

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Strojírenská technologie - technologie obrábění

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Metody zhotovování děr do hliníkových profilů se vznikem minimálních
otřepů

Autor: **Tomáš BAKŠA**

Vedoucí práce: **Ing. Josef SKLENIČKA**

Akademický rok 2011/2012

Zadání bakalářské práce

Prohlášení o autorství

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

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Josefu Skleničkovi, za odborné vedení a cenné rady při zpracování bakalářské práce. Děkuji členům katedry technologie obrábění za jejich názory a připomínky.

Děkuji své rodině a blízkým za jejich podporu během studia.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení BAKŠA	Jméno Tomáš	
STUDIJNÍ OBOR	2301R016 „Strojírenská technologie-technologie obrábění“		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Sklenička	Jméno Josef	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Metody zhotovování děr do hliníkových profilů se vznikem minimálních otřepů		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2012
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	46	TEXTOVÁ ČÁST	35	GRAFICKÁ ČÁST	11
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Bakalářská práce je rešerše, která se zabývá možnostmi tvorby děr do hliníkových profilů, tvořením otřepů při vrtání a frézování děr, faktory ovlivňujícími vznik otřepů a možnostmi minimalizace vzniku otřepů během zhotovování děr.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p>	<p>otřepy, vrtání, frézování, hliník, minimalizace otřepů, geometrie nástroje</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname BAKŠA		Name Tomáš	
FIELD OF STUDY	2301R016 „Manufacturing Processes - Technology of Metal Cutting“			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Sklenička		Name Josef	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Methods of making holes in the aluminum profiles with minimum burr formation			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Cutting technology	SUBMITTED IN	2012
----------------	------------------------	-------------------	--------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	46	TEXT PART	35	GRAPHICAL PART	11
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis is research, which deals with possibilities of making holes in the aluminum profiles, burr formation in drilling and milling holes, factors influencing burr formation and minimizing of burr formation during the making holes.
KEY WORDS	burr, drilling, milling, aluminum, burr minimization, tool geometry

Obsah

SEZNAM ZNAČEK VELIČIN, SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
1 ÚVOD.....	10
2 ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU.....	11
2.1 STRATEGIE TVORBY DĚR DO HLINÍKOVÝCH PROFILŮ	11
2.1.1 Vrtání.....	12
2.1.2 Frézování.....	17
3 OTŘEPY - JEJICH VZNIK A MINIMALIZACE PŘI VRTÁNÍ	19
3.1 CHARAKTERISTIKA OTŘEPŮ, NEGATIVNÍ VLIV	19
3.1.1 Odstraňování otřepů	19
3.2 POROVNÁNÍ VRTÁKU HSS S NAVRŽENÝM SHD VRTÁKEM, POZOROVÁNÍ VZNIKU OTŘEPŮ A KLASIFIKACE OTŘEPŮ	20
3.2.1 Charakteristika	20
3.2.2 Pozorování vzniku otřepů při experimentálním vrtání	21
3.2.3 Pozorování vzniku otřepů při vrtání do čistého Al	22
3.2.4 Pozorování vzniku otřepů u Al6061.....	22
3.3 MECHANISMUS A KLASIFIKACE TVOŘENÍ OTŘEPŮ	23
3.3.1 Klasifikace otřepů vzniklých při vrtání	23
3.3.2 Analýza mechanismu vzniku otřepů.....	24
3.4 ÚPRAVA GEOMETRIE VRTÁKU	25
3.4.1 Zkosený vrták	25
3.4.2 Zaoblený vrták	26
3.4.3 Stupňovitý vrták.....	27
4 TVOŘENÍ OTŘEPŮ PŘI FRÉZOVÁNÍ DĚR DO HLINÍKU A JEHO SLITIN ...	31
4.1 VLIV NA TVOŘENÍ OTŘEPŮ A KLOBOUČKU PŘI FRÉZOVÁNÍ DĚR	31
4.2 TVOŘENÍ KLOBOUČKU PŘI FRÉZOVÁNÍ DĚR HLINÍKU 2024 T351.....	32
4.2.1 Vliv posuvu na tvoření kloboučku u hliníku 2024 T351	33
4.2.2 Vliv průměru díry a nástroje na tvoření kloboučku u hliníku 2024 T351	33
4.3 TVOŘENÍ OTŘEPŮ A KLOBOUČKU PŘI FRÉZOVÁNÍ DĚR DO POTAŽENÉHO HLINÍKU 2024 T351 S NÁTĚREM	34
4.3.1 Geometrie nástroje a síly při frézování děr do potaženého hliníku 2024 T351.....	35
4.3.2 Minimalizace kloboučku a otřepů při frézování děr do hliníku 2024	36
4.4 SHRNU TÍ KAPITOLY	41

5	SPECIÁLNÍ NÁSTROJE NA TVOŘENÍ DĚR BEZ OTŘEPŮ	43
5.1	SPECIÁLNÍ „BURRFREE“ VRTÁK.....	43
5.2	NÁSTROJ VEX-S A COMBI.....	44
6	ZÁVĚR	45
7	LITERATURA	46

Seznam značek veličin, symbolů a zkratk

Značka veličiny, symbol	Jednotka	Popis
a_p	[mm]	hloubka řezu
d	[mm]	průměr nástroje
D	[mm]	průměr díry
D_1	[mm]	průměr vrtáku
D_2	[mm]	menší průměr stupňovitého vrtáku
D_B	[mm]	průměr díry
D_w	[mm]	průměr frézy
f	[mm·ot ⁻¹]	posuv na otáčku
f_a	[mm]	axiální posuv na zub
F_n	[N]	normálová síla
F_{res}	[N]	výsledná síla
F_t	[N]	tangenciální síla
F_x	[N]	složka řezné síly
F_y	[N]	složka řezné síly
F_z	[N]	složka řezné síly
G	[-]	poměr mezi obvodovým a čelním řezem
n_o	[ot·min ⁻¹]	orbitální otáčky
n_s	[ot·min ⁻¹]	otáčky vřetena
p	[MPa]	tlak (vnitřní chlazení)
R	[mm]	poloměr zaoblení
Rz	[μm]	drsnost povrchu
V_1	[mm ³]	objem vyfrézovaného materiálu
V_2	[mm ³]	objem vyvrtaného materiálu
v_c	[m·min ⁻¹]	řezná rychlost
v_f	[mm·min ⁻¹]	rychlost posuvu
$v_{f,a}$	[mm·min ⁻¹]	rychlost axiálního posuvu
ϵ_1	[°]	vrcholový úhel
μ	[-]	koeficient tření

Zkratka	Popis
A2024	hliníková slitina (AlCu4Mg1)
Al	hliník
Al6061	hliníková slitina (AlMg1SiCu)
AlMgSi1	slitina hliníku (dural)
CNC	počítačem číslicově řízený systém („Computer Numerical Control“)
Co	kobalt
CVD	metoda chemické depozice („Chemical Vapour Deposition“)
D	typ provedení břitové destičky („Difficult“)
DLC	diamantu podobný uhlík („Diamond Like Carbon“)
HSS	rychlořezná ocel („high speed steel“)
IT	toleranční stupeň
K10F	typ jemnozrnného karbidu
MoS ₂	molybdenit
MQL	minimální množství maziva („Minimum Quantity Lubrication“)
P25	označení skupiny karbidů
Si	křemík
SM20C	ocel 12024 (dle ČSN)
SM45C	ocel 12050 (dle ČSN)
T	typ provedení břitové destičky („Tough“)
TiAlN	nitrid titanu-hliníku
TiB ₂	borid titanu
TiN	nitrid titanu
VBD	vyměnitelné břitové destičky
WC	karbid wolframu

1 Úvod

Obrábění materiálů je nepostradatelnou součástí strojírenského oboru. Díky technologickému postupu jsou kladeny větší požadavky na oblast obrábění a na zvýšení její produktivity. Jednou z operací obrábění je tvoření děr a otvorů do strojírenských materiálů, jako je například hliník a jeho slitiny. Hliníkové materiály jsou díky jeho mechanickým vlastnostem a poměrně nízké hmotnosti (v porovnání s ocelí) v posledních letech často využívány například v automobilovém nebo leteckém průmyslu.

Během obrábění vznikají na obrobku otřepy, které značně snižují kvalitu výrobku a je často nutné otřepy odstranit. Přidáním další dokončovací operace je možno ve většině případů tyto otřepy odstranit, ale zároveň se značně zvýší náklady na výrobu a prodlouží se celkový čas obrábění. Z toho důvodu je snaha minimalizovat vznik otřepů již v průběhu obrábění a eliminovat tak nákladné dokončovací operace. Tím se značně zvýší produktivita.

Tato bakalářská práce je rešerší, která se zabývá metodami tvoření děr do hliníkových profilů, a možnostmi minimalizovat vznik otřepů během tvoření děr. Práce je zaměřená na technologii vrtání a frézování, jako na nejproduktivnější metody tvorby děr do hliníkových materiálů. Popisuje princip a možnosti tvoření děr a v dalších kapitolách se zabývá problematikou otřepů, kde je popsán způsob vzniku otřepů, jejich charakteristika a klasifikace. Dále jsou určeny důležité faktory, které ovlivňují jejich vznik a velikost. Bakalářská práce zkoumá různé úpravy geometrie vrtáku a frézy a různé řezné podmínky, za účelem redukovat tvoření otřepů během vrtání a frézování děr do hliníku. Dále popisuje speciální vrtací nástroje, které jsou schopny odstranit vzniklé otřepy během procesu vrtání.

Stávající téma jsem si vybral z důvodu, že se zabývá důležitou a aktuální problematikou v oblasti technologie obrábění, a má velký vliv na kvalitu a produktivitu. Cílem této bakalářské práce je zhodnocení současných způsobů tvorby děr do hliníkových profilů, uvedení do problematiky otřepů a vyhledání postupů pro minimalizaci tvoření otřepů. Během vypracovávání práce jsem vycházel převážně z výzkumů a experimentů popsaných ve vědeckých článcích uvedených v seznamu použité literatury.

2 Rozbor současného stavu

V dnešní strojírenské praxi je tvoření děr do strojních součástí, výrobků a polotovarů různých materiálů naprosto běžná záležitost. Existuje mnoho technologií pro tvorbu děr. O tom, jaká technologie je vhodnější pro tvorbu díry do polotovaru rozhoduje mnoho faktorů, jako například materiál polotovaru, velikost díry, hloubka díry, potřebná přesnost díry, atd. Díry můžeme tvořit konvenčními nebo nekonvenčními metodami.

Konvenční metody

Při konvenční metodě je díra vytvořena pomocí nástroje, který odebraný materiál mění na třísku (popř. výstřížek). Mezi základní konvenční metody tvoření děr patří vrtání, frézování a stříhání (děrování).

Vrtání:

- Nejčastější způsob tvorby děr (vysoká produktivita)
- Nástrojem je vrták
- Lze tvořit díry skrz i do určité hloubky materiálu
- Průměry děr jsou relativně malé

Frézování:

- Tvorba děr a otvorů i větších průměrů, než při vrtání
- Nástrojem je fréza
- Nelze tvořit díry do takové hloubky jako u vrtání
- Menší produktivita než u vrtání

Stříhání (děrování):

- Tvářecí operace, při které vzniká výstřížek
- Strojem je stříhadlo (střížník, střížnice)
- Pouze pro velmi omezené tloušťky materiálů (např. plechy)

Nekonvenční metody:

Při nekonvenční metodě je díra vytvořena fyzikálním pochodem a zpravidla nevzniká tříška. Patří sem například řezání vodním paprskem, laserem, atd.

Nekonvenční metody nejsou pro tvorbu děr příliš produktivní (omezená hloubka, cena, velká náročnost) proto se jimi nebudu v této práci zabývat.

2.1 Strategie tvorby děr do hliníkových profilů [9]

Obrábění hliníku a jeho slitin je v dnešní době rozšiřujícím se trendem. To je zřejmé i v počtu aplikací hliníkových součástí, které jsou vyráběny z hliníkových odlitků třískovým obráběním - jde například o bloky motorů, válce, hlavy motorů, kola a další. S tím úzce souvisí i snaha výrobců o ekonomické a ekologické obrábění těchto součástí.

Hliník a jeho slitiny však při obrábění, zejména za sucha, patří mezi velmi problémové materiály i přes poměrně nízké mechanické vlastnosti. Je to způsobeno jejich vysokou tepelnou vodivostí, výrazným sklonem k adhezi na břit většiny řezných materiálů a nízkou teplotou tavení - maximálně do cca 650 °C. Vlivem vysoké tepelné vodivosti se při obrábění odvádí značné množství tepla z místa řezu do obrobku a vysoká tepelná roztažnost hliníku má za následek tepelné deformace obrobku. Vzhledem k nízké teplotě tavení vznikají problémy s utvářením třísky, jejím odvodem a nalepováním na břit, eventuálně čelo destičky. Problém nale-

Katedra Technologie Obrábění

Tomáš Bakša

pování hliníku při obrábění standardními řeznými nástroji ze slinutého karbidu je všeobecně známý. Tendence k nalepování stoupá s rostoucí zrnitostí karbidu wolframu (WC), obsahu kobaltu (Co) a drsností řezné hrany a povrchu řezného nástroje. Zvýšení kteréhokoli uvedenému parametru se projeví ve zvýšeném nalepování hliníku na řezný nástroj.

U nástrojů s povrchovou úpravou diamantovým mikroleštěním se v důsledku nižší drsnosti adheze snižuje. Další nalepování hliníku omezuje aplikace ochranných vrstev s nízkým koeficientem tření $\mu = 0,1 \div 0,2$ (např. TiB_2 , MoS_2 , DLC vrstvy). Obdobný antiadhezní účinek mají i diamantové povlaky nebo polykrystalický diamant. Aplikace těchto materiálů je nejvhodnější pro obrábění hliníkových slitin s vyšším obsahem křemíku (Si (12 %) z důvodu nízké afinity a adheze uhlíku a hliníku a vysoké otěruvzdornosti diamantu.

2.1.1 Vrtání [8], [7], [6]

Vrtání patří mezi nejproduktivnější technologie pro tvorbu děr nejen u běžných ocelových produktů, ale i u hliníku a jeho slitin. Všeobecně známé problémy při obrábění hliníku (viz. předchozí odstavec) platí i pro vrtání do hliníku. Proto se používané nástroje (vrtáky) značně liší od nástrojů používaných pro vrtání do jiných materiálů (například ocelí). Nástroje se liší hlavně ve výběru řezného materiálu, geometrii nástroje a řezných parametrech.

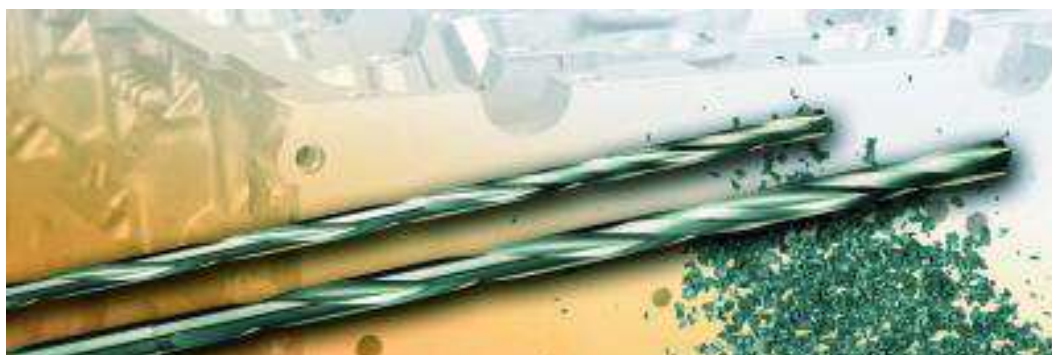
Vrtáky mohou být buď celistvé (z jednoho materiálu), nebo s vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD). Mezi další druhy vrtáků patří například vrtáky dělové, hlavňové a vrtací hlavy.

Protože výrobci v dnešní době kladou vysoké požadavky na zvyšování produktivity tvorby děr u dílů z hliníku a hliníkových slitin, rozhodli se některé firmy věnovat tomuto trendu mimořádnou pozornost. Zvyšování produktivity vrtání spočívá především ve vývoji nových vrtáků a výstružníků.

Vrtání hlubokých děr do hliníku

Firma Gühring vyvinula v poslední době monolitní spirálovitý vrták, který slouží pro vrtání hlubokých otvorů. Jedná se o výkonný vrták řady RT 100T ALU (Obr. 2.1-1), který byl oproti řadě RT100T (pro oceli) optimalizován a specializován na hliník.

U tohoto nového typu byl zvolen vhodný druh slinutého karbidu a byla provedena optimalizace geometrie. Optimalizovaný výbrus špičky byl zaměřen na to, aby třísky měly co nejlepší tvar z hlediska jejich pohybu ve šroubovitě drážce [8].



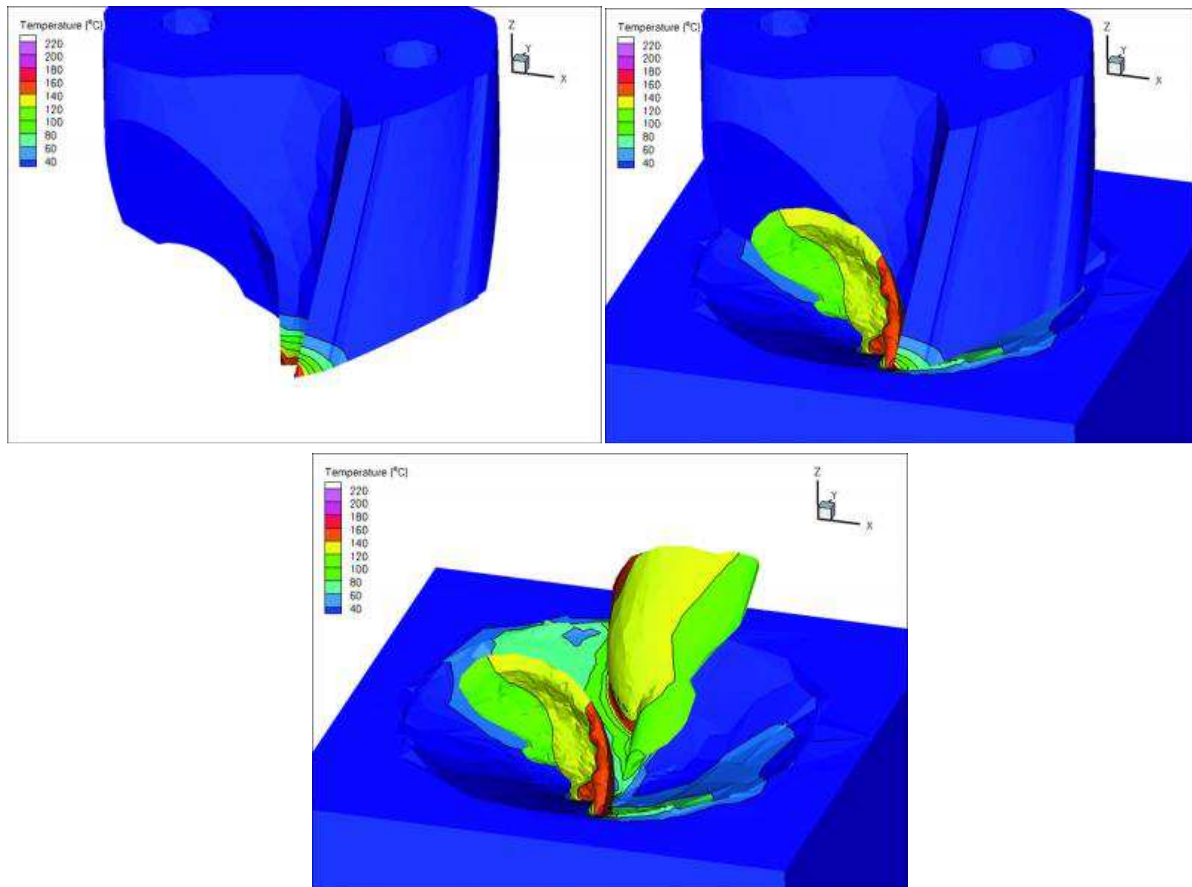
Obr. 2.1-1: Vrták RT 100T ALU pro hluboké vrtání hliníku [8]

Důležitým faktorem při vrtání do hliníku je geometrie drážky vrtáku. Povrch drážky je upraven tak, aby zajišťoval nízký koeficient tření při odvodu třísky z místa řezu. Pro zajištění krátké dráhy při odvodu třísky, je nastaven úhel stoupaní šroubovice na 15° . Kombinace vy-

Katedra Technologie Obrábění

Tomáš Bakša

nikající drsnosti povrchu drážky a úhel stoupání šroubovice 15° zaručuje vynikající odvod třísky během vrtání hlubokých děr do hliníku a jeho slitin.



Obr. 2.1-2: Optimalizace geometrie vrtáku [8]

Příklad použití vrtáku - vrtání hlavy válců (Obr. 2.1-5):

Typickým příkladem použití je automobilový průmysl, konkrétně ve výrobě motorů. Parametry obrábění jsou uvedeny v Tab. 2.1-1.



Obr. 2.1-3: Provedení drážek a vnitřní přívod chladicí kapaliny [8]

Parametry vrtání hlavních olejových kanálů	
Průměr [mm]	6,95
Hloubka a_p [mm]	2x 210
Řezná rychlost v_c [$m \cdot min^{-1}$]	110
Rychlost posuvu v_f [$mm \cdot min^{-1}$]	1500
Vnitřní chlazení p [MPa]	4
Trvanlivost bříty [m]	500

Tab. 2.1-1: Parametry vrtání [8]

Vystružování děr v hliníku:

Pro vystružování vyvrtaných otvorů v hliníku byly firmou Gühring vyvinuty výstružníky řady HR 500 S pro vystružování neprůchozích děr a HR 500 D (Obr. 2.1-4) pro vystružování průchozích děr. Tyto nástroje vychází z řady výstružníků pro ocel, které byly *optimalizovány podle nejnovějších trendů ve strojírenském oboru jako komplexní systém: řezný materiál - aplikace tenké vrstvy - geometrie - řezné parametry* [8].

Jako řezný materiál byl zvolen velmi jemný slinutý karbid, na jehož povrch byla aplikována vrstva speciálního povlaku. Tato vrstva zabraňuje nalepování hliníku na břit nástroje, což by mohlo způsobit zvětšení průměru díry. Pro optimální tvar třísky v závislosti na řezných podmínkách byla upravena geometrie výstružníku.



Obr. 2.1-4: Nástroj HR 500 D pro vystružování průchozích děr (paralelní drážky na stopce jsou přihlášeny k patentování) [8]



Obr. 2.1-5: Příklad obrobku: vrtání olejových kanálů v hlavě válců [8]

Příklad použití výstružníku na neprůchozí díry:

V Tab. 2.1-2 je uveden příklad řezných parametrů použitých při obrábění AlMgSi1 s použitím výstružníku HR500S 7H7.

Parametry vystružování AlMgSi1	
Otáčky [min^{-1}]	18000
Hloubka a_p [mm]	30
Řezná rychlost v_c [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	400
Posuvu f [$\text{mm}\cdot\text{ot}^{-1}$]; v_f [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]	2,2 ; 40000
Vnitřní chlazení p [MPa]	4
Trvanlivost břitu [m]	300

Tab. 2.1-2: Příklad parametrů pro vystružování [8]

Dosažená kvalita povrchu R_z byla v rozmezí 1,1 až 1,8 μm , stálost průměrů během doby řezu činila 2 μm [8].



Obr. 2.1-6: HPC výstružníky HR 500 [8]

Další vrtáky:**Vrtání do hliníku za sucha:**

Firma Rübiger vyvinula vrták, který je schopen vrtat za sucha do měkkých materiálů, jako je například hliník a jeho slitiny. Jedná se o vrták ze slinutého karbidu typu Speedmax (Obr. 2.1-7) s optimalizovanými vlastnostmi slinutého karbidu, typu povlaku a geometrie [7]. Použitý jemnozrnný karbid (typu K10F) má optimální odolnost vůči opotřebení a vysokou stabilitu břitu. Pro snížení tření u měkkých materiálů, jako je hliník, je vrták potažen novým DLC povlakem, který snižuje adhezi a tření. Dalším hlavním faktorem, který umožňuje spolehlivé a bezpečné vrtání za sucha, je patentovaná geometrie vrtáku. Geometrie zároveň zaručuje optimální trvanlivost. Vrták je vhodný pro vrtání hliníku a jeho slitin za sucha, ale je možné použít i malé množství maziva nebo emulze.



Obr. 2.1-7: Monolitní vrták pro vrtání hliníku za sucha [7]

Vysoce výkonné monolitní vrtáky CDX-Al

Jako další příklad vrtáku do hliníku je uveden vrták CDX-Al od společnosti Dormer. Tento vrták z mikrozrnného slinutého karbidu je vhodný pro vrtání všech druhů hliníku a vyznačuje se vysokým výkonem. Základem je broušený povrch vrtáku, na který je možné opatřit povlak Dialub pro zvýšení životnosti nástroje (např. při obrábění hliníkových slitin s vysokým obsahem Si). Na následujících obrázcích jsou zobrazeny dva vrtáky řady CDX-Al pro vrtání do hloubky 3x d (Obr. 2.1-9) a 5x d (Obr. 2.1-8).



Obr. 2.1-9: Vrták CDX-Al R587 pro vrtání otvorů do hloubky $3x d$ [6]



Obr. 2.1-8: Vrták CDX-Al R583 pro vrtání otvorů do hloubky $5x d$ [6]

Geometrie nástroje je upravena tak, aby vrták správně pracoval při vysokých řezných podmínkách. Patentovaná geometrie špičky nástroje značně snižuje přítláčnou sílu a tím výskyt otřepů na výstupní straně díry. Odvod třísky z místa řezu, při vysokých řezných podmínkách, je zajištěn speciálně vyvinutou geometrií drážky. *Profil drážky má speciální tvar, který stlačuje třísku a láme ji na menší kusy, jež lze snáze odvést z otvoru. Pomalá spirála a tvar drážky vrtáku pozitivně ovlivňují celý proces odvádění třísky [6].* Odvodu třísky dále pomáhá řezná kapalina, která je přivedena na špičku vrtáku vnitřním rozvodem v nástroji.

2.1.2 Frézování [1], [14], [13]

Frézování je ve strojírenství velmi často používaný způsob obrábění materiálů. Vzhledem k jeho vysoké produktivitě a velkému rozptylu využití, dochází v poslední době k vývoji nových nástrojů pro frézování. K jeho velkému rozptylu využití patří i tvorba děr a otvorů ve strojírenských materiálech, tedy i v hliníku a hliníkových slitinách.

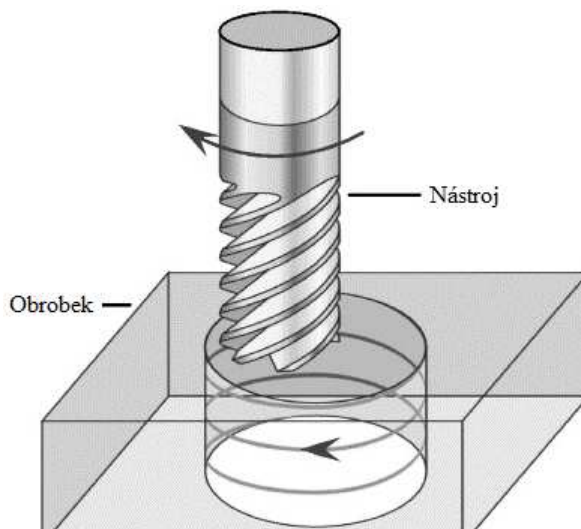
Nástroje (frézy) pro frézování hliníku se stejně jako vrtáky liší od nástrojů pro frézování jiných materiálů (např. ocelí) a jsou přizpůsobeny specifickým vlastnostem hliníku.

Na rozdíl od vrtáku při vrtání, koná fréza navíc ještě orbitální pohyb, který koná po určitém poloměru (průměru). Rotující nástroj se tedy pohybuje po kruhové dráze a současně koná pohyb v axiálním směru. Superpozicí těchto pohybů vzniká šroubovitý pohyb. Šroubovitý pohyb frézy při tvoření děr nabízí mnoho výhod. Kinematika frézování umožňuje různé pracovní postupy pro produkci různých geometrií děr s použitím jednoho nástroje. Válcové díry mohou být vrtány nezávisle na průměru nástroje a bez výměny nástroje. Díky tomuto je možné frézovat složité kuželové díry a provádět dokončovací operace za použití stejného válcového nástroje a nastavení. Další významnou výhodou frézování děr je proměnlivost průměru bez změny nástroje. Tato skutečnost nabízí možnost dynamické korekce průměru díry během obráběcího procesu. To může být použito například pro kompenzaci odchylky průměru, způsobené různými vlastnostmi materiálů v kompozitních strukturách nebo důsledkem opotřebení nástroje. Další výhodou frézování je dobrý odvod třísky a přístupnost pro řeznou kapalinu.

Charakteristickým znakem frézování děr jsou malé axiální síly a ostří, které není trvale v záběru. Lze říci, že při frézování děr probíhají dva obráběcí procesy zároveň, a to frézování a vrtání. Vrtací proces probíhá na čele nástroje, který postupně provrtává materiál do určité hloubky a vytváří „dno“ díry, dokud není materiál provrtán skrz. Frézovací proces probíhá na válcové části nástroje, který postupně frézuje válcovou stěnu díry až do požadované velikosti průměru díry. Schéma frézování díry je vidět na Obr. 2.1-10.

Na Obr. 2.1-12 jsou ukázány frézovací nástroje ze slinutého karbidu řady Hm Alu od firmy Silmax pro vysoce výkonné obrábění hliníku a jeho slitin. Řada zahrnuje nástroje se dvěma a třemi břity s nezaoblenou, zaoblenou a také kulovou hlavou. Geometrie těchto nástrojů, která je dána řeznými uhly a tvarem drážek, byla speciálně vyvinutá, aby zajišťovala vysoký výkon, nejlepší odvod třísky a odolnost proti opotřebení. Silmax pro tuto řadu zvolila nejnovější TiAlN povlak, který byl vyvinut.

Monolitní nástroje od Niagara Cutter (Obr. 2.1-11) jsou vyrobeny z velmi jemnozrného surového slinutého karbidu. Velikost zrna karbidu wolframu se pohybuje okolo 0,8 μm . Má vynikající kombinaci pevnosti a houževnatosti. Trvale vysoká kvalita nástrojů je zajištěna díky materiálu s jedinečnými vlastnostmi a vysokou čistotou. Niagara Cutter jsou speciálně navrženy pro obrábění hliníku, titanu, nerez oceli a slitiny exotických materiálů.



Obr. 2.1-10: Schéma frézování díry [15]



Obr. 2.1-11: Frézovací nástroje od firmy Niagara Cutter [13]



Obr. 2.1-12: Frézovací nástroje od firmy Slimax [14]

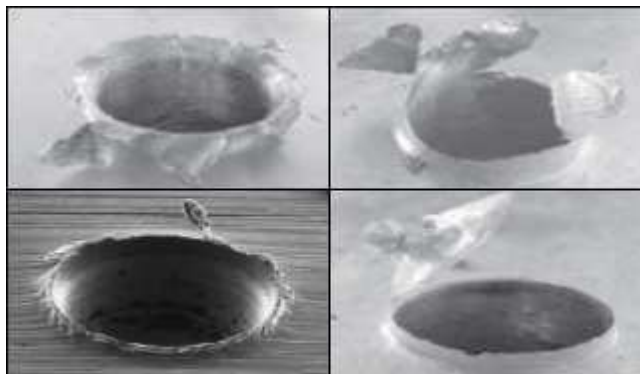
3 Otřepy - jejich vznik a minimalizace při vrtání

3.1 Charakteristika otřepů, negativní vliv [2]

Vznikající otřepy při vrtání hrají velmi důležitou roli v kvalitě výrobku, proto je důležité se na problematiku otřepů zaměřit a řešit ji již ve fázi výroby. Tato kapitola se zabývá vznikem otřepů, jejich charakteristikou, možnostmi odstranění vzniklých otřepů a minimalizací vzniku otřepů vlivem řezných podmínek a geometrie vrtáku.

Otřep je plasticky deformovaný materiál, vytvořený na hraně součásti během řezání nebo stříhání. Tvoření otřepů na výstupní hraně díry během vrtání má nežádoucí vliv na kvalitu výrobku, tudíž je vyžadována značná pozornost ve výzkumu výroby. Tyto otřepy jsou zdrojem chybných rozměrů, způsobující různé problémy ve funkčnosti výrobku. Důvodem může být například chybné spojení částí vlivem otřepů, což může způsobit vychýlení částí. Otřepy představují problém ve spolehlivosti a snižují přesnost provedení dílů a tím ovlivňují kvalitu.

Také mohou způsobovat zkratky v elektrických součástech, snížení únavové životnosti komponentů a mohou způsobovat iniciaci trhlin. Otřepy mohou způsobit ucpaní v kritických místech a turbulence při proudění kapalin nebo plynů potrubím. V případě, že se součásti pohybují relativně blízko sebe, může vlivem otřepů dojít k tření a tedy k opotřebení součástí. V takovém přípa-

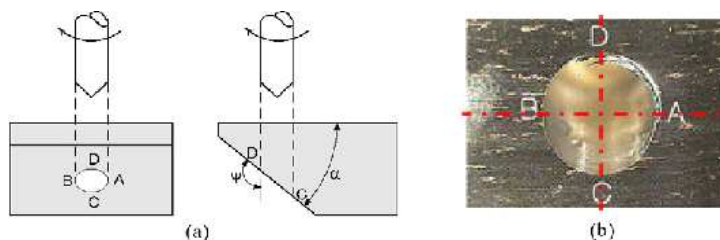


Obr. 3.1-1: Příklady otřepů [5], [17]

dě dochází nejen ke snížení kvality hran, ale i ke zvýšení hlučnosti a vibrací. Příklady otřepů jsou ukázány na Obr. 3.1-1.

3.1.1 Odstraňování otřepů [2]

Odstranění vzniklých otřepů je možné provést po vyrobení díry přidáním další operace. Proces odjehlení se provádí na odjehlovacích strojích s použitím nástrojů na odjehlení. Příklady těchto nástrojů můžete vidět na Obr. 3.1-3. Nevýhodou procesů na odstraňování otřepů je jejich ekonomická náročnost. Přidáním další operace do procesu výroby nejen značně prodloužíme výrobu jedné součásti, ale také zvýšíme náklady spojené s nákupem strojů, nástrojů, zajištěním potřebných prostorů atd. Odhaduje se, že odstraňování otřepů a úpravy hran přesných dílů stojí přibližně stejně jako 30% ceny hotového dílu. Další nevýhodou je obtížnost automatizace těchto dokončovacích operací. Pokud se otřepy vytvoří uvnitř součásti, jako je tomu například u protínajících se děr, je velmi složité je odstranit a není možné použít žádný z běžných nástrojů. Tyto otřepy mají po obvodu různý potenciál. Na Obr. 3.1-2 je vidět schéma vrtacího procesu (a) a polohu otřepů na výstupu nakloněného povrchu (b).



Obr. 3.1-2: Schéma vrtání a vznik otřepů na šikmém povrchu [16]

Katedra Technologie Obrábění

Tomáš Bakša

Na odstranění otřepů byly kromě mechanického způsobu použity i jiné, nekonvenční způsoby, jako například elektrochemické, tepelné, ultrazvukem atd. Nicméně mnoho z těchto procesů jsou zbytečně drahé a z tohoto důvodu se zpravidla nepoužívají.

Vzhledem k tomu, že dokončovací operace na konečnou úpravu hran jsou velkou ekonomickou přítěží, je zapotřebí všechny tyto dokončovací operace v procesu výroby minimalizovat. Z toho důvodu je důležité eliminovat nebo alespoň omezit vznik otřepů na součástech již během výroby.



Obr. 3.1-3: Odjehlovací nástroje zdroj:

<http://www.cogsdill.com/products/deburring/>

3.2 Porovnání vrtáku HSS s navrženým SHD vrtákem, pozorování vzniku otřepů a klasifikace otřepů [5]

V této kapitole budeme popisovat navržený vrták SHD, a srovnávat ho s běžným HSS vrtákem, „běžné“ geometrie. Budeme zkoumat vliv tohoto navrženého vrtáku na velikost a tvar otřepů u různých materiálů (například u čistého hliníku) za různých řezných podmínek a sledovat mechanismus vzniku těchto otřepů.

Vrták SHD je navržen tak, aby zvyšoval přesnost a produktivitu vrtání děr. Běžné vrtáky, které mají příčné ostří, vytvářejí při vrtání dlouhé třísky, které omezují řeznou rychlost a rychlost posuvu. Navržený vrták SHD je vyroben z karbidu wolframu a má oproti HSS vrtáku pozměněnou geometrii, jako například odstraněné příčné ostří. Výsledkem toho je 5-10 krát větší produktivita tvorby přesných děr, při zachování vysoké tuhosti. Provedené studie ukazují, že na vznik a velikost otřepů má kromě řezných podmínek vliv i geometrie nástroje.

3.2.1 Charakteristika

Když porovnáme navržený vrták s běžným vrtákem, uvidíme u navrženého vrtáku tři charakteristické rysy, kterými jsou délka příčného (přechodového) ostří, větší vrcholový úhel a specifická geometrie drážky. Motivací k této změně geometrie vrtáku bylo zvýšení výkonosti vrtání. Zvýšená přesnost vyvrtané díry je důsledkem snížení řezného odporu a zvýšení tuhosti navrženého vrtáku. Produktivita navrženého vrtáku může být 5-10 krát vyšší než u běžného HSS vrtáku. Byly provedeny následující změny:

1. Odstranění příčného (přechodového) ostří

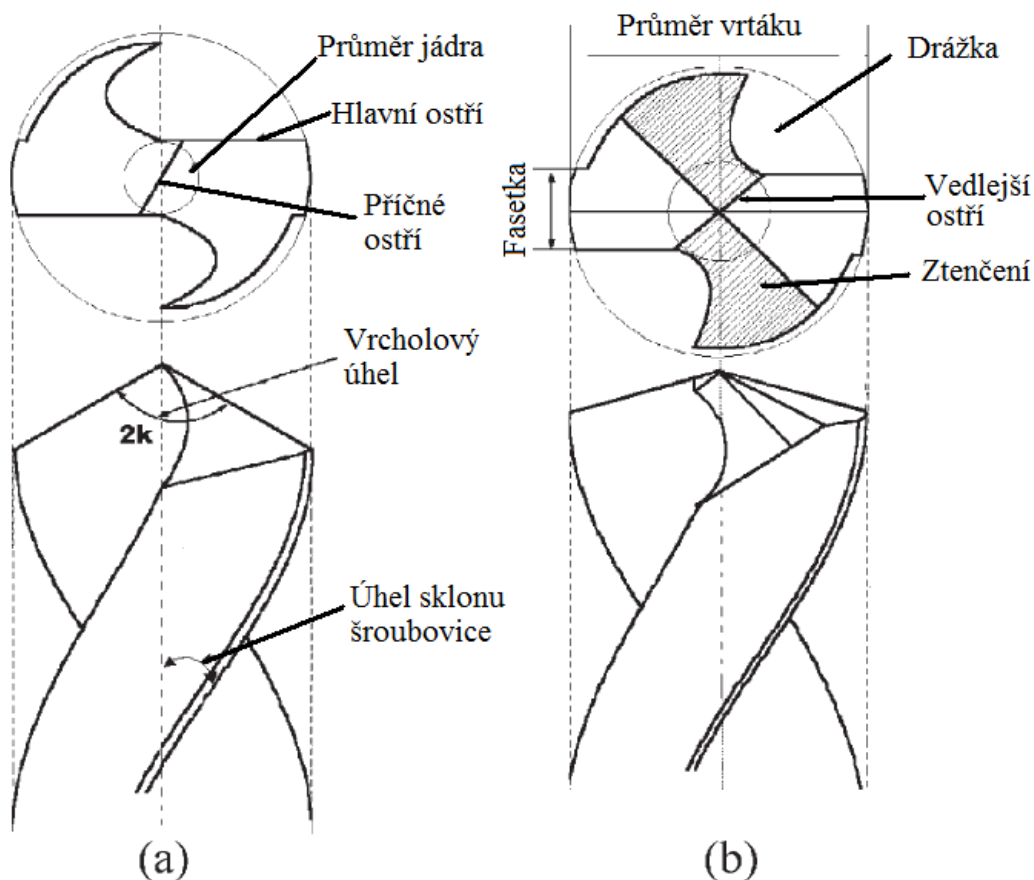
Příčné ostří je vytvořeno během broušení vrtáku na požadovanou hodnotu úhlu hřbetu (Obr. 3.2-1a). Běžný vrták klade díky negativnímu úhlu čela velký řezný odpor, což má za následek nepřesnost vyvrtané díry a zkrácení životnosti nástroje. Navržený vrták má oproti HSS vrtáku zkrácené, nebo úplně odstraněné příčné ostří a tím zvyšuje odolnost vrtáku a přesnost otvoru (Obr. 3.2-1b).

2. Zvětšení vrcholového úhlu

Jak je vidět z Obr. 3.2-1, vrcholový úhel navrženého vrtáku je zvětšen oproti běžnému vrtáku ze 123° na 139°. Výsledkem zvýšení vrcholového úhlu je změna směru toku třísky a produkce krátkých lámaných třísek.

3. Zvětšení průměru jádra vrtáku

Průměr jádra navrženého vrtáku je oproti běžnému zvětšen z 2,33 mm na 3,0 mm. Aby byla zajištěna vysoká tuhost vrtáku a lámání třísky na malé části, musí být správně stanoveno uspořádání drážky.



Obr. 3.2-1: Rozdílná geometrie vrtáků – (a) HSS vrták, (b) SHD vrták [5]

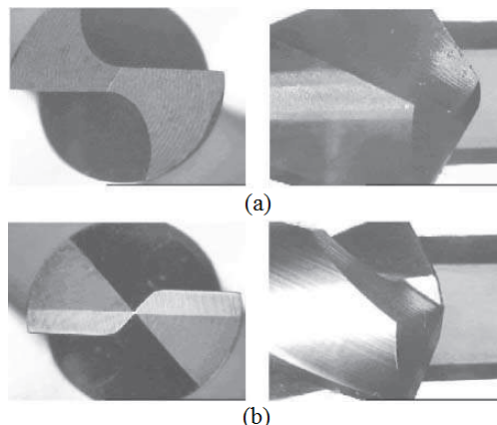
3.2.2 Pozorování vzniku otřepů při experimentálním vrtání [5]

Dva různé vrtáky (běžný HSS a navržený SHD vrták) byly použity pro experimentální vrtání do různých materiálů a byl sledován průběh vzniku otřepů při tomto vrtání. Oba vrtáky jsou specifikovány v Tab. 3.2-1.

<i>Parametry</i>	<i>SHD</i>	<i>HSS</i>
Průměr vrtáku [mm]	10,3	10,3
Úhel stoupání šroubovice [°]	25	25
Vrcholový úhel [°]	139,28	123,39
Průměr jádra [mm]	3,0	2,33
Délka příčného ostří [mm]	0,07	0,74
Třída	Karbid P25 TiN povlak	Rychlořezná ocel Bez povlaku

Tab. 3.2-1: Specifikace vrtáků [5]

Provedení obou vrtáků je znázorněno na Obr. 3.2-2. Použité materiály pro vrtání byly voleny tak, aby pokryly širokou škálu tažnosti materiálů. Mezi použité materiály patří například čistý hliník, SM20C, Al6061 a SM45C.



Obr. 3.2-2: Provedení vrtáků - a) HSS vrták, b) SHD vrták [5]

3.2.3 Pozorování vzniku otřepů při vrtání do čistého Al [5]

Experimentální vrtání s použitím HSS a SHD vrtáku bylo provedeno na čistém hliníku při různých řezných podmínkách. Tvary vzniklých otřepů při vyšších otáčkách jsou patrné v tabulce 2.

S použitím HSS vrtáku můžeme pozorovat, že se při malém posuvu a malých otáčkách tvoří otřepy rovnoměrně. Specifickým rysem otřepu, který se tvoří při tomto malém posuvu, je takzvaný „klobouček“. Klobouček je obvykle malý a rovnoměrně tvořený a je snadné ho oddělit od součásti. S rostoucí rychlostí posuvu je zbylý klobouček roztržen ze středu a vytvoří na okraji díry velký otřep. Roztržený otřep se tvoří například při posuvu 0,15 mm/ot a otáčkách 400 ot/min. Pokud snížíme posuv například na 0,1 mm/ot, ale zároveň zvýšíme otáčky na 800 ot/min, vznikne nám opět roztržený otřep. Stejněho efektu dosáhneme při ještě náročnějších řezných podmínkách. Roztříštěný otřep je velice náročné odstranit a odjehlit.

Použitím navrženého SHD vrtáku jsou otřepy tvořeny rovnoměrně se vzniklým kloboučkem. Jakmile je klobouček ze součástí odstraněn, je snadné odstranit i zbylé otřepy. Můžeme pozorovat, že na rozdíl od HSS vrtáku nedochází ke vzniku roztříštěných otřepů na okraji díry. Protože jsou tyto otřepy rovnoměrně uspořádány, je možné měřit jejich velikost výškoměrem a laserovým systémem.

	SHD vrták	HSS vrták
Rychlost posuvu [mm/ot]	Velikost otáček: 800 ot/min	
0,05		
0,1		
0,15		

Tab. 3.2-2: Tvary otřepů při různém posuvu [5]

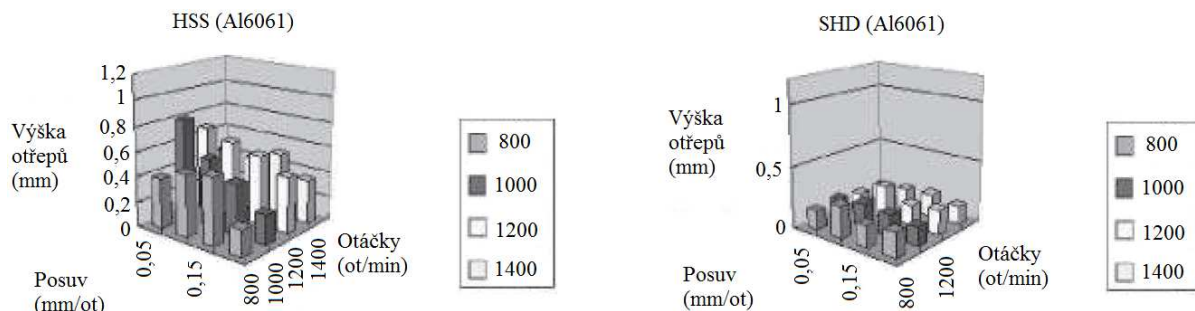
3.2.4 Pozorování vzniku otřepů u Al6061 [5]

Oproti čistému hliníku je slitina Al6061 křehčím materiálem a nemá tedy takovou tažnost. Slitina byla podrobena experimentálnímu vrtání dvěma různými vrtáky (HSS a SHD) stejně jako čistý hliník. Vrtáním SHD vrtákem dosáhneme vzniku kloboučku a malých pravidelných otřepů. Vrtáním HSS vrtákem vzniknou podobně jako u SM20C velké a nepravidelné otřepy vlivem roztříštění během vrtání. Velikosti otřepů v závislosti na posuvu a otáčkách můžeme vidět na Obr. 3.2-3. Z obrázku je vidět, že vrtáním HSS vrtákem dostaneme otřepy,

Katedra Technologie Obrábění

Tomáš Bakša

kteřé jsou vyšší a více nepravidelné než u SHD vrtáku. Z experimentu také vyplývá, že větší otřepy se zpravidla tvoří v materiálech s větší tažností.



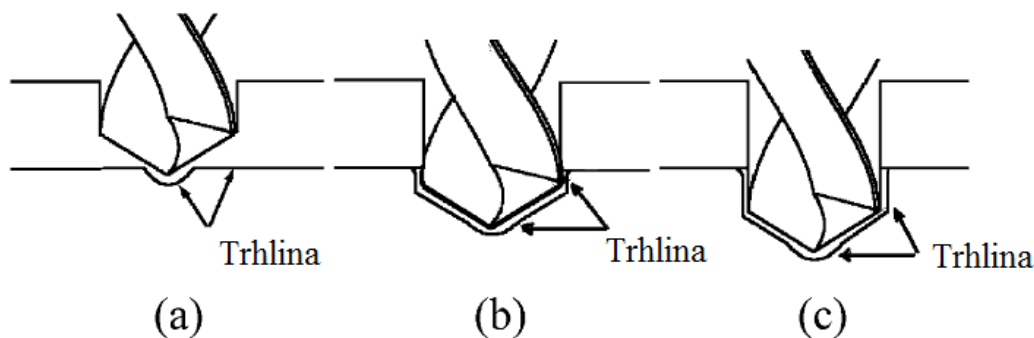
Obr. 3.2-3: Naměřené velikosti otřepů u Al6061 [5]

3.3 Mechanismus a klasifikace tvoření otřepů

3.3.1 Klasifikace otřepů vzniklých při vrtání [5]

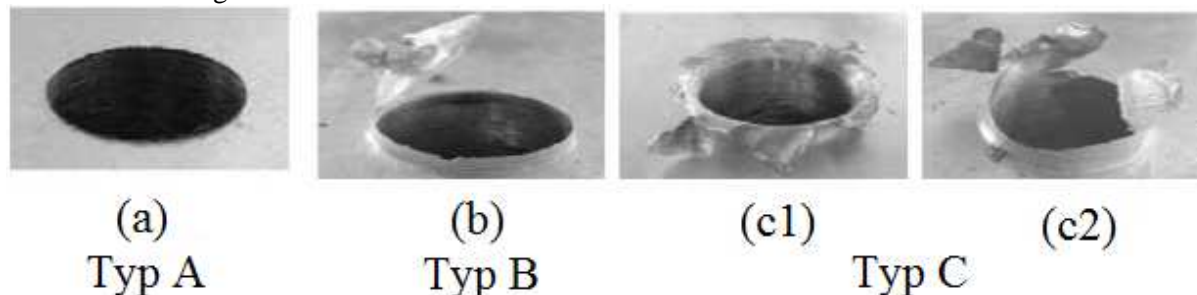
Výše popsané tvoření otřepů je pozorováno při různých podmínkách, jako například různá geometrie vrtáku, vlastnosti materiálu, rychlost posuvu a řezná rychlost. Mnoho druhů otřepů se v konečné fázi vrtání tvoří podle různých mechanismů. Z pozorování můžeme shrnout, že tvorba otřepů je výsledkem plastické deformace a následného porušení materiálu. Výsledná geometrie je určena množstvím plastické deformace, o které rozhoduje tažnost materiálu. Tažnost materiálu je zastoupena prodloužením materiálu a velikostí prodloužení při přetržení. Místo porušení je dáno velikostí prodloužení při přetržení materiálu a geometrií nástroje. Proto je tvoření otřepů vysoce závislé na vlastnostech materiálu, geometrii vrtáku a řezných podmínkách.

Otřepy mohou být klasifikovány do tří typů podle tvoření kloboučku. Na Obr. 3.3-1 jsou ukázány tři pozice během vrtání a tvorba otřepů.



Obr. 3.3-1: Pozice vrtáku při vzniku otřepů [5]

Když se vrták blíží ke konci materiálu, jak se vidět na Obr. 3.3-1a, plastická deformace narůstá. V této fázi se může objevit trhлина ve středu díry nebo ve zbývajícím materiálu díry. Když vrták vystupuje z materiálu (Obr. 3.3-1b), plastická deformace dále narůstá a pokud materiál již není schopen se deformovat, dojde k iniciaci trhlin v místě hrotu vrtáku nebo v místě okraje díry. Pokud nedojde k porušení při výstupu, postupuje vrták dále (Obr. 3.3-1c) až do maximální deformace, kdy dojde k porušení materiálu v místě hrotu nebo podél okraje díry, stejně jako v předchozím případě.



Obr. 3.3-2: Klasifikace otřepů při vrtání [5]

Otřep typu A (bez kloboučku)

Jak se vrták blíží k výstupu z díry (Obr. 3.3-1a), zbývající materiál je vlivem přítláčné síly vystřižen, nebo vytlačen ven aniž by byl porušen. Vytlačena část, u které nedojde k porušení, se přetvoří na klobouček nebo otřep. V této fázi dojde k porušení v případě, že je materiál příliš křehký a nedokáže vyvinout ani malé množství plastické deformace. Trhlina vznikne v místě hrotu vrtáku, nebo kolem výstupního okraje díry. V tomto případě se nebudou na materiálu vyskytovat žádné zbývající otřepy (Obr. 3.3-2a), ale může dojít ke vzniku negativního zkosení z důvodu porušení. Pokud okolo hrany zůstanou velmi malé otřepy, je velmi jednoduché je odstranit.

Otřep typu B (otřep s kloboučkem) a typu C (roztržený otřep bez kloboučku)

Pokud plastická deformace pokračuje i přesto, že vrták vystoupil z díry (Obr. 3.3-1b), mohou nastat dva případy porušení – porušení v místě hrotu vrtáku a porušení podél okraje výstupu díry. Když trhlina začíná na okraji výstupu díry, bude se tvořit klobouček a také rovnoměrné otřepy podél okraje (Obr. 3.3-2b). Tyto rovnoměrné otřepy jsou klasifikovány jako typ B. Část materiálu podél okraje díry je vystavena namáhání v tahu. Pokud porušení začíná v místě hrotu vrtáku, bude klobouček roztržen na několik částí, které zůstanou na hraně díry v podobě velkých nepravidelných otřepů. Tento „roztržený“ otřep je klasifikován jako typ C (Obr. 3.3-2c). Klobouček může být roztržen do dvou nebo více částí, to je znázorněno na Obr. 3.3-2 c1 a c2. O tom, jak velké otřepy vzniknou, rozhoduje velikost plastické deformace před porušením materiálu (jak daleko se vrták „dostane“ než dojde k porušení).

3.3.2 Analýza mechanismu vzniku otřepů [5]

Jak vrták postupuje skrz materiál do fáze výstupu, množství plastické deformace se zvýší. Pokud celkové napětí dosáhne v nějakém místě své maximální hodnoty, dojde v tomto místě k porušení materiálu. Vzdálenost, do které vrták pokračuje bez porušení, závisí na tužnosti a velikosti prodloužení při přetržení. Výsledná velikost otřepů je pak určena touto vzdáleností. Místo porušení je kromě jiného závislé i na geometrii vrtáku. Pokud má vrták malý vrcholový úhel, vzniklé napětí v místě hrotu vrtáku je mnohem větší, než podél výstupní hrany díry. To je důvodem, proč zmiňovaný HSS vrták produkuje v mnoha případech otřepy typu C. Pokud by se vrcholový úhel zvětšil, jako v případě SHD vrtáku, napětí v místě hrotu vrtáku by nebylo o tolik větší než podél výstupní hrany díry. Jak by vrták postupoval, tahové napětí by v místě podél hrany díry rostlo až dokud by v tomto místě nedošlo k porušení materiálu. V takovémto případě by se vytvořily pravidelné otřepy typu B s kloboučkem. Můžeme tedy říct, že místo porušení je určeno porovnáním napětí v místě hrotu vrtáku a v místě podél výstupní hrany díry. Při použití HSS vrtáku může dojít ke změně otřepů typu B na otřepy typu C, pokud změníme řezné podmínky (zvětšíme posuv, otáčky). U navrženého SHD vrtáku tento jev nenastává. Zdá se tedy, že pro specifické materiály existuje kritický vrcholový úhel, který nám zajistí produkci pouze otřepů typu B.

3.4 Úprava geometrie vrtáku

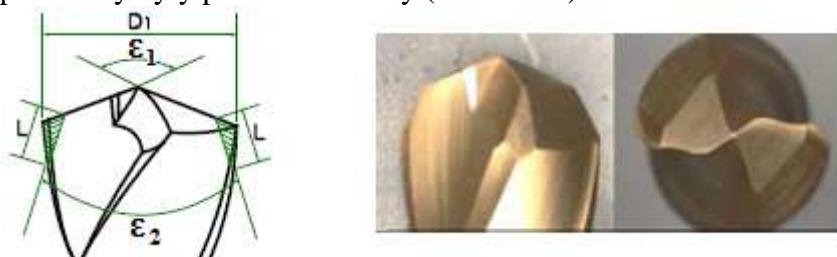
V předchozí kapitole byl popsán mechanismus, kterým výstupní otřepy při vrtání vznikají. Otřepy byly klasifikovány do třech základních typů a byly určeny základní faktory (materiál, geometrie nástroje, řezné podmínky) ovlivňující jejich tvar a velikost. V této kapitole se budeme zabývat úpravou geometrie nástroje, konkrétně vrtáku, a budeme určovat jeho vliv na vznik otřepů. Následující rozbor vychází z [3], experimentu, který probíhal na CNC obráběcím centru Hyundai SPT18S a za podmínek určených v následujících odstavcích.

Geometrii vrtáku, jako jeden z ovlivňujících faktorů, je možno upravit takovým způsobem, aby vzniklé otřepy byly co nejmenší a zvýšit tím kvalitu vyvrtané díry. První úprava geometrie byla již popsána v předchozích kapitolách, kde jsme porovnávali běžný vrták z rychlořezné oceli s navrženým (upraveným) vrtákem ze slinutého karbidu. Kromě zvětšení průměru jádra a odstranění příčného ostří, bylo hlavní a zásadní úpravou zvětšení vrcholového úhlu vrtáku z původních 123° na 139° . Tato úprava umožnila, že vznikající otřepy byly typu B, tedy malé rovnoměrné otřepy s kloboučkem. Otřepy s kloboučkem jsou přijatelnější, protože vzniklý klobouček lze odstranit snadněji, než roztržené otřepy typu C. Přestože jsou otřepy s kloboučkem přijatelnější, je nutno je odstranit další operací. Jsou však případy, kdy ani zbylý klobouček není lehké odstranit, například u protínajících se děr (bloky motorů). Aby bylo dosaženo minimálních otřepů bez vzniku kloboučku, musí být geometrie vrtáku dále upravena. V této kapitole je popsáno několik variant úpravy vrtáků [3].

3.4.1 Zkosený vrták [3]

Jednou z variant upravených vrtáků je takzvaný zkosený vrták ze slinutého karbidu, který je charakterizován tím, že má zkosenou obvodovou hranu na hlavě vrtáku, Obr. 3.4-1. Zkosením hrany je ostří vrtáku rozděleno na dvě části, přední a zkosená část. Kromě průměru vrtáku a vrcholového úhlu jsou základními parametry úhel zkosení ε_2 a délka zkosení L .

Výzkumníci navrhli a vyrobili zkosený vrták s dvěma různými úhly zkosení a podrobily je experimentálnímu vrtání do různých materiálů, při kterém pozorovali vliv pozměněné geometrie na velikost vzniklých výstupních otřepů. Dosažené výsledky porovnali s výsledky běžného HSS vrtáku a vrtáku ze slinutého karbidu. Parametry vrtáku jsou zobrazeny v Tab. 3.4-2. Řezné podmínky byly pevně stanoveny (Tab. 3.4-1).



Obr. 3.4-1: Konfigurace zkoseného vrtáku [3]

Řezné podmínky	
Řezná rychlost [m/min]	35
Posuv [mm/min]	150

Tab. 3.4-1: Řezné podmínky [3]

Parametry	Zkosený vrták 1	Zkosený vrták 2
Průměr D_1 [mm]	10	10
Vrcholový úhel ε_1 [°]	140	140
Úhel zkosení ε_2 [°]	60	40
Délka zkosení L [mm]	2	2

Tab. 3.4-2: Parametry zkoseného vrtáku [3]

Při samotném vrtacím procesu se nejprve dostává do řezu přední část ostří, která pak plynule přechází ve zkosenou část ostří. Jakmile se přední část ostří provrtá skrz materiál, zanechá podél okraje díry zbytkový materiál a vytvoří otřepy, jejichž velikost závisí na vrtaném materiálu. Množství zbytkového materiálu (jemně vyšrafovaná část na Obr. 3.4-2) je dáno velikostí úhlu zkosení vrtáku. Zkosená část ostří má za úkol odřezat zbytkový materiál na okraji díry. Bylo zjištěno, že velikost vzniklých otřepů po odřezání zbytkového materiálu je dána tuhostí zbývajícího materiálu. Jestliže je jeho tuhost dostatečně velká, dojde k jeho odstřížení za vzniku malých otřep. V opačném případě, kdy není tuhost zbytkového materiálu dostatečná, dojde k deformaci (ohybu) toho zbylého materiálu, která se projeví jako velký otřep. Z hlediska geometrie vrtáku má na tuhost zbylého materiálu největší vliv velikost úhlu zkosení ε_2 .

Byly použity vrtáky s úhlem zkosení 40 a 60° (viz. Tab. 3.4-2) a vrtání probíhalo do různých materiálů. Výsledné otřepy byly měřeny pomocí laserových senzorů. Jedním z použitých testovacích materiálů byla ocel SM45C, u které bylo zjištěno, že zkosený vrták produkuje menší otřepy než běžný HSS vrták nebo vrták ze slinutého karbidu. Na Obr. 3.4-2 je zobrazen vrtací proces ve fázi, kdy se přední část ostří provrtá skrz materiál. Z pokusu vyplynulo, že tuhost zbývajícího materiálu, který je na obrázku zobrazen jemně vyšrafovanou částí, je větší při použití úhlu zkosení 40°. Tedy výsledné otřepy jsou s použitím tohoto úhlu menší než u 60°.

Další materiály použité při testování byly slitiny hliníku A6061 a A2024, přičemž slitina A6061 se vyznačuje větší tažností a slitina A2024 naopak větší křehkostí. Použitím zkoseného vrtáku při vrtání do slitiny A6061 mají výsledné otřepy nepravidelný a nerovnoměrný tvar, jejíž výšku nelze díky nepravidelnosti měřit pomocí laserového senzoru. Naopak vrtáním do slitiny A2024 jsou vzniklé otřepy pravidelné a velmi malé (menší než 0,1 mm). To je způsobeno vyšší křehkostí této slitiny. Je tedy důležité si uvědomit, o

Obr. 3.4-2: Znárodnění zkoseného vrtáku při výstupu z materiálu [3]

jaký druh hliníkové slitiny, s jakými vlastnostmi (tažnost, křehkost), se při vrtání jedná.

3.4.2 Zaoblený vrták [3]

V předchozích odstavcích jsme se zabývali vrtákem, který měl zkosenou obvodovou hranu na hlavě vrtáku. Další možností úpravy geometrie je zaoblený vrták, který má obvodovou hranu na rozdíl od předchozího případu zaoblenou o určitý rádius. Ostří vrtáku se opět skládá z hlavní přední části, která plynule přechází do zaoblené části ostří. Ta je charakterizována poloměrem zaoblení R , jak je vidět na Obr. 3.4-3.



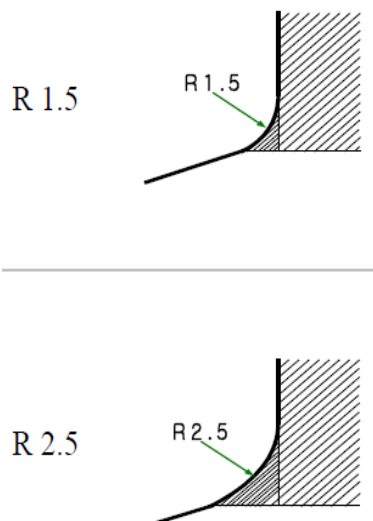
Obr. 3.4-3: Konfigurace zaobleného vrtáku [3]

Byly vyzkoušeny vrtáky se dvěma různými parametry R a stejně jako v předchozím případě byly použity pro vrtání různých materiálů. Parametry vrtáků jsou znázorněny v Tab. 3.4-3. Řezné podmínky byly nastaveny na řeznou rychlost 35 m/min a posuv 150 mm/min.

Parametry	Zaoblený vrták 1	Zaoblený vrták 2
Průměr D_1 [mm]	10	10
Vrcholový úhel ϵ_1 [°]	140	140
Poloměr zaoblení R [mm]	1,5	2,5

Tab. 3.4-3: Parametry zaobleného vrtáku [3]

Samotný vrtací proces probíhá podobně jako u zkoseného vrtáku. Přední část ostří zanechá po provrtání materiálu na okraji díry zbytkový materiál, který je odřezán zaoblenou částí ostří. Velikost vzniklých otřepů po odřezání je opět dána tuhostí zbytkového materiálu (jemně vyšrafovaná část na Obr. 3.4-4). Hlavním ovlivňujícím geometrickým faktorem je zde poloměr zaoblení R.



Obr. 3.4-4: Znáznornění zaobleného vrtáku při výstupu z materiálu [3]

Vrtáním do slitiny A6061 se dosáhlo relativně lepších výsledků než při použití zkoseného vrtáku. Pokud je použit vrták s poloměrem zaoblení R rovno 2,5 mm, jsou vzniklé otřepy rovnoměrné a lze je tedy měřit pomocí laserového systému. Výška těchto otřepů a pohybovala okolo 0,4 mm. Při použití vrtáku s menším poloměrem ($R = 1,5$) byly vzniklé otřepy nerovnoměrné jako v případě zkoseného vrtáku a nebylo tedy možné měřit jejich výšku. Slitina A2024 se vzhledem ke své křehkosti projevovala podobně jako u zkoseného vrtáku. Výsledné otřepy byly malé a rovnoměrné (menší než 0,1 mm). I když v případě oceli SM45C dosáhl lepších výsledků vrták s menším poloměrem zaoblení, v případě slitiny A6061 jsou přijatelnější výsledky dosaženy s vrtákem s větším poloměrem kvůli pravidelnosti vzniklých otřepů.

3.4.3 Stupňovitý vrták [3], [4]

Stupňovitý vrták je další vrták s upravenou geometrií tak, aby minimalizoval vzniklé otřepy během vrtání. Hlavním rysem tohoto vrtáku je přechod menšího průměru (D_2) na větší průměr (D_1). Většinou se stupňovité vrtáky využívají na současné vyvrtání děr a zahloubení, ale v tomto případě je tvar vrtáku přizpůsoben pro minimalizaci otřepů. Na Obr. 3.4-5 je ukázán tvar jednoho z těchto vrtáků s kótami základních rozměrů.

Velmi důležité parametry, které ovlivňují tvoření otřepů, jsou úhel zkosení přechodu ϵ_2 mezi jednotlivými průměry a rozdílná velikost těchto průměrů D_1 a D_2 . Klíčem k úspěchu je tedy zvolit vhodné hodnoty těchto parametrů. Příklady vrtáků s různými parametry jsou

Katedra Technologie Obrábění

Tomáš Bakša

zaznamenány v Tab. 3.4-4. Vhodné parametry se mohou lišit v závislosti na vrtaném materiálu a použitých řezných podmínkách. Pro posouzení uvedených vrtáků byla pevně stanovena řezná rychlost ($v_c = 35$ m/min) i posuv ($v_f = 150$ mm/min).



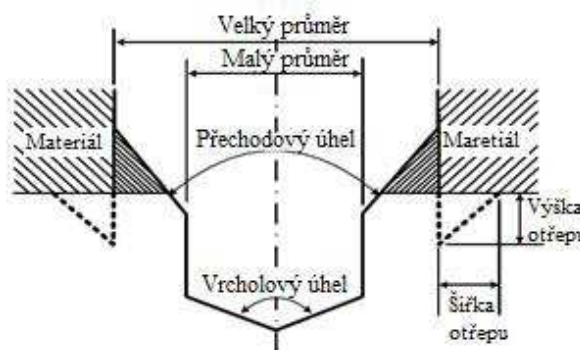
Obr. 3.4-5: Konfigurace stupňovitého vrtáku [3]

Parametry	Vrták 1	Vrták 2	Vrták 3	Vrták 4	Vrták 5	Vrták 6	Vrták 7	Vrták 8
Velký průměr D_1 [mm]	10	10	10	10	10	10	10	10
Malý průměr D_2 [mm]	8	8	8	8	8	9	9	9
Vrcholový úhel ε_1 [°]	140	140	140	140	140	140	140	140
Úhel přechodu ε_2 [°]	130	100	75	60	40	75	60	40
Vzdálenost přechodu L [mm]	2	2	2	2	2	2	2	2

Tab. 3.4-4: Parametry stupňovitého vrtáku [3]

Stupňovitý vrták má dvě řezná ostří, která jsou od sebe navzájem oddělená. Hlavní (přední) ostří a druhé ostří, které je na přechodu mezi oběma průměry. Při vrtání tedy probíhají dva řezné procesy za sebou. Nejprve se do řezu dostává hlavní ostří (první řezný proces) a po dosažení určité hloubky se do řezu dostává i druhé ostří (druhý řezný proces). Jakmile hlavní ostří projde skrz materiál, je první řezný proces ukončen. Druhý řezný proces probíhající na druhém ostří pokračuje a postupně odřezává zbývající materiál do doby, než se začne deformovat. Stejně jako v předchozích případech je deformace dána tuhostí zbývajícího materiálu. Jakmile zbývající materiál ztratí potřebnou tuhost, je vytlačen ven a projeví se jako zbytkový otřep. Schéma výstupu vrtáku je zobrazeno na Obr. 3.4-6.

Jak již bylo řečeno, pro minimalizaci vzniku otřepů je nutno zvolit optimální parametry vrtáku. Vrtáky různých parametrů uvedených v Tab. 3.4-4 byly výzkumníky navrženy a vyrobeny pro zjištění jejich vlivů. Hlavním zkoumaným parametrem byl úhel přechodu ε_2 , který má velký vliv na objem zbývajícího materiálu. Vrták, jehož hodnota ε_2 činila 130° a průměr D_2 8 mm, vykazuje



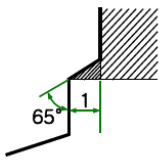
Obr. 3.4-6: Proces tvoření otřepů při vrtání [3]

obecně podobnou účinnost z hlediska velikosti vzniklých otřepů, jako běžný SHD vrták.

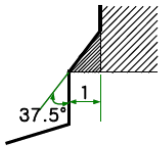
V případě hliníkové slitiny (A6061) je vliv dokonce podobný případu se zkoseným vrtákem, tedy vzniklé otřepy jsou nepravidelné a nerovnoměrné a nelze ani správně měřit jejich velikost. Zmenšením úhlu ε_2 na 100° ($D_2 = 8$ mm) dosáhneme rovnoměrnějších otřepů, ale jejich velikost je prakticky srovnatelná s předchozím případem. K výraznému zmenšení vzniklých otřepů dojde, jestliže úhel přechodu ε_2 je snížen pod hodnotu 75° . Snížením tohoto úhlu se dosáhne větší tuhosti zbývajícího materiálu, což umožní vrtáku odřezat jeho větší část a zmenšit tak vzniklé otřepy. Nejmenších otřepů se dosáhne s použitím vrtáku s $\varepsilon_2 = 40^\circ$. Kromě úhlu přechodu ε_2 , má velký vliv na velikost otřepů také rozdíl průměrů D_1 a D_2 .

Doted' byly popsány stupňovité vrtáky, jejichž menší průměr D_2 byl roven 8 mm. Zvětšením průměru D_2 na hodnotu 9 mm zmenšíme mezistupňovou obvodovou mezeru mezi oběma průměry (na 0,5 mm) a zmenšíme tak objem zbývajícího materiálu, který v díře zanechá první řezný proces. Zmenšením obvodové mezery dosáhneme výrazné redukce velikosti a zvětšení stability vzniklých otřepů v závislosti na změně rychlosti posuvu.

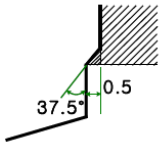
130°
Ø8



75°
Ø8




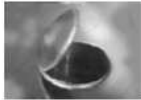


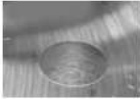
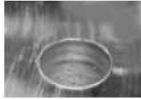


75°
Ø9



Při použití stupňovitého vrtáku tedy dosáhneme efektivního snížení otřepů v případě, že zvolíme úhel přechodu mezi jednotlivými průměry ϵ_2 menší než 75° a zmenšíme obvodovou mezeru (rozdíl průměrů) mezi stupni. Klíčem je tedy menší úhel ϵ_2 a větší průměr D_2 . Z vyzkoušených stupňovitých vrtáků průměru $D_1 = 10$ mm dosáhl nejlepších výsledků, z hlediska minimalizace vzniku otřepů, stupňovitý vrták s úhlem přechodu (ϵ_2) 40° a menším průměrem (D_2) 9 mm. Vrták s těmito parametry zajistil, že zbývající materiál (jemně vyšrafovaná část na Obr. 3.4-7) po prvním řezném procesu je malého objemu a jeho tuhost je dostatečně velká k tomu, aby byl odřezán ve druhém řezném procesu za vzniku minimálních otřepů. V případě hliníkové slitiny A6061 dosahovaly vzniklé otřepy velikosti menší než 0,4 mm, v případě A2024 menší než 0,1 mm. Nicméně je důležité si uvědomit, že zmenšení rozdílu průměrů D_1 a D_2 (obvodové mezery) na malé hodnoty může způsobit vznik třecího efektu, kdy místo druhého řezného procesu dojde ke tření a vytlačování zbývajícího materiálu. Proto je podstatné zvolit optimální průměr D_2 vzhledem k průměru D_1 , aby k třecímu efektu nedocházelo.

Obr. 3.4-7: Znázornění stupňovitého vrtáku při výstupu z materiálu [3]

Na obrázku Obr. 3.4-8 jsou zobrazeny výstupy děr (průměru 10 mm) a vzniklé otřepy různých vrtaných materiálů při použití vrtáku ze slinutého karbidu a stupňovitého vrtáku s úhlem ϵ_2 rovno 40° a průměrem D_2 rovno 9 mm.

Materiál	SM45C	SS400	A2024	A6061
Vrták				
SHD vrták				
Stupňovitý vrták 40°/ Ø9				

Obr. 3.4-8: Porovnání vzniklých otřepů mezi stupňovitým a SHD vrtákem při vrtání do různých materiálů [3]

Nevýhody stupňovitého vrtáku [3]:

V průběhu experimentu [3] byly měřeny řezné síly, vznikající během vrtání do různých materiálů. Signály řezných sil u modifikovaných vrtáků byly oproti běžnému karbidovému méně stabilní. Průběh řezné síly u zaobleného a zkoseného vrtáku se ukázal jako nejnestabilnější. Stupňovitý vrták vykazoval mnohem lepší výsledky, ale v porovnání s běžným vrtákem byl jeho průběh řezné síly méně stabilní. Na Obr. 3.4-9 jsou zobrazeny průběhy řezných sil všech vrtáků při vrtání hliníku A6061.

Nestabilita v průběhu řezných sil se projevuje při tvoření třísky. Při vrtání zkoseným a zaobleným vrtákem se tvořila tříška nestabilně (není tvořena plynule). To je způsobeno tvořením třísky na modifikované části ostří (zkosené a zaoblené ostří). Tento jev je výraznější u hliníku, protože má větší tažnost než ocel. V případě stupňovitého vrtáku se tříška tvoří stabilněji než u předchozích případů, kvůli vzdálenosti L , která odděluje přední a přechodové ostří. Tvoří se dva druhy třísek, jedna na předním ostří a druhá na přechodovém ostří. Třísky na předním ostří jsou dobře formovány do malých velikostí a jsou odvedeny díky designu drážky vrtáku. Na přechodovém ostří jsou však tvořeny dlouhé třísky, které při zvětšující se hloubce zvyšují řezný odpor (řeznou sílu). Řezná síla klesne jakmile přední ostří projde skrz materiál.

Další nevýhodou stupňovitého vrtáku je potřeba dostatečného místa pro vyjetí vrtáku, které je závislé vzdálenosti L mezi stupni.



Obr. 3.4-9: Řezné síly u modifikovaných vrtáků při vrtání A6061 [3]

4 Tvoření otřepů při frézování děr do hliníku a jeho slitin

4.1 Vliv na tvoření otřepů a kloboučku při frézování děr [1]

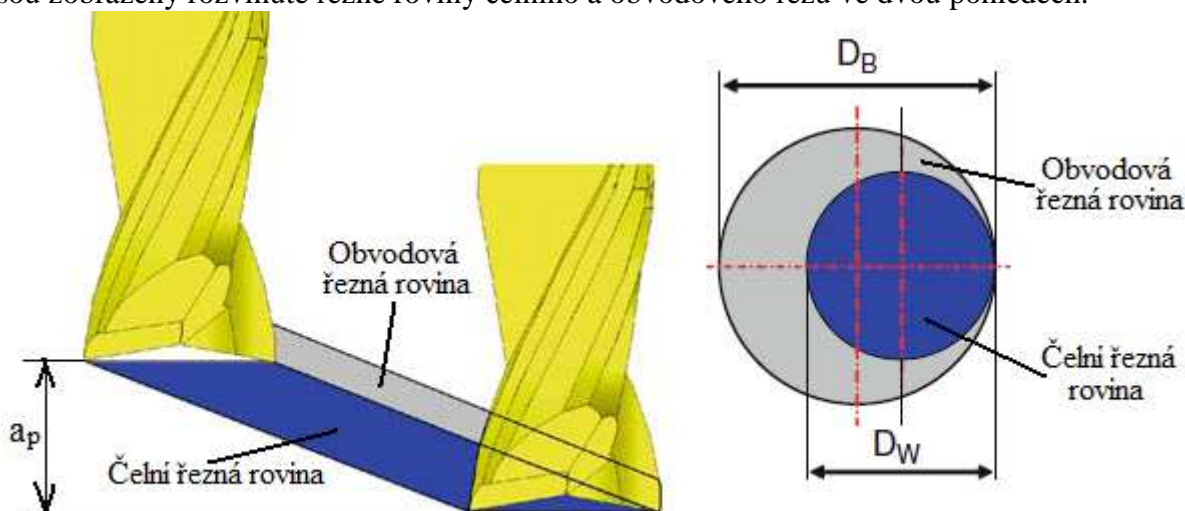
Při procesu frézování děr vznikají na obrobku otřepy stejně jako při vrtání a jiném obráběcím procesu. Tyto otřepy se tvoří v místě vstupu nástroje do materiálu a místě výstupu nástroje z materiálu, jestliže se jedná o průchozí díru. Vstupní otřep je obecně menší, než výstupní a lze ho jednoduše odstranit. Problém nastává u výstupního otřepu průchozí díry, který může dosahovat velkých rozměrů a není vždy snadné jej odstranit. Na výstupním konci díry se také může tvořit klobouček ze zbytkového vytlačeného materiálu. Tento klobouček byl popsán v předchozích kapitolách. Například v automobilovém nebo leteckém průmyslu může otřep nebo klobouček způsobit nemalé problémy ve výrobě a montáži, proto je jejich vznik v častých případech nepřijatelný.

Studie ukázaly, že tvoření otřepů a kloboučku je složitá interakce různých faktorů. V kapitole 3 byly určeny tři hlavní faktory ovlivňující tvorbu otřepů a kloboučku, které platí i u procesu frézování děr. Hlavní ovlivňující faktory jsou tedy nástroj, obrobek a procesní parametry (řezné podmínky). V Tab. 4.1-1 jsou rozepsány tyto parametry podrobněji.

Faktory ovlivňující tvorbu otřepů a kloboučku při frézování děr		
Nástroj	Obrobek	Procesní parametry (řezné podmínky)
Geometrie	Materiál	Řezná rychlost
Materiál	Mez kluzu	Hloubka řezu na jednu orbitální otáčku
Povlak	Teplota	Rychlost axiálního a tangenciálního posuvu
Opotřeben	Nátěr	Mazání
	Povlak	Chlazení

Tab. 4.1-1: Vliv na tvorbu otřepů a kloboučku při frézování [1]

V kapitole 2.1.2 je popsána kinematika planetového frézování děr, které se dá rozdělit na proces frézování a proces vrtání. Po bližším zkoumání lze říct, že tato kinematika vytváří dvě různé řezné oblasti. Čelní řezná oblast je „vrtána“ člením ostřím nástroje, zatímco obvodová řezná oblast je „frézována“ obvodovým ostřím (válcovou částí) nástroje. Na Obr. 4.1-1 jsou zobrazeny rozvinuté řezné roviny čelního a obvodového řezu ve dvou pohledech.



D_B - průměr díry, D_W - průměr nástroje, a_p - hloubka řezu na jednu orbitální otáčku

Obr. 4.1-1: Řezné roviny čelního a obvodového řezu [1]

Katedra Technologie Obrábění

Tomáš Bakša

Během spirálového frézování díry je část objemu díry vyvrtána a část vyfrézována. Celkový poměr G mezi obvodovým a čelním řezem (frézování s vrtáním) při frézování díry dává konstantní hodnotu v každém bodě šroubovitého pohybu. Tento poměr není závislý na rychlosti posuvu v axiálním směru, otáčkách vřetena, ani na orbitálních otáčkách. Celkový poměr G je závislý pouze na průměru díry D_B a průměru nástroje D_W . To lze vyjádřit následujícím vztahem:

$$G = \frac{V_1}{V_2} = \frac{D_B^2 - D_W^2}{D_W^2}$$

kde V_1 je objem „vyfrézovaného“ materiálu, V_2 objem „vyvrtaného“ materiálu, D_B je průměr díry a D_W průměr nástroje.

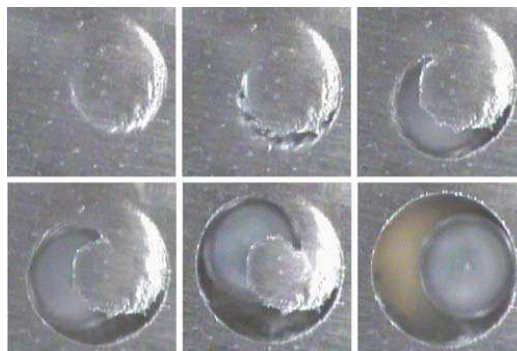
Výzkum ukázal, že celkový poměr G má vliv na vznik a velikost otřepů (kloboučku). Protože je tento poměr závislý na průměru frézované díry a průměru nástroje, lze jednoduše říct, že na tvoření otřepů a kloboučku má vliv poměr obou průměrů (díry a nástroje) D_B/D_W (zjednodušeně D/d).

4.2 Tvoření kloboučku při frézování děr hliníku 2024 T351 [1]

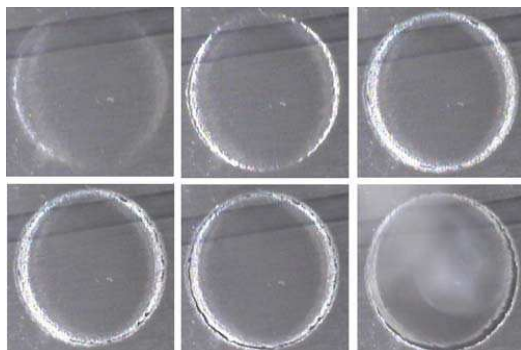
Výzkum frézování děr do hliníku 2024 T351 spirálovým způsobem byl proveden výzkumníky na Kaiserslauternské Univerzitě v Německu. V prvních krocích šetření jsou ukázány vlivy různých procesních parametrů frézování děr do hliníku 2024. Všechny díry byly frézovány v jednom pracovním kroku, s jednou geometrií nástroje a bez použití mazání.

Během frézování mohou vzniknout tři různé formy kloboučku. Obr. 4.2-1 ukazuje tvoření takzvaného srpkovitého kloboučku. Další formou kloboučku je uzavřený klobouček, jehož vznik je zobrazen na Obr. 4.2-3. Poslední forma je takzvaný neoddělený klobouček (Obr. 4.2-2), který zůstává na obrobku a jedná se o nejhorší případ. Pokud porovnáme všechny tři formy vzniklých kloboučků během frézování do hliníku 2024 T351,

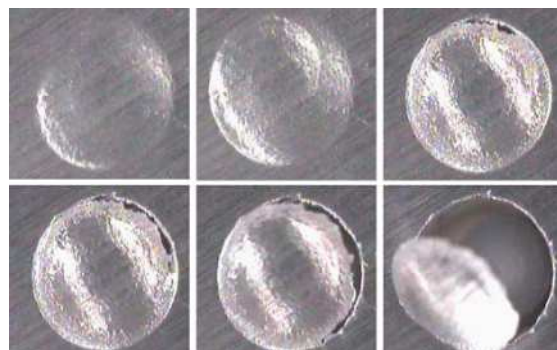
srpkovitý klobouček se ukázal jako nejlepší možnost pro výrobu, protože zajišťuje odstranění třísek v největší míře.



Obr. 4.2-1: Tvoření srpkovitého kloboučku [1]



Obr. 4.2-3: Tvoření uzavřeného kloboučku [1]



Obr. 4.2-2: Tvoření neodděleného kloboučku [1]

Při frézování děr do hliníku 2024 je tedy snaha produkovat klobouček srpkovitým průběhem. Toho lze dosáhnout dvěma způsoby. Jednou z úspěšných možností může být při-

Katedra Technologie Obrábění

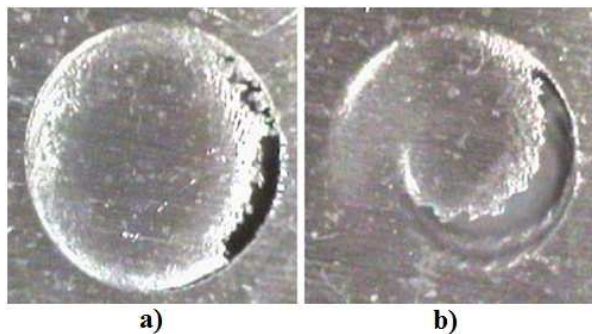
Tomáš Bakša

způsobení procesních parametrů (velká hloubka záběru a_p a velký axiální posuv $v_{f,a}$). Další alternativou je nastavení správného poměru mezi průměrem díry a nástroje ($D/d \geq 1,45$). Nicméně je nutno brát v úvahu další vliv těchto parametrů na jiné požadavky, jako je například přesnost díry, nebo kvalita povrchu.

Při tvorbě kloboučku srpkovitým způsobem (Obr. 4.2-1) dochází nejprve k zakřivení povrchu v místě výstupu nástroje elasticky a následně plasticky. To je způsobeno velkou axiální silou při posuvu. Tvoří se klobouček, který se drží pouze na okraji v tenkém rozmezí. Axiální síla působí na klobouček pouze na obvodové hraně díry. Zbytek kloboučku není axiální silou ovlivněn. V oblasti čelního řezu již nedochází ke tvorbě třísek, pouze k tváření kloboučku. Klobouček je na okraji, v místě přechodu mezi kloboučkem a obrobkem, tlačěn a plastická deformace postupuje, až dokud není klobouček oddělen od obrobku obvodovým řezem. Zbývající otřep na obrobku je následně obvodovým ostrím přeměněn na konečný otřep.

4.2.1 Vliv posuvu na tvoření kloboučku u hliníku 2024 T351 [1]

Z řezných podmínek, které ovlivňují tvoření kloboučku (otřepu), má největší vliv posuv nástroje. Proto byl proveden pokus frézování děr do hliníku 2024, za použití dvou různých hodnot axiálního posuvu. Obě díry byly frézovány s otáčkami na vřetenu $n_s = 18000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ a otáčkami orbitálního pohybu $n_o = 300 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Na Obr. 4.2-4a je znázorněno tvoření kloboučku během frézování s axiálním posuvem $v_{f,a} = 60 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. S nízkým axiálním posuvem se tvoří klobouček, který může mít podobu uzavřeného, nebo neodděleného kloboučku. Druhý obrázek (Obr. 4.2-4b) ukazuje tvoření kloboučku při posuvu $v_{f,a} = 180 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Tento klobouček má tvar srpkovitěho kloboučku, který je pro odstranění nejlepší variantou. Nejlepších výsledků tvorby kloboučku bylo dosaženo s velkým axiálním posuvem $v_{f,a}$ a velkou hloubkou záběru na jednu orbitální otáčku a_p . Nevýhodou velkého posuvu a



Obr. 4.2-4: Vliv posuvu: a) $v_{f,a} = 60 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,
b) $v_{f,a} = 180 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ [1]

hloubky záběru však je tendence k nižší přesnosti díry, která může být menší než IT8. Hlavním důvodem této nepřesnosti průměru je vychýlení nástroje, způsobené třením na čelní straně nástroje v kombinaci s jeho orbitálním pohybem. Lepších výsledků, co se týče přesnosti frézované díry, dosáhneme tedy menším posuvem. Proto je důležité, při volbě vhodné hodnoty posuvu, brát ohled, jak tvoření kloboučku, tak na přesnost díry.

4.2.2 Vliv průměru díry a nástroje na tvoření kloboučku u hliníku 2024 T351 [1]

V kapitole 4.1, kde byly uvedeny hlavní ovlivňující faktory tvorby otřepů, byl vyjádřen poměr G mezi obvodovým a čelním řezem během spirálového frézování děr. Tento poměr je závislý na průměru díry D a průměru nástroje d . Při zkoumání vlivu poměru těchto průměrů (D/d) na tvoření kloboučku u hliníku 2024, byly frézovány díry o průměru $D = 5,1 \text{ mm}$ s použitím dvou nástrojů s různým průměrem d . První nástroj měl průměr $d = 3,5 \text{ mm}$ a jeho vliv je ukázán na Obr. 4.2-4a. Druhý nástroj měl průměr $d = 4 \text{ mm}$ a jeho vliv je zobrazen na Obr. 4.2-4b. Výzkumníci došli k závěru, že se zvyšujícím se poměrem mezi průměrem frézované díry a průměrem nástroje (D/d) je tvořený klobouček výhodnější. Vyšší poměr díra/nástroj vede ke tvoření malých srpkovitých kloboučků. To znamená, že v celkovém poměru G mezi obvodovým a čelním řezem se část obvodového řezu zvyšuje.

Katedra Technologie Obrábění

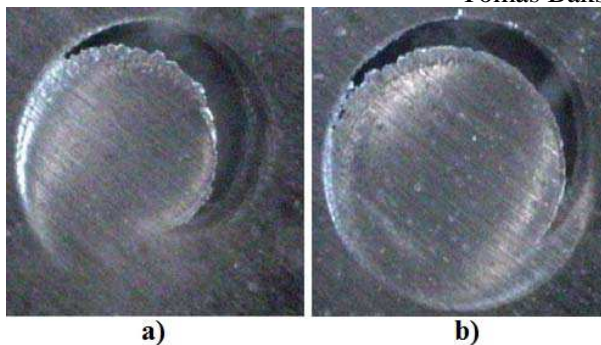
Tomáš Bakša

Při použití menšího průměru nástroje však musí být brána v úvahu jeho nižší pevnost v ohybu, než při použití nástroje s větším průměrem. Nižší pevnost může způsobit vychýlení nástroje a tím negativně ovlivnit přesnost díry.

Během frézování děr do hliníku 2024 bylo zjištěno, že poměry mezi průměrem frézované díry a nástroje $D/d \geq 1,45$ produkují velmi malý srpkovitý klobouček, který nebyl odřezán čelním ostřím nástroje.

Tento zbývající materiál je následně, při výstupu nástroje z obrobku, odřezán obvodovým ostřím během orbitálního pohybu nástroje. Odříznutý klobouček pak může být lehce odstraněn pomocí vakua.

Obrábění s větším poměrem D/d než 1,45 a s použitím mazání, vykazuje rovněž dobré výsledky při odstranění kloboučku a třísek.



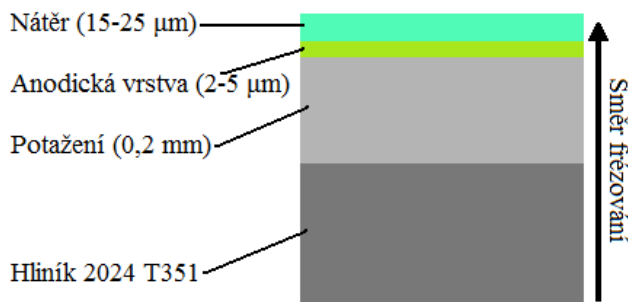
Obr. 4.2-5: Vliv poměru D/d : a) 1,45, b) 1,275 [1]

4.3 Tvoření otřepu a kloboučku při frézování děr do potaženého hliníku 2024 T351 s nátěrem [1]

V automobilovém nebo leteckém průmyslu se v mnoha případech používají materiály, které jsou povrchově upraveny. Materiály, které jsou pro dosažení požadovaných vlastností potaženy vrstvou jiného materiálu, například pro zlepšení jeho korozivzdornosti. Jakýkoliv potah, nátěr, nebo barva nanesená na materiál značně pozmění jeho mechanické vlastnosti na povrchu. To ovlivňuje tvoření otřepů a kloboučku vzniklých při frézování děr.

Tato kapitola popisuje tvoření otřepů a jejich minimalizace u potažené hliníkové slitiny 2024 T351, která v tomto ohledu vykazuje špatné výsledky. Jeho povrchová úprava ovlivňuje tvoření kloboučku, i jeho odtržení od obrobku.

Potažený hliník 2024 T351 je materiál, který se skládá z několika vrstev (Obr. 4.3-1). Základním materiálem je hliníková slitina 2024 T351, která byla tepelně zpracována a tažena. Slitina je potažena vrstvou čistého hliníku, který slouží jako ochrana proti korozi základního materiálu. Další je anodická vrstva, která se skládá z vrstvy oxidu hlinitého a je nanášena v lázni kyseliny chromové. Základní nátěr je založen na epoxidové pryskyřici. Nátěr nabízí vynikající stabilitu, protikorozivní vlastnosti vůči chemikáliím, rozpouštědlům i palivům.



Obr. 4.3-1: Vícevrstvý materiál obrobku [1]

Tento hliníkový potažený materiál byl podroben pokusnému frézování, při kterém bylo použito pět různých geometrií nástroje a třicet různých nastavení řezných podmínek. Byl zkoumán vliv těchto podmínek na tvoření otřepů a kloboučku a možnosti jejich minimalizace. Mezi řezné parametry, které byly měněny, patří otáčky vřetena n_s , orbitální otáčky n_o a axiální posuv na zub. Všechny použité parametry jsou vypsány v Tab. 4.3-1. Frézování se provádělo nesousledným způsobem pro každý typ nástroje. Sousedné frézování děr bylo testováno s nastavením orbitálních otáček na n_o 199 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ a s použitím minimálního množství mazání.

Použité řezné parametry		
Otáčky vřetena n_s [ot·min ⁻¹]	Orbitální otáčky n_o [ot·min ⁻¹]	Axiální posuv f_a [mm]
18 000	199	0,0033
21 000	299	0,0066
24 000	399	---
27 000	---	---
30 000	---	---

Tab. 4.3-1: Použité řezné parametry [1]

4.3.1 Geometrie nástroje a síly při frézování děr do potaženého hliníku 2024 T351 [1]

Použité nástroje jsou dvoubřité frézy ze slinutého karbidu. Všechny pět nástrojů je zobrazeno na Obr. 4.3-2. Frézy 1, 2, 3 a 4 jsou bez povlaku a mají rozdílnou geometrii v rozsahu čelního ostří. Rozdílné varianty geometrií jsou porovnány. Nástroj 5 je vyroben ze slinutého karbidu a je potažen diamantovým povlakem, pomocí CVD procesu. Všechny nástroje mají průměr 3 mm. Další krok pokusů ukazuje vliv některých prvků geometrie nástroje na formování kloboučku a otřepů. Tyto výsledky jsou pak základem pro lepší pochopení procesu a další cílené úpravy nástrojů pro frézování děr.

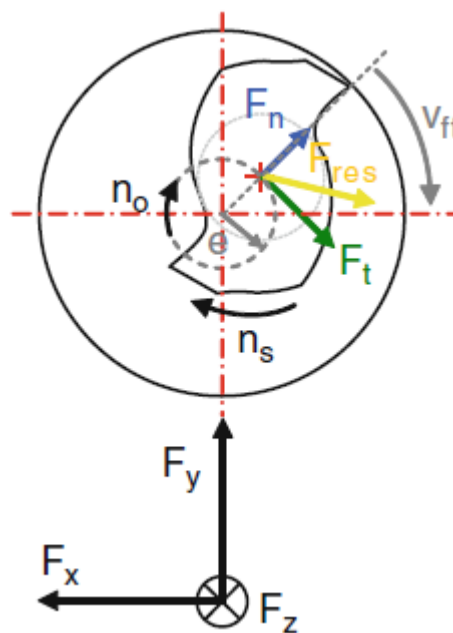


Obr. 4.3-2: Geometrie frézovacích nástrojů [1]

Během experimentu byly měřeny síly pomocí tří-složkového dynamometru Kistler (složky F_x , F_y , F_z). Pro lepší použití, byly síly přepočteny do rotačních sil, kterými jsou tangenciální síla F_t , normálová síla F_n a výsledná síla F_{res} (Obr. 4.3-3).

Při experimentálním frézování byla měřena axiální síla F_z u nástrojů 1, 2, 3 a 4. Všechny experimenty byly prováděny třikrát a byla měřena závislost síly F_z na řezné rychlosti v_c , za použití dvou různých axiálních posuvů f_a a tří různých orbitálních otáček n_o . Hodnoty použitých f_a a n_o jsou zapsány v Tab. 4.3-1. Největší axiální síly F_z pro všechny použité parametry byly dosaženy s nástrojem 1. Při frézování s větším posuvem $f_a = 0,0066$ mm klesá axiální síla F_z s rostoucí řeznou rychlostí. Větší axiální posuv vytváří větší axiální sílu, než menší axiální posuv. Nejmenší axiální síly byly získány s nástroji 3 a 4.

Kromě axiální síly F_z , byla měřena stejným způsobem i závislost výsledné síly F_{res} . Stejně jako v předchozím případě, byly největší výsledné síly dosaženy s nástrojem 1. Při práci s velkým axiálním posuvem $f_a = 0,0066$ mm, klesá výsledná síla s rostoucí řeznou rychlostí. Nástroj 4 vykazoval při šetření nejmenší výsledné síly F_{res} .

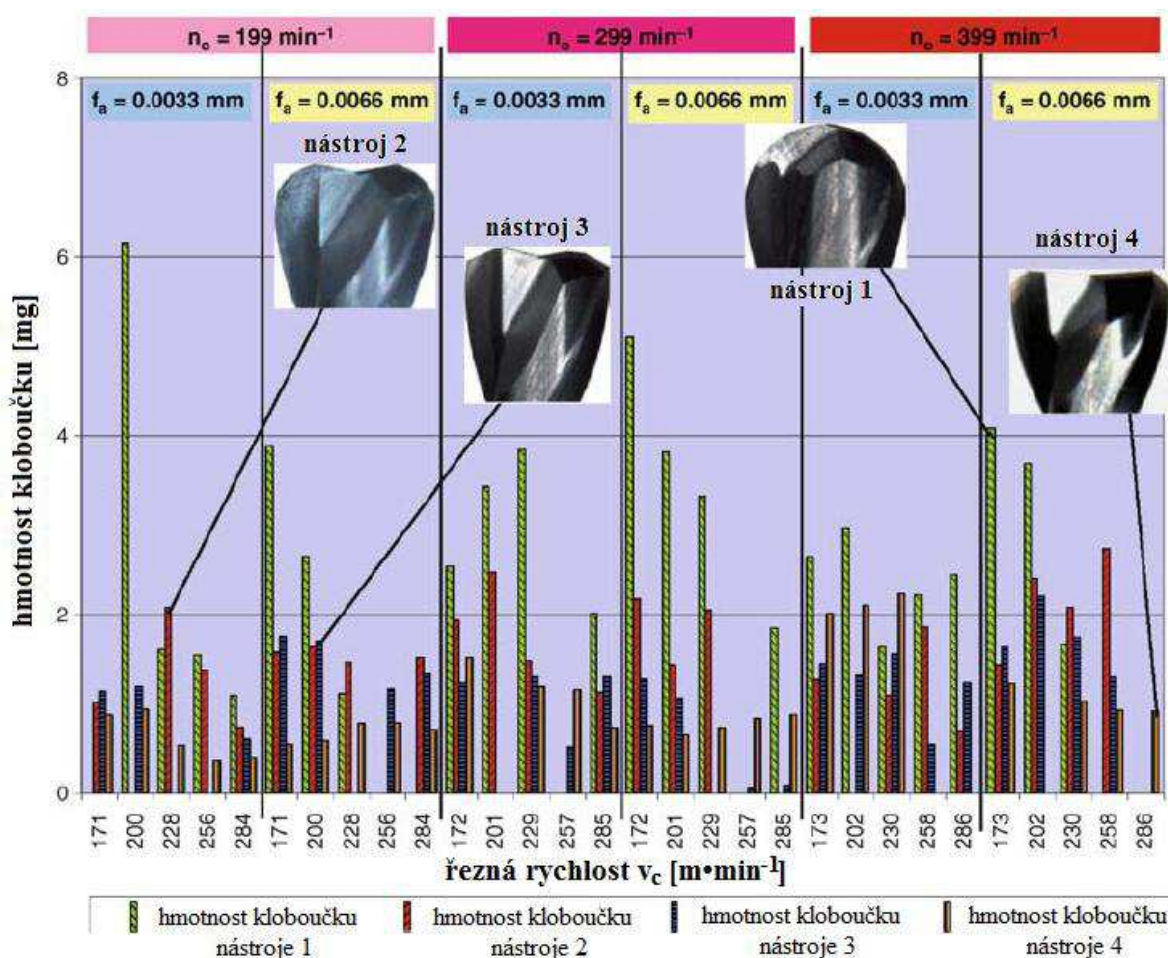


Obr. 4.3-3: Síly při frézování děr [1]

Katedra Technologie Obrábění

Tomáš Bakša

Na Obr. 4.3-4 je zobrazena průměrná hmotnost kloboučku, který se tvořil při frézování, v závislosti na řezné rychlosti s použitím dvou různých axiálních posuvů a tří orbitálních otáček. Nejmenší hmotnosti kloboučku produkoval nástroj 4 s řeznou rychlostí $v_c = 256 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, orbitálními otáčkami $n_o = 199 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ a malým axiálním posuvem $f_a = 0,0033 \text{ mm}$.



Obr. 4.3-4: Závislost hmotnosti kloboučku na řezných parametrech [1]

4.3.2 Minimalizace kloboučku a ořepů při frézování děr do hliníku 2024 [1]

Geometrie kloboučku a ořepů byla zkoumána pro nástroje 1, 2, 3 a 4. Řezné podmínky byly fixně stanoveny a jsou ukázány v Tab. 4.3-2. Frézování probíhalo nesousledně, bez použití minimálního množství mazání (MQL).

Řezné podmínky	
Orbitální otáčky n_o [$\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$]	199
Axiální posuv na zub f_a [mm]	0,0033
Řezná rychlost v_c [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	171

Tab. 4.3-2: Řezné podmínky pro nástroje 1, 2, 3 a 4 [1]

Obrázek Obr. 4.3-5 ukazuje poslední fáze tvorby kloboučku a ořepu při frézování díry do potaženého hliníku 2024 s nástrojem 1. Nástroj 1 produkuje velké a hmotné kloboučky a ořepy. To je způsobeno jeho plným zaoblením čelního ostří. Jednou z nevýhod použití této geometrie je výskyt nulové řezné rychlosti $v_c = 0 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ na vrcholu nástroje při vysokých axiálních silách. V rámci výzkumu, bylo tvoření kloboučku a ořepu s nástrojem 1 vyhodnoceno jako nejhorší.



Obr. 4.3-5: Tvoření kloboučku na potaženém hliníku 2024 s nástrojem 1 [1]

Obrázek Obr. 4.3-6 zobrazuje poslední fáze tvorby kloboučku a ořepu při frézování díry do potaženého hliníku 2024 s nástrojem 2. Povrch obrobku v oblasti výstupu se zakřivuje nejprve elasticky, poté plasticky, kvůli velké axiální síle. Klobouček je tlačěn ve směru axiálního posuvu a vyvíjí ohybovou zátěž. Ohybový moment je výsledkem axiální síly posuvu. Materiál, v tomto případě vrstva potaženého čistého hliníku, začne téct, pokud je napětí v ohybu větší než mez kluzu. Mez kluzu závisí na převládající teplotě. Zakřivený materiál nemůže absorbovat axiální sílu působící pod kloboučkem, protože je k materiálu připojena již jen vrstva nátěru. V místě vrcholu předního ostří je vytvořena trhлина. Objeví se malý klobouček a zbývající ořep na obrobku je zcela přeměněn obvodovým ostřím do konečného ořepu.



Obr. 4.3-6: Tvoření kloboučku na potaženém hliníku 2024 s nástrojem 2 [1]

Obrázek Obr. 4.3-7 ukazuje poslední fáze tvorby kloboučku a ořepu při frézování díry do potaženého hliníku 2024 s nástrojem 3. Proces tvoření kloboučku je stejný jako u nástroje 2



Obr. 4.3-7: Tvoření kloboučku na potaženém hliníku 2024 s nástrojem 3 [1]

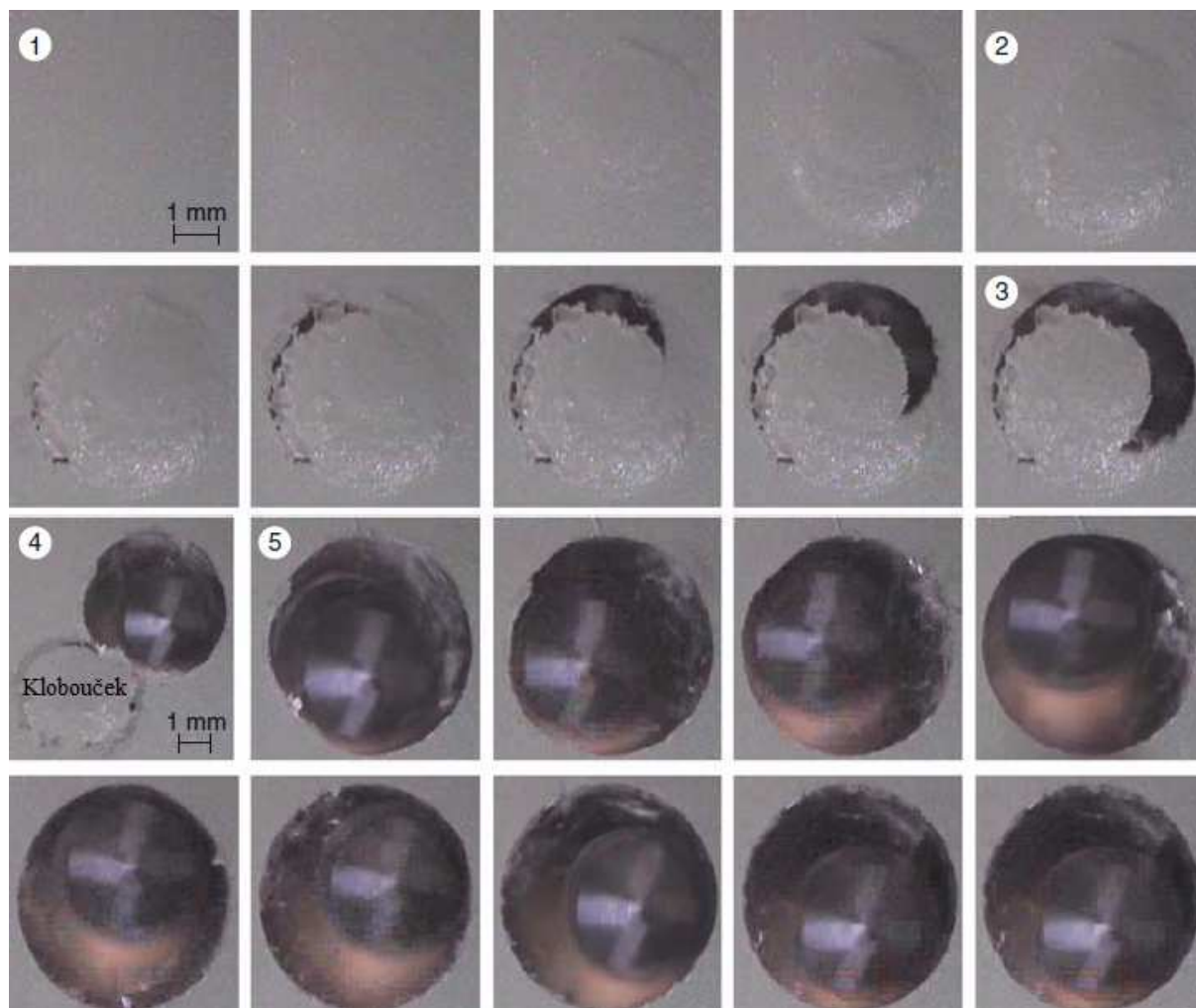
Obrázek Obr. 4.3-8 zobrazuje poslední fáze tvorby kloboučku a ořepu při frézování díry do potaženého hliníku 2024 s nástrojem 4. Tento nástroj produkuje nejmenší klobouček a ořep ze všech čtyř nástrojů. Proto je vzat bližší pohled na tvoření kloboučku nástrojem 4.



Obr. 4.3-8: Tvoření kloboučku na potaženém hliníku 2024 s nástrojem 4 [1]

Tvoření kloboučku s nástrojem 4 je znázorněno podrobněji na Obr. 4.3-9 ve dvaceti detailních pohledech. Postup tvorby toho kloboučku je vysvětlen v 5 krocích:

1. Nástroj je stále v dostatečné vzdálenosti od výstupního povrchu. Výstupní materiál není deformován elasticky, ani plasticky.
2. Povrch obrobku se v oblasti výstupu zakřivuje elasticky, poté plasticky vlivem velké axiální síly posuvu.
3. Tvoří se klobouček, který se drží pouze na okraji v tenkém rozmezí. Axiální síla působí na klobouček pouze na okrajové hraně.
4. Zbývající materiál není schopen absorbovat axiální sílu působící pod kloboučkem. V oblasti čelního ostří se již netvoří tříška, dochází pouze k tvarování kloboučku. Klobouček je na okraji, v místě přechodu mezi kloboučkem a obrobkem, tlačěn a plastická deformace postupuje, až dokud není klobouček oddělen od obrobku obvodovým řezem.
5. Zbývající otřep na obrobku je následně obvodovým ostřím přeměněn na konečný otřep.

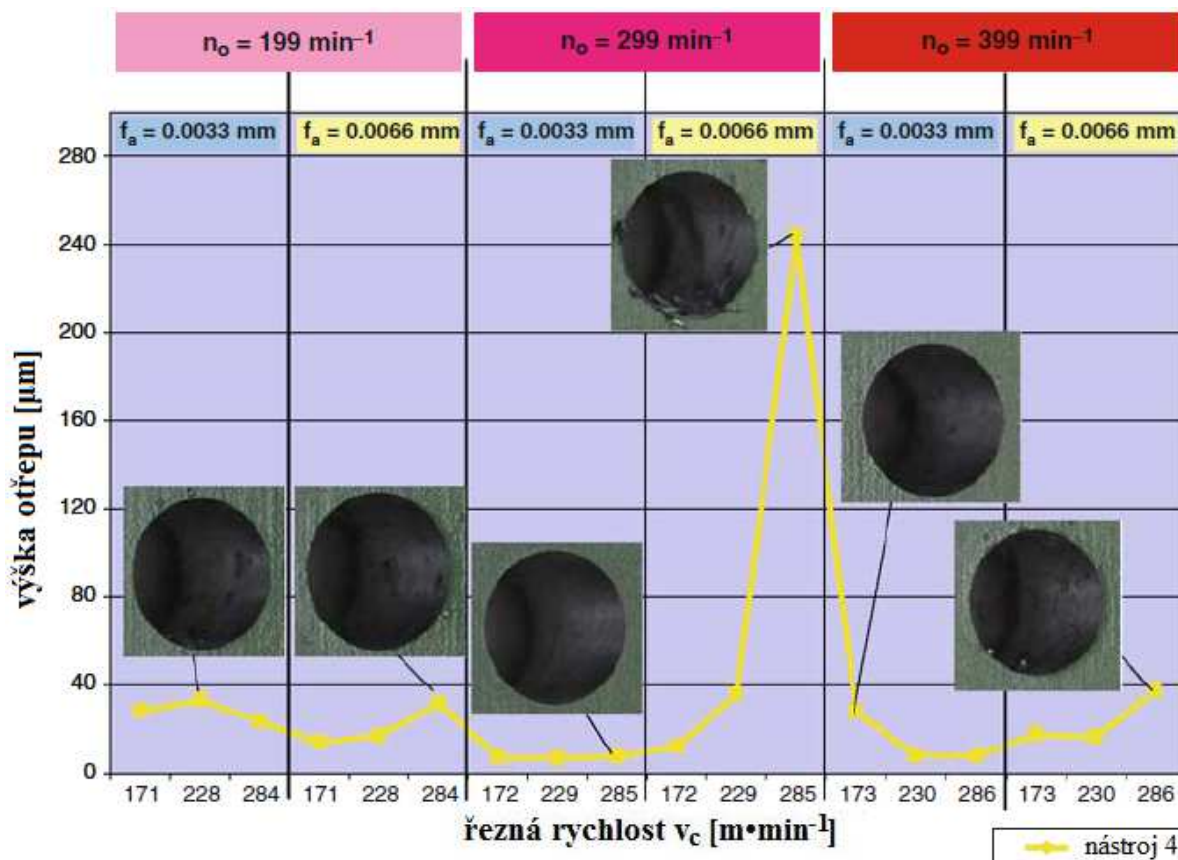


Obr. 4.3-9: Tvoření kloboučku na potaženém hliníku 2024 s nástrojem 4 (nesousledné frézování, bez MQL) [1]

Kromě nesousledného frézování, provedli výzkumníci, s použitím nástroje 4, i frézování sousledné. Ukázalo se, že strategií sousledného frézování jsou obecně produkovány větší kloboučky, než při nesousledném frézování děr.

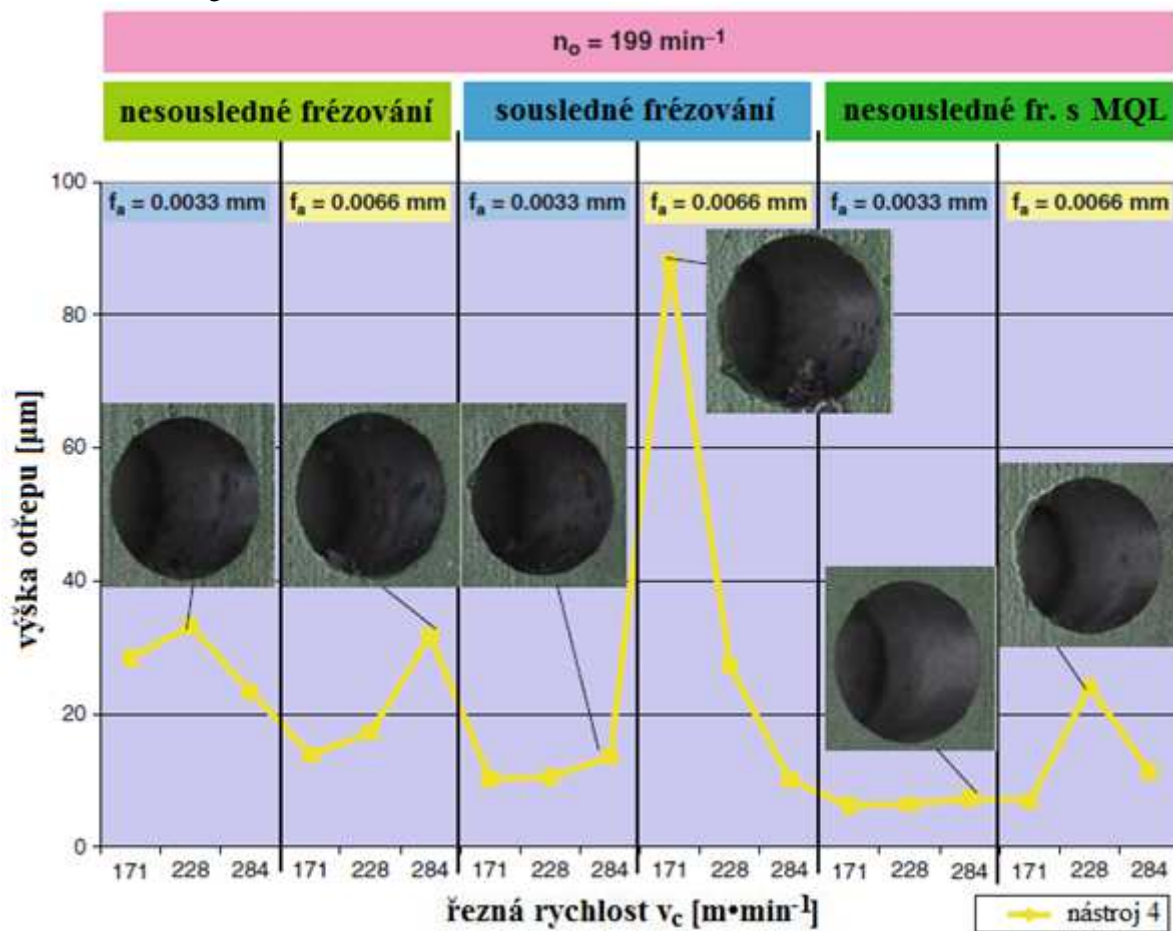
Dále bylo s nástrojem 4 provedeno nesousledné frézování s použitím minimálního množství mazání (MQL). Tato procesní strategie produkuje obecně větší klobouček, než nesousledné frézování děr nasucho. To může být způsobeno mikro-vrstvou mazacího filmu, který vzniká mezi materiálem a čelním ostřím. To přispívá ke kluzu potahového materiálu přes čelní ostří. Mikro-vrstva mazacího filmu brání potřebným adhezivním silám mezi materiálem kloboučku a čelním ostřím. Nastane zvýšený tvářící proces.

Následující diagram (Obr. 4.3-10) znázorňuje tvoření otřepů v závislosti na řezné rychlosti s použitím dvou různých axiálních posuvů f_a a tří orbitálních otáček n_o pro nástroj 4. Diagram ukazuje, že s větším axiálním posuvem a zvětšující se řeznou rychlostí se tvorba otřepů zvyšuje.



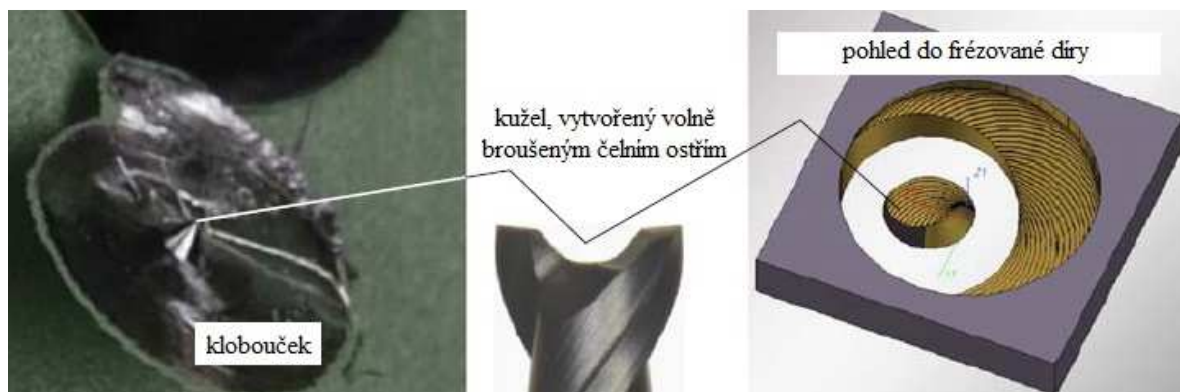
Obr. 4.3-10: Velikost otřepů s nástrojem 4 v závislosti na řezných parametrech [1]

Obrázek Obr. 4.3-11 ukazuje tvoření otřepů v závislosti na řezné rychlosti s použitím dvou axiálních posuvů f_a s nástrojem 4 pro různé frézovací strategie. Nejnižší otřepy byly naměřeny u nesousledného frézování s použitím minimálního množství mazání (MQL).



Obr. 4.3-11: Velikost otřepů s nástrojem 4 v závislosti na řezných parametrech a frézovací strategii [1]

Frézování děr do potaženého hliníku 2024 T351 s nástrojem 5, jehož geometrie je zobrazena na Obr. 4.3-12, se ukázalo jako nevýhodné. Geometrie nástroje 5 má sklón produkovat velké otřepy, kvůli jeho volně broušeným čelním břitům. Mezi oběma čelními ostrími vzniká na výstupním materiálu malý kužel, který vytváří velký axiální tlak (Obr. 4.3-12). Potahový materiál je vysoce tvarován, zatímco v oblasti okraje kloboučku materiál praská. Zakřivený výstupní materiál není oddělen obvodovým ostrím od obrobku, místo toho praská kvůli vysoké plastické deformaci. Zbývající otřep, je následně přeměněn obvodovým ostrím do konečného otřepu.

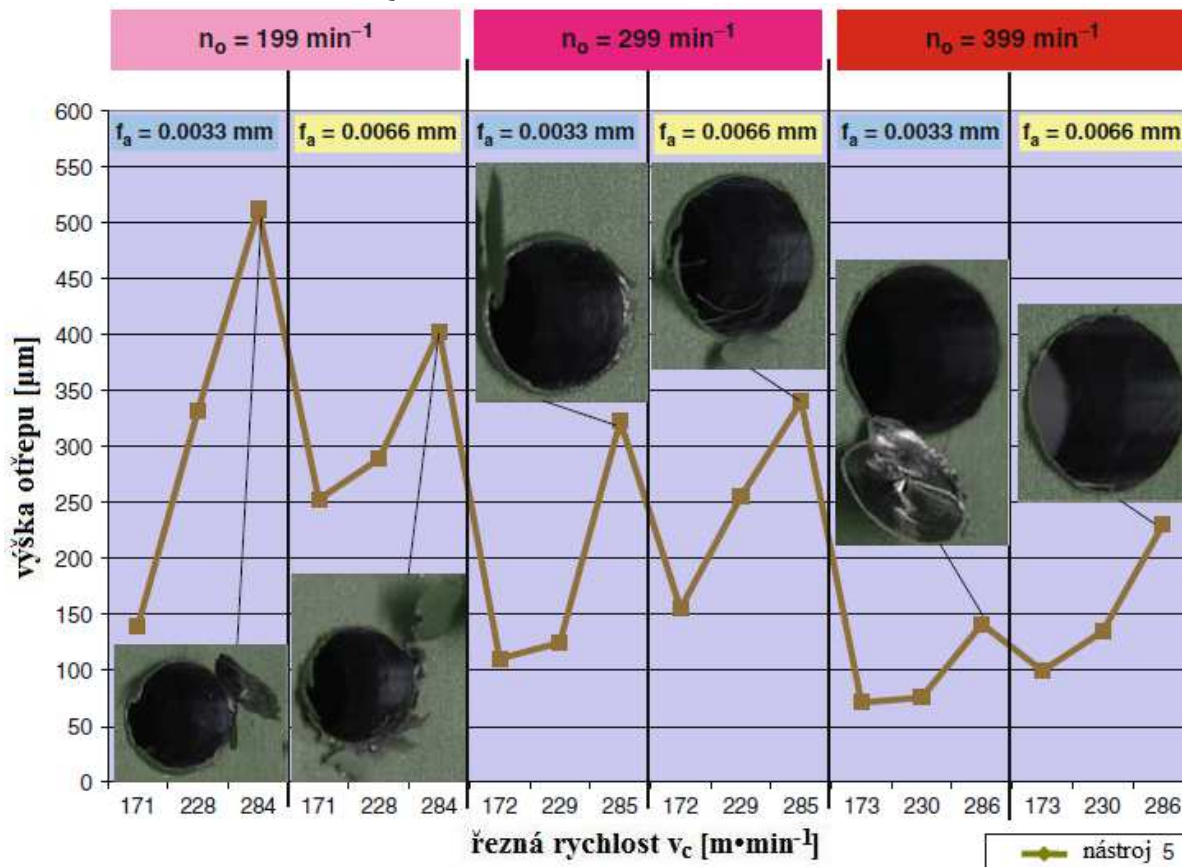


Obr. 4.3-12: Klobouček s kuželem, nástroj 5 [1]

Katedra Technologie Obrábění

Tomáš Bakša

Otřepy, které se tvoří při frézování děr do potaženého hliníku 2024 s nástrojem 5, jsou zobrazeny na Obr. 4.3-13, ukazující velikost otřepů v závislosti na řezných parametrech. Při nastavení velké hloubky řezu na jednu otáčku (nízké orbitální otáčky), dochází s rostoucí řeznou rychlostí k vysoké tvorbě otřepů. Stejně jako u nástroje 4 se i tady nejmenší otřepy tvoří u nesousledného frézování s MQL.



Obr. 4.3-13: Velikost otřepů s nástrojem 5 v závislosti na řezných parametrech [1]

4.4 Shrnutí kapitoly [1]

Výzkumníci provedli pokusy, při kterých zkoumali tvoření kloboučku a otřepů během frézování děr do hliníkových materiálů. Byly použity různé geometrie frézovacích nástrojů, různé řezné podmínky a procesní strategie, aby byl zjištěn vliv těchto faktorů na tvoření otřepů a kloboučku. Následně byly vyhodnoceny způsoby, jak minimalizovat vznik otřepů a kloboučku. Během šetření se dosáhlo následujících závěrů:

První část šetření ukázala tři formy tvoření kloboučku v hliníku 2024 T351. Tvoření srpkovitěho kloboučku je nejlepší formou pro výrobu. Srpkovitý klobouček vzniká s velkým axiálním posuvem $v_{f,a} = 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a velkou hloubkou řezu $a_p = 0,75 \text{ mm}$ na jednu orbitální otáčku. Pro průměry frézované díry větší než 5 mm platí, že poměr mezi průměrem díry (D) a průměrem nástroje (d): $D/d \geq 1,45$ ukazuje nejlepší výsledky, pokud jde o tvoření kloboučku. Při frézování díry s průměrem $D \geq 5 \text{ mm}$ je možno použít minimální množství mazání, bez toho, aby se snížil odvod třísky pomocí vakua (pokud je $D/d \geq 1,45$).

Shrnutím výsledků druhé části šetření, geometrie nástroje 4 (ostrá čelní ostří bez poloměru a s broušeným úhlem čela 10°) ukazuje nejlepší výsledky týkající se řezných sil a tvoření kloboučku a otřepů v potaženém hliníku 2024 T351 s nátěrem. Sousedné frézování s použitím MQL produkuje větší kloboučky, než nesousledné frézování na sucho. V tomto pokusu jsou nejmenší kloboučky, které lze snadno odvést vakuem, tvořeny s řeznou rychlostí

Katedra Technologie Obrábění

Tomáš Bakša

$v_c = 256 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, orbitálními otáčkami $n_o = 199 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ a malým axiálním posuvem $f_a = 0,0033 \text{ mm}$ (Obr. 4.4-1).



Obr. 4.4-1: Nejmenší klobouček, nástroj 4 [1]

5 Speciální nástroje na tvoření děr bez otřepů

V dnešní době je snaha vyvinout speciální vrtací nástroje, které by byly schopny vytvořit díru do obrobku a zároveň odstranit vzniklé otřepy na vstupní i výstupní straně obrobku. Tyto speciální nástroje slučují proces vrtání a proces odjehlování do jedné operace. Odjehlení obrobku je dosaženo pomocí vysouvací břitové destičky.

5.1 Speciální „BurrFree“ vrták [10]

Vrták „BurrFree“, vyvinutý a patentovaný společností E-Z Burr Tool Company, nabízí možnost účinnějšího vrtacího procesu tím, že kombinuje dva nezávislé obráběcí procesy do jednoho. Tento speciálně kombinovaný nástroj spojuje kopinatou břitovou destičku s trnem karbidového nástroje a nabízí perfektní jednokrokové vrtání bez otřepů. Nástroj vyvrtá díru a poté odstraní otřepy na obou stranách (vstupní i výstupní) díry v jedné operaci. Tento efekt společně s výjimečnou kvalitou nástroje, trvanlivostí a užitečností se promítne do některých významných úspor. „BurrFree“ vrták je zobrazen na Obr. 5.1-1.

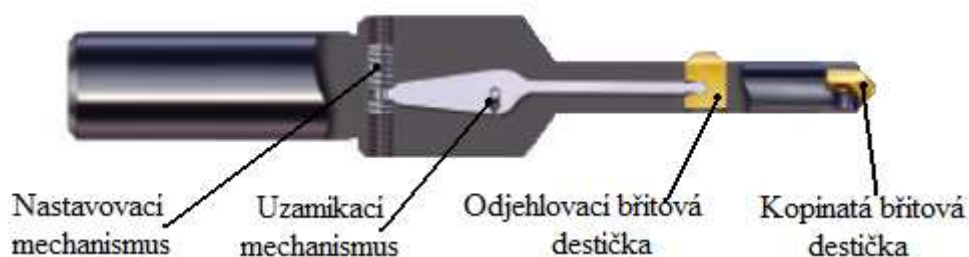


Obr. 5.1-1: BurrFree vrták od společnosti E-Z Burr [10]

„BurrFree“ vrták je univerzální nástroj, který lze kombinovat například s přesným nástrojem na tvorbu sražení od téže společnosti. To umožňuje vrtat díru, vytvořit přesné zkončení na vstupní straně díry a odstranit otřepy na výstupu, vše v jediné operaci.

Vrtákem je možné odstranit otřepy na obou nebo pouze na výstupní straně díry. Je vhodný pro houževnaté a těžké materiály, jako je nerez ocel, nízkouhlíková ocel a konstrukční ocel, dále je vhodný pro vysoko teplotní slitiny. Břitové destičky jsou dostupné ve dvou provedeních (T a D).

Patentovaný uzavírací systém umožňuje rychlou výměnu destičky během několika sekund. Design nástroje je uzpůsoben tak, aby se v případě opotřebení jednoduše vyměnila pouze břitová destička bez zbytečného odstraňování dalších součástí. Na Obr. 5.1-2 je ukázán řez vrtákem.



Obr. 5.1-2: Řez vrtákem [10]

„BurrFree“ vrták je velmi populární pro jeho efektivnost a nabízí celou řadu standardních velikostí pro díry o průměru 9,5 mm a větší. Pro správné použití vrtáku je doporučeno prodiskutovat možnosti aplikace s výrobcem vrtáku. Existují totiž určitá omezení, co se týče hloubky vrtání a tloušťky materiálů, které je nástroj schopen zvládnout. Kromě toho je velmi důležitý správný výběr kopinaté VBD v závislosti na vrtaném materiálu, protože vrtací a odjehlovací nástroj bude fungovat jen tak dobře, jak vhodně je zvolena břitová destička.

5.2 Nástroj VEX-S a COMBI [11], [12]

Vrtací nástroj VEX-S (Obr. 5.2-1) vyvinula firma HEULE, jako snahu zkombinovat více obráběcích procesů a snížit tak čas potřebný k obrábění. Nástroj VEX spojuje proces vrtání a proces sražení hran a to jak na přední, tak i zadní straně obrobku. Tím ušetří čas za výměnu nástroje, čas obrábění, prostor pro nástroje a zároveň zachová vysokou kvalitu. Geometrie nástroje VEX-S limituje problémy s přetáčením třísky a odstraňuje jakékoliv přídavné odjehlovací procesy. Schéma vrtání je znázorněno na Obr. 5.2-3.

VEX-S je vysoce výkonný monolitní šroubovitý vrták ze slinutého karbidu. Sražení hran a zároveň odstranění otřepů je zajištěno pomocí břitové destičky SNAP (od společnosti HEULE), která je snadno použitelná a nabízí rychlé změny funkce, takže nástroj nikdy neopustí stroj.

Nástroj je vynikající pro obrábění menších otvorů. Šroubovitou koncovku vrtáku je možné vyměnit, nebo přebrousit a znovu povlakovat pro optimální efektivitu nákladů. Nástroj umožňuje vrtat díry o průměrech 5 mm až 10,5 mm. Vrták VEX-S se používá například na tvoření a odjehlení děr pro šrouby do přírub (Obr. 5.2-2).



Obr. 5.2-1: Nástroj VEX-S [12]

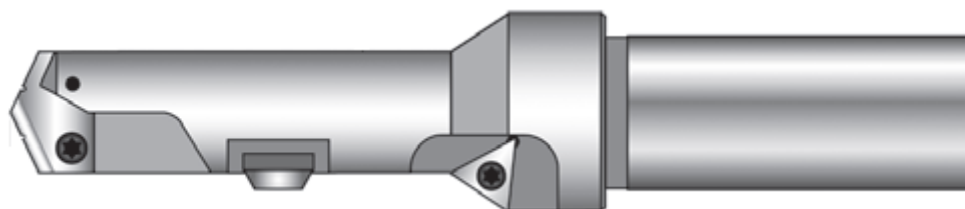


Obr. 5.2-3: Schéma vrtání [12]



Obr. 5.2-2: Příklad použití - příruha [12]

Mezi další nástroje, které vyvinula společnost HEULE, patří i nástroj COMBI (Obr. 5.2-4). Jednoduchý nástroj COMBI je stejně jako nástroj VEX-S kombinací vrtacího nástroje a nástroje na sražení hran (odjehlení). Komplexnější nástroj COMBI umožňuje navíc ještě provádět zahloubení. To vše v jediném kroku. Sražení hran je zajištěno břitovou destičkou stejného typu, jako u nástroje VEX-S. Samotné vrtání zajišťuje kopinatá břitová destička. Nástroj se ukázal jako velmi účinný v automobilovém průmyslu a to například na obrábění kol, náprav, nebo kotoučových brzd.



Obr. 5.2-4: Nástroj COMBI [11]

6 Závěr

V této bakalářské práci byly popsány dva nejproduktivnější způsoby tvorby děr do hliníkových profilů a to konkrétně vrtání a frézování. Byly popsány rozdíly mezi oběma metodami a jejich vzájemné výhody a nevýhody. Ke každé z metod jsou ukázány příklady nástrojů. Dále se bakalářská práce zabývá problematikou otřepů, kde byly určeny negativní vlivy otřepů, jejich charakteristika a klasifikace do typů A, B, C podle způsobu jejich vzniku. Byly určeny hlavní faktory ovlivňující vznik otřepů při vrtání a frézování děr do hliníku. Pomocí rešerší na experimenty byly stanoveny možnosti minimalizace vzniku otřepů při zhotovování děr do hliníku. Jejich vyhodnocením se dosáhlo následujících závěrů:

- Významný vliv na tvoření otřepů má geometrie nástroje, jejíž úpravou je možno redukovat vznik otřepů.
- Odstraněním příčného ostří a zvětšením vrcholového úhlu na 139° u běžného vrtáku se dosáhne vzniku menších otřepů, popřípadě vzniku kloboučku.
- Z vrtáků s modifikovanou geometrií dosáhl nejlepších výsledků stupňovitý vrták ($D_1 = 10$ mm) s menším průměrem $D_2 = 9$ mm a úhlem přechodu $\varepsilon_2 = 40^\circ$.
- Při planetovém frézování děr je snaha o tvoření kloboučku srpkovitým způsobem, který produkuje nejmenší otřepy.
- Tvoření srpkovitého kloboučku se dosáhne pomocí velké hloubky záběru a_p a velké rychlosti posuvu $v_{f,a}$ nebo nastavením poměru mezi průměrem díry a nástroje na $D/d \geq 1,45$.
- Z frézovacích nástrojů dosáhl nejlepších výsledků nástroj 4, který měl ostrý profil čelního ostří bez poloměru a vybroušený úhel čela na 10° .
- Nejmenší otřepů při frézování se dosáhlo s řeznou rychlostí $v_c = 256$ m·min⁻¹, orbitálními otáčkami $n_o = 199$ ot·min⁻¹ a malým axiálním posuvem $f_a = 0,0033$ mm.

V závěru práce byly představeny speciální vrtací nástroje, pomocí ních je možné vrtat díry a zároveň odstranit vzniklé otřepy v jednom kroku. Tyto nástroje jsou omezeny různými faktory, jako je například tloušťka materiálu, nebo poměrně velký prostor pro vyjetí nástroje.

Z důvodu odstávky na halových laboratořích KTO nebylo bohužel možné provést vlastní experimenty.

7 Literatura

- [1] AURICH, J. C.; DORNFELD, D. *Burrs - Analysis, Control and Removal*. Berlin Heidelberg: Springer, 2010. ISBN 978-3-642-00568-8
- [2] GAITONDE, V. N.; KARNIK, S. R.; aj. Taguchi optimization in drilling of AISI 316L stainless steel to minimize burr size using multi-performance objective based on membership function. *Journal of materials processing technology*. Elsevier, 2007. vol. 202, s. 374–379.
- [3] KO, S.-L.; CHANG, J.-E. Development of drill geometry for burr minimization in drilling. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2003, vol. 52, s. 45–48.
- [4] KO, S.-L.; CHANG, J.-E.; YANG, G.-E. Burr minimizing scheme in drilling. *Journal of Materials Processing Technology*. Elsevier, 2003. vol. 140, s. 237–242.
- [5] KO, S.-L.; LEE, J.-K. Analysis of burr formation in drilling with a new-concept drill. *Journal of materials processing technology*. Elsevier, 2001. vol. 113, s. 392–398.
- [6] BENÝR, P. *Vysoce výkonné vrtáky*. [online]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/vysoce-vykonne-vrtaky.html>>
- [7] NOVÁK, Z. *Nové řezné nástroje pro výrobu - 2. část*. [online]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nove-rezne-nastroje-pro-vyrobu-2-cast.html>>
- [8] PLÁNIČKA, F. *Efektivní obrábění hliníku*. [online]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/efektivni-obrabeni-hliniku.html>>
- [9] ALEX GROUP. *Obrábění hliníku a slitin*. [online] [cit. 2011-11-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.axelgroup.cz/CZ/o-hliniku/obrabeni-hliniku-a-slitin.aspx>>
- [10] E-Z BURR TOOL. *BurrFree Drill*. [online]. Dostupný z WWW: <http://www.ezburr.com/products/burrfree_drill.php>
- [11] HEULE TOOL. *COMBI*. [online]. Dostupný z WWW: <<http://www.heuletool.com/documents/Combi08.pdf>>
- [12] HEULE TOOL. *VEX-S*. [online]. Dostupný z WWW: <http://www.heuletool.com/documents/VEX-S_HTC012_webversion.pdf>
- [13] NIAGARA CUTTER. *Solid Carbide*. [online]. Dostupný z WWW: <<http://www.niagaracutter.com/solidcarbide/index.html>>
- [14] SILMAX. *High speed milling cutter for aluminum*. [online]. Dostupný z WWW: <<http://www.directindustry.com/prod/silmax/high-speed-milling-cutters-for-aluminum-12051-62382.html>>
- [15] IYER, R.; aj. Helicalmilling: An enabling technology for hard machining precision holes in AISI D2 tool steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007. vol. 47, s. 205–210.
- [16] KO, S.-L.; LEE, K. U. Development of deburring tool for burrs at intersecting holes. *Journal of materials processing technology*. Elsevier, 2008. vol. 201, s. 454–459.
- [17] LEE, K.; DORNFELD, D. A. Micro-burr formation and minimization through process control. *Precision Engineering*. 2005. vol. 29, s. 246–252.