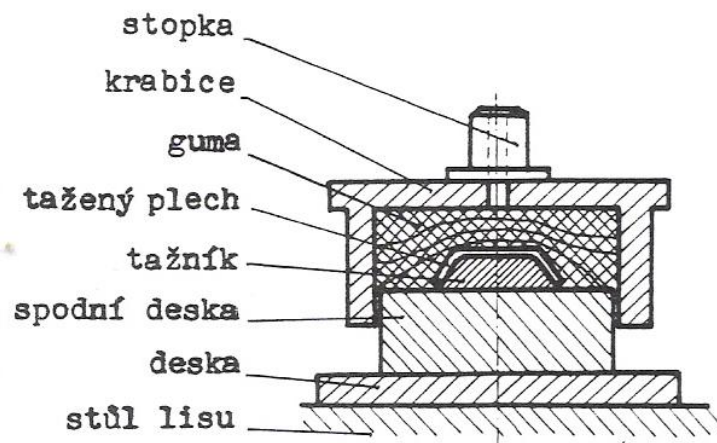


Obr. 12. Žlábkování [5]

Jako **zvláštní způsoby tažení** bylo patentováno mnoho nejrůznějších technologií. Velmi často se jedná o stroje s nekovovým nástrojem. Tvářecí síla velmi často působí přes gumu, viz obrázek (Obr. 13) nebo přes gumový polštář. Mohou to být také činná média. Výhody těchto technologií jsou [5]:

- tažení vhodných tvarů na jeden tah;
- malá zbytková vnitřní pnutí při vyšší tvarové přesnosti;
- vhodné pro tažení v malých sériích a pro prototypy;
- tažení vrstvených materiálů.

Nevýhodou těchto technologií však je, že se dají kromě tváření přes gumu provádět jen na speciálních strojích.



Obr. 13. Tažení gumou [5]

Přetahování je metoda, která se využívá v kusové nebo malosériové výrobě. Vhodná je pro velké výrobky jednoduchých tvarů. Požadovaný tvar se je získán tažením přes tažník.

4 VÝROBA OTVORŮ

Výroba otvorů zaznamenala obrovský pokrok. V průběhu uplynulých dvou set let se tvar vrtáků zlepšoval, ale geometrie byla velmi jednoduchá a pracovní činnost naprosto nedostatečná. Ve vývoji procesu řezání bylo velkým pokrokem použití parního stroje jako zdroje energie. V období manufaktury vzniklo mnoho druhů speciálních nástrojů, např. šroubovité vrtáky, závitníky a závitové čelisti. [2]

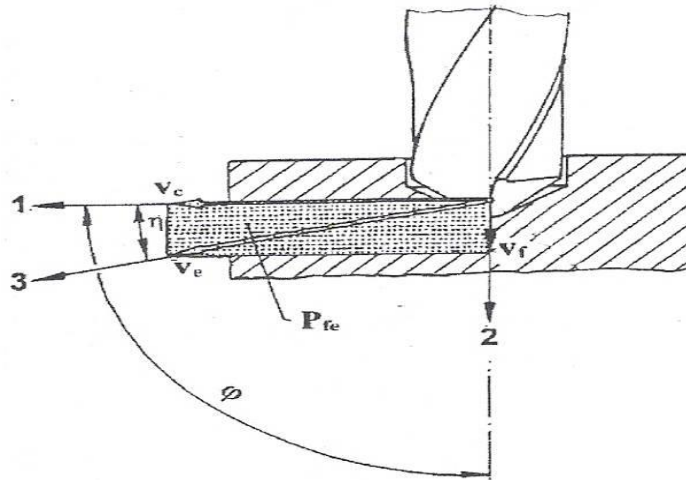
4.1 Vrtání

Výroba děr vrtáním je velmi stará činnost. Tato metoda se časem značně vyvinula v moderní technologii obrábění. Vrtání bylo a v dohledné době i bude nejrozšířenější metodou pro zhotovování otvorů. Je více používaná oproti soustružení, frézování atd.

Tato technologie je členěna na různé operace. K těm základním a nejpoužívanějším operacím patří [2]:

- **vrtání do plna** (vrtání na průměr) je operace, při které je díra vrtána do plného materiálu. V jediné operaci dojde k provrtání přes celou šířku materiálu a dojde k vytvoření průchozí díry;
- **vrtání na hřbetovou plochu**, kdy se díra vrtá do plného materiálu jako při vrtání do plna. Rozdíl spočívá v tom, že vrtáme jen do určené hloubky materiálu;
- **vrtání na jádro** (vyvrtání) je operací, kdy je aplikováno postupné vrtání. Tato metoda má menší nároky na příkon stroje než je u vrtání do plna a proto se využívá pro větší průměry děr;
- **vrtání na věnec** se používá pro vrtání mezikruží. T tomu se využívá tzv. trepanační nástroj, který nevrtá celý průřez díry, ale jen mezikruží po obvodu. Uprostřed zůstává plné jádro. Tento způsob je nejvhodnější pro průchozí díry;
- **zahlubování** je operací na zvětšení průměru předvrtané díry speciálně konstrukčně upraveným nástrojem. Tento nástroj odebírá velké množství materiálu po obvodu díry;
- **vystružování a vyhrubování** se používá pro zvýšení kvality vyvrtané díry. Nejprve se díra vyhrubuje a následně vystružuje.

Při vrtání vykonává hlavní řezný pohyb (otáčivý) i posuv ve směru osy obvykle nástroj. Pro správné pochopení procesu vrtání je dobré znát kinematiku vrtacího procesu (Obr. 14).



Obr. 14. Kinematika vrtacího procesu při vrtání šroubovým vrtákem [9]

1 - směr hlavního pohybu; 2 - směr posuvového pohybu; 3 - směr řezného pohybu; v_c - řezná rychlost; v_f - posuvová rychlost; v_e - rychlost řezného pohybu; P_{fe} - pracovní boční rovina; φ - úhel posuvového pohybu; η - úhel řezného pohybu

Řezná rychlost v_c je jedním ze základních parametrů při vrtání. Je jednou z hlavních složek rychlosti řezného pohybu v_e . Řezná rychlost, je vlastně je obvodová rychlost nejvzdálenějšího bodu řezné dráhy od osy otáčení. [2]

Vypočteme ji pomocí vzorce [2]:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n_c}{1000} \quad (2)$$

v_c řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]

Dprůměr řezného nástroje [mm]

n_c otáčky řezného nástroje [min^{-1}]

Zvláštností vrtání je to, že řezná rychlost jednotlivých bodů řezné hrany směrem k ose vrtáku se zmenšuje a v ose je nulová. Tímto je dán jeden z největších problémových faktorů

vrtání, a to plynulá změna řezné rychlosti od obvodu vrtáku (hrot nástroje - maximální řezná rychlost) směrem od středu (k ose nástroje - minimální řezná rychlost, z hlediska teorie až nulová). Z toho jevu plynou některé technologické problémy. Například příčný břit v ose vrtáku vzhledem k nepříznivé geometrii v podstatě neodebírá třísku, ale materiál jen plasticky deformuje. Výrobci řezných nástrojů uvádějí ve svých příručkách a katalozích tzv. doporučené řezné rychlosti, které jsou nejvyšší obvodovou řeznou rychlostí. [2]

Další složkou rychlosti řezného pohybu v_e , je posuvová rychlost v_f . Tento parametr vypočteme ze vzorce [2]:

$$v_f = f \cdot n_c \quad (3)$$

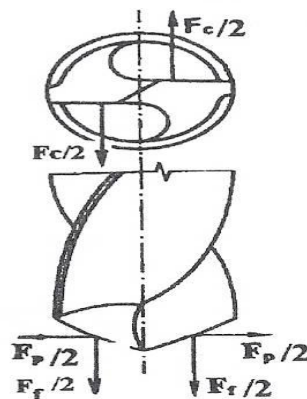
v_f posuvová rychlost [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]

f posuv řezného nástroje [mm]

n_c otáčky řezného nástroje [min^{-1}]

Posuv f ze vzorce (3) je pohyb vrtáku ve směru osy v [mm]. U běžného vrtáku pracuje každá řezná hrana (v případě, že jsou dvě) s polovičním posuvem.

Pro výpočet dalších důležitých parametrů jako je řezný výkon je třeba znát Rozložení řezných sil při vrtání, které je dobře patrné z obrázku (Obr. 15).



Obr. 15. Řezné síly při vrtání [9]

F_c - řezná síla; F_f - posuvová síla; F_p - pasivní síla

Z obrázku (Obr. 14) a (Obr. 15) pak vyplývá vzorec pro výpočet řezného výkonu při řezání šroubovitým vrtákem:

$$P_c = \frac{F_c}{2} \cdot \frac{v_c}{60} = \frac{F_c \cdot v_c}{120} \quad (4)$$

P_c posuvová rychlost [W]

F_c posuv řezného nástroje [N]

v_c otáčky řezného nástroje [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]

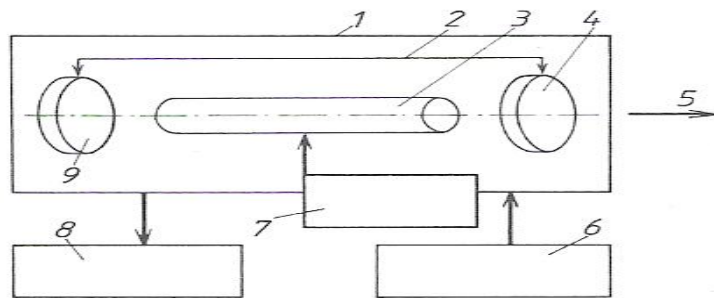
Pro vrtání se používá mnoho rozličných nástrojů. Tyto nástroje můžeme dle jejich tvaru dělit na [8]:

- **šroubovité vrtáky**, které jsou nejčastěji používané nástroje na výrobu děr. Ve většině případů jsou dvoubřité. Jejich šroubovité drážky usnadňují odchod třísky. Válcová fazetka na vedlejším ostří vrtáku zajišťuje vedení ve vrtané díře. K odstranění tření v díře je vrták mírně kuželovitý s menším průměrem u stopky. Větší průměr jádra opačným směrem zvyšuje tuhost vrtáku;
- **kopinaté vrtáky** jsou nejstarším nejjednodušším druhem vrtacích nástrojů. Řeznou část tvoří dva hlavní břity a příčný břit. Dle tvrdosti materiálu se volí úhel, který svírají obě hlavní ostří větší (90° až 146°). Řezná část kopinatých vrtáku je v dnešní době obvykle vyměnitelná břitová destička z rychlořezné oceli nebo slinutého karbidu. Mezi nevýhody tohoto typu vrtáku je velmi špatný odvod třísek z místa řezu;
- **středící vrtáky** se používají k navrtávání tvarových důlků pro upínání obrobků do hrotů. Slouží také k navrtávání středícího důlku pro přesné určení polohy osy díry při vrtání;
- **dělové vrtáky** jsou vhodné pro vrtání do hlubokých děr. Jejich konstrukce a ostří je konstruováno tak, aby bylo vedení v díře co nejlepší. Tento vrták slouží pro vrtání hlubokých děr, až několik desítek nebo stovek průměrů vrtáků;
- **vrtací hlavy** se velmi často používají pro vrtání děr velkých průměrů. Tyto vrtáky jsou osazeny pájenými nebo mechanicky upínanými břitovými destičkami.

4.2 Laser

LASER je zkratka anglického názvu Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Laser pracuje na principu indukované emise (vynuceného záření). Přeměna světelné energie na tepelnou energii je základem pro obrábění a opracování laserem. K tomu dochází při styku paprsku laseru s materiálem obrobku. Při vzniku vysokých teplot se obráběný materiál ohřívá, taje a odpařuje. [10]

Samotná konstrukce laseru je velmi specifická (Obr. 16). Hlavní částí laseru je laserová hlavice, která obsahuje laserové médium, to určuje délky vlny záření. Je to směs několika materiálů s vhodnými energetickými hladinami ve vhodném nosném materiálu, který je průhledný a má schopnost odvést teplo. Dále laser obsahuje rezonátor, což je optický systém umožňující zformovat a zesílit záření. Mimo laserovou hlavici se nachází budící zařízení, které ovlivňuje pracovní režim laseru, způsob buzení je dán laserovým médiem. Nevyužitou energii, která se nepřemění v záření, ale v tepelnou energii. [10]



Obr. 16. Schéma konstrukce laseru[10]

- 1 - laserová hlavice; 2 rezonátor; 3 - laserové médium;
 4 - polopropustné zrcadlo; 5 - výstupní záření; 6 - zdroj energie buzení; 7 - budící zařízení; 8 - chladicí systém; 9 - nepropustné zrcadlo

V technologii se laser používá pro vrtání, popisování součástí, řezání a vyřezávání, svařování a pájení, tepelné zpracování, nanášení povlaků, soustružení, frézování a gravírování. Schopnost materiálu být obráběn laserem je dána zejména těmito vlastnostmi [10]:

- **absorpcí**, což je schopností materiálu pohlcovat světelnou energii a měnit ji na kinetickou energii neuspořádaného pohybu molekul nebo atomů absorbující látky (tepelnou energii);

- **tepelnou vodivostí**, která je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti;
- **odrazivost**, která je dána poměrem odražené energie k energii dopadající.

V samotné technologii třískového obrábění byl laser poprvé použit v roce 1965 pro vrtání děr do diamantových průvlaků. Ty se nejčastěji používají pro tažení tenkých drátů. Pulzní režim laseru je vhodný pro vrtání děr (malých průměrů). Při něm laser vysílá jednotlivé pulzy o vysoké intenzitě záření. Laser je velmi vhodný pro vrtání do těžkoobrobitelných kovových i nekovových materiálů. Tvary děr mohou být kruhové i tvarové. Pro vrtání se používají [10]:

- CO₂ lasery, které se využívají zejména pro vrtání (kruhových i tvarových) otvorů. Nejmenší průměr vrtaných děr je 0,2 mm;
- Nd:YAG lasery jsou velmi vhodné pro vrtání děr s menšími průměry. Nejmenší průměr vrtaných děr je 0,025 mm;
- excimerový laser se užívá pro vrtání děr do keramických materiálů.

Pro vrtání děr v průmyslové výrobě se používají především Nd:YAG lasery o vstupním výkonu od 100 až do 500 W. Tloušťka vrtaného materiálu a výstupní výkon výrazně ovlivňují dobu vrtání. [10]

4.3 Elektronový paprsek

Obrábění elektronovým paprskem využívá kinetickou energii proudu urychlených elektronů. Podstatou metody obrábění elektronovým paprskem je, že v místě dopadu paprsku elektronů se jejich kinetická energie mění v tepelnou energii, materiál obrobku taje a odpařuje se. V určité hloubce se pohyb elektronů zastaví a vzniklá tepelná energie se koncentruje pod povrchem a způsobí, že se materiál začne erupčně odpařovat. Zionizované páry odpařeného materiálu způsobí zaostření paprsku v pracovním místě. [10]

Elektronový paprsek je nejvhodnější pro vrtání děr malých průměrů. Nejmenší díry, které lze vrtat jsou průměru 0,015 mm, při rychlosti až 4000 děr za sekundu. Pokud chceme vrtat hluboké díry, musí být průměr paprsku 2 až 4 menší než je průměr, který potřebujeme. Přesnost takovéto díry je okolo 5 až 20 % jejího průměru.

V obecné rovině je obrobitelnost materiálů elektronovým paprskem dána jejich fyzikálními vlastnostmi. Mechanické vlastnosti obrobitelnost neovlivňují. Elektronový paprsek se v

průmyslu využívá nejčastěji pro opracování především těžkoobrobitelných materiálů, jako žárupevných ocelí, austenitických ocelí při stavě jaderných reaktorů, hliníkových a titanových slitin, křemíku, drahokamů, tantalu, wolframu a speciálních slitin používaných v letectví a kosmonautice. Jak je vidět použití této metody je opravdu široké a v praxi se hojně využívá. Mezi nevýhody této metody však patří horší obrábění mosazi, bronzu, zinku, hořčíku a slitinových kovů. [10]

4.4 Termální vrtání

Historie samotného termálního vrtání sahá až do roku 1923, kdy se v malé stodole na jihu Francie Jan Cloude de Valliere pokoušel o vynalezení nástroje, který by umožnil pomocí frikčního tepla (namísto řezání) vytvořit otvor do tenkostěnných ocelových plechů a profilů. Nakonec se mu to podařilo, ale dalších 60 let trvalo, než termální vrtání dostalo současnou podobu. Muselo být vyřešeno mnoho problémů, než tato technologie mohla najít své komerční využití. Pro praktické průmyslové využití nebyl nástroj v té době využitelný z těchto důvodů. [11]:

- nebyly dostupné vysoce tvrdé materiály na výrobu nástroje (karbid wolframu);
- nebyla známá správná geometrie nástroje;
- neexistovaly diamantové brusné kotouče na přeostření tvrdokovových materiálů;
- nástrojárny nebyly schopny vyrobit požadovaný složitý tvar nástroje.

K výrobě pomocí technologie termálního vrtání se používá vrták Thermdrill, což je polygonový kuželový nástroj vyrobený z velmi pevného materiálu karbidu wolframu. Nástroj při výrobě otvorů generuje vysoké třecí teplo, které vznikne prostřednictvím vysokých otáček a axiální síly působící na obráběný materiál. Takto vygenerované teplo ohřívá materiál, což způsobuje ztrátu pevnosti materiálu a nástroj tak umožňuje plynulý průchod obrobkem. Při tom se formuje lem z přemísťovaného materiálu. Pro termální vrtání je na trhu k dispozici široká škála nástrojů, a to vše v návaznosti na materiál a rozměry obráběné součásti. Této speciální technologii se využívá například v topenářském, nábytkářském a automobilovém průmyslu, při výrobě nábytku z kovových materiálů, osvětlovací techniky a domácího vybavení. [11, 12]

Ke konkrétním příkladům dalšího použití patří [11, 12]:

- laciná výroba děr pro stříkací techniku (beztřísková technologie, bez nebezpečí zlomení nástrojů);
- těsné spoje pro plynárenský průmysl;
- závitová spojení s obrubou okolo díry;
- závitová spojení s hladkým čelem;
- ložisková nebo hřídelová podepření;
- vodotěsné i vysokotlaké spojení měkkým pájením.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 STANOVENÍ CÍLŮ PRÁCE

Celá teoretická část byla podporou pro část praktickou, která měla dát čtenáři povědomí o jevech při tváření. V praktické části již budeme podrobněji rozebírat metodu termálního vrtání.

Hlavní cílem praktické části je však provést experiment, který bude mít za cíl porovnat tři různé materiály při použití metody termálního vrtání. Zkoušenými materiály jsou: slitina hliníku 42 4401, konstrukční ocel 11 373 a chromniklová ocel 17 346. Hlavními porovnávacími parametry bude vytvořený vnitřní průměr díry a výška lemu. Tyto parametry budou pro lepší přehlednost vyhodnoceny do grafů, které jednotlivé materiály porovnají.

Praktická část se bude postupně zabývat těmito hlavními body:

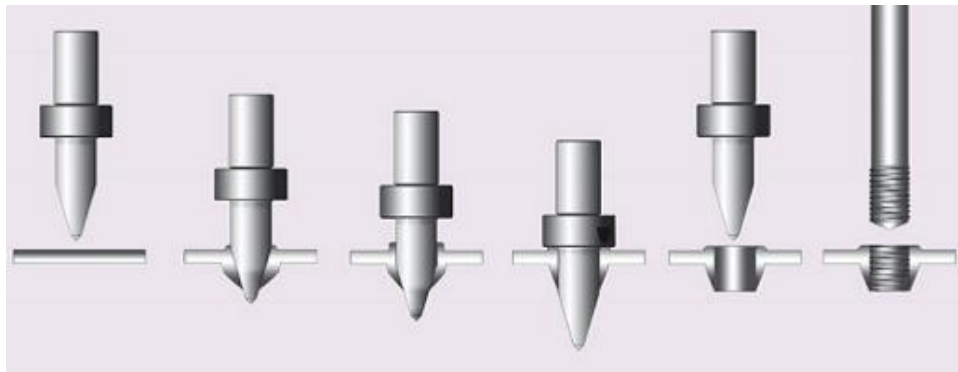
- Podrobné rozebrání principu metody termálního vrtání.
- Příprava a provedení experimentu na třech materiálech.
- Vyhodnocení a porovnání velikosti otvorů vzniklých po termálním vrtání.
- Vyhodnocení a porovnání lemů vzniklých po termálním vrtání.
- Vyhodnocení vhodnosti zkoušených materiálu pro termální vrtání díky získaným parametrům.
- Zhodnocení celého experimentu a vyvození náležitých závěrů.

6 TECHNOLOGIE TERMALNÍHO VRTÁNÍ

6.1 Princip a nástroje

Termální vrtání je proces, kdy dochází k vytvoření přesného otvoru protlačením speciálního vrtáku částečně kuželového tvaru. Materiál, který je nadbytečný vytváří lem (krček), do kterého lze snáze vyřezat závit.

Samotný průběh termálního vrtání můžeme vidět na (Obr. 17). Termální vrtání probíhá za vysokých otáček (2400-3000 za minutu). Působením axiální síly je vrták přitlačován k materiálu. Vysoké otáčky a axiální síla mají za následek velké tření a to způsobuje vysoký nárůst teploty (až 950 °C u běžné oceli). U měkčích materiálů bude tato teplota mnohem nižší. Když materiál dosáhne vhodné teploty, klesne v tomto místě jeho pevnost. Vrták se vlivem axiální síly, kterou na součást působí, začne protlačovat skrze stěnu materiálu. V této chvíli se také začne tvořit lem (krček) na obou stranách vrtaného materiálu. Poměr tvořícího se lemu na přední a na zadní straně je přibližně 1:2 u běžné oceli. Tento poměr se liší dle použitého materiálu. Ve většině případů je lem na přední straně pro další účely a zpracování nevhodný a potřebujeme jej odstranit. K tomu slouží nákrůžek ve střední části vrtáku.



Obr. 17. Kompletní operace termálního vrtání včetně výroby závitu [14]

Pro termální vrtání se používají dva typy nástrojů:

- Prvním typem je nástroj s názvem Thermdrill „FORM“, který má nákrůžek válcového tvaru (Obr. 18). Tento typ nákrůžku má za úkol zatlačit lem na přední straně zpět směrem do materiálu. Vznikne rovná dosedací plocha, což je výhodné použít například u spojení trubek. Zbylý lem na přední straně poslouží jako další prostor pro závit.



Obr. 18. Nástroj Thermdrill „FORM“ [14]

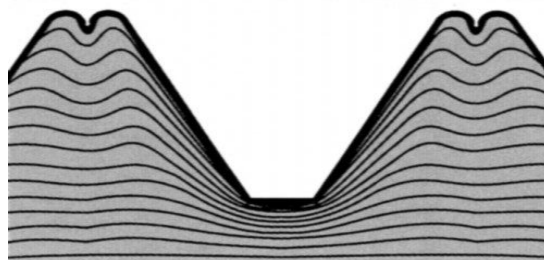
- Druhý typ nástroje se nazývá Thermdrill „CUT“, který má v nákrůžku velmi jednoduché ostří (Obr. 19). Toto ostří slouží k odřezání lemu na přední straně. Touto metodou lze lem odstranit úplně, takže na materiálu pak vznikne hladká plocha.



Obr. 19. Nástroj Thermdrill „CUT“ [14]

6.2 Závity

Další operace při výrobě kompletní díry je výroba závitu. Po termálním vrtání se pro výrobu závitu nepoužívá klasického řezání závitu, ale závit se tváří. Jedná se o beztržkovou metodu výroby závitů. Výhodou je, že tváření nenarušuje vlákna jejich odřezáváním, ale naopak vtlačuje a zhutňuje materiál, viz obrázek (Obr. 20). Tato metoda zaručí vysokou tuhost závitu a jeho odolnost proti statickému i dynamickému namáhání.



Obr. 20. Struktura tvářeného závitu [15]

6.3 Přípravky pro termální vrtání

Nedílnou součástí termálního vrtání je mazání. Vrtáky se musí mazat k tomu určenou pastou, kterou dodává výrobce. Pasty zvyšují efektivitu samotné práce a životnost vrtáku. Zvyšují tření, což způsobí rychlejší ohřátí vrtaného materiálu.

Další potřebnou pomůckou je kleštinový upínač. Slouží jako speciální upínací přípravek. Termální vrtání je beztřísková metoda výroby, takže nenastává problém s odvodem třísky, ovšem tříska při běžném obrábění odvádí teplo. K pohlcení nadbytečného tepla nám slouží kleštinový upínač, který má přesně vyrobený hliníkový prsteneček. Díky němu teplo nepřechází na stroj a neovlivňuje tak negativně celou práci.

6.4 Materiály

Technologie termálního vrtání je vhodná pro celou řadu různých materiálů. Jsou mezi nimi jak ušlechtilé a konstrukční oceli, tak barevné kovy jako měď, mosaz či hliník. Materiály se používají v rozmezí tloušťek 1 – 12 mm.

6.5 Praktické použití

Tato technologie nachází uplatnění v mnoha výrobních technologiích. Typickou aplikací této metody jsou šroubové spoje. Vyvrtáme díru, následně vyrobíme závit a provedeme šroubový spoj. Možné je také použití samořezného šroubu. Dále se termální vrtání používá pro rozšíření konců trubek a pro jejich následné spojení. Pokud se vyrobí dva protilehlé otvory pomocí termálního vrtání, mohou také sloužit k uchycení ložiska. Toho se užívá například u některých kardanových hřídelů. V neposlední řadě je tento způsob výroby děr vhodný pro pájené a svařované spoje. Lem vzniklý po vrtání nám dá dostatečně velkou styčnou plochu.

7 ZKOUŠKA A VYHODNOCENÍ

7.1 Podmínky zkoušky

Zkouška byla provedena na sloupové vrtačce, při 3000 otáčkách za minutu. Nebylo použito žádného chlazení (emulze, vzduch). Při samotném experimentu bylo vyvrtáno dvacet otvorů do každého ze tří materiálů bez větších prodlev mezi vrtáním. Docházelo tedy k zahřátí materiálu i stroje.

7.1.1 Použitý nástroj

K samotnému termálnímu vrtání bylo použito tvářecího vrtáku od firmy STIM ZET s.r.o., který je znám pod názvem Thermdrill „CUT“ (Obr. 21). Tento nástroj je rozdělen na část pracovní a část upínací. Pracovní část se skládá z bodového konce a kužele. Kužel pak přechází ve válcovou část. Přibližně ve středu délky nástroje se nachází ostří s úhlem břitu 90° . Celá tato pracovní část se musí vyznačovat vysokou tvrdostí, která zaručí správný průběh samotného vrtacího procesu. Pro tento nástroj se používá materiál karbid wolframu (WC). Experiment byl proveden s vrtákem o průměru M8.



Obr. 21. Obrázek tvářecího vrtáku

7.1.2 Použitý stroj

Jako stroj byla pro experiment použita sloupová vrtačka E 1720 F/400. Tento typ sloupové vrtačky byl zvolen především pro svůj vysoký rozsah otáček, které jsou potřebné pro provedení experimentu. V tabulce (Tab. 1) jsou uvedeny základní parametry vrtačky.

Tab. 1. Tabulka parametrů vrtačky

Typ:	E 1720 F/400
Rozsah otáček:	160-3000 ot./min ⁻¹
Napětí:	3/N PE AC/400V 50Hz
Příkon:	1,1kW
Hmotnost	85 kg

Na obrázku (Obr. 22) je sloupová vrtačka nachystaná k provedení experimentu. Zkušební materiál byl upnut ve svěráku. Samotný svěrák byl upnut pomocí upínek k pracovnímu stolu vrtačky. Bylo také nutné zafixovat polohu pracovního stolu ve vodorovné poloze.



Obr. 22. Sloupová vrtačka E 1720 F/400

7.1.3 Zkušební materiály

Prvním zkoušeným materiálem byla slitina hliníku norma 42 4401 (Obr. 23). Slitina má chemické složení dle normy EN 573.3. Materiál byl profilu ve tvaru L o síle 3mm.



Obr. 23. Zkušební materiál z hliníku

Druhým zkoušeným materiálem byla konstrukční ocel 11 373 (Obr. 24). Jedná se o ocel obvyklých vlastností vhodnou pro ocelové konstrukce a pro svařování. Dle české normy je ocel označena ČSN 41 1373. Zkušební materiál byl profilu ve tvaru U o síle 3mm.



Obr. 24. Zkušební materiál z konstrukční oceli 11 373

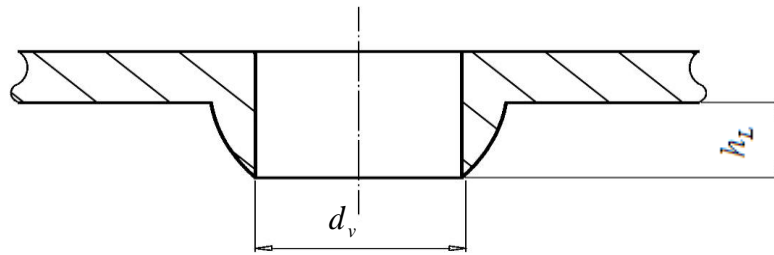
Posledním zkoušeným materiálem byla chromniklová ocel 17 346 (Obr. 25). Dle české normy je ocel označena ČSN 41 7346. Tato ocel je korozivzdorná, odolává trvalému působení vody a páry. Jedná se o ocel střední pevnosti. Zkoušený materiál byl profilu ve tvaru U o síle 3mm.



Obr. 25. Zkušební materiál z chromniklové oceli 17 346

7.2 Kontrola a vyhodnocení

Po vykonání jednotlivých zkoušek byla provedena kontrola všech otvorů a lemů. Nejprve byly kontrolovány vnitřní průměry d_v a poté lemy h_L u všech tří zkušebních materiálů. Oba tyto rozměry zobrazuje schéma na obrázku (Obr. 26).



Obr. 26. Schéma měřených rozměrů na vyvrtaném otvoru

d_v - vnitřní průměr vrtané díry; h_L - výška lemu

7.2.1 Kontrola průměrů

Kontrola vnitřních průměrů d_v vytvořených děr viz (Obr. 27) byla provedena na zkušebních materiálech po jejich ochlazení na pokojovou teplotu (20 °C).

K měření bylo použito digitálního posuvného měřítka s rozsahem 0 - 150 mm a s rozlišením 10 μm . Vnitřní průměr každé díry byl změřen třikrát ($x_1 - x_3$) na různých místech. Celkem bylo změřeno dvacet děr u každého ze tří zkoušených materiálů. Všechny hodnoty byly zaneseny do tabulek (Tab. 2 až 4). V každé tabulce je uveden výsledný aritmetický průměr a směrodatná odchylka pro každou díru. Rozměry otvorů jsou v tabulce uvedeny chronologicky podle toho, jak byly vyvrtány.



Obr. 27. Příklad vytvořených děr v oceli 11 373

Výpočet aritmetického průměru:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\bar{X} = \frac{7,24 + 7,21 + 7,17}{3} = 7,21 \text{ mm}$$

Výpočet směrodatné odchylky:

$$S = + \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$S = + \sqrt{\frac{(7,24 - 7,21)^2 + (7,21 - 7,21)^2 + (7,17 - 7,21)^2}{3}} = 0,03$$

Tab. 2. Tabulka naměřených průměrů zkušebního vzorku ze slitiny hliníku

Č. Měření	d_v [mm]	\bar{x} [mm]	S	Č. Měření	d_v [mm]	\bar{x} [mm]	S
1	7,24	7,21	0,03	31	6,99	6,97	0,03
2	7,21			32	6,98		
3	7,17			33	6,93		
4	7,24	7,19	0,04	34	7,36	7,31	0,04
5	7,19			35	7,28		
6	7,15			36	7,29		
7	7,36	7,31	0,04	37	7,19	7,23	0,09
8	7,28			38	7,15		
9	7,29			39	7,36		
10	7,16	7,24	0,06	40	7,16	7,24	0,06
11	7,25			41	7,25		
12	7,3			42	7,3		
13	6,99	6,97	0,03	43	6,99	7,05	0,05
14	6,98			44	7,11		
15	6,93			45	7,05		
16	7,24	7,24	0,02	46	7,24	7,24	0,04
17	7,21			47	7,19		
18	7,26			48	7,28		
19	7,01	7,06	0,04	49	7,29	7,23	0,05
20	7,11			50	7,16		
21	7,05			51	7,25		
22	7,24	7,19	0,04	52	7,3	7,29	0,01
23	7,19			53	7,28		
24	7,15			54	7,29		
25	7,36	7,31	0,04	55	7,16	7,24	0,06
26	7,28			56	7,25		
27	7,29			57	7,3		
28	7,16	7,24	0,06	58	7,29	7,23	0,05
29	7,25			59	7,16		
30	7,3			60	7,25		

Tab. 3. Tabulka naměřených průměrů zkušebního vzorku z oceli 11 373

Č. Měření	d_v [mm]	\bar{x} [mm]	S	Č. Měření	d_v [mm]	\bar{x} [mm]	S
1	6,87	6,80	0,07	31	6,8	6,73	0,11
2	6,7			32	6,81		
3	6,82			33	6,57		
4	6,63	6,58	0,09	34	6,91	6,89	0,02
5	6,45			35	6,86		
6	6,65			36	6,89		
7	6,75	6,73	0,13	37	6,86	6,83	0,02
8	6,88			38	6,82		
9	6,56			39	6,81		
10	6,68	6,76	0,07	40	6,84	6,81	0,04
11	6,84			41	6,75		
12	6,75			42	6,84		
13	6,51	6,65	0,11	43	6,85	6,82	0,02
14	6,77			44	6,81		
15	6,68			45	6,79		
16	6,81	6,82	0,01	46	7,03	6,97	0,04
17	6,82			47	6,96		
18	6,84			48	6,93		
19	7,04	6,91	0,10	49	6,78	6,73	0,08
20	6,89			50	6,62		
21	6,8			51	6,78		
22	6,84	6,80	0,06	52	6,86	6,83	0,04
23	6,72			53	6,85		
24	6,85			54	6,78		
25	6,76	6,79	0,05	55	6,8	6,80	0,01
26	6,87			56	6,81		
27	6,75			57	6,78		
28	6,82	6,83	0,01	58	6,67	6,74	0,06
29	6,84			59	6,73		
30	6,83			60	6,82		

Tab. 4. Tabulka naměřených průměrů zkušebního vzorku z oceli 17 346

Č. Měření	d_v [mm]	\bar{x} [mm]	S	Č. Měření	d_v [mm]	\bar{x} [mm]	S
1	6,81	6,79	0,09	31	6,98	6,885	0,13
2	6,89			32	6,68		
3	6,68			33	6,89		
4	6,86	6,83	0,05	34	7,02	6,94	0,11
5	6,87			35	6,78		
6	6,76			36	7,01		
7	6,84	6,82	0,05	37	6,88	6,86	0,09
8	6,87			38	6,74		
9	6,76			39	6,97		
10	6,95	6,80	0,11	40	6,69	6,73	0,04
11	6,73			41	6,78		
12	6,72			42	6,71		
13	6,76	6,77	0,15	43	6,67	6,75	0,08
14	6,96			44	6,72		
15	6,59			45	6,86		
16	6,79	6,79	0,06	46	7,04	7,09	0,04
17	6,87			47	7,14		
18	6,72			48	7,08		
19	6,98	6,86	0,15	49	6,95	6,86	0,07
20	6,95			50	6,84		
21	6,64			51	6,78		
22	6,68	6,76	0,09	52	6,91	6,92	0,05
23	6,71			53	6,99		
24	6,88			54	6,87		
25	7,04	6,90	0,16	55	7,05	7,06	0,05
26	6,68			56	7,12		
27	6,97			57	7,01		
28	6,65	6,70	0,10	58	6,79	6,83	0,03
29	6,61			59	6,82		
30	6,84			60	6,87		

7.2.2 Kontrola lemu

Stejně jako v případě vnitřních průměrů byly lemy h_L kontrolovány po ochlazení na pokojovou teplotu (20 °C). Příklad lemu můžeme vidět na obrázku (Obr. 28).

Měření lemů bylo provedeno pomocí digitálního posuvného měřítka o rozsahu 0 - 150 mm a s rozlišením 10 μm . Každý lem byl změřen třikrát ($x_1 - x_3$) na různých místech. Celkem bylo změřeno dvacet lemů u každého ze tří zkoušených materiálů. Tabulky jsou sestaveny stejným způsobem jako v případě kontroly průměrů. V každé tabulce je uveden výsledný aritmetický průměr pro každou díru a směrodatná odchylka. Rozměry lemů jsou uvedeny chronologicky dle jejich zhotovení.



Obr. 28. Příklad vytvořeného lemu v konstrukční oceli 11 373

Výpočet aritmetického průměru:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\bar{X} = \frac{4,25 + 4,78 + 4,26}{3} = 4,43 \text{ mm}$$

Výpočet směrodatné odchylky:

$$S = + \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$S = + \sqrt{\frac{(4,25 - 4,43)^2 + (4,78 - 4,43)^2 + (4,26 - 4,43)^2}{3}} = 0,25$$

Tab. 5. Tabulka naměřených výšek lemu zkušebního vzorku ze slitiny hliníku

Č. Měření	h_L [mm]	\bar{x} [mm]	S	Č. Měření	h_L [mm]	\bar{x} [mm]	S
1	4,25	4,43	0,25	31	4,31	4,31	0,11
2	4,78			32	4,45		
3	4,26			33	4,17		
4	4,03	4,19	0,11	34	4,52	4,32	0,18
5	4,27			35	4,08		
6	4,27			36	4,37		
7	4,52	4,32	0,18	37	4,27	4,35	0,12
8	4,08			38	4,27		
9	4,37			39	4,52		
10	3,96	4,15	0,15	40	3,96	4,15	0,15
11	4,33			41	4,33		
12	4,15			42	4,15		
13	4,31	4,31	0,11	43	4,31	4,20	0,13
14	4,45			44	4,28		
15	4,17			45	4,01		
16	3,92	4,15	0,17	46	4,03	4,13	0,10
17	4,34			47	4,27		
18	4,18			48	4,08		
19	4,16	4,15	0,11	49	4,37	4,22	0,18
20	4,28			50	3,96		
21	4,01			51	4,33		
22	4,03	4,19	0,11	52	4,15	4,20	0,12
23	4,27			53	4,08		
24	4,27			54	4,37		
25	4,52	4,32	0,18	55	3,96	4,15	0,15
26	4,08			56	4,33		
27	4,37			57	4,15		
28	3,96	4,15	0,15	58	4,37	4,22	0,18
29	4,33			59	3,96		
30	4,15			60	4,33		

Tab. 6. Tabulka naměřených výšek lemu zkušebního vzorku z oceli 11 373

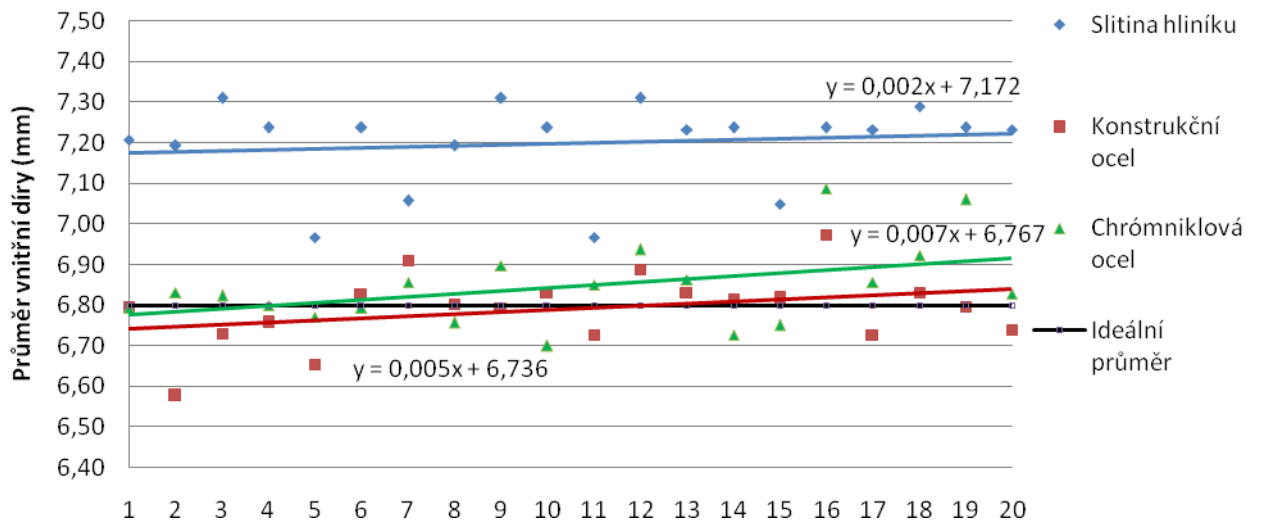
Č. Měření	h_L [mm]	\bar{x} [mm]	S	Č. Měření	h_L [mm]	\bar{x} [mm]	S
1	5,35	5,18	0,14	31	5,38	5,29	0,10
2	5,19			32	5,14		
3	5,01			33	5,34		
4	4,81	4,66	0,12	34	5,13	5,24	0,10
5	4,51			35	5,21		
6	4,65			36	5,38		
7	4,67	4,74	0,05	37	5,46	5,23	0,18
8	4,76			38	5,21		
9	4,78			39	5,03		
10	4,84	4,87	0,02	40	4,85	5,03	0,13
11	4,89			41	5,09		
12	4,88			42	5,16		
13	4,84	4,85	0,05	43	5,06	5,01	0,03
14	4,92			44	5		
15	4,8			45	4,98		
16	4,65	4,69	0,03	46	4,92	5,12	0,14
17	4,73			47	5,21		
18	4,68			48	5,22		
19	4,85	4,85	0,00	49	5,18	5,17	0,09
20	4,86			50	5,27		
21	4,85			51	5,06		
22	4,88	4,82	0,06	52	5,13	5,22	0,06
23	4,74			53	5,26		
24	4,84			54	5,27		
25	4,93	4,92	0,03	55	5,34	5,26	0,06
26	4,96			56	5,24		
27	4,88			57	5,19		
28	4,95	4,91	0,06	58	5,21	5,20	0,03
29	4,82			59	5,16		
30	4,96			60	5,23		

Tab. 7. Tabulka naměřených výšek lemu zkušebního vzorku z oceli 17 346

Č. Měření	h_L [mm]	\bar{x} [mm]	S	Č. Měření	h_L [mm]	\bar{x} [mm]	S
1	6,34	6,03	0,35	31	6,2	5,27	0,05
2	6,22			32	6,29		
3	5,54			33	6,32		
4	6,13	5,91	0,41	34	6,34	6,19	0,12
5	5,33			35	6,17		
6	6,27			36	6,06		
7	5,66	5,80	0,20	37	6,07	6,12	0,16
8	5,67			38	6,33		
9	6,08			39	5,95		
10	6,2	5,80	0,39	40	6,02	5,91	0,11
11	5,28			41	5,76		
12	5,93			42	5,94		
13	5,53	5,54	0,29	43	5,74	5,84	0,28
14	5,19			44	6,22		
15	5,91			45	5,57		
16	5,56	5,54	0,31	46	6,11	6,16	0,26
17	5,15			47	5,87		
18	5,91			48	6,49		
19	5,61	5,74	0,12	49	5,89	5,62	0,21
20	5,89			50	5,57		
21	5,71			51	5,39		
22	5,55	5,57	0,18	52	6,49	6,52	0,16
23	5,79			53	6,35		
24	5,36			54	6,73		
25	5,44	5,54	0,08	55	6,31	6,44	0,11
26	5,54			56	6,43		
27	5,64			57	6,57		
28	5,24	5,55	0,24	58	6,28	6,27	0,05
29	5,82			59	6,21		
30	5,59			60	6,33		

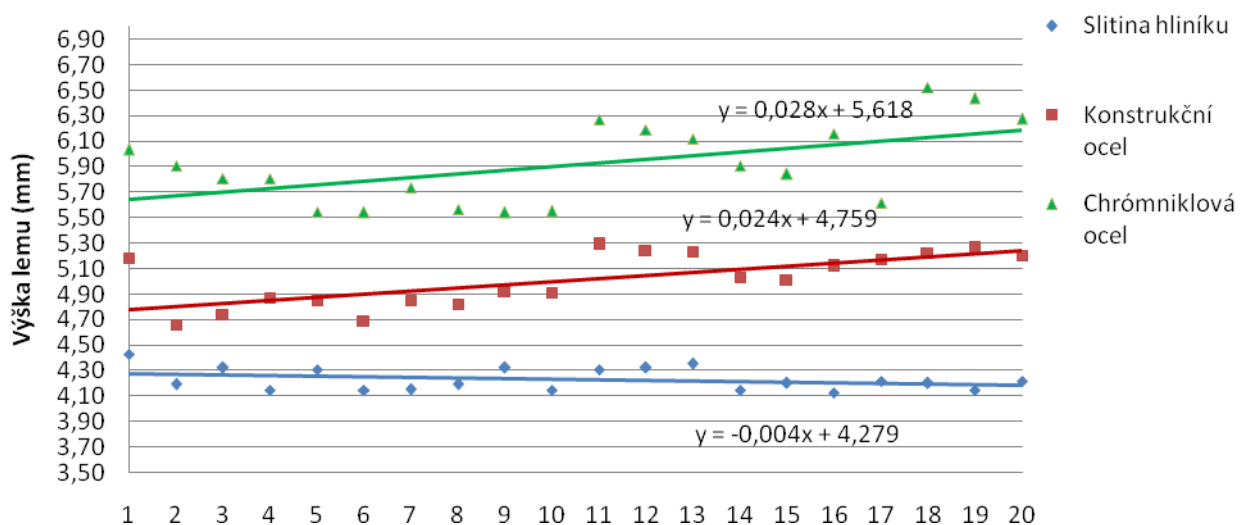
7.2.3 Vyhodnocení

Vyhodnocení hodnot zaznamenaných v tabulkách bylo provedeno do dvou grafů. První graf se týká vyhodnocení kontroly průměrů (Obr. 29).



Obr. 29. Graf porovnání vnitřních průměrů zkušebních materiálů

Graf zobrazuje průměrné hodnoty vnitřních průměrů z tabulek. Průměry jsou znázorněny jako body jedna až dvacet. Každý materiál má svoji specifickou barvu. Ideální průměr v tomto případě zobrazuje tabulkovou hodnotu 6,8 mm (průměr pro řezání závitu M8). Pro lepší porovnání výsledků jsou body proloženy lineární spojnicí. Pro úplnost je každá spojnice trendu opatřena regresní rovnicí. U tohoto grafu můžeme sledovat rostoucí tendenci u všech zkoušených materiálů.



Obr. 30. Graf porovnání výšek lemů zkušebních materiálů

Druhý graf se zabývá porovnáním výšek lemů (Obr. 30). Do grafu jsou zaneseny průměrné hodnoty výšek lemů z tabulek. Při vyhodnocení byl postup stejný jako v minulém případě. V tomto grafu má křivka nerezové a konstrukční oceli rostoucí tendenci. Ovšem křivka hliníkového zkušebního vzorku se postupně svažuje a má klesající trend.

ZÁVĚR

Cílem práce bylo prakticky vyzkoušet technologii termálního vrtání a porovnat její vhodnost pro tři vybrané materiály. V teoretické části jsem se zabýval nejprve teorií tváření obecně a poté konkrétně tvářením za tepla a za studena. Poslední kapitolu teoretické části jsem věnoval teorii výroby otvorů, kde jsem popsal jak klasické vrtání, tak i jiné moderní speciální technologie. Tato teorie byla přípravou na samotnou praktickou část. V té jsem se věnoval popisu experimentu se všemi náležitostmi, včetně vyhodnocení výsledků.

Samotný průběh experimentu byl provázen několika negativními jevy. Prvním z nich byla nedostatečná tuhost sloupové vrtačky. Docházelo k chvění a při vrtání do tvrdšího materiálu dokonce k velmi malému vychylování vrtáku. Pro náš experiment byl sice tento stroj dostačující, pro praktické využití v sériové výrobě by byl vhodnější specializovaný stroj, který je na trhu v dnešní době k dispozici. Další jev, který stojí za zmínění je absence kleštinového upínače, jehož funkce je popsána na straně (Str. 44). Bez jeho ochlazovací schopnosti docházelo u materiálů s vyšší teplotou tavení (konstrukční ocel, chromniklová ocel) k nepřiměřenému přechodu tepla na celý stroj. To by se také jistě negativně projevilo při hromadné a velkosériové výrobě.

Jak bylo již popsáno v praktické části, byly naměřené hodnoty zaznamenány do tabulek a poté vyhodnoceny do grafů. První graf zobrazoval rozměry vnitřních průměrů vzhledem k ideálnímu průměru. Ideální průměr byl dán rozměrem 6,8 mm, což průměr pro výrobu závitů M8. Při této zkoušce nejlépe dopadla chromniklová ocel 17 346. Nejhůře dopadla slitina hliníku, jejíž průměr byl vysoko nad touto hodnotou. Díky lineární regresi, kterou jsou body proloženy, můžeme sledovat další jev. Vrtání proběhlo v těsném sledu za sebou, takže můžeme říci, že s rostoucí teplotou materiálu došlo k postupnému zvětšování průměrů. Všechny křivky stoupají pod stejným úhlem, takže žádný ze zkoušených materiálů nedopadl hůře ani lépe. V praxi by proto mělo být zajištěno chlazení, aby tento jev negativně neovlivnil přesnost výroby.

Druhý graf se zabýval porovnáním výšky lemu. Největší lem měla chromniklová ocel 17346 a naopak nejmenší slitina hliníku. Mezi chromniklovou a konstrukční ocelí je přibližně milimetrový rozdíl a mezi konstrukční ocelí a slitinou hliníku je pak rozdíl přibližně půlmilimetrový. Na regresních křivkách zde můžeme u oceli 17346 a u oceli 11373 sledovat s postupem času stejný jev jako v případě vnitřních průměrů. S postupem času a ros-

toucí teplotou se výška lemu zvětšuje. Zajímavé je, že u slitiny hliníku je tato tendence opačná, což je nepříznivé. V praxi se snažíme dosáhnout co největšího lemu tak, aby závit, který je do otvoru vyřezán, dokázal udržet strojní součásti jako například šrouby. Lem ale nesmí být natolik velký, aby došlo na úkor jeho délky k nepříznivému ztenčení stěny.

Při konečném zhodnocení dopadla nejlépe chromniklová ocel 17346 a nejhůře slitina hliníku. Měkké a barevné kovy se touto technologií také opracovávají, ale zkoušená slitina hliníku není příliš vhodná.

Celkově hodnotím tuto metodu výroby otvorů velmi kladně, mezi její výhody jistě patří: rychlost, nízké výrobní náklady, nenáročnost. Využívá se ve velkém míře v automobilovém a topenářském průmyslu. Technologie se také používá v situacích, kdy je potřeba vyrobit otvor se závitovým spojením a na součásti není dostatek místa pro nasazení matky. Pro spojení se pak použije samořezných šroubů. Technologie termálního vrtání je hojně používaná výrobní metoda a v průmyslové výrobě má své nezastupitelné místo. V dohledné době se zatím neuvažuje o technologii, která by ji měla nahradit.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Monografie

- [1] HLUCHÝ, M.; KOLOUCH, J.; PAŇÁK, R. *Strojírenská technologie 2: Polotovary a jejich technologičnost 1. díl.* 2. uprav. vyd. Praha: Scientia, 2001. 317 s. ISBN 80-7183-244-8.
- [2] JURKO, J.; LUKOVICS, I. *VŘTANIE: technologická metoda výroby dier.* 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, Fakulta technologická, 2007. 191 s. ISBN 978-80-7318-488-9.
- [3] ROHAN, R., et al. *Hutní materiál: Příručka pro dodavatele a odběratele válcované oceli, ocelových trubek, tažené oceli a ocelových tenkostěnných profilů.* 1. vyd. Praha: SNTL, 1977. 496 s.
- [4] ČERNOCH, S. *Strojně technická příručka.* 13. uprav. vyd. Praha: SNTL, 1977. 2568 s.
- [5] NOVOTNÝ, J., et al. *Technologie I: Slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy.* Dotisk 2. vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. 227 s. ISBN 80-01-02351-6.
- [6] BOTHE, O. *Strojírenská technologie II: pro strojírenské učební obory.* 6. uprav. vyd. Praha: SABOTÁLES, 1999. 163 s. ISBN 978-80-85920-58-1.
- [7] ČADA, R. *Technologie tváření a slévání: Objemové tváření zatepla nekonveční způsoby tváření, plasty.* 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická Univerzita Ostrava, 2010. 80 s. ISBN 978-80-248-2273-0.
- [8] ŘASA, J.; POKORNÝ, P.; GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3: Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění 1. díl.* 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. 223 s. ISBN 80-7183-336-3.
- [9] KOČMAN, K. *Technologické procesy obrábění.* 1. vyd. Brno: Nakladatelství CERM, 2011. 332 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [10] ŘASA, J.; GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3: Metody, stroje a nástroje pro obrábění 1. díl.* 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. 256 s. ISBN 80-7183-337-1.

Internetové zdroje:

- [11] Termální vrtání: progresivní metoda tváření otvorů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2002-12-11, 12, [cit. 2011-04-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/termalni-vrtani-progresivni-metoda-tvareni-otvoru>>.
- [12] What is Formdrill [online]. [cit. 2011-01-16]. Dostupné z WWW: <http://www.formdrill.eu/?gclid=CJ2Gkevs_aYCFZIn3wodjEhubQ>.
- [13] Thermal Drilling [online]. 2009 [cit. 2011-01-16]. Dostupné z WWW: <http://autospeed.com/cms/title_Thermal-Drilling/A_110952/article.html>.
- [14] Tepelné tváření kovů [online]. [cit. 2011-04-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.thermdrill.cz/>>.
- [15] KALIVODA, M. Termální závitování v profilech rámců kabin traktorů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008-11-19, 11, [cit. 2011-04-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/termalni-zavitovani-v-profilech-ramu-kabin-traktoru>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

D	Průměr řezného nástroje [mm]
dh	Elementární deformace ve směru nástroje [m]
dt	Doba tváření [s]
d _v	Vnitřní průměr vrtané díry [mm]
F	Jmenovitá síla [N]
F _c	Řezná síla [N]
F _f	Posuvová síla [N]
F _p	Pasivní síla [N]
φ	Úhel posuvového pohybu [°]
h	Výška tvářeného polotovaru [m]
h _L	Výška lemu [mm]
n	Počet měření
n _c	Otáčky vřetena řezného nástroje [min ⁻¹]
η	Úhel řezného pohybu [°]
P _c	Řezný výkon [W]
P _{ef}	Pracovní boční rovina
R _m	Mez pevnosti v tahu [MPa]
S	Směrodatná odchylka
v	Rychlost tvářecího nástroje [m.s ⁻¹]
v _c	Řezná rychlost [m.min ⁻¹]
v _d	Přetvárná rychlost [s ⁻¹]
v _f	Posuvová rychlost [mm.min ⁻¹]
v _e	Rychlost řezného pohybu [m.min ⁻¹]
\bar{x}	Aritmetický průměr [mm]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Kovadla pro volné kování [1]</i>	19
<i>Obr. 2. Kování v jednodutinové zápustce na bucharu [5]</i>	20
<i>Obr. 3. Kování v postupové zápustce [5]</i>	21
<i>Obr. 4. Válcování podélné [5]</i>	22
<i>Obr. 5. Válcování příčné [5]</i>	23
<i>Obr. 6. Protlačování za tepla [5]</i>	23
<i>Obr. 7. Stříhání stříhadlem a děrovadlem [5]</i>	25
<i>Obr. 8. Volné ohýbání [5]</i>	27
<i>Obr. 9. Ohýbání do tvaru V [1]</i>	28
<i>Obr. 10. Ohýbání do tvaru U [1]</i>	28
<i>Obr. 11. Tažení bez přidržovače a s přidržovačem [1]</i>	29
<i>Obr. 12. Žlábkování [5]</i>	30
<i>Obr. 13. Tažení gumou [5]</i>	31
<i>Obr. 14. Kinematika vrtacího procesu při vrtání šroubovým vrtákem [9]</i>	33
<i>Obr. 15. Řezné síly při vrtání [9]</i>	34
<i>Obr. 16. Schéma konstrukce laseru [10]</i>	36
<i>Obr. 17. Kompletní operace termálního vrtání včetně výroby závitu [14]</i>	42
<i>Obr. 18. Nástroj Thermdrill „FORM“ [14]</i>	43
<i>Obr. 19. Nástroj Thermdrill „CUT“ [14]</i>	43
<i>Obr. 20. Struktura tvářeného závitu [15]</i>	43
<i>Obr. 21. Obrázek tvářecího vrtáku</i>	45
<i>Obr. 22. Sloupová vrtačka E 1720 F/400</i>	46
<i>Obr. 23. Zkušební materiál z hliníku</i>	46
<i>Obr. 24. Zkušební materiál z konstrukční oceli 11 373</i>	47
<i>Obr. 25. Zkušební materiál z chromniklové oceli 17 346</i>	47
<i>Obr. 26. Schéma měřených rozměrů na vyvrtaném otvoru</i>	48
<i>Obr. 27. Příklad vytvořených děr v oceli 11 373</i>	48
<i>Obr. 28. Příklad vytvořeného lemu v konstrukční oceli 11 373</i>	51
<i>Obr. 29. Graf porovnání vnitřních průměrů zkušebních materiálů</i>	53
<i>Obr. 30. Graf porovnání výšek lemů zkušebních materiálů</i>	53

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Tabulka parametrů vrtačky</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 2. Tabulka naměřených průměrů zkušebního vzorku ze slitiny hliníku</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 3. Tabulka naměřených průměrů zkušebního vzorku z oceli 11 373</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 4. Tabulka naměřených průměrů zkušebního vzorku z oceli 17 346</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 5. Tabulka naměřených výšek lemu zkušebního vzorku ze slitiny hliníku.....</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 6. Tabulka naměřených výšek lemu zkušebního vzorku z oceli 11 373.....</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 7. Tabulka naměřených výšek lemu zkušebního vzorku z oceli 17 346.....</i>	<i>52</i>