



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OBRÁBĚNÍ TĚŽKO OBRÁBITELNÝCH MATERIÁLŮ

MACHINING OF HARD-TO-MACHINE MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jakub Tejkl

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jakub Tejkl

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Obrábění těžkoobrobitelných materiálů

v anglickém jazyce:

Machining of hard-to-machine materials

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá rozdělením těžkoobrobitelných materiálů, příčinami jejich zhoršené obrobitelnosti, návrhem experimentálních zkoušek, jejich vyhodnocením.

Cíle bakalářské práce:

Úvod.

Teoretický rozbor problému.

Návrh experimentálních zkoušek.

Realizace experimentů, jejich statistické vyhodnocení.

Diskuze.

Závěry.

Seznam odborné literatury:

- HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. Praha. MM publishing s. r.o. 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- KOCMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. 2. vyd. Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005. ISBN 80-214-3068-0.
- FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. Praha. Scientia, s. r. o. 1997. ISBN 91-97 22 99-4-6. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook.
- PÍŠKA, M., POLZER, A. Wear of coated solid carbide end mills when machining of hardened steels in dry conditions. In: Proceedings of the 3rd International Tools Conference, ITC 2003. UTB Zlín, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství, 21.-22.5.2003. ISBN 80-7318-135-56
- SHAW, M.C. Metal Cutting Principles. Oxford University Press, 2nd ed., 2005, pp. 651, ISBN 0-19-514206-3
- BARÁNEK, I. Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábanie. TU Alexandra Dubčeka v Trenčíne, 1.vyd., Slovensko, Trenčín, s. 112. ISBN 80-8075-013-0.
- BARÁNEK, I., ŠANDORA, J. Výroba vybraných súčiastok špeciálnej techniky. TnUAD, Trenčín, 2004 s. 212, ISBN 80-8075-013-0.
- MARINESCU, I.D. et al. Tribology of abrasive machining processes. 1st ed. William Andrew, Norwich, 2004, pp.724, ISBN 0-8155-1490-5.
- LEYENS, Ch., PETERS, M. Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications. 2nd ed., Willet-VCH, Koln, 2005, p. 513. ISBN 3-527-30534-3.

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 20.11.2011

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá studiem obrábění těžkoobrobitelných materiálů. V první části jsou rozděleny těžkoobrobitelné materiály a následuje jejich analýza. V další části se práce zaměřuje na problematiku obrobitelnosti jednotlivých slitin. Závěrečná část práce je věnovaná experimentu, jeho statistickému zpracování a nakonec následnému vyhodnocení.

Klíčová slova

korozivzdorná ocel, titanové slitiny, niklové slitiny, obrobitelnost materiálu, řezné nástroje, chlazení

ABSTRACT

This bachelor thesis studies the machining of hard-to-machine materials. The first part of the thesis considers hard-to-machine materials and analyses them. The next part of the study focuses on individual alloy machinability issues. The final section of the thesis is devoted to experiment, statistical analysis and subsequently to its evaluation.

Keywords

stainless steel, titanium alloys, nickel alloys, machinability of the material cutting tools, cooling

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TEJKL, Jakub. *Obrábění těžkoobrobitelných materiálů: Bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 50s., Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Obrábění těžkoobrobitelných materiálů** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

24.5.2012

Datum

Jakub Tejkl

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému vedoucímu práce prof. Ing Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce a Milanu Rusiňákovi za výpomoc při realizaci experimentu. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Josefu Bednářovi, Ph.D. za pomoc při statistickém zpracování dat.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH	7
ÚVOD	9
1 Rozdělení těžkoobrobitelných materiálů	10
1.1 Analýza korozivzdorných ocelí	10
1.1.1 Vliv přísadových prvků na vlastnosti korozivzdorných ocelí	11
1.2 Analýza titanu a jeho slitin.....	12
1.2.1 Slitiny titanu	13
1.2.2 Vliv přísadových prvků na vlastnosti titanových slitin	15
1.3 Analýza niklu a jeho slitin	15
1.3.1 Slitiny niklu	16
1.3.2 Vliv přísadových prvků na vlastnosti niklových slitin	19
2 Obrobitelnost těžkoobrobitelných materiálů.....	20
2.1 Obrobitelnost korozivzdorných ocelí	21
2.1.1 Vliv legujících prvků na obrobitelnost.....	21
2.1.2 Teplo při řezání.....	21
2.1.3 Tvorba třísky	22
2.1.4 Oblast obrobitelnosti	22
2.2 Obrobitelnost titanových slitin.....	23
2.2.1 Vliv legujících prvků na obrobitelnost.....	23
2.2.2 Tvorba třísky	23
2.2.3 Použití řezných nástrojů.....	24
2.3 Obrobitelnost niklových slitin	25
2.3.1 Využití kryogenního chlazení	26
2.3.2 Mikrostruktura niklových slitin	27
2.3.3 Zpevňování za studena	28
2.3.4 Členění niklových slitin	28
3 Experimentální zkouška	30
Prepreg (uhlíkovo/epoxidový laminát)	31
3.1 Úvod do problematiky	31
3.2 Praktický experiment.....	32
3.2.1 Předběžné výpočty	32

3.2.2 Realizace experimentu.....	33
4 DISKUZE	43
ZÁVĚR	46
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	47
Seznam použitých symbolů a zkratek	49

ÚVOD

Práce se zabývá studiem problematiky obrábění těžkoobrobitelných materiálů, kam patří především korozivzdorné oceli (ať už austenitické, nebo feritické), titan, nikl a jejich slitiny. Do této skupiny kovů se řadí také kobalt.

Korozivzdorná ocel je ocel legovaná zejména chromem (10,5 - 13%), niklem a molybdenem, které výrazně zvyšují odolnost proti korozi. Strukturu i vlastnosti těchto ocelí výrazně ovlivňují legující prvky, které rozděluje korozivzdorné oceli na austenitické s hlavními legujícími složkami - Cr, Mo, Ni, dále na feritické oceli - Cr a na martenzitické - Cr, C nebo Ni. Hlavní požadavky, které jsou kladeny na korozivzdorné oceli, jsou odolnost proti působení chemických sloučenin a houževnatost. Kromě těchto nároků způsobuje jejich špatnou obrobitelnost také velmi nízká tepelná vodivost. Ke zlepšení obrobitelnosti lze použít jako přísadu síru.

Titan je stříbřitě bílý kov, který je sedmým nerozšířenějším kovem v zemské kůře. Vyskytuje se v minerálech, jako jsou například rutil (TiO_2) nebo ilmenit (FeTiO_3). Titan je tvrdý a velmi lehký kov, který je odolný proti korozi. Na druhé straně má své nevýhody. První negativní vlastností je nízká tepelná vodivost, což způsobuje velké opotřebování nástroje. Dalším nedostatkem je vysoká afinita, která vede k tomu, že se materiál navařuje na nástroj.

Nikl je kov bílé barvy. V přírodě je zastoupen v docela velkém množství a vyskytuje se ve formě oxidů nebo sulfidů. Je poměrně lehký prvek a velmi stabilní proti působení vzduchu i vody, proto se často používá k povrchovým ochranám jiných materiálů. Zhoršená obrobitelnost je způsobená tím, že během samotného obrábění dochází k opotřebení na čele nástroje ve tvaru žlábků a také na hřbetě vyměnitelné břitové destičky.

Obecně se těžkoobrobitelné materiály vyznačují vysokou tvrdostí, nízkou hmotností a jsou odolné proti korozi. Kombinace těchto vlastností vede k jejich zhoršené obrobitelnosti, protože dochází k navařování a tvoření nárůstků na nástroji a mají tendenci ke zpevňování za studena, což vede k namáhání a následnému opotřebení nástroje.

Studium těžkoobrobitelných materiálů je nezbytné zejména proto, že se uplatnění těchto materiálů stále rozšiřuje. Titan se už nepoužívá jenom v leteckém a kosmickém průmyslu, ale například také v lékařském průmyslu pro výrobu tělních implantátů, v lodním průmyslu na komponenty lodí i ponorek, v automobilovém průmyslu apod. Nikl slouží pro legování ocelí, ale nachází uplatnění také při ražbě mincí a při výrobě šperků.

V současnosti musíme brát na zřetel také ekonomické hledisko. V době nestabilní ekonomické situace musí být zajištěna stabilita výroby, tudíž její náklady nemohou být příliš vysoké, aby nebyla narušena výroba nejen vysoce produktivních výrobků z těžkoobrobitelných materiálů, ale i z ostatních materiálů.

1 ROZDĚLENÍ TĚŽKO OBRÁBĚLÝCH MATERIÁLŮ

Těžkoobrobitelné materiály lze rozdělit do tří základních skupin. Do první skupiny se řadí korozivzdorné oceli, ať už austenitické, feritické nebo martenzitické. Do druhé skupiny patří titan a jeho slitiny, do poslední nikl a jeho slitiny.

1.1 Analýza korozivzdorných ocelí

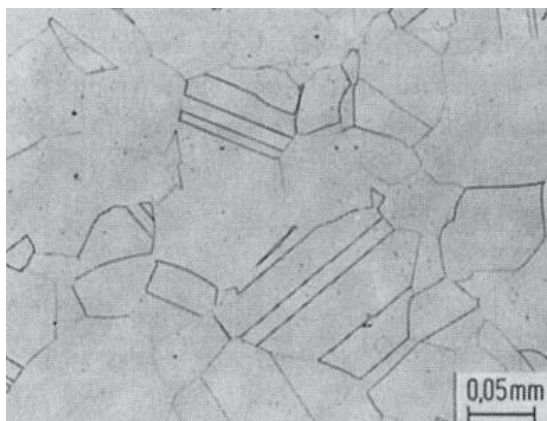
Název korozivzdorná ocel se používá pro oceli, které mají výrazně vyšší odolnost proti působení chemických sloučenin než ostatní oceli. Charakteristickým rysem je, že ocel má nízký obsah uhlíku. Mezi nejdůležitější legující prvky patří chrom (Cr), kterého obsahují tyto oceli minimálně 10,5%, nikl (Ni) a molybden (Mo). Pro zlepšení obrobitelnosti lze ocel dolegovávat sírou (S)⁵.

Odolnost vůči korozi je dána vytvořením tenké povrchové vrstvy, která má schopnost pasivity proti škodlivým vlivům prostředí a může se zlepšovat navyšováním množství obsahu chromu, molybdenu, ale i niklu.

Korozivzdorné oceli se dělí podle chemického složení do tří základních skupin⁵:

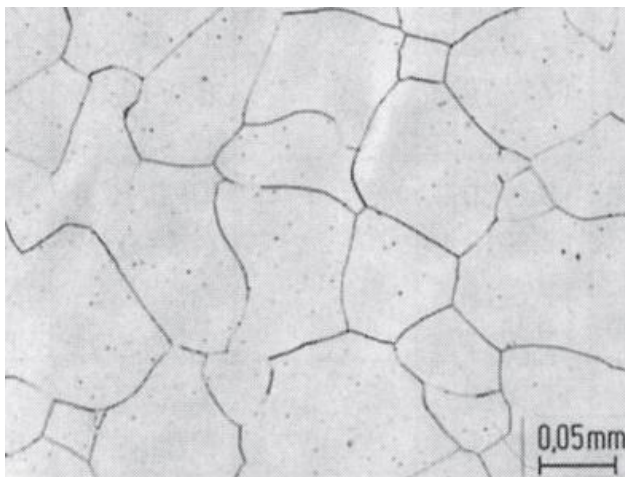
- 1) austenitické - hlavní legující prvky jsou chrom, nikl a molybden
- 2) feritické - hlavní legující prvek je chrom
- 3) martenzitické - hlavní legující prvky jsou chrom a nikl

Austenitické oceli mají velmi široké použití, protože se vyznačují příznivými mechanickými vlastnostmi, odolností proti korozi a také zpracovatelností. Důležitou podmínkou pro dosažení dobrých technologických vlastností je jemnozrnná struktura. Tyto oceli se tepelně zpracovávají zejména rozpouštěcím žíháním. Austenitické oceli se mohou legovat také dusíkem (N), který zlepšuje odolnost vůči korozi a pevnost⁵.



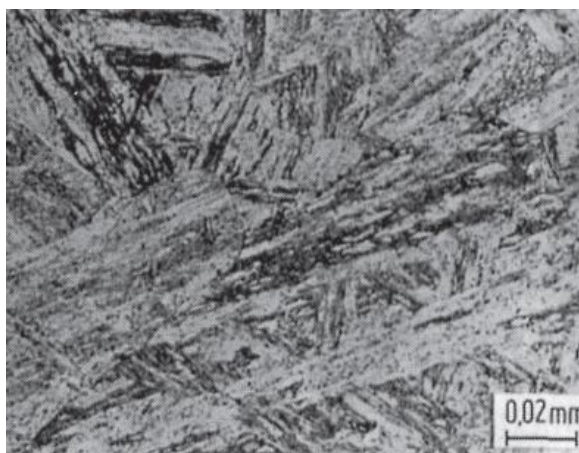
Obr. 1 Typická struktura korozivzdorné oceli s austenitickou strukturou⁵.

Feritické oceli podobně jako austenitické oceli musí mít jemnozrnnou strukturu pro dosažení požadovaných technologických vlastností. Některé oceli mohou obsahovat niob (Nb) nebo titan (Ti). Tyto prvky na sebe vážou uhlík a ocel je vhodná i pro svařování. Oproti austenitickým ocelím mají velmi dobrou odolnost proti korozi pod napětím⁵.



Obr. 2 Typická struktura korozivzdorné oceli s feritickou strukturou⁵.

Martenzitické oceli vznikají zakalením austenitických ocelí. Vyznačují se vysokou tvrdostí, která je vyšší s vyšším obsahem uhlíku (C), a širokou oblastí pevnostních hodnot. Vlastnosti se mohou ovlivnit tepelným zpracováním. Martenzitické oceli se po kalení zušlechťují a následně popouští při teplotách 650 - 750°C. Tím se dosáhne snížení pevnosti a zvýšení tažnosti⁵.



Obr. 3 Typická struktura korozivzdorné oceli s martenzitickou strukturou⁵.

1.1.1 Vliv přísadových prvků na vlastnosti korozivzdorných ocelí

Co se týče vlivu přísadových prvků na vlastnosti korozivzdorných slitin, tak se rozděluje na dva základní směry. Prvním jsou legující prvky, které tvoří ferit (feritotvorné), kam patří chrom, molybden a křemík. Dalším jsou legující prvky

tvořící austenit (austenitotvorné). Sem patří zejména uhlík, mangan, měď, nikl a dusík.

Uhlík (C)

Naprostá majoritní část korozivzdorných ocelí má malý obsah uhlíku, řádově 0,02 - 0,05%, poněvadž uhlík obecně zhoršuje svařitelnost. V dnešní době se často uhlík kompenzuje přidáváním dusíku, ten zvyšuje pevnost.

Nikl (Ni)

Nikl patří mezi přísadový prvek, který tvoří strukturu austenitu. Přítomnost niklu v korozivzdorných ocelích zvyšuje jejich odolnost proti působení chemických sloučenin. Také dochází ke změně mechanických vlastností. Slitiny jsou lépe tvárné, svařitelné, více houževnaté a žárupevné.

Molybden (Mo)

Molybden se řadí mezi prvky, které podporují tvorbu feritu. Tento prvek výrazně zlepšuje odolnost vůči korozi těchto ocelí proti naprosté většině prostředí, i proti kyselinám. Molybden zlepšuje také odolnost proti korozi v hloubce materiálů.

Chrom (Cr)

Chrom podobně jako molybden patří mezi prvky, které podporují tvorbu feritické struktury. Podobně jako předchozí prvky také chrom zlepšuje odolnost proti korozi.

Dusík (N)

Dusík má podobné vlastnosti jako nikl v korozivzdorných ocelích. Jedná se o prvek austenitotvorný, a proto může nikl také nahradit ve slitinách. S obsahem dusíku se zvyšuje pevnost a zlepšuje se svařitelnost¹³.

1.2 Analýza titanu a jeho slitin

Titan je v zemské kůře sedmým nejrozšířenějším kovem. Vyznačuje se leskle bílou barvou. V malých množstvích je zastoupen ve většině nerostů, mezi nejvýznamnější patří rutil (TiO_2 - oxid titaničitý) a ilmenit (FeTiO_3 - oxid železnato-titaničitý). Velmi hojně je zastoupen také na povrchu Měsíce³.

Titan se řadí k velmi tvrdým a lehkým kovům. Má velmi dobrou odolnost vůči korozi a v některých případech i vůči kyselinám. Záleží však na jeho úpravě povrchu, musí být dokonale vyleštěn. Titan i jeho slitiny mají značně dobré pevnostní charakteristiky a také extrémní schopnost tepelné zátěže (pracovní teploty slitin titanu mohou být až 600°C). Mezi nevýhody patří špatné třecí vlastnosti - titan se často zadírá⁸.

Obrobitelnost je velmi obtížná, protože povrch obrobku bývá často křehký vlivem kyslíku a dusíku z atmosféry. Titan disponuje také nízkou tepelnou

vodivostí, která zapříčiňuje nalepování na břit obráběného nástroje a tím jeho rychlejší otupení. Existuje rovněž šance vzplanutí titanových třísek⁸.

Titan se nemůže vyrábět běžnými hutními metodami, které se používají k výrobě jiných kovů. Příčinou je vysoká reaktivita s plyny za zvýšených teplot (nad 700°C). Proto se nejčastěji vyrábí redukcí par z chloridu titaničitého hořčíkem tzv. Krollovým postupem³:



Takto vzniklý titan je tuhý a pórovitý a musí se dále upravovat. Odstraňuje se zbylý chlorid hořečnatý a potom se čistí. Výroba tímto způsobem je finančně velmi nákladná³.

Dalším nedostatkem titanu je jeho vysoká cena. Je až třikrát dražší než legovaná ocel a pětikrát dražší než hliník. Kvůli jeho špatným vlastnostem, zejména špatné třecí vlastnosti, se nemůže používat pro spojení typu šroub - matice. Na druhou stranu slitiny titanu spadají mezi nejlepší konstrukční a antikorozní materiály⁷.

1.2.1 Slitiny titanu

Slitiny titanu se dělí podle rozpustnosti přísady ve fázi alfa a ve fázi beta:

1) **Slitiny α** mají nízkou měrnou hmotnost, pevnost až do hodnoty 1000 MPa a jsou odolné proti křehkému porušení. Mezi prvky, které stabilizují fázi α , patří hliník, dusík, kyslík a uhlík. Tyto slitiny se používají zejména v letectví a kosmonautice.

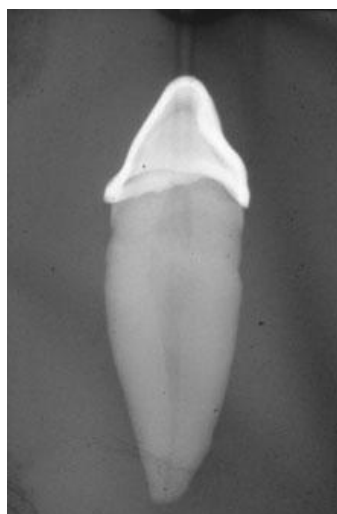
2) **Slitiny β** vykazují vlastnosti, jako jsou vysoká odolnost proti korozi a dobrá tvářitelnost za normální teploty. Jejich pevnost po vytvrzení dosahuje hodnot až 1600 MPa. Nevýhodou je vyšší měrná hmotnost než u ostatních titanových slitin a také vysoká cena. Mezi prvky, které stabilizují fázi β , patří molybden, niob, tantal a vanad.

3) **Slitiny $\alpha+\beta$** (heterogenní) se vyznačují širokou škálou vlastností, které se dají řídit jednak přísadami, jednak tepelným zpracováním. Mají horší svařitelnost než slitiny α v závislosti na chemickém složení. Disponují výbornými vlastnostmi při teplotě okolí a na druhou stranu zhoršenými při vyšších teplotách (nad 350°C). Mezi prvky, které stabilizují fázi α i β , patří mangan, železo, chrom, křemík, stříbro a vodík. Tyto slitiny se používají obzvláště na lopatky turbín a kompresorů a součásti leteckých podvozků.

Z důvodu nákladné výroby titanu se začal zpočátku využívat hlavně při výrobě letadel, ve zbrojním průmyslu a později v kosmonautice a při vývoji raketové techniky. Vzhledem k velké výhodě titanu, jeho nízké hmotnosti a tvrdosti se při výrobě letadel ušetřilo značné množství hmotnosti, téměř 40%.

Například u letadla společnosti Airbus (A380) tvoří titan a jeho slitiny nemalé množství váhy (9%). Velmi významnou roli zastal titan v kosmonautice a raketovém průmyslu, protože je stabilní i ve vakuu a za nízkých teplot, které panují v kosmickém prostoru. Proto také titan tvořil naprostou většinu hmotnosti raketoplánu (nad 80%)⁸.

Titan je čím dál více používán pro zařízení, která fungují v mořské vodě. Je to dáno tím, že titan je odolný proti mořské vodě a erozi. Proto se používá pro komponenty lodí a ponorek, jako jsou lodní šrouby, hřídele, kormidla apod.



Obr. 4 Rentgenový snímek korunky zubu z titanu⁹.

Dále se titan a jeho slitiny používají v automobilovém průmyslu, zejména ke snížení hmotnosti a také pro jeho odolnost vůči nízkým teplotám. Z těchto důvodů se auta vyvážejí do celého světa bez ohledu na klimatické podmínky. Další obrovské možnosti má použití titanu v lékařském průmyslu, zejména v oblasti výroby chirurgických nástrojů a nemůžeme opomenout ani umělé orgány. Jejich výhodou nesporně je, že nekorodují v lidském těle, bez problémů se spojí s kostí i tkánivem.



Obr. 5 Letoun Blackbird má prakticky celotitanovou konstrukci (poprvé vzlétlo v roce 1962)⁸.

V současnosti má titan velmi široké využití v mnoha oblastech lidské činnosti. Jako příklad můžeme uvést luxusní hodinky, výroba šperků, komponentů do fotoaparátů a v neposlední řadě sportovní potřeby, jako jsou například kola špičkových sportovců, tenisové rakety, golfové hole atd.⁸.

1.2.2 Vliv přísadových prvků na vlastnosti titanových slitin

Železo (Fe)

Nejznámější slitinou titanu se železem je ferotitan TiFe_2 , který absorbuje kyslík a také dusík. Jinak je železo v titanových slitinách považováno za nečistotu, která se v nich objevuje při redukci⁸.

Molybden (Mo) a chrom (Cr)

Primárním cílem těchto přísadových prvků je zvýšení pevnosti žárupevnosti. Slitiny titanu s molybdenem jsou až tisíckrát odolnější proti působení chemických sloučenin než čistý titan⁷.

Hliník (Al)

Nejdůležitější pro průmysl jsou slitiny titanu s hliníkem. Hliník zvyšuje žárupevnost, snižuje hmotnost i cenu. Hliník stabilizuje α -titan a zvyšuje jeho pevnost a modul pružnosti při zachování plasticity a houževnosti.

Mangan (Mn)

Mangan ve slitině s titanem zvyšuje její pevnost a také zlepšuje její plasticitu.

Měď (Cu)

Již malé množství tohoto prvku ve slitině titanu a mědi zvyšuje její žárupevnost.

1.3 Analýza niklu a jeho slitin

Nikl je kovový feromagnetický prvek, který se vyznačuje svou bílou barvou. Je to poměrně lehký kov a má docela velké zastoupení v zemské kůře. Často se objevuje v přírodě jako oxid, a to buď se železem (laterit a garnierit), nebo v podobě sulfidů (millerit - NiS a pentlandit - $(\text{Ni,Fe})_9\text{S}_8$). Nikl je také značně zastoupen v meteoritech, proto jsou největší lokality nálezů na místech, kam v minulosti dopadala tato vesmírná tělesa (např. Sudbury v Kanadě, Rusko atd.)³.

Nikl je velmi drahý kov. Má velmi dobrou korozní odolnost a je stálý vůči působení vzduchu, tudíž se mnohdy používá k povrchovým ochranám jiných kovů, zejména železa. Disponuje velice dobrými mechanickými vlastnostmi jak za normálních podmínek, tak i za zvýšených teplot. Další významnou vlastností

niklu je vysoká houževnatost i při nízkých hodnotách teplot, je rovněž dobře leštitelný⁸.

Způsobů výroby niklu je více. Jedním postupem je tzv. Mondův proces, kdy velmi čistý kov (čistota přesahuje 99,99%) získáme termickým rozkladem³:



1.3.1 Slitiny niklu

Slitiny niklu jsou pevnější, tvrdší a houževnatější než větší část slitin neželezných kovů. Velmi rychle se zpevňují při tváření, což vyžaduje opětované mezioperační ohřevy⁸.

Slitiny niklu se rozdělují podle použití na konstrukční slitiny niklu a slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi.

Konstrukční slitiny niklu

Ni - Cu

Vystupují pod obchodním názvem monely nebo Nicorros. Vyznačují se výbornou odolností proti korozi. Po vytvrzení mají vysokou pevnost (až 1200 MPa) za normální i zvýšené teploty. Mají také dobrou houževnatost a tepelnou vodivost. Zpravidla se používají komplexní monely s přísadami křemíku, manganu, železa a hliníku⁸.

Ni - Be

Obsah beryllia bývá zpravidla do 2%. Po vytvrzení dosahují pevnosti až 1800 MPa. Tyto slitiny jsou použitelné zhruba do teploty 500°C např. na pružiny, membrány a trysky⁸.

Ni - Mn

Přísada manganu způsobuje to, že tyto slitiny výborně odolávají korozi i za vyšších teplot a také v prostředích, která obsahují síru. Často se používají na elektrody zapalovacích svíček⁸.

Ni - Mo

Tyto slitiny mohou obsahovat až 35% molybdenu. Jsou vhodné pro odlitky, které odolávají koroznímu prostředí, kde působí kyselina sírová, ať už studená, nebo horká. Dojde k vytvoření poměrně silné pasivační vrstvy na povrchu materiálu. Používají se zejména v potravinářském průmyslu⁷.

Ni - Co

Slitiny mohou obsahovat až 4,5% kobaltu, což způsobuje zvýšení magnetických vlastností, kterou je například permeabilita. Použití nacházejí v ultrazvukových zařízeních a v elektronice⁸.

Ni - Al

U těchto slitin je možné je precipitačně vytvrdit. Pevnost potom dosahuje hodnot až 1350 MPa při obsahu 4,5% hliníku, tento materiál se používá na pružiny. Další uplatnění nacházejí tyto slitiny zejména při výrobě pump, hřídelí a oběžných kol⁸.

Slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi**1) Termočláňkové slitiny**

Jako termočláňkové slitiny se používají slitiny niklu s chromem, kterého obsahují zhruba 9 - 12%. Jsou známé pod obchodním názvem chromel. Dalšími slitinami jsou almel (Ni-Al-Mn-Si), konstantan (Ni-Cu-Mn) v poměru složení 40-58-2% a kopel (Ni-Cu-Mn) s jiným složením 43-56,5-0,5%. Zejména chromel a almel tvoří termočlánek pro teplotní rozsah 300 - 1000°C⁸.

2) Odporové slitiny

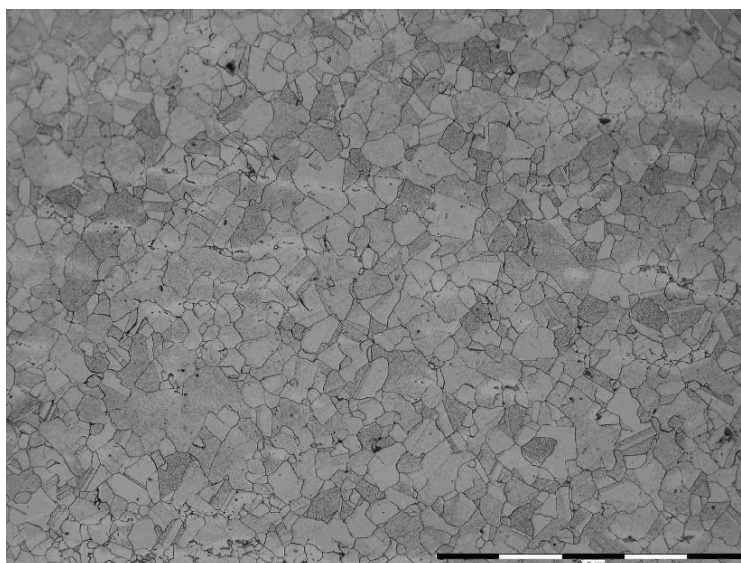
Odporové slitiny tvoří nikl a chrom, kterého je v niklu obsaženo cca 20%. Jsou nazývány obchodními názvy nichrom, chromnikl nebo pyrochrom. Tyto slitiny jsou tvárné, hodí se na výrobu drátů, tyčí a pásů. S vyšším obsahem chromu je také vyšší žárupevnost a žáruvzdornost⁸. Používají se také pro topné odpory do teploty 1150°C.

3) Magneticky měkké slitiny

Jsou označovány názvem permalloy. Kromě niklu obsahují také železo, případně molybden, měď, chrom a křemík. Vyznačují se vysokou a stálou permeabilitou⁸. Používají se jako materiály pro jádra transformátorů měřících zařízení.

4) Slitiny žáruvzdorné a žárupevné

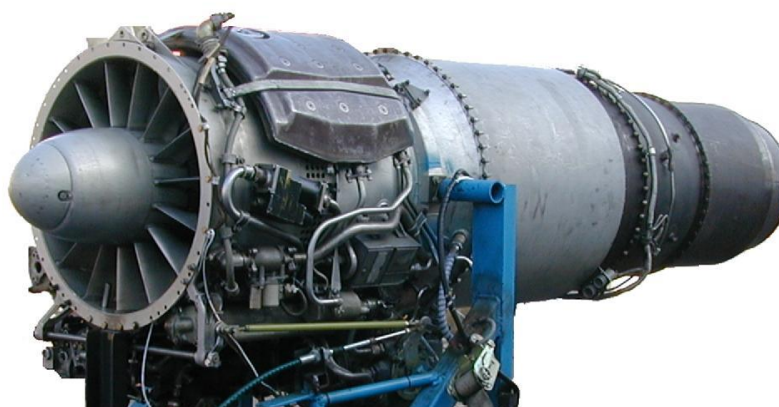
Vyznačují se výrazně vyšší žáruvzdorností a žárupevností než železné slitiny. Do této skupiny patří slitiny na bázi Ni-Cr-Co, které obsahují další přísady, jako jsou hliník a titan, popřípadě molybden, wolfram nebo niob. V určitých použití se nikl nahrazuje určitým procentem železa. Proto bývají někdy řazeny ke slitinám železa. Tyto slitiny vystupují pod obchodními názvy např. invar, hastelloy, mu-metal, nicrofer atd. Žáruvzdorné a žárupevné slitiny se používají na nejnamáhanější součásti parních a spalovacích turbín⁸.



Obr. 6 Mikrostruktura niklové slitiny s obchodním označením Waspaloy⁸.

5) Superslitiny

Jako superslitina se označuje žárupevná slitina, která se používá zejména na výrobu součástek parních turbín. Jde především o lopatky, disky a rotory. Niklová superslitina obsahuje zpevněnou fázi Ni_3Al , ale existují i jiné jako například kobaltové, molybdenové a podobně, které se nazývají stejně - superslitiny. Tyto slitiny jsou poměrně hodně legované, aby se zvýšila odolnost proti creepu a proti korozi za vyšších teplot. Významným legujícím prvkem superslitin je chrom, kterého obsahují $13 \div 18\%$ a který zvyšuje korozní odolnost. Zabezpečení vzniku creepu se dosahuje přidáváním uhlíku (do $0,08\%$)⁷.



Obr. 7 Použití niklu jako součásti proudových a raketových motorů⁸.

1.3.2 Vliv přísadových prvků na vlastnosti niklových slitin

Uhlík (C)

Uhlík je v tuhém stavu velmi málo rozpustný. Nikl je sám o sobě grafitotvorný, což vede k tomu, že dochází ke změně rozpustnosti a vylučování grafitu na hranicích zrn. To vede ke snížení pevnosti a meze tečení⁸.

Křemík (Si)

Křemík se v niklu zčásti rozpouští a váže na sebe skvěle síru. Křemík má na materiál stejný vliv jako mangan, váže kyslík a uvolňuje tak mangan pro síru⁸.

Síra (S)

Síra se v niklových slitinách téměř vůbec nerozpouští, což způsobuje křehkost (jak za tepla, tak i za studena). Síra se eliminuje pomocí manganu, se kterým tvoří sulfid (MnS)⁸.

2 OBROBITELNOST TĚŽKO OBROBITELNÝCH MATERIÁLŮ

Obrobitelnost materiálu lze chápat jako celkový účinek fyzikálních vlastností a chemického složení materiálu na kvalitu procesu řezání. Zahrnuje také ekonomický vliv. Obrobitelnost závisí na spoustě faktorů, mezi které například patří způsob výroby a tepelného zpracování materiálu, chemické složení materiálu, metoda obrábění, řezné podmínky, geometrie nástroje apod. Vyhodnocuje se stupeň obrobitelnosti, který není při obrábění odlišnými metodami (soustružení, frézování, broušení atd.) totožný².

Zkoušky obrobitelnosti se dělí na dlouhodobé a krátkodobé. Dlouhodobá zkouška obrobitelnosti je objektivní, avšak trvá poměrně dlouhou dobu. Provádí se zejména soustružením a frézováním. Kritériem obrobitelnosti je velikost řezné rychlosti, která odpovídá dohodnuté době trvanlivosti. Krátkodobá zkouška trvanlivosti je oproti dlouhodobé zkoušce méně objektivní a trvá kratší dobu. Používá se hlavně pro rozdělení skupiny materiálu dle stupně obrobitelnosti nebo také pro otestování změny stupně obrobitelnosti².

Každý konstrukční materiál je rozdělen podle Celostátní normy a normativů do devíti základních skupin, které slouží pro požadavky vyhodnocování obrobitelnosti. Tyto skupiny jsou označovány malými písmeny²:

- a) litiny
- b) oceli
- c) těžké neželezné kovy, měď a slitiny mědi
- d) lehké neželezné kovy, hliník a slitiny hliníku
- e) plastické hmoty
- ⋮

Z každé skupiny slouží vždycky jeden materiál jako etalon obrobitelnosti a ve vztahu k tomuto materiálu se poté počítá relativní obrobitelnost ostatních materiálů celé skupiny. V každé skupině jsou ještě materiály rozděleny do tříd obrobitelnosti podle indexu kinetické obrobitelnosti, který je dán vztahem²:

$$i_0 = \frac{v_{c15}}{v_{c15et}} \quad (3)$$

v_{c15} - řezná rychlost při trvanlivosti $T=15$ minut pro sledovaný materiál

v_{c15et} - řezná rychlost při trvanlivosti $T=15$ minut pro etalonový materiál

Jednotlivé třídy jsou označeny číslem, které je umístěno před písmeno určující danou skupinu materiálů (např. 11a, 10d apod.)².

2.1 Obrobitelnost korozivzdorných ocelí

Obrobitelnost korozivzdorných ocelí se mění. Je to způsobeno hlavně kladenými nároky, mezi které patří odolnost proti korozi a pevnost v tahu. To má za následek jejich velmi zhoršenou obrobitelnost. Ta se dá zlepšit například přidáním síry do materiálu, ale na druhé straně se výrazně zhorší odolnost proti působení chemických sloučenin materiálu. Proto se velmi často korozivzdorná ocel popouští, nebo také tahá za studena, zejména austenitické a feritické oceli. To se prokázalo jako prospěšné zpracování ke zlepšení obrobitelnosti⁴.

Co se týče feritických ocelí, tak se obrábějí velmi dobře. Dají se srovnávat s nízkolegovanými konstrukčními ocelmi. Podobnými vlastnostmi se vyznačují také martenzitické oceli, ale musí obsahovat velmi malé množství uhlíku nebo chromu. Nejlepší obrobitelnost z martenzitických ocelí má ocel s obsahem 13% chromu a s nízkým obsahem uhlíku. Obrobitelnost se naopak zhoršuje s rostoucím obsahem chromu a také uhlíku. Dokonce některé druhy ocelí s vysokým obsahem uhlíku (cca $0,8 \div 1,0\%$) působí velmi abrazivně vzhledem ke sklonu tvoření karbidů. Austenitické oceli mají obecně horší obrobitelnost než oceli martenzitické⁴.

2.1.1 Vliv legujících prvků na obrobitelnost

Jak je uvedeno výše, obrobitelnost lze nejnadhěji zlepšit dodáním síry do materiálu. Značný vliv má také na trvanlivost řezné hrany a na tvorbu třísky. Na plochách, které byly obrobena, velmi často dochází ke zpevnění za studena vlivem plastické deformace. Tvrdost může dosahovat hodnot $400 \div 500$ HB, do hloubky zhruba 0,1 mm. Tedy zejména tyto parametry se musí vzít do úvahy při volbě řezných podmínek. Například špatně zvolený úhel čela nebo otupené ostří mají za následek zvětšenou tloušťku vrstvy. Tím může vzniknout špatná jakost obrobena plochy jako dopad toho, že obrábění obecně neprobíhá rovnoměrně tak jako u ostatních ocelí. Správně zvolenými řeznými podmínkami se také viditelně sníží deformace obrobena materiálu⁷.

2.1.2 Teplo při řezání

Obecně teplo při obrábění je předmětem poměrně hluboké studie mnoha vědců. Skoro všechna mechanická energie, která je vynaložená na tvorbu třísky, se mění na energii tepelnou (cca $95 \div 98\%$). Zbytek energie zůstává v materiálu, v třískách a v obrobena materiálu jako elastická energie. Největší množství tepla se tvoří v oblasti primární plastické deformace, pak následuje oblast sekundární, oblast plastické deformace².

Zásadní rozdíl korozivzdorných ocelí od ostatních ocelí, zejména tedy nelegovaných, je v tom, že mají velmi špatnou tepelnou vodivost. Z toho vyplývá, že v místě řezání vzniká vysoká teplota, která je mimo jiné ještě způsobena

velkou tepelnou pohltivostí. Proto je nadmíru důležité, aby byl materiál dostatečně chlazen⁴.

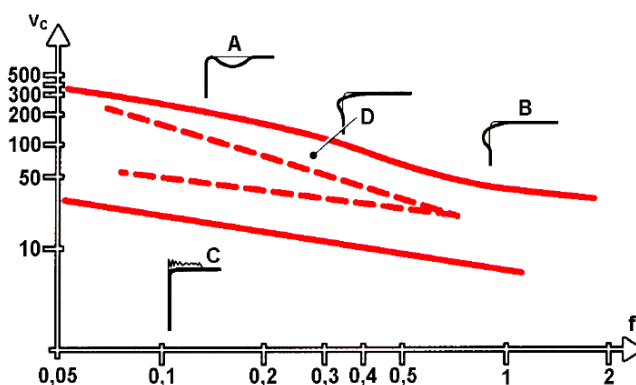
2.1.3 Tvorba třísky

Protože při obrábění obecně vznikají vibrace a také kmitání celé soustavy, dochází k ustavičné změně velikosti řezné síly, což má za následek vznik zvlněné obrobene plochy. Například při volbě malého úhlu ostří (do 5 stupňů) tříska z místa řezu odchází méně plynule než při obrábění konstrukčních ocelí. Při zvolení úhlu například 20 stupňů se tříska tvoří plynule a dochází k velmi malým změnám řezných sil. Při použití velkého stupně ostří se předejde zpevňování za studena⁷.

2.1.4 Oblast obrobitelnosti

Korozivzdorné oceli mají tendenci ke zpevňování za studena. Jsou také náchylné k nalepování na řeznou destičku, což může vést v krajním případě až k vylamování řezné hrany nástroje. Důsledkem zpevňování může vzniknout až extrémní tvrdost obrobene plochy¹³.

Obecně feritické a martenzitické oceli jsou vystaveny deformačnímu zpevňování v daleko menší míře, než je tomu u ocelí austenitických. V důsledku deformačního zpevňování může dojít k situaci, kdy tvrdost materiálu na povrchu bude až dvakrát vyšší než ve středu. Z výše uvedeného důvodu je nutné provést volbu hloubky řezu a posuvu tak, aby hrot řezné hrany nástroje byl pod zpevněným pásmem¹³.



Obr. 8 Vymezení pracovních oblastí pro různé způsoby opotřebení řezné hrany nástroje¹³.

U korozivzdorných ocelí může také nastat problém s vytvářením nárůstku na nástroji, tvorbou otřepů, špatným odchodem třísky z místa řezu nebo také špatnou kvalitou obrobene plochy. Předejít této situaci lze použitím materiálů, které jsou tažené za studena a následně vhodně tepelně zpracované. V každém případě bychom měli zabránit vzniku hrubé struktury¹³.

2.2 Obrobitelnost titanových slitin

Obrobitelnost titanu je zcela rozdílná než obrobitelnost jiných kovů, například ocelí nebo niklu, protože povrch obrobku je křehký z důvodu přítomnosti kyslíku a dusíku z atmosféry. Nízká tepelná vodivost má za následek nalepování na břit nástroje a tím také jeho rychlejší otupení. Na jednu stranu rychlost odběru materiálu a také trvanlivost nástroje je menší než například při obrábění ocelí. Na straně druhé spotřebováváný výkon a řezné síly jsou značně nižší jako například u niklu nebo ocelí. Jedinou výjimku tvoří oblast nízkých řezných rychlostí⁷.

V dnešní době se hodnota řezné rychlosti pohybuje při obrábění titanu a titanových slitin kolem 60 m/min. Musíme přitom brát v úvahu také vznik vibrací nástroje. Ty jsou způsobeny nestejnou plastickou deformací, která přispívá k tvorbě segmentované třísky. Pokud ovšem vzniknou vibrace, tak je nutné okamžitě snížit řeznou rychlost. Tím se zmenší také efektivita obrábění⁷.

Při obrábění titanu a jeho slitin by se měl používat ostrý pozitivní břit a velký úhel hřbetu. Musí být zajištěny stabilní podmínky, spolehlivé upnutí obrobku a také optimalizovaný posuv. Velkou výhodou je také přívod chladicí kapaliny, která je přizpůsobená způsobu obrábění a řezným podmínkám. Mělo by se zamezit nárůstu opotřebení a tím udržovat teplotu obrábění v příznivých mezích. Dále by se měly co nejvíce minimalizovat už výše uvedené vibrace. Tato doporučení jsou velmi důležitá a vedou k velmi výraznému zlepšení obrobitelnosti už tak špatně obrobitelného titanu⁴.

2.2.1 Vliv legujících prvků na obrobitelnost

Jestliže se do titanu přidá určité množství například uhlíku, dusíku nebo kyslíku, výrazně to ovlivňuje obrobitelnost. Dochází ke zvýšení teploty na čele nástroje (až 900°C) a ke snížení řezné rychlosti. To vede k deformaci řezné hrany a také k vytváření žlábků na čele nástroje stejně jako při obrábění ocelí¹⁰.

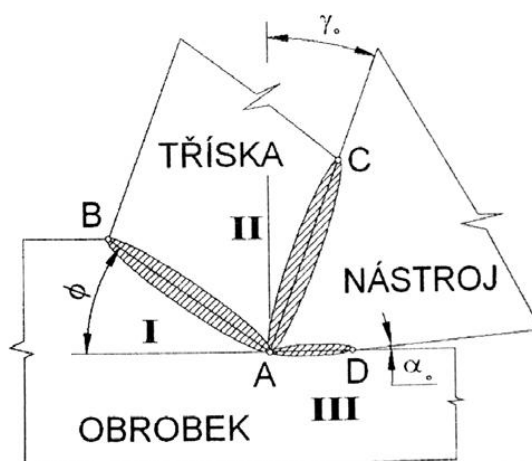
K obrábění titanu se používá zejména rychlořezná ocel a nástroje ze slinutého karbidu. Při obrábění slinutými karbidy dochází k vyšší trvanlivosti, zvláště slinutého karbidu typu WC + Co označené jako skupina K. Při použití slinutého karbidu typu WC + TiC, který se řadí do skupiny P, už není trvanlivost tak příznivá jako v předchozím případě. Proto je slinutý karbid na bázi WC + Co vhodný k obrábění titanu a jeho slitin, navíc je odolný proti deformacím za vysokých teplot a proti difuznímu opotřebení¹⁰.

2.2.2 Tvorba třísky

Při obrábění titanu vzniká segmentovaná tříska. Postup mechanismu tvorby segmentované třísky lze rozdělit do dvou fází.

V první fázi vzniká plastická nestabilita. Vede k lokalizaci deformace podél plochy smyku, která má počátek na řezné hraně. Nejprve je orientovaná ve směru vektoru řezné rychlosti, následně se ohýbá směrem nahoru, kde se protne s obráběnou plochou. Ve druhé fázi dochází k tomu, že se postupně začíná vyrovnávat skloněná strana segmentu třísky, která je orientovaná k obráběnému materiálu. V tomto důsledku bude tloušťka třísky zhruba rovna tloušťce odřezávané vrstvy¹⁰.

Tvorba segmentů třísky začíná počátečním kontaktem nože s právě se tvořícím segmentem, který je značně krátký a délka styku kontaktu roste s pohybem nože. Dochází k intenzivnímu přenosu tepla do kontaktní zóny nože a probíhá zde také chemická reakce mezi třískou a nožem, což velmi často vede k urychlení opotřebení nástroje. Při postupném stlačování vytvářeného elementu třísky se celý segment tlačí směrem nahoru⁷.



Φ úhel střížné roviny, γ_0 ortogonální úhel čela, α_0 ortogonální úhel hřbetu

I oblast primárních pl. deformací – max. smykové napětí

II oblast sekundárních pl. deformací – tření třísky po čele nástroje

III oblast terciárních pl. deformací – tření o obrobek

Obr. 9 Oblasti plastických deformací v kořenu třísky².

2.2.3 Použití řezných nástrojů

Bylo zjištěno, že při překročení určité hodnoty řezné rychlosti (zhruba 63 m/min) dojde k poškození a tudíž i ke zničení nástroje. Je to způsobeno tím, že vzroste teplotní napětí v nástroji na takovou hodnotu, že převyší mez pevnosti materiálu nástroje. Proto se nedoporučuje použití řezné keramiky na obrábění titanu a jeho slitin, je to ekonomicky neefektivní⁷.

Jak už bylo řečeno výše, pro obrábění titanových slitin se nejčastěji používá slinutý karbid. Daleko více se používá slinutého karbidu ze skupiny K (nástroj např. K10, K20, ...) na bázi WC + Co, protože teplota řezání je nižší než u jiných

skupin, trvanlivost je daleko vyšší a také se může použít vyšší řezná rychlost. Obecně slinuté karbidy skupiny K jsou určeny k obrábění materiálů, které tvoří krátkou třísku, což titan je, protože vytváří třísku segmentovanou. Dalším možným používaným slinutým karbidem může být karbid skupiny P (nástroj např. P10, P15, ...) na bázi WC + TiC. Avšak při použití tohoto slinutého karbidu dochází k vyšší teplotě řezání (až o 50%), trvanlivost tím pádem klesá a řezná rychlost musí být menší (až o 40%). Slinuté karbidy skupiny P jsou obecně určeny pro materiály tvořící dlouhou třísku, což titan není^{3,7}.



Obr. 10 Ukázka vyměnitelné břitové destičky ze skupiny K firmy Pramet Tools¹¹.

Pro obrábění titanových slitin se může ještě použít diamant. Avšak nástroj musí být dobře chlazen, často musí být chladicí kapalina vháněna do místa řezu pod poměrně velkým tlakem. Použitý stroj musí mít také vysoký výkon, protože nástroje z polykrystalického diamantu pracují velmi často za vysokých řezných rychlostí³.

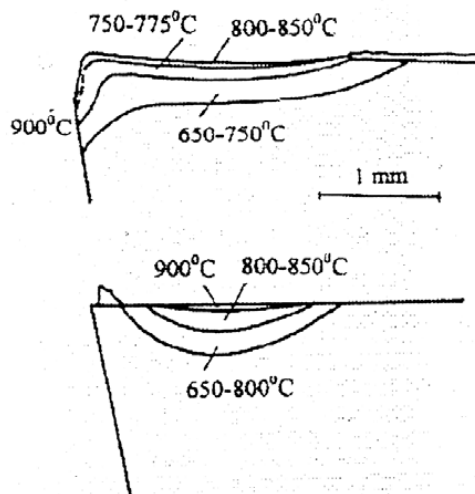
Z toho plyne závěr, že pro obrábění titanu a jeho slitin je výhodnější použít slinutých karbidů skupiny K než skupiny P nebo M, protože jsou odolnější proti namáhání. Mají také daleko vyšší pevnost řezných hran. Uplatnění polykrystalického diamantu při obrábění titanových slitin není příliš výhodné, protože z výše uvedených faktů je zřejmé, že ekonomický efekt by nebyl pozitivní.

2.3 Obrobitelnost niklových slitin

Obrobitelnost niklu a niklových slitin je velmi rozličnou záležitostí. Při obrábění se vytváří opotřebení na hřbetě vyměnitelné břitové destičky a také současně žlábků na čele vyměnitelné břitové destičky. K velmi strmému poklesu jakosti obrobené plochy dochází v důsledku zvyšování řezné rychlosti. Oproti tomu velikost posuvu nemá vliv na hodnotu drsnosti povrchu obrobené plochy. Bylo také zjištěno, že nástroj tíhne k opotřebení ve formě žlábků při nízkých rychlostech řezání, avšak opotřebení špičky nástroje je menší⁷.

Velmi důležitou součástí procesu obrábění niklu a niklových slitin je použití mazání nebo chladicí kapaliny. Velmi často se používají oleje, které obsahují síru, protože síra zlepšuje kluzné vlastnosti a také tvorbu třísky. V poslední době bylo zkoumáno využití kryogenního chlazení při obrábění, což představuje chlazení za pomoci mrazivého proudu vzduchu.

Pokud dochází k obrábění vysokými rychlostmi, jako je například frézování, soustružení a podobně, doporučuje se používání chladicí kapaliny. Nejčastěji se užívají emulze na základě vody, protože mají lepší chladicí efekt než již zmiňované oleje se sírou. Při obrábění nižšími rychlostmi jako například vrtání, protahování a podobně se používají zejména velmi hustá maziva a také chemické chladicí kapaliny. Při vrtání je lepší použít rozředěný roztok kvůli odvodu vytvořené třísky⁷.



Obr. 11 Srovnání teplotních oblastí nástroje při soustružení niklu a titanu¹⁰.

2.3.1 Využití kryogenního chlazení

Kryogenní chlazení vede v procesech obrábění ke zvýšení životnosti materiálu a k rozměrové přesnosti. To má za následek zvýšení obráběcího výkonu.

Na niklové slitině, konkrétně Inconel 718, byl proveden experiment, který probíhal za různých podmínek chlazení. Nejprve byla slitina obráběna za suchého chlazení, dále pak za minimálního množství mazání (120 ml/hod), třetí experiment se realizoval v prostředí kryogenního chlazení (pod tlakem 1,5 MPa) a posledním pokusem byla kombinace kryogenního chlazení s minimálním množstvím mazání. Výsledky se zaměřovaly zejména na měření zbytkového napětí, plastické deformace, ale také na měření tvrdosti a drsnosti povrchu⁶.

Z výsledků práce vyplývá, že zbytkové napětí pod povrchem obráběného materiálu je výrazně tlakové, což je prospěšné z hlediska životnosti. Při použití suchého obrábění dosahuje "poškozená" zóna do hloubky 40 μm pod povrch materiálu, zatímco pro ostatní případy je tento účinek rozšířen až do 70 μm pod povrch. To představuje silnější tlakovou zónu pod povrchem obráběného materiálu. Užití kryogenních chladicích podmínek také potlačuje tepelné účinky, které vznikají při obrábění, a tedy snižuje sklon pro produkci tahových napětí, která mají opačné účinky než napětí tlakové⁶.

Na povrchu materiálu i pod ním byla naměřena vysoká tvrdost, která snižuje opotřebení obrobku, větší tlaková napětí zvyšují odolnost proti únavovému selhání a zvyšují také vlastnosti, které prodlužují životnost finálního výrobku. Na povrchu obrobku dosahovala hodnota tvrdosti 800 HV a směrem do základního materiálu klesla na 500 HV 40 μm pod povrchem. Pokud se srovnají výsledky jednotlivých podmínek chlazení, nejvyšší tvrdost je zaznamenána v obou případech kryogenního chlazení⁶.



Obr. 12 Ukázka kryogenního chlazení při obrábění niklových slitin⁶.

Výsledky práce ukazují, že při srovnání všech čtyř podmínek chlazení vychází kryogenní chlazení jako nejlepší volba. Tato metoda představuje více udržitelnou alternativu obrábění než jiné zkoušené metody. Dále také vytváří více tlakových zbytkových napětí v obráběném materiálu a směrem do hloubky materiálu klesají hodnoty napětí až o 60%. A v neposlední řadě tvrdost materiálu na povrchu vzrostla z 500 HV na 800 HV, což představuje zvýšení tvrdosti o 60%.

2.3.2 Mikrostruktura niklových slitin

Na obrobitelnost niklových slitin má zřetelný vliv zejména velikost zrna. To ovlivňuje strukturu slitin a také vlastnosti slitin po daném tepelném zpracování. Existuje mnoho postupů tepelného zpracování niklu a jeho slitin, jako jsou například žíhání na měkko, rozpouštěcí žíhání, precipitační vytvrzování a žíhání na snížení vnitřního pnutí. Velikost zrna také může mít vliv na jakost obrobené plochy.

Pokud obsahují slitiny niklu sulfidy, karbidy, oxidy, nitridy a jiné sloučeniny, ovlivňují poměrně zásadním způsobem obrobitelnost. Mají také vliv na životnost nástrojů. Jako příklad lze uvést slitinu Ni-Cr. Tato slitina má nízkou odolnost proti korozi, protože má relativně malý obsah uhlíku a tím pádem také menší podíl karbidů. Mezi nejtvrdší a také korozivzdorný karbid patří karbid titanu TiC ⁷.

2.3.3 Zpevňování za studena

Veškeré niklové slitiny mají austenitické základní fáze, které se vytvrzují za studena stejně rychle jako austenitické korozivzdorné oceli. Je to způsobeno tím, že při řezném procesu vznikají mezi nástrojem a obrobkem vysoké tlaky, které vytvářejí na povrchu obrobku vrstvu deformovaného materiálu. To může vést k nalepování materiálu na řeznou destičku, což může dojít až do stádia vylamování řezné hrany nástroje⁴.

Jednou z možností, jak snížit zpevnění materiálu za studena, je použití vhodné geometrie břitu a také řezných podmínek. Nejlepší variantou je provedení nízkoteplotního zpracování materiálu před samotným obráběcím procesem. Tím se dosáhne nejvyšší jakosti obrobeného povrchu. Konkrétně pro obrábění je nejvhodnější použít materiál tažený za studena, který je zbaven vnitřního pnutí. Zato materiál, který je válcovaný za tepla, se musí nejprve vyžít a až poté obrábět. Hrubovací proces se velmi často provádí před samotným zušlechťením. Obrobitelnost se většinou zlepší rozpouštěcím žíháním⁷.

Druhou možností, vedoucí ke snížení zpevňování za studena, je používání nástrojů, které umožňují jemný řez. Nástroj musí mít ostrý břit, aby se předešlo vzniku efektu válcování a tření na povrchu obrobku. Úhel břitu se volí například 20°, protože tak vzniká plynulý proces tvorby třísky, která odchází z řezu přes čelo řezné hrany nástroje⁴.

2.3.4 Členění niklových slitin

Slitiny niklu se dělí do tří nejdůležitějších skupin. První skupinu tvoří slitina nikl-měď, druhou nikl-chrom-železo a třetí nikl-titan. Velká část slitin niklu je všeobecně známá jednak pod obchodními označeními, jednak ale také jsou definovány různými normami.

Nikel (Nickel)

Takto označené slitiny mají vysokou houževnatost a také relativně dobrou odolnost proti mechanickému zatížení. Obrobitelnost a lepší kvalita povrchu se dosáhne pomocí žíhání⁷.

Například slitina Nickel 201 je definována normou ISO 6207, 6208, ale také německou normou DIN 17740, americkou normou ASME SB-160 - SB-163, ASTM B 160 apod.¹².

Monel

Vyznačují se vysokou pevností a odolností proti korozi. Na druhé straně mají nižší houževnatost než slitiny s označením Nikel. Jedná se o slitiny na bázi Ni-Cu, které obsahují až 32% mědi, případně i další prvky (Mn, Si, Al, Fe). Je vhodné je žít k odstranění vnitřního pnutí a tím se dosáhne lepší obrobitelnosti a kvality povrchu⁷.

Pro příklad uvádím slitinu Monel alloy K-500, která je opět definována normou ISO 6208, německou normou DIN 17743, 17752 - 17754 i americkými normami ASTM B 865 a ASME Code Case 1192¹².

Nimonic

Jedná se o slitiny, které kromě niklu obsahují dále chrom (10 - 20%), kobalt (15 - 20%) a přísady molybdenu, hliníku a titanu. Provozní teploty se pohybují v rozmezí 660 - 870°C. Slitiny, které mají vyšší obsah molybdenu, se vyznačují vyšší celkovou odolností.

Konkrétní slitina Nimonic alloy 80A je určena normami DIN 17742, ASTM B 637 atd¹².

Inconel

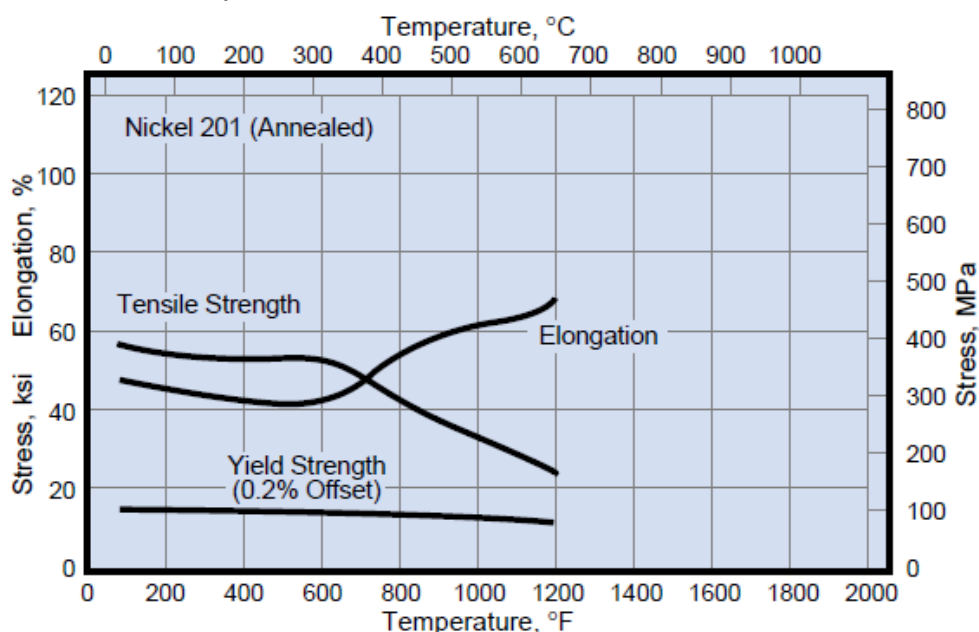
Jsou to slitiny velmi podobné slitinám Nimonic, ale neobsahují kobalt. Tyto slitiny však odolávají nižšímu zatížení. Mají dobrou odolnost proti korozi. Používají se u plynových turbín, u raketových motorů a také v leteckých konstrukcích.

Zajímavou slitinou je Inconel alloy X-750, protože je formulována jak normou ISO 6208, tak i evropskou normou EN 10269. Dále také normami ASME SB-637, ASTM B 637 apod¹².

Hastelloy

Slitiny pod tímto označením jsou registrovány pod ochrannou známkou Haynes International, Inc. Vyznačují se výbornou odolností proti korozi.

Slitin, které mají obchodní označení, je velmi mnoho. Mezi nejmenované patří například Inco, Incoloy, Nilo, Astraloy, Nimocast a podobně. Leckteré z nich patří ke kovům, které se používají v leteckém průmyslu a astronautice. Mohou pracovat v náročném prostředí.



Obr. 13 Ukázka závislostí pevnosti v tahu, prodloužení a meze kluzu na teplotě u slitiny Nickel 201¹².

3 EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKA

Experimentální zkouška proběhla vrtáním do titanové slitiny, do oceli a do kompozitního materiálu. Byla zjišťována velikost posuvové síly F_f mezi vrtákem a materiálem a také velikost krouticího momentu M_k . Vzhledem k tomu, že velikosti síly a krouticího momentu jsou závislé jednak na opotřebení vrtáku, jednak na použití jádra vrtáku, byla zkouška provedena napřed při vrtání celého vrtáku a následně pro srovnání opotřebení s předvrtaným jádrem vrtáku pomocí středícího vrtáku o průměru 3 mm. K porovnání byl použit vzorek titanové slitiny Ti Gr5 4-9-4475, ocel 12 050 a kompozitní materiál s označením Prepreg. Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli 12 050 jsou zaznamenány tabulkách 3.1 a 3.2.

Tab. 3.1 Chemické složení oceli 12 050 v % dle ČSN 41 2050:

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
min.	0,42	0,50	0,17	-	-	-	-	-
max.	0,50	0,80	0,37	0,25	0,30	0,30	0,04	0,04

Tab. 3.2 Mechanické vlastnosti dle ČSN 41 2050 ve stavu normalizačně žíhaném:

Označení		
Mez kluzu	$R_{p0,2}$	min. 325 MPa
Mez pevnosti	R_m	min. 540 MPa
Tažnost	A	min. 17 %
Tvrdost	HB	max. 225 HB
Modul pružnosti v tahu	E	211 GPa
Modul pružnosti ve smyku	G	79 GPa

Chemické složení a mechanické vlastnosti titanové slitiny Ti Gr5 4-9-4475 jsou uvedeny v tabulkách 3.3 a 3.4.

Tab. 3.3 Chemické složení titanové slitiny Ti Gr5 4-9-4475 v %:

	Fe	O	N	C	H	Al
min.	-	-	-	-	-	5,50
max.	0,40	0,20	0,05	0,10	0,015	6,70

Tab. 3.4 Mechanické vlastnosti titanové slitiny Ti Gr5 4-9-4475:

Označení		
Mez kluzu	$R_{p0,2}$	800 - 1100 MPa
Mez pevnosti	R_m	890 - 1400 MPa
Modul pružnosti v tahu	E	110 GPa

Prepreg (uhlíkovo/epoxidový laminát)

- matrice: epoxidová pryskyřice FT105,
- výztuž: uhlíková vlákna,
- orientace vláken: jednosměrná,
- tloušťka: 6 mm (tloušťka jedné vrstvy 0,15 mm -> počet vrstev 40),
- výrobce Prepregu: Havel Composites CZ s.r.o,
- výroba laminátu: Letecký ústav FSI, VUT BRno.

Tab. 3.5 Mechanické vlastnosti Prepregu (uhlíkovo/epoxidového laminátu)¹⁴:

Pevnost v podélném směru		E-modul v podélném směru		Protažení [%]	Hustota [g.cm ⁻³]
Tah [MPa]	Ohyb [MPa]	Tah [MPa]	Ohyb [MPa]	-	-
DIN 53455	DIN 53455	DIN 53455	DIN 53455	DIN 53455	DIN 53455
75,1	125,8	3568	3559	2,7	1,22

3.1 Úvod do problematiky

Mým úkolem bylo změřit opotřebení vrtáku po vrtání do kompozitního materiálu s označením Prepreg a do titanové slitiny.

Jelikož se při obrábění produkuje značné množství tepla, tak se významně namáhá břit nástroje. Při procesu tvorby třísky se vytváří na nástroji kovový povrch, jenž často podléhá chemickým reakcím a také difuzním procesům. Téměř veškeré materiály určené k obrábění obsahují značně tvrdé částice, které mají podobnou tvrdost jako materiál nástroje. Tyto částice pak vzbuzují u nástroje brousící a také abrazivní efekt¹.

Sdružováním abrazivních efektů, ale i chemických, tepelných a mechanických činitelů dochází k opotřebovávání břitu nástroje. Rozlišuje se několik mechanismů opotřebení. Abrazivní otěr, který vzniká především účinkem tvrdých částic v materiálu obrobku. Difuzní otěr vzniká při působení chemických vlivů během procesu obrábění. Dalším významným mechanismem je oxidační otěr, který souvisí s vysokými teplotami v průběhu procesu řezání. Společně s okolním vzduchem mají za následek oxidaci materiálu nástroje. Posledním mechanismem opotřebení je adhezní otěr, který se na druhou stranu vyskytuje zejména při nízkých teplotách obrábění na břitu nástroje¹.

Dalším úkolem v experimentální části této práce bylo vypočítat z naměřených hodnot měrné řezné odpory jednotlivých materiálů, do kterých se vrtalo.

Měrný řezný odpor je definovaný rovnicí:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \quad (4)$$

Lze jej formulovat také jako sílu ve směru hlavního řezného pohybu vztahenou na průřez třísky 1mm^2 . Tudíž jednotkou měrného řezného odporu je MPa. Měrný řezný odpor bývá často nazýván také měrnou řeznou silou. Je to způsobeno tím, že v teorii obrábění byla sjednána konvence pro označování a působení sil pro obrábění, obecně označovaných F , a sil, které jsou vztahovány k vnitřnímu řeznému odporu materiálu, obecně označovaných R . Toto silové zatížení je potom v rovnováze, nicméně opačně orientováno dle vztahu²:

$$F = -R \quad (5)$$

Velikost řezného odporu ovlivňují zejména fyzikální vlastnosti materiálu, hlavně pevnost a tvrdost, velikost průřezu třísky, geometrie nástroje a v neposlední řadě také řezné prostředí².

3.2 Praktický experiment

3.2.1 Předběžné výpočty

Před samotnou realizací experimentu bylo nutné určit řezné podmínky vrtání. Pro řeznou rychlost platí:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (6)$$

kde: D [mm] je průměr obráběné díry,
 n [min^{-1}] jsou otáčky nástroje.

A z toho otáčky:

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{10 \cdot 1000}{\pi \cdot 8} = 397,9 \text{ min}^{-1} \cong 400 \text{ min}^{-1} \quad (7)$$

Dále bylo nutné určit hodnotu posuvové rychlosti. Ta se určila z rovnice:

$$v_f = f \cdot n \quad (8)$$

kde f [mm] je posuv nástroje na jednu otáčku a byl určen z následujícího vztahu:

$$f_z = \frac{f}{z} \quad (9)$$

kde: f_z [mm] je hodnota posuvu na zub, v našem případě 0,02
 z [-] je počet zubů nástroje, v našem případě 2.

Po dosazení rovnice (9) do rovnice (8) byl výsledkem výraz pro výpočet posuvové rychlosti:

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n = 0,02 \cdot 2 \cdot 400 = 16 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \quad (10)$$

3.2.2 Realizace experimentu

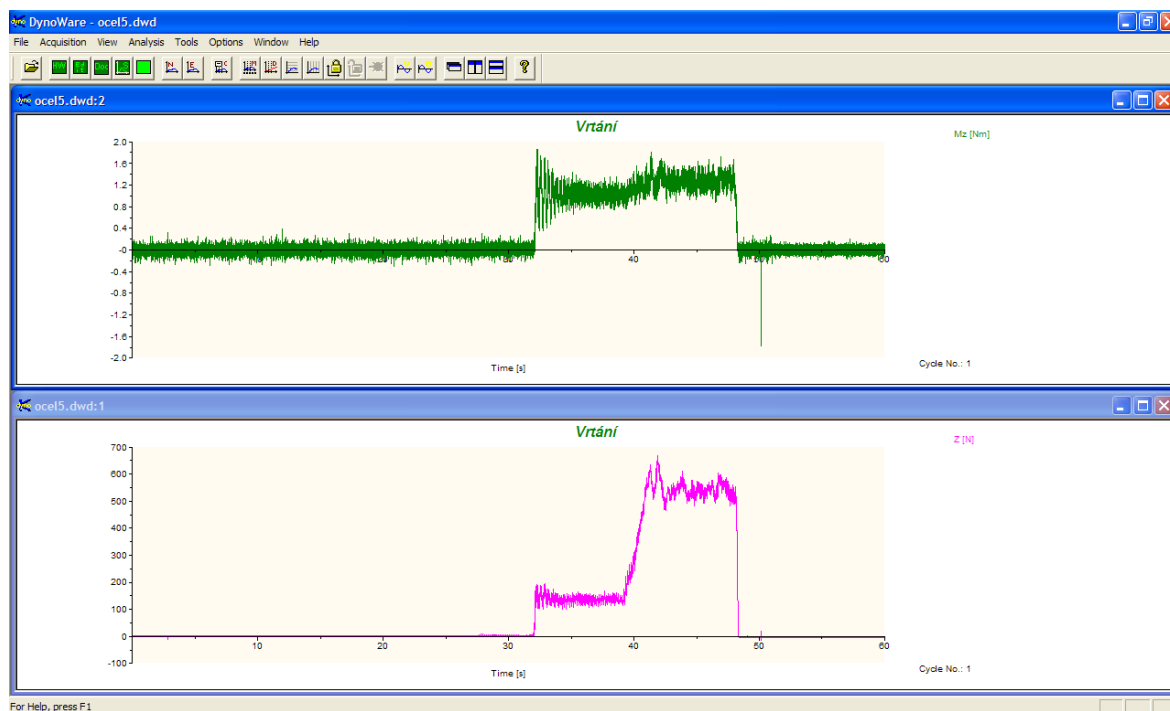
Experiment proběhl na obráběcím stroji s označením FV 25 CNC A prostřednictvím CNC programu:

```
0   BEGIN PGM Specka-vrtani MM
1   BLK FORM 0.1 Z X+0 Y+0 Z-20
2   BLK FORM 0.2 X+50 Y+50 Z+0
3   TOOL CALL 1 Z S400
4   M3
5   L X+0 Y+0 Z+5 FMAX
6   CYCL DEF 9.0 CASOVA PRODLEVA
7   CYCL DEF 9.1 Prodlv2
8   L Z-7 F16
9   L Z+5 F600
10  M30
11  END PGM Specka-vrtani MM
```

Při vrtání byl použit pro chlazení CIMSTAR 597 s vodou mísitelný koncentrát řezné kapaliny pro obrábění. Jednotlivé hodnoty posuvové síly F_f mezi vrtákem a materiálem a krouticího momentu M_k byly zaznamenávány do počítače pomocí diagnostické techniky KISTLER 5070A a operačního softwaru DynoWare, který je součástí tohoto přístroje. Měření opotřebení vrtáků bylo prováděno na měřicí základně Guhring.



Obr. 14 Vyhodnocování experimentu pomocí programu DynoWare.



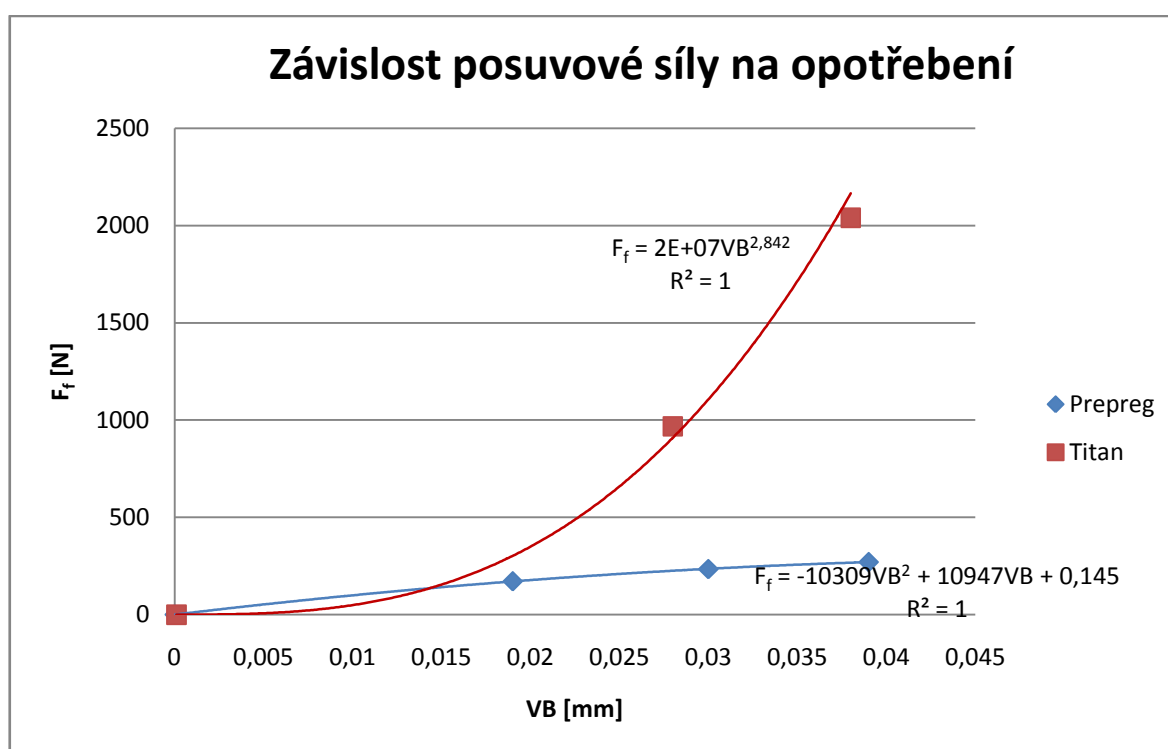
Obr. 15 Ukázka programu DynoWare (závislosti krouticího momentu a síly na čase).

Vrtání do kompozitního materiálu probíhalo pouze do plného materiálu a byly naměřeny následující hodnoty opotřebení:

- 1. otvor: VB = 0,019 mm
- 2. otvor: VB = 0,030 mm
- 3. otvor: VB = 0,039 mm

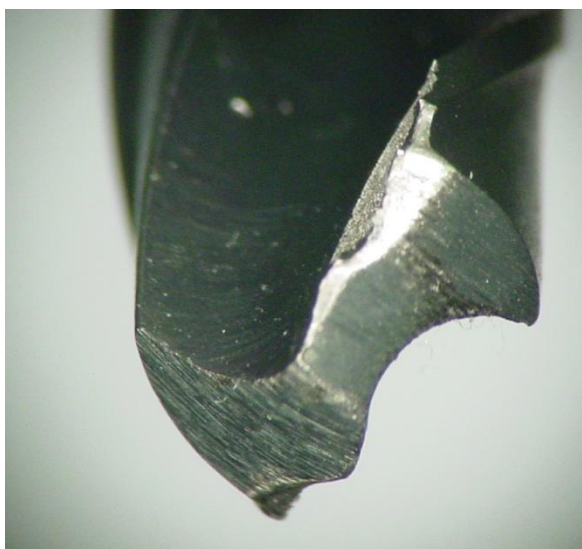
Při vrtání do titanu se vrták při druhém pokusu do plného materiálu zničil a při vrtání do materiálu s předvrtanou dírou se zničil hned při prvním pokusu. Nicméně byly naměřeny aspoň dvě hodnoty opotřebení při vrtání s jádrem:

- 1. otvor: VB = 0,028 mm
- 2. otvor: VB = 0,038 mm



Obr. 16 Graf závislosti řezné síly na opotřebení.

Z grafu vyplývá, že závislost opotřebení na posuvové síle F_f je kvadratická jak pro kompozitní materiál, tak pro titan. Pro jednotlivé hodnoty opotřebení byla vypočítána průměrná hodnota posuvové síly z jednotlivých měření. Z grafu je zřejmé, že při vrtání do titanové slitiny působí mezi vrtákem a materiálem mnohem větší síly než u kompozitního materiálu.



Obr. 17 Opotřebení vrtáku po vrtání do titanové slitiny.

Pro vyhodnocení měrného řezného odporu je nutné si nejprve spočítat jmenovitý průřez třísky, který je odebíraný jedním břitem vrtáku:

$$A_D = b_d \cdot h_d = a_p \cdot \frac{f}{2} \quad (11)$$

kde: b_d [mm] je jmenovitá šířka třísky,
 h_d [mm] je jmenovitá tloušťka třísky,
 a_p [mm] je šířka záběru ostří,
 f [mm] je posuv na otáčku.

Pokud se vrtá do plného materiálu, tak je šířka záběru ostří $a_p = D/2$ a při vrtání do předvrtané díry $a_p = (D - d)/2$. Rovnice (11) byla uvedena pro jeden břit, v našem případě máme břity dva. Z toho důvodu je nutné celou rovnici násobit dvěma. Poté rovnice (11) pro případ vrtání do plného materiálu má tuto podobu:

$$A_D = \frac{D \cdot f}{2} \quad (12)$$

a pro případ vrtání do předpracované díry:

$$A_D = \frac{(D - d) \cdot f}{2} \quad (13)$$

Dále je nutné si stanovit hodnoty řezné síly F_c , které se vypočítají z krouticího momentu:

$$M_k = 2 \cdot \frac{F_c}{2} \cdot \frac{D}{4} = \frac{1}{4} \cdot F_c \cdot D \quad (14)$$

kde: M_k [Nmm] je krouticí moment,
 F_c [N] je řezná síla,
 D [mm] je průměr vrtáku.

Pokud rovnici (14) upravíme, získáme vztah pro výpočet řezné síly F_c :

$$F_c = \frac{4 \cdot M_k}{D} \quad (15)$$

Pro výpočet měrného řezného odporu byly použity statisticky vyhodnocené průměrné hodnoty krouticích momentů jednotlivých měření z dat, která byla získána prostřednictvím diagnostické techniky KISTLER 5070A a operačního softwaru DynoWare.

Pro první měření titanové slitiny do plného materiálu byl zjištěn výsledný krouticí moment $M_k = 1,84$ Nm. Pro výpočet řezné síly je nutno všechny hodnoty krouticího momentu vyjadřovat v Nmm, tudíž $M_k = 1840$ Nmm. Pak podle vztahu (15) je řezná síla:

$$F_c = \frac{4 \cdot M_k}{D} = \frac{4 \cdot 1840}{8} = 920 \text{ N} \quad (16)$$

Jmenovitý průřez třísky je podle rovnice (12) a (9):

$$A_D = \frac{D \cdot f}{2} = \frac{D \cdot f_z \cdot z}{2} = \frac{8 \cdot 0,02 \cdot 2}{2} = 0,16 \text{ mm}^2 \quad (17)$$

Výsledný měrný řezný odpor se zjistí podle rovnice (4):

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} = \frac{920}{0,16} = 5750 \text{ MPa} \quad (18)$$

Při druhém měření stejného materiálu byl naměřen výsledný krouticí moment $M_k = 4,11$ Nm, což je 4110 Nmm. Jmenovitý průřez třísky se neměnil, protože se vrtalo to plného materiálu, proto $A_D = 0,16 \text{ mm}^2$. Potom opět:

$$F_c = \frac{4 \cdot M_k}{D} = \frac{4 \cdot 4110}{8} = 2055 \text{ N} \quad (19)$$

A pro měrný řezný odpor potom platí opět rovnice:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} = \frac{2055}{0,16} = 12\,843,75 \text{ MPa} \quad (20)$$

Pro poslední měření titanové slitiny byla díra předvrtána pomocí středícího vrtáku o průměru 3 mm. Tím se změnil jmenovitý průřez třísky:

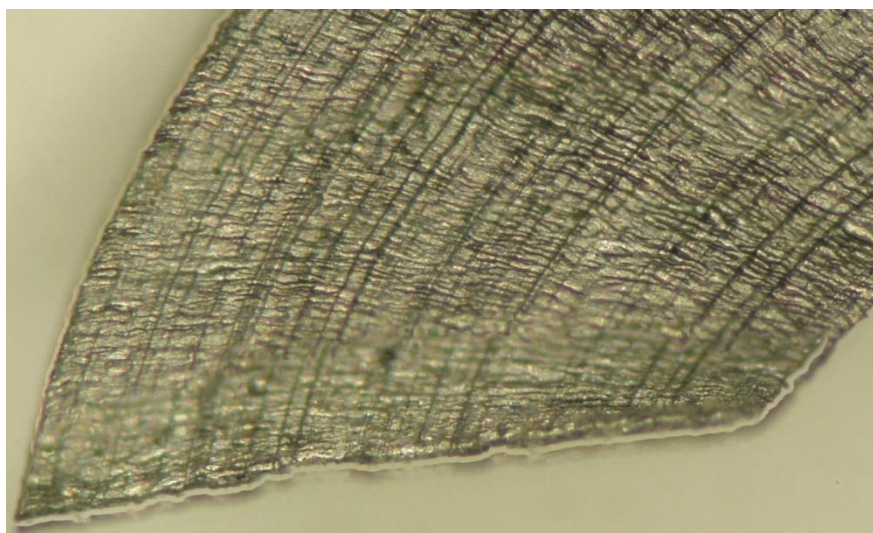
$$A_D = \frac{(D - d) \cdot f}{2} = \frac{(D - d) \cdot f_z \cdot z}{2} = \frac{(8 - 3) \cdot 0,02 \cdot 2}{2} = 0,1 \text{ mm}^2 \quad (21)$$

Výsledný krouticí moment byl naměřen 2,92 Nm = 2920 Nmm. Pak řezná síla je rovna:

$$F_c = \frac{4 \cdot M_k}{D} = \frac{4 \cdot 2920}{8} = 1460 \text{ N} \quad (22)$$

A měrný řezný odpor:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} = \frac{1460}{0,1} = 14\,600 \text{ MPa} \quad (23)$$



Obr. 18 Detailní pohled na třísku titanové slitiny Ti Gr5 4-9-4475.

Pro srovnání s titanovou slitinou je vhodné použít opět kompozitní materiál s označením Prepreg. Poněvadž se u tohoto materiálu vrtalo pouze do plného materiálu, byla dostačující jedna hodnota jmenovitého průřezu třísky. Byl použit vrták o stejném průměru, a proto hodnota $A_D = 0,16 \text{ mm}^2$ je shodná pro všechna tři měření.

Při prvním měření byl výsledný krouticí moment $M_k = 0,399 \text{ Nm}$, čemuž odpovídá 399 Nmm, a proto řezná síla je rovna:

$$F_c = \frac{4 \cdot M_k}{D} = \frac{4 \cdot 399}{8} = 199,5 \text{ N} \quad (24)$$

A pro měrný řezný odpor:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} = \frac{199,5}{0,16} = 1246,88 \text{ MPa} \quad (25)$$

Při druhém měření byl naměřen výsledný krouticí moment $M_k = 0,487 \text{ Nm}$, což je rovno 487 Nmm. Pak pro řeznou sílu platí:

$$F_c = \frac{4 \cdot M_k}{D} = \frac{4 \cdot 487}{8} = 243,5 \text{ N} \quad (26)$$

A pro měrný řezný odpor opět platí:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} = \frac{243,5}{0,16} = 1521,88 \text{ MPa} \quad (27)$$

Při třetím měření byla vypočtena řezná síla a měrný řezný odpor pro naměřený krouticí moment $M_k = 0,628 \text{ Nm} = 628 \text{ Nmm}$:

$$F_c = \frac{4 \cdot M_k}{D} = \frac{4 \cdot 628}{8} = 314 \text{ N} \quad (28)$$

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} = \frac{314}{0,16} = 1962,5 \text{ MPa} \quad (29)$$

Tab. 3.6 Tabulka hodnot vypočtených měrných řezných odporů.

Tabulka hodnot měrných řezných odporů pro jednotlivé materiály		
	Titan	Prepreg
1. měření	5750 MPa	1246,88 MPa
2. měření	12 843,75 MPa	1521,88 MPa
3. měření	----	1962,50 MPa

V další části experimentu jsem srovnal hodnoty měrných řezných odporů při vrtání do oceli, a to jednak bez použití jádra (do předvrtané díry), jednak do plného materiálu. Nejprve bylo nutné spočítat jmenovité hodnoty průřezu třísky, která byla

stejná jako v případě titanu, a to $A_D = 0,16 \text{ mm}^2$ v případě vrtání do plného materiálu a v případě vrtání do předvrtané díry pomocí středícího vrtáku o průměru 3 mm $A_D = 0,1 \text{ mm}^2$.

Pro první měření při vrtání do plného materiálu byl naměřen výsledný krouticí moment $M_k = 1,28 \text{ Nm}$, což odpovídá 1280 Nmm a pro řeznou sílu platí:

$$F_c = \frac{4 \cdot M_k}{D} = \frac{4 \cdot 1280}{8} = 640 \text{ N} \quad (30)$$

Pro měrný odpor platí vztah:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} = \frac{640}{0,16} = 4000 \text{ MPa} \quad (31)$$

Při druhém měření byl zjištěn výsledný krouticí moment $M_k = 1,25 \text{ Nm}$, to se rovná 1250 Nmm, a proto řezná síla a následně měrný řezný odpor:

$$F_c = \frac{4 \cdot M_k}{D} = \frac{4 \cdot 1250}{8} = 625 \text{ N} \quad (32)$$

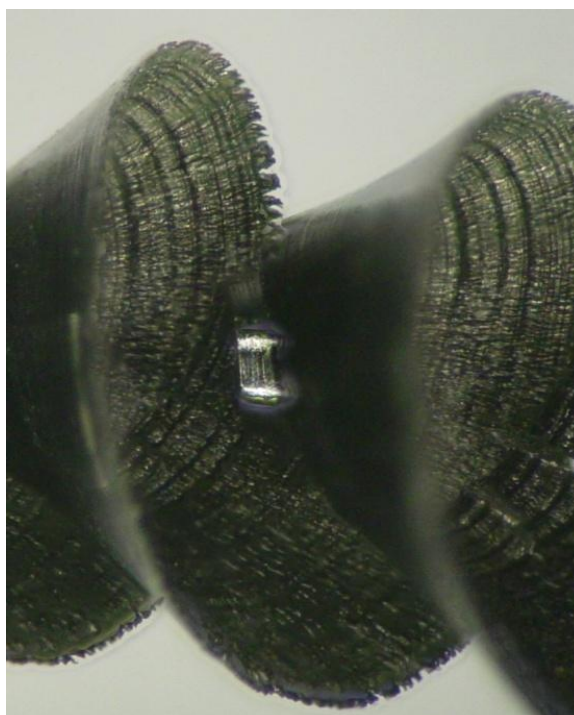
$$k_c = \frac{F_c}{A_D} = \frac{625}{0,16} = 3906,25 \text{ MPa} \quad (33)$$

Při třetím měření pro vrtání bez předvrtané díry byl naměřen výsledný krouticí moment $M_k = 1,24 \text{ Nm} = 1240 \text{ Nmm}$. Pro měrnou řeznou sílu a měrný řezný odpor platí vztah:

$$F_c = \frac{4 \cdot M_k}{D} = \frac{4 \cdot 1240}{8} = 620 \text{ N} \quad (34)$$

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} = \frac{620}{0,16} = 3875 \text{ MPa} \quad (35)$$

V závěrečné části experimentu bylo nutný výpočet měrných řezných odporů pro vrtání do materiálu s předvrtanou dírou. Hodnoty jsou mírně zkreslené, protože jsem vždy statisticky vyhodnocoval celkový výsledný krouticí moment M_k i s částí, kdy nástroj nejprve zabíral naprázdno, protože jádro nástroje nemohlo odebírat žádný materiál. Teprve potom nástroj začal odebírat třísku.



Obr. 19 Fotografie třísky oceli 12 050.

Pro první měření do materiálu s předvrtanou dírou byl naměřen výsledný krouticí moment $M_k = 1,19 \text{ Nm} = 1190 \text{ Nmm}$ a pro řeznou sílu a řezný odpor platí při jmenovitém průřezu třísky $A_D = 0,1 \text{ mm}^2$:

$$F_c = \frac{4 \cdot M_k}{D} = \frac{4 \cdot 1190}{8} = 595 \text{ N} \quad (36)$$

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} = \frac{595}{0,1} = 5950 \text{ MPa} \quad (37)$$

Pro druhé měření byl naměřen celkový výsledný krouticí moment $M_k = 1,13 \text{ Nm} = 1130 \text{ Nmm}$ a pro řeznou sílu a měrný řezný odpor platí vztah:

$$F_c = \frac{4 \cdot M_k}{D} = \frac{4 \cdot 1130}{8} = 565 \text{ N} \quad (38)$$

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} = \frac{565}{0,1} = 5650 \text{ MPa} \quad (39)$$

Při posledním měření byl naměřen výsledný krouticí moment $M_k = 1,10 \text{ Nm} = 1100 \text{ Nmm}$. Pro řeznou sílu a měrný řezný odpor platí vztah:

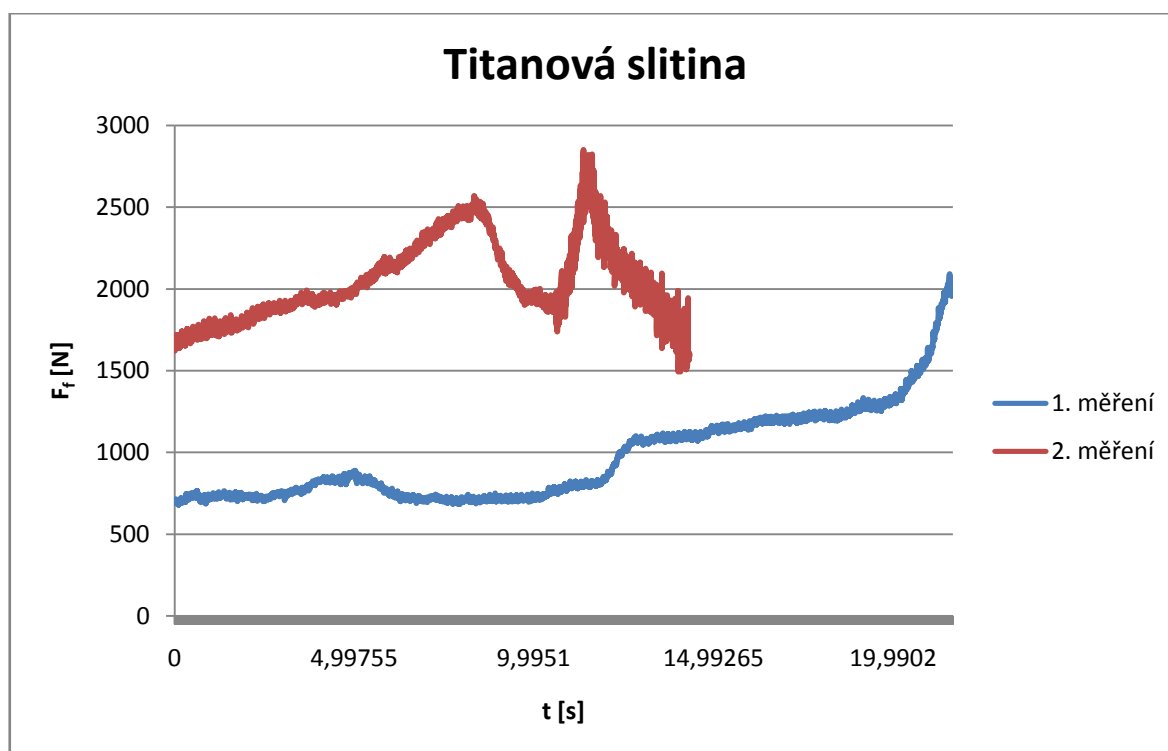
$$F_c = \frac{4 \cdot M_k}{D} = \frac{4 \cdot 1100}{8} = 550 \text{ N} \quad (40)$$

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} = \frac{550}{0,1} = 5500 \text{ MPa} \quad (41)$$

Tab. 3.7 Tabulka hodnot vypočtených měrných řezných odporů pro ocel.

Tabulka hodnot měrných řezných odporů pro jednotlivá měření vrtání do oceli		
	Plný materiál	Předvrtaná díra
1. měření	4000,00 MPa	5950 MPa
2. měření	3906,25 MPa	5650 MPa
3. měření	3875,00 MPa	5500 MPa

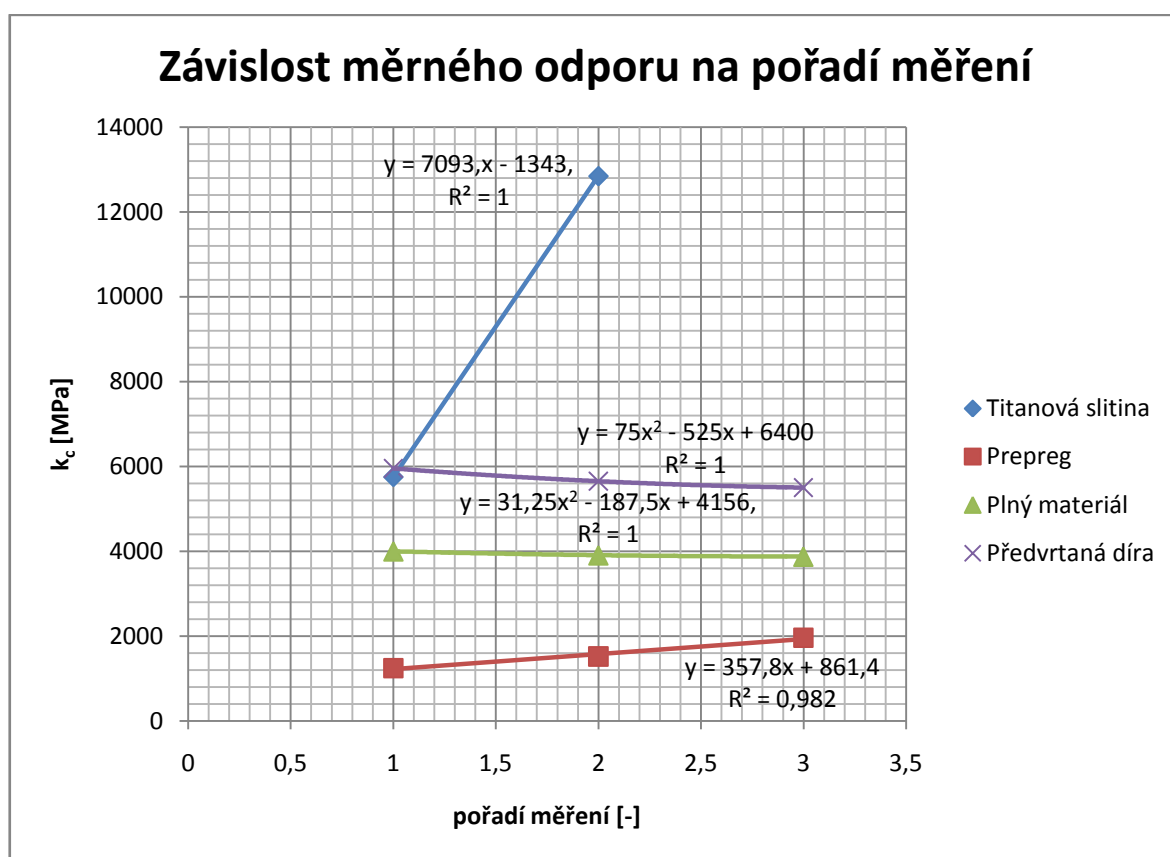
Statistické zpracování dat bylo provedeno v programu Minitab. Jedná se o statistický software, kde byly rozříděny hodnoty a následně vypočteny jednotlivé výsledné průměrné hodnoty sil. Současně došlo ke srovnání dílčích materiálů a k jejich měření.



Obr. 20 Graf závislosti růstu posuvové síly F_f pro obě měření titanové slitiny.

4 DISKUZE

Z obrázku 20 je patrné, že při vrtání do titanové slitiny se zpočátku hodnota posuvové síly F_f pohybovala v rozmezí $700 \div 1000$ N. Pro první měření dosáhla síla svého maxima na konci procesu, a to přibližně 2000 N. Při druhém měření síla poměrně dost kolísala a své maximální hodnoty dosáhla před koncem vrtání, zhruba 2800 N. Vyšších sil bylo dosahováno zejména proto, že byl použit stejný vrták jako v prvním případě. V důsledku toho byl už značně opotřebovaný z prvního pokusu. Druhé měření může působit zkresleně, protože vrták byl úplně zničen a zkouška musela být přerušena.

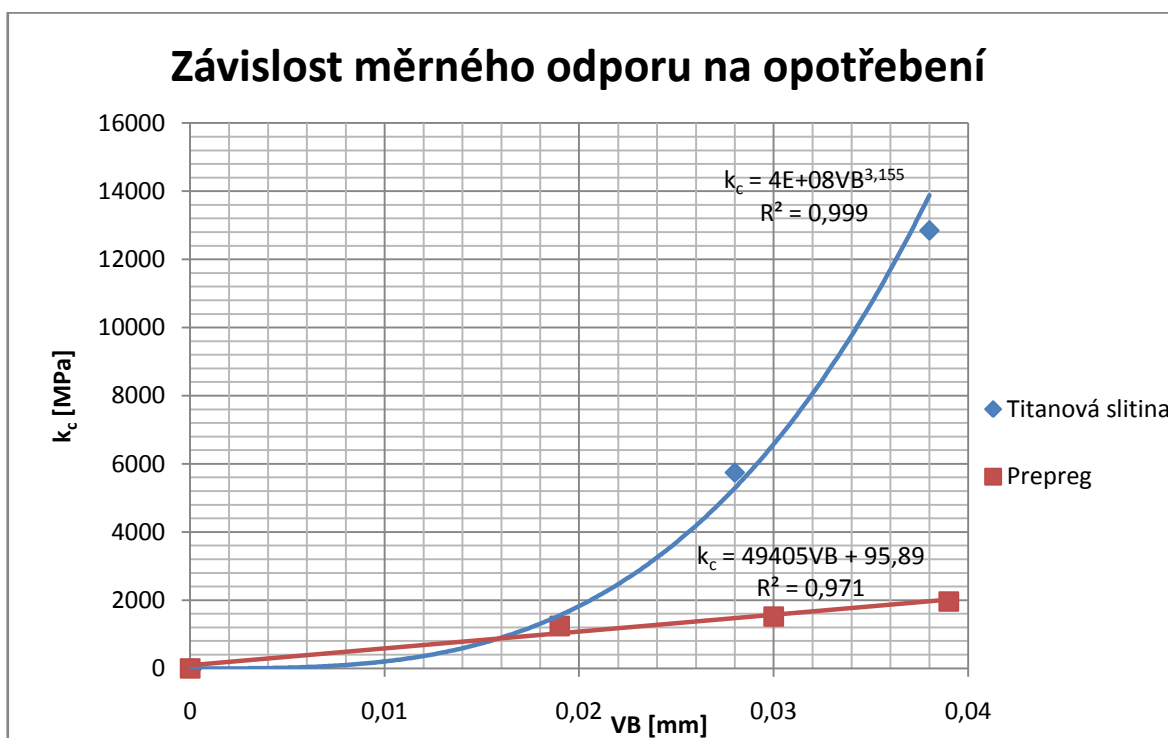


Obr. 21 Graf závislosti měrného odporu na pořadí měření.

Z obrázku 21 vyplývá, že měrný odpor u titanové slitiny je mnohem větší než u ostatních zkoušených materiálů. Je to způsobeno zvláště tím, že titan disponuje nízkou tepelnou vodivostí a ta má za následek nalepování materiálu na břit nástroje. Tím se zvyšuje stupeň jeho otupení, které je rychlejší. Dalším problémem u obrábění (a tím i vrtání) titanových slitin je vznik vibrací nástroje při procesu. Jsou zapříčiněny nesteromernou plastickou deformací, která má za následek tvorbu segmentované třísky, jež je vyfocena z průběhu experimentu na obrázku 22. Nejnižší hodnoty měrného odporu vykazoval kompozitní materiál. Pokud se týká oceli 12 050, hodnoty řezného odporu mají stejnou tendenci, nicméně se liší o zhruba 1500 - 2000 MPa.

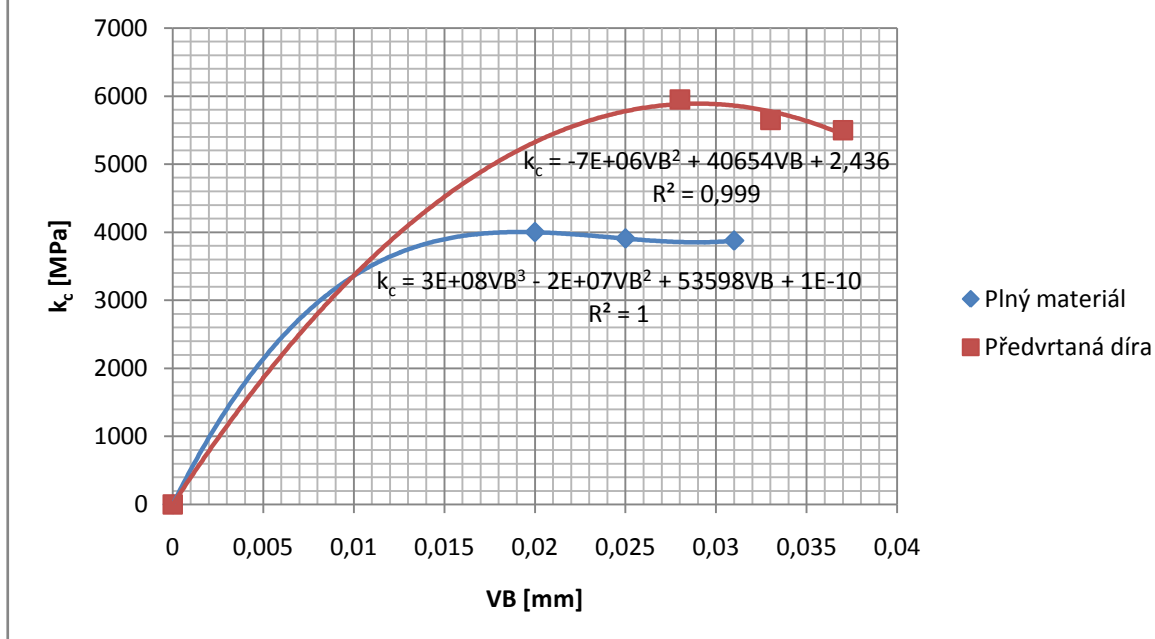


Obr. 22 Fotografie segmentované třísky titanové slitiny.

Obr. 23 Graf závislosti měrného odporu na opotřebení $k_c = f(VB)$ pro titan a Prepreg.

Na obrázku 23 je zaznamenána závislost měrného řezného odporu na opotřebení pro titanovou slitinu a kompozitní materiál Prepreg. Z grafu je zřejmé, že hodnoty měrného odporu pro titanovou slitinu jsou nesrovnatelně vyšší než u kompozitního materiálu, u kterého je závislost na opotřebení přibližně lineární. Na druhé straně u slitiny Ti Gr5 4-9-4475 má závislost řezného odporu na opotřebení exponenciální charakter.

Závislost měrného odporu na opotřebení



Obr. 24 Graf závislosti měrného odporu na opotřebení $k_c = f(VB)$ pro ocel.

Z předchozího obrázku 24 vyplývá, že pro ocel 12 050 jsou závislosti poměrně podobné. Měrné řezné odpory pro vrtání do materiálu s předvrtanou dírou nabývají vyšších hodnot, nicméně po prvním pokusu začínaly hodnoty mírně klesat. Hodnoty opotřebení byly naměřeny poněkud vyšší, protože materiál se začal odebírat přímo břity nástroje, nikoliv jádrem vrtáku. To vedlo k většímu opotřebení materiálu nástroje. Pro vrtání do předvrtané díry byl použit vrták z předchozího pokusu (vrtání do plného materiálu), v důsledku toho už nesl známky opotřebení. Hodnoty opotřebení pro druhý pokus proto musely být přepočítány tak, jako by se pokus uskutečnil s neopotřebovaným vrtákem. To stejné lze konstatovat i o vrtání bez jádra (do předvrtané díry), kde se hodnoty řezného odporu po prvním pokusu ustálily.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo zrekapitulovat literární prameny o problematice těžkoobrobitelných materiálů, zejména o jejich obrobitelnosti.

V práci jsou rozděleny a důkladně analyzovány jednotlivé těžkoobrobitelné materiály včetně vlivů přísadových prvků na vlastnosti každého materiálu a jeho slitiny.

Poměrně velká část této práce je věnována samotné obrobitelnosti dílčích slitin. Je zde popsána tvorba třísky a také tepelná bilance procesu řezání a v neposlední řadě také doporučení pro výběr řezných nástrojů tak, aby obrábění těchto materiálů probíhalo vždy bez problémů a snižovala se ekonomická nákladnost na procesy obrábění. U niklových slitin byla realizována rozsáhlá studie poměrně nového způsobu chlazení. Jedná se o kryogenní způsob chlazení, což znamená chlazení za pomoci mrazivého vzduchu o tlaku 1,5 MPa. Výsledkem této studie je zjištění, že hodnoty zbytkových tlakových napětí směrem do hloubky materiálu klesají až o 60%. Také tvrdost materiálu po tomto způsobu chlazení vzrostla zhruba o 60%, než jaká byla hodnota tvrdosti před obráběním.

Závěrečná část této práce je věnována experimentu. Pokus spočíval ve vrtání do různých materiálů, konkrétně do titanové slitiny Ti Gr5 4-9-4475, oceli 12 050 a kompozitního materiálu označeného jako Prepreg. Do oceli se vrtaly díry jednak do plného materiálu, jednak do materiálu s předvrtanou dírou. Mým cílem bylo spočítat měrné řezné odpory pro jednotlivá měření. Z výsledků experimentu vyplývají tyto skutečnosti:

- titanová slitina disponovala nejvyššími hodnotami řezných odporů, konkrétně 12 843,75 MPa při vrtání do plného materiálu,
- řezné odpory oceli 12 050 nabývaly odlišných hodnot při vrtání do plného materiálu a při vrtání bez jádra - řezný odpor pro vrtání do předvrtané díry byl poněkud vyšší,
- nejnižší hodnoty řezných odporů měl kompozitní materiál (1246,88 ÷ 1962,50 MPa),
- hodnoty opotřebení byly vždy po třetím měření každého pokusu podobné, v rozmezí 0,031 ÷ 0,039 mm.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005. ISBN 80-214-3068-0.
2. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2006. ISBN 80-214-2374-9.
3. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing s.r.o, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
4. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o.: *Příručka obrábění - kniha pro praktiky*. 1. české vyd. Překlad Miroslav Kudela. Praha: Scientia, 1997, 857 s. ISBN 91-972-2994-6. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook.
5. Korozivzdorné oceli - vlastnosti. In: *Vlastnosti korozivzdorných ocelí* [online]. Vydání 2002. Lucembursko: Euro Inox, 2002, 28 s. ISBN 2-87997-082-2 [cit. 2012-02-10]. Dostupné z: <http://www.euro-inox.org/pdf/map/StainlessSteelProperties_CZ.pdf>
6. KENDA, Jani; PUSAVEC, Franci; KOPAC, Janez. Analysis of Residual Stresses in Sustainable Cryogenic Machining of Nickel Based Alloy - Inconel 718. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. August 2011, 133, 4, s. 041009-1 - 041009-7.
7. PERONČÍK, Martin. *Obrábění těžkoobrobitelných materiálů*. Brno, 2010. Dostupné z: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=25826>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Anton Humár, CSc.
8. *Nikl a jeho slitiny, titan a jeho slitiny (katalog)*. Západočeská univerzita v Plzni, Oddělení povrchového inženýrství, dostupné z: <http://ateam.zcu.cz/download/nikl-titan-09_10.pdf>
9. LEYENS, Christoph a Manfred PETERS. *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2003, 513 s. ISBN 35-273-0534-3.
10. VASILKO, Karol. *Obrábanie titánu a jeho zliatin*. prvé. Prešov: Fakulta výrobných technológií Technickej univerzity v Košiciach, so sídlom v Prešove, 2001. 120 s. ISBN 80-7099-683-8.
11. PRAMET TOOLS, s.r.o. Šumperk, ČR. *Soustružení 2012*. [online]. [cit. 2012-04-08]. Dostupné z: <<http://www.pramet.com/download/katalog/pdf/Turning%202012%20CZ%20PROG.pdf>>
12. Special metals. *Product Handbook of High-Performance Alloys* [online]. Vydání 2001. New Hartford, New York, USA, 2001 [cit. 2012-04-15]. Dostupné z: <<http://www.specialmetals.com/documents/Product%20Handbook%20Part%201.pdf>>
13. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o.: *Soustružení korozivzdorných ocelí*. 1. české vyd. Překlad Miroslav Kudela. Praha: Scientia, 2001, 88 s. Přel. z: Stainless steel turning.

14. SEDLÁČEK, Jan. *Efektivní obrábění vláknově vyztužených kompozitních materiálů: Effective machining of fiber reinforced composite materials: zkrácená verze Ph.D. Thesis.* [V Brně: Vysoké učení technické], 2010. 30 s. ISBN 978-80-214-4142-2.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
CNC	[-]	číslicové řízení počítačem (computer numerical control)
HB	[-]	tvrdost dle Brinella
HV	[-]	tvrdost podle Vickerse
SK	[-]	slinutý karbid

Symbol	Jednotka	Popis
A	[%]	tažnost
A_D	[mm ²]	jmenovitý průřez třísky
D	[mm]	průměr vrtáku
E	[GPa]	modul pružnosti v tahu
F	[N]	síly pro obrábění
F_c	[N]	řezná síla
F_f	[N]	posuvová síla
G	[GPa]	modul pružnosti ve smyku
M_k	[Nm]	krouticí moment
R	[N]	síly spojeny s vnitřním řezným odporem materiálu
R_{p0,2}	[MPa]	mez kluzu
R_m	[MPa]	mez pevnosti
VB	[mm]	opotřebení nástroje
a_p	[mm]	šířka záběru ostří
b_D	[mm]	jmenovitá šířka třísky
d	[mm]	průměr předvrtané díry
f	[mm]	posuv nástroje na jednu otáčku
f_z	[mm]	posuv na zub
h_D	[mm]	jmenovitá tloušťka třísky
k_c	[MPa]	měrný řezný odpor
n	[min ⁻¹]	otáčky nástroje

v_c	[m.min⁻¹]	řezná rychlost
v_{c15}	[m.min⁻¹]	řezná rychlost při trvanlivosti T=15 minut pro sledovaný materiál
v_{c15et}	[m.min⁻¹]	řezná rychlost při trvanlivosti T=15 minut pro etalonový materiál
v_f	[m.min⁻¹]	posuvová rychlost
z	[-]	počet zubů (břitů) nástroje

