



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ZEFEKTIVNĚNÍ PROCESU OBRÁBĚNÍ LOŽISKOVÝCH KROUŽKŮ

EFFICIENCY INCREASING OF BEARING RINGS MACHINING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Pekař

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Pavel Pekař
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

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 diplomové práce:

Zefektivnění procesu obrábění ložiskových kroužků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce se bude zabývat zefektivněním technologie soustružení při obrábění výkovků ložiskových kroužků z oceli 100Cr6. V práci bude provedena analýza stávajícího stavu obrábění ložiskových kroužků a navržena inovace, která povede k zefektivnění stávajícího výrobního procesu. Součástí práce bude provedení zkoušek trvanlivosti za různých řezných podmínek a jejich porovnání se současným stavem výroby z technického i ekonomického hlediska. Cílem práce bude zvýšení produktivity obrábění a hospodárnější zpracovávání odpadu formou třísek, což povede ke generování vyššího zisku při výrobě ložiskových kroužků. Práce bude ukončena technicko–ekonomickým zhodnocením včetně adekvátnosti použitých metod při obrábění ložiskových kroužků.

Cíle diplomové práce:

Literární rešerše dané problematiky.

Analýza stávajícího stavu výroby ložiskových kroužků.

Návrh inovace výrobního procesu – zefektivnění stávajícího stavu.

Technicko–ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

KOČMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.

HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Vyd. 1. Praha: MM publishing, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

Příručka obrábění-kniha pro praktiky. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. Přel. KUDELA, M. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.

MÁDL, J. Optimalizace řezných podmínek v teorii obrábění. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1990. ISBN 80-01-00323-X.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá zefektivněním soustružení při obrábění výkovků ložiskových kroužků z oceli 100Cr6. První část je zaměřena na danou problematiku z teoretického hlediska. Následně byla provedena analýza stávajícího výrobního procesu a navržena inovace, která povede k jeho zefektivnění. Součástí práce je provedení zkoušek trvanlivosti nástroje za různých řezných podmínek a jejich porovnání se současným stavem výroby z technického i ekonomického hlediska.

Klíčová slova

Obrábění, soustružení, ložisko, zefektivnění, náklady

ABSTRACT

The master's thesis deals with the efficiency of turning in machining of forgings of bearing rings made of 100Cr6 steel. The first part is focused on the problem from the theoretical point of view. Next, an analysis of the existing production process was carried out and an innovation that will lead to its efficiency was proposed. Part of the work is to carry out tool durability tests under different cutting conditions and to compare them with the current state of production from a technical and economical point of view.

Keywords

Machining, turning, bearing, increasing efficiency, costs

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PEKAŘ, Pavel. *Zefektivnění procesu obrábění ložiskových kroužků*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149658>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Sedlák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Zefektivnění procesu obrábění ložiskových kroužků vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

.....
místo, datum

.....
Pavel Pekař

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu práce doc. Ing. Josefu Sedlákovu, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě Šroubárna Kyjov, spol. s.r.o. za spolupráci, zejména Ing. Martinu Gazdovi a Robertu Šafářovi. Děkuji také své rodině za podporu během celého studia.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 TECHNOLOGIE SOUSTRUŽENÍ.....	10
1.1 Nástroje pro soustružení	13
1.2 Opotřebení nástroje	16
1.3 Trvanlivost nástroje	21
1.4 Náklady na obrábění.....	23
1.5 Optimalizace trvanlivosti	25
2 SOUČASNÝ STAV VÝROBY	26
2.1 Představení společnosti	26
2.2 Postup výroby ložiskových kroužků	27
2.3 Materiál 100Cr6	28
2.4 Obrábění ložiskových kroužků.....	29
2.5 Obráběcí stroj a měřicí zařízení.....	30
3 NÁVRH INOVACE VÝROBNÍHO PROCESU	33
3.1 Návrh experimentu	33
3.2 Realizace experimentu.....	34
3.3 Vyhodnocení experimentu	37
3.4 Zpracování výsledků experimentu	41
4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	44
4.1 Náklady na obrobení v současném stavu	44
4.2 Náklady na obrobení po inovaci.....	46
4.3 Porovnání způsobů obrábění	48
ZÁVĚR.....	50

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam příloh

ÚVOD

Současná ekonomická krize se mimo jiné obory výrazně promítla i do strojírenství, neboť výrobní podniky vykazují velkou spotřebu energií, jejichž cena se za poslední roky zvýšila až o desítky procent. Tento růst se promítá nejen do nákladů na samotné energie, ale také do cen vstupních materiálů, které jsou touto skutečností rovněž ovlivněny. Z důvodu zachování konkurenceschopnosti si firmy často nemohou dovolit zvýšit cenu svých produktů v odpovídající míře, a proto je potřeba hledat různá úsporná opatření. Jedním z těchto opatření může být například zefektivnění využití obráběcích strojů.

Neustálým vývojem v oblasti nástrojů, který nejčastěji spočívá v úpravě použitého materiálu, povlaku nebo jeho geometrie, bývá umožněno použití rezných rychlostí, posuvů a šířek záběru ostří zvyšujících produktivitu výroby při zachování životnosti nástroje. Jejich výrobci sice uvádějí, jakým způsobem je nejvhodnější obrábět, nicméně analýza těchto rezných podmínek v daném podniku a následné stanovení jejich nejvhodnější kombinace může výrazně ovlivnit výslednou cenu výroby každého kusu, což se nejvíce promítne v konečných nákladech zejména při hromadné výrobě, čímž produkce ložiskových kroužků bezpochyby je.

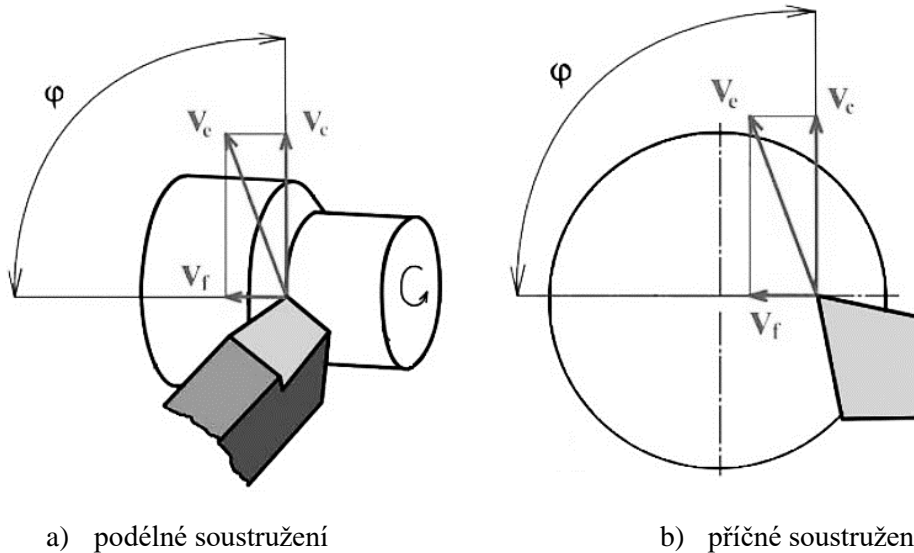
Ložiska jsou rotační součásti sloužící ke snížení tření a tím i k usnadnění vzájemného pohybu mezi dvěma částmi mechanismu, což vede ke zvýšení efektivity a životnosti celého zařízení, kterým může být například raketoplán, automobil, soustruh, gyroskop, dopravník, pračka, ventilátor, posuvné dveře atd. Konstrukčně nejjednodušším typem ložisek jsou kluzná ložiska, která se skládají pouze z vnějšího a vnitřního kroužku. Druhý typ se skládá z vnitřního a vnějšího kroužku, které jsou odděleny kuličkami, válci nebo jinými elementy, jejichž rozstup určuje ložisková klec. Tento druh konstrukce se nazývá valivé ložisko. Dále se ložiska dělí podle způsobu namáhání na axiální a radiální, podle počtu řad valivých elementů a také podle jejich tvaru, viz obr. 1.



Obr. 1 Valivá ložiska [1].

1 TECHNOLOGIE SOUSTRUŽENÍ

Technologie soustružení se používá pro zhotovení součástí válcovitých, kuželových i různých profilových tvarů. Tvrďší řezný nástroj je nejčastěji pevný a vniká do obrobku vykonávající rotační pohyb, viz obr. 2. Tato metoda obrábění sice patří z mnoha hledisek k těm nejjednodušším, nicméně se však také řadí k těm nejvíce používaným, a proto dochází k jejímu neustálému vývoji. K soustružení je obvykle zapotřebí pouze jednobřítý nástroj, nicméně mnohá základní pravidla lze aplikovat i při obrábění vícebřítými nástroji [2; 4; 5].



Obr. 2 Vektory rychlostí při soustružení [3].

Řezná rychlost v_c se rovná obvodové rychlosti rotujícího polotovaru, která je dána počtem otáček a rozměrem opracovávaného průměru. V případě soustružení čelních ploch tedy dochází ke změně řezné rychlosti, pokud obrobek rotuje konstantními otáčkami. Většina moderních strojů je však vybavena funkcí automatické změny otáček pro dosažení konstantní rychlosti. Při obrábění součástí o velmi malém průměru není tato kompenzace možná, neboť výrobní stroje mají omezený rozsah otáček vřetene, takže se musí řezná rychlost přizpůsobit [2; 3].

Vztah pro výpočet řezné rychlosti v_c [3]:

$$v_c = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{1\,000}, \quad (1.1)$$

kde: D – obráběný průměr [mm],

n – otáčky obrobku [min^{-1}].

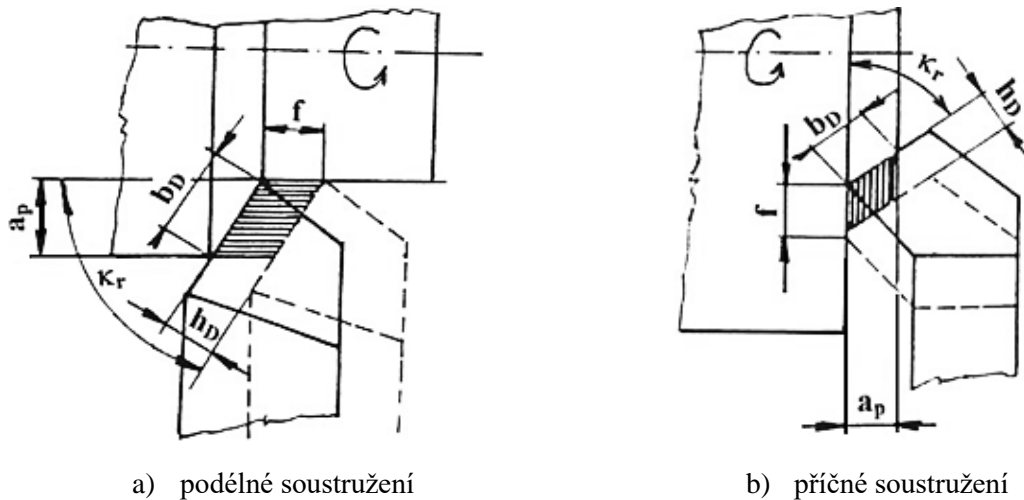
Další velmi významnou veličinou je rychlost posuvu v_f . Jedná se o rychlost vedlejšího pohybu, který vykonává soustružnický nůž vůči rotujícímu obrobku. Velikost posuvu určuje dráhu nástroje připadající na jednu otáčku polotovaru. Tato řezná podmínka výrazně ovlivňuje celkovou rychlost úběru materiálu, kvalitu utváření třísky a jakost obrobené plochy [2; 3].

Vztah pro výpočet posuvové rychlosti v_f [3]:

$$v_f = \frac{f \cdot n}{1\,000}, \quad (1.2)$$

kde: f – posuv [mm].

Šířka záběru ostří a_p je limitována mechanickými vlastnostmi obráběného materiálu, tuhostí obrobku a způsobem obrábění. Podle těchto omezení bývá volena maximální možná hodnota pro dosažení co největší produktivity obrábění. V některých případech lze odebrat celý přírůstek na jednu třísku. Šířka záběru ostří spolu s posuvem a nástrojovým úhlem nastavení hlavního ostří udává průřez třísky, viz obr. 3 [2; 3; 4].



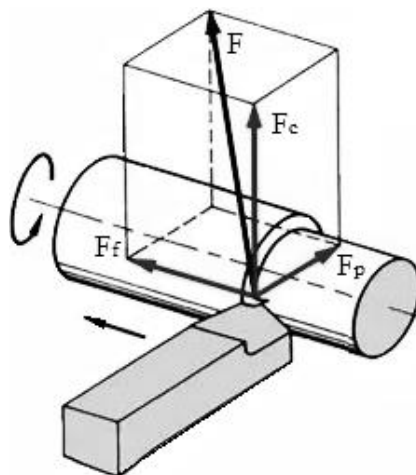
Obr. 3 Průřez třísky při soustružení [5].

Jmenovitý průřez třísky A_D se stanoví podle vztahu [5]:

$$A_D = b_D \cdot h_D = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \cdot f \cdot \sin \kappa_r = a_p \cdot f, \quad (1.3)$$

- kde: h_D – jmenovitá tloušťka třísky [mm],
 b_D – jmenovitá šířka třísky [mm],
 a_p – šířka záběru ostří [mm],
 κ_r – úhel nastavení hlavního ostří [°].

Řezné síly je možno změřit dynamometrem nebo teoreticky spočítat. Největší tlak působí přímo na ostří břitu a postupně se zeslabuje podél čela nástroje. Celková řezná síla soustružení se skládá z řezné síly F_c , posuvové síly F_f a pasivní síly F_p , viz obr. 4. Při podélném soustružení tlačí pasivní složka nástroj do místa řezu v radiálním směru, posuvová síla probíhá ve směru axiálního posuvu. Největší řezná síla směřuje tangenciálně proti smyslu otáčení obrobku [2; 3].



Obr. 4 Řezné síly [3].

Výpočet složek celkové řezné síly je možno provést na základě empiricky vyšetřených závislostí, u kterých se mění pouze konstanty. Řezná síla F_c se tedy stanoví dle [3]:

$$F_c = C_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}}, \quad (1.4)$$

kde: C_{F_c} – materiálová konstanta [-],

x_{F_c} – exponent vlivu šířky záběru ostří [-],

y_{F_c} – exponent vlivu posuvu [-].

Celková řezná síla F je dána vektorovým součtem dílčích složek [3]:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2}. \quad (1.5)$$

Další způsob výpočtu řezné síly vychází ze znalosti měrné řezné síly. Jedná se o sílu vztaženou na milimetr čtvereční průřezu třísky, tudíž úzce souvisí s tloušťkou odebírané vrstvy a posuvem, protože jejich nárůst vede ke snížení její hodnoty. Na její velikost má vliv také řezná rychlost. Zvyšující se rychlost znamená i růst teploty a důsledkem toho klesá pevnost obráběného materiálu. Tyto skutečnosti podporují obrábění řeznými podmínkami v nejvyšší možné míře, což je zároveň i velice produktivní [2; 3].

Výpočet řezné síly F_c podle měrné řezné síly je dána výpočtem [4]:

$$F_c = k_c \cdot A_D, \quad (1.6)$$

kde: k_c – měrná řezná síla [MPa].

Celkový výkon obráběcího stroje P_m potřebný pro pokrytí řezného výkonu a pasivních odporů stroje se určí dle vztahu [5]:

$$P_m = \frac{F_c \cdot v_c}{60 \cdot \eta}, \quad (1.7)$$

kde: η – mechanická účinnost obráběcího stroje [-].

Strojní čas (čas automatického chodu stroje) tvoří ve většině případů nejdelší úsek z celého obráběcího procesu, a proto se také jedná o nejvíce nákladnou část. Z toho důvodu se spousta pozornosti věnuje optimalizaci řezných podmínek a strategii obrábění, díky čemuž se strojní čas snižuje [15].

Jednotkový strojní čas t_{AS} potřebný pro výrobu součásti se určí jako [4]:

$$t_{AS} = \frac{L}{n \cdot f} = \frac{l_n + l + l_p}{n \cdot f}, \quad (1.8)$$

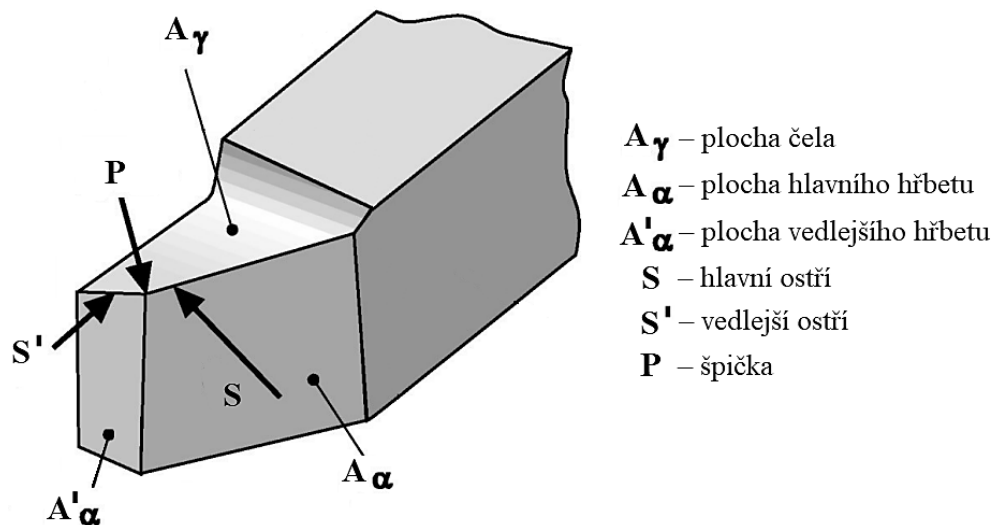
kde: l_n – délka náběhu [mm],

l – obráběná délka součásti [mm],

l_p – délka přeběhu [mm].

1.1 Nástroje pro soustružení

Nástroje pro soustružení jsou soustružnické nože, viz obr. 5. Ty mohou být celistvé, s pájenými břitovými destičkami, anebo s vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD), které jsou v dnešní době používány bezkonkurenčně nejvíce. Výhoda těchto nástrojů spočívá v jejich jednoduché výměně, kdy stačí pouze odepnout destičku a otočit na neopotřeбенé ostří, nebo ji vyměnit za úplně novou. Není tedy nutno jakkoliv manipulovat s držákem, díky čemuž se nůž následně nemusí seřizovat, což výrazně přispívá ke zvýšení produkce výroby. VBD bývá nejčastěji připojena k tělu nástroje z konstrukční oceli pomocí šroubu nebo upínky. Držáky se rozlišují podle směru posuvového pohybu na levé a pravé, podle způsobu obrábění na vnější a vnitřní. Na základě strategie obrábění se nástroje dělí na uběrací, zapichovací, upichovací, kopírovací a speciální tvarové [5].



Obr. 5 Řezná část soustružnického nože [5].

V případě obrábění VBD jsou jednotlivé nástrojové úhly dány kombinací použité destičky a nožového držáku. Velikosti těchto úhlů z velké části ovlivňují řezné síly, teplotu řezání, mechanismus tvorby třísky, povrchové napětí obrobené plochy, její strukturu a celkovou hospodárnost soustružení. Volba nástrojových úhlů je nejvíce závislá na fyzikálních a mechanických vlastnostech obráběného materiálu, dále také na vlastnostech nástrojového materiálu a požadovaných vlastnostech povrchové vrstvy [2; 5].

Úhel nastavení hlavního ostří κ_r nejvíce ovlivňuje tvar třísky a složky řezné síly. Při obrábění úhlem 90° odpovídá šířka třísky šířce záběru ostří a tloušťka třísky velikosti posuvu. S klesající hodnotou tohoto úhlu až k 45° roste část ostří v záběru, čímž se zvětšuje šířka třísky na úkor její tloušťky. Zatížení při oddělování třísky se tedy rozloží na delší část ostří, díky čemuž při soustružení běžných materiálů dochází ke zvýšení trvanlivosti břitu. Menší úhel nastavení hlavního ostří se také vyznačuje rovnoměrnějším rozdělením řezné síly mezi posuvovou a pasivní složkou. V případě soustružení dlouhých štíhlých obrobků, které mají sklon k deformaci ohybem při obrábění, bývá volen úhel i přes 90° , aby docházelo ke směřování co největší části řezné síly do axiálního směru [2; 3; 5; 6].

Úhel sklonu hlavního ostří λ_s má vliv na tuhost břitu a zároveň i částečně ovlivňuje směr, kterým odcházejí třísky z místa řezu. Hodnota tohoto úhlu může nabývat kladných i záporných hodnot. Podle jeho smyslu se VBD dělí na negativní a pozitivní. Úhel sklonu je pozitivní v případě, kdy se ostří zvedá směrem ke špičce břitu, čehož se využívá při obrábění méně pevných materiálů. Negativní je naopak když klesá směrem ke špičce břitu. Taková geometrie dosahuje vyšší tuhosti břitu, a proto se používá k soustružení pevnějších obrobků [2; 3; 5].

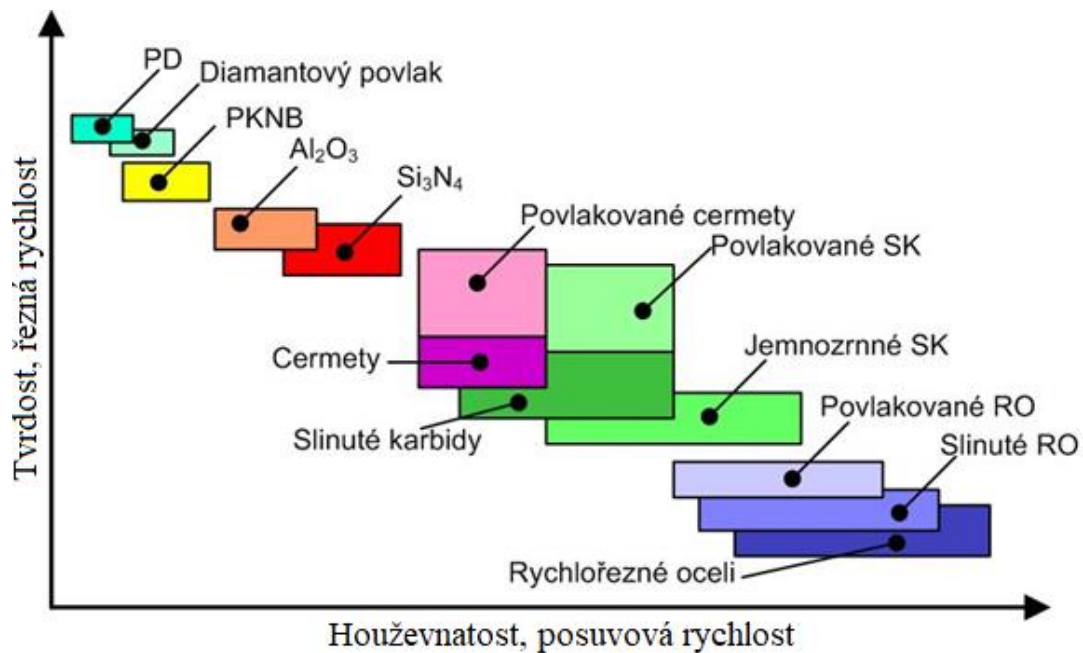
Úhel čela γ_0 ovlivňuje hlavně mechanismus tvorby třísky a její odvádění, neboť právě po ploše čela odchází z místa řezu. Má vliv na velikost řezné síly, protože se zmenšující se velikostí tohoto úhlu dochází k intenzivnějšímu pěchování třísky, což má za následek i vyšší řezný odpor. Nízké hodnoty úhlu jsou dále doprovázeny i vyšší tuhostí nástroje. Stejně jako u úhlu sklonu hlavního ostří se jeho velikost pohybuje v pozitivních i negativních stupních. U VBD se často stává, že kvůli zamezení kontaktu mezi hřbetem nástroje a obrobkem je úhel sklonu hlavního ostří lehce negativní, ale úhel čela výrazně pozitivní, čímž je dosaženo celkově pozitivní geometrie. V současnosti bývá na čelní plochu většiny destiček vylisován nebo vybroušen utvářeč třísek, který umožňuje jejich optimální utváření a výrazně ovlivňuje celkovou výkonnost nástroje [2; 5; 6].

Úhel hřbetu α_0 má vliv na podmínky tření mezi hřbetem nástroje a obrobeným povrchem obrobku. Stejně jako předešlé úhly má také vliv na tuhost nástroje, avšak na rozdíl od nich může dosahovat pouze kladných hodnot kolem 10° . Větší hodnoty jsou doporučeny při obrábění materiálů s vysokou pevností, malé tloušťky třísky, nízké posuvy a vyšší řezné rychlosti [5; 6].

Úhel špičky ε ležící mezi hlavním a vedlejším ostří je dán základním tvarem VBD. Určuje velikost aktivní plochy břitu a tím i jeho stabilitu. Čím ostřejší špička břitu je, tím je také slabší a méně stabilnější, nicméně pro dokončovací operace, kdy je potřeba obrobit i těžce dostupné tvarové oblasti, je často nutno použít destičky s úhlem špičky pouze 35° . Naproti tomu destičky kruhového průřezu mají podstatně větší plochu břitu, takže jsou velice stabilní a lze je využít pro velice náročné obráběcí operace [2].

Poloměr špičky r_ε leží na teoretickém průsečíku hlavního a vedlejšího ostří. Špička je v rámci celé destičky tím nejslabším místem, protože se zde koncentruje zatížení vyvolané obráběcím procesem na relativně malou plochu. Poloměr má tedy hlavně za úkol snížit její ostrost a tím i zeslabení břitu. Větší zaoblení výrazně zvyšuje odolnost vůči velkým řezným silám, rozděljuje řez na větší část břitu a také mnohem lépe odvádí teplo, což způsobuje mimo jiné i delší trvanlivost VBD. Nevýhodou velkých poloměrů špičky je sklon k vibracím, tudíž kladou vysoké nároky na upnutí nástroje i obrobku pro dosažení požadované stability procesu. Kromě nároku na celkovou tuhost vyžadují i vyšší výkon stroje, protože se tříska tváří v jednom směru vlivem úhlu čela a ve druhém směru vlivem poloměru zaoblení. Spolu s velikostí posuvu má zásadní vliv na výslednou jakost obrobené plochy. Další řeznou podmínkou, které je potřeba věnovat pozornost v závislosti na tomto poloměru, je šířka záběru ostří. V případě obrábění velkým poloměrem špičky při malé šířce záběru ostří dochází ke zmenšování úhlu nastavení hlavního ostří, což je nevhodné v případě obrábění dlouhých štíhlých obrobků kvůli zvýšení pasivní síly. Obecně lze konstatovat, že poloměr špičky by měl být volen co největší pro hrubování i dokončování [2; 5].

Volba vhodného řezného materiálu výrazně ovlivňuje výslednou produktivitu obráběcího procesu. Obecně platí, že každých 20 let dochází ke ztrojnásobení efektivity obrábění a tím i zvýšení produktivity. Dlouholetý vývoj v této oblasti umožňuje výběr vhodného řezného materiálu pro každou aplikaci. Materiály, které dosahují enormních hodnot tvrdosti, jsou vhodné pro obrábění vysokými řeznými rychlostmi a malými posuvy. Pro obrábění vysokým posuvem jsou zase určeny houževnaté materiály, viz obr. 6. Historicky první nástroje byly vyrobeny z konstrukčních ocelí, nicméně zanedlouho byly nahrazeny nástrojovými ocelmi. V dnešní době je nejvýraznější vývoj v oblasti použití slinutých karbidů s povlakem, protože představují kompromis mezi požadovanou tvrdostí a houževnatostí [2; 3; 5; 7].



Obr. 6 Přehled řezných materiálů [5].

Rychlořezná ocel je slitina železa a uhlíku legovaná zejména W a Cr. Díky těmto prvkům dochází v průběhu kalení a následného popouštění k tvorbě velkého množství karbidů. Ve srovnání s ostatními materiály je jejich tvrdost poměrně nízká, nicméně z hlediska houževnatosti vykazují nejlepší vlastnosti. Z těchto důvodů jsou vhodné pouze pro obrábění nízkými řeznými rychlostmi. V dnešní době jsou nejvíce využívány pro výrobu tvarově složitých nástrojů, které nelze vyrobit z ostatních řezných materiálů [3; 5].

Cermety jsou materiály, které jsou velice podobné slinutým karbidům jak svou strukturou, tak i řeznými vlastnostmi. Jako kovové pojivo pro karbidy na bázi Ti využívají Ni nebo slitinu Ni a Co. Vyznačují se vynikající odolností proti oxidačnímu opotřebení, chemickou stabilitou, tvrdostí za tepla a odolností proti tvorbě nárůstku. Dobře se uplatní pro obrábění malých přesně definovaných přídavek na obrábění korozivzdorných ocelí při středních až vysokých řezných rychlostech a středních posuvech. Dodržením těchto podmínek lze dosáhnout dlouhé trvanlivosti břitu a dobré jakosti obrobku [2; 3; 5].

Řezná keramika byla nejdříve používána pouze v technologii broušení ve formě brusných zrn. Postupný vývoj však umožnil vyrobit z řezné keramiky i VBD. Rozlišují se oxidické keramiky (Al_2O_3), které dosahují vyšší tvrdosti s nižší houževnatostí a neoxidické (Si_3N_4), jejichž použití je omezeno na obrábění šedé litiny, protože při obrábění ocelí a tvárných litin dochází k velmi rychlému opotřebení. Obecně má řezná keramika vysokou tvrdost za tepla a nereaguje chemicky s materiálem obrobku [2; 3; 5].

Kubický nitrid boru vykazuje výrazně vyšší tvrdost než jakýkoliv karbid kovu. Svou tvrdost si zachovává i při vysokých teplotách, takže je velice odolný proti abrazivnímu opotřebení i za vysokých řezných rychlostí. Jeho nespornou výhodou oproti ještě tvrdšímu diamantu je chemická odolnost. Jedná se o řezný materiál pro obrábění žáruvzdorných a kalených ocelí, jejichž tvrdost přesahuje 48 HRC. Při obrábění měkčích materiálů dochází k výraznému opotřebení. Výsledný povrch obrobku dosahuje velice nízkých hodnot drsnosti, což v případě soustružení břitem z kubického nitridu boru činí zajímavou alternativu k dokončovací operaci broušením [2; 3].

Polykrystalický diamant je tím nejtvrdším známým řezným materiálem. Syntetický diamant dosahuje téměř stejné tvrdosti jako přírodní monokrystalický diamant. Kvůli vysoké afinitě uhlíku k železu ho však nelze použít pro obrábění ocelí, takže nachází uplatnění spíše u zcela specifických aplikací, jako je obrábění vláknově vyztužených kompozitů, skel a ovrnávání brousících kotoučů [2; 3; 5].

Slinuté karbidy jsou řezným materiálem, který se skládá z tvrdých částic karbidů menších než 1 μm a houževnatého pojiva ve formě Co (případně Ni). Mezi nejvíce využívané karbidy se řadí WC, TiC, TaC a NbC. Výsledný produkt je tvořen karbidy z více než 80 %, takže se jedná o tvrdou strukturu, nicméně díky kovovému pojivu je zároveň i dostatečně houževnatá. Zejména podle typu a velikosti karbidů, druhu pojiva a jeho podílu značně kolísají mechanické vlastnosti slinutých karbidů, a proto je lze upravovat tak, aby plnily různorodé podmínky obrábění. Správně zvolený typ slinutého karbidu dosahuje podobných vlastností jako teoretický ideální řezný materiál. I při vysokých řezných rychlostech si zachovává odolnost proti opotřebení a tuhost. Z těchto důvodů jsou k výrobě nástrojů pro obrábění využívány nejvíce. VBD ze slinutých karbidů pro obrábění běžných ocelí se značí písmenem P a modrou barvou, korozivzdorných ocelí písmenem M a žlutou barvou, litin písmenem K a červenou barvou, neželezných kovů písmenem N a zelenou barvou, žárupevných slitin písmenem S a hnědou barvou, zušlechtěných písmenem H a šedou barvou [2; 3; 7].

Řezné vlastnosti slinutého karbidu jsou ještě o řád posunuty pomocí velmi tvrdých povlaků vytvořených na povrchu nástroje. Povlaky o tloušťce pouze několika mikrometrů dosahují vyšší tvrdosti než ten samý materiál v jakékoliv jiné podobě. Vrstvy o tloušťce více než 10 μm jsou sice odolnější proti opotřebení, ale zároveň také křehčí a mají sklon k odlupování, což negativně ovlivňuje výkonnost břitové destičky. Povlakové materiály typu TiC, TiN, AlN, Al₂O₃ a TiCN neobsahují žádné pojivo, mají jemnější zrnitost a méně defektů. Tato povrchová úprava umožňuje díky tepelné odolnosti použití vyšších řezných rychlostí a výrazně zvyšuje odolnost proti opotřebení. Při porovnání s nepovlakovými destičkami dosahují mnohonásobně vyšší trvanlivosti, takže i přes vyšší pořizovací cenu je jejich použití ekonomicky výhodnější. Podle způsobu tvorby povlaku se povlakování dělí na CVD (*Chemical Vapour Deposition*) a PVD (*Physical Vapour Deposition*) [2; 7].

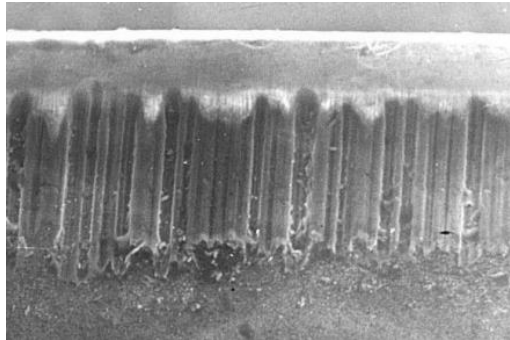
Metoda CVD spočívá ve vystavení nástroje atmosféře, která obsahuje povlakový materiál v plynné fázi, za vysokých teplot (900 – 1 200 °C). Přivedená energie ve formě tepla způsobuje chemickou reakci, jejíž produktem je tenký povlak na katalyzátoru (nástroj ze slinutého karbidu). Výsledná vrstva se vyznačuje značnou adhezí mezi podkladem a povlakem, možností nanesení vrstev o větší tloušťce, rovnoměrnou tloušťkou i v těžce přístupných místech a variabilitou typů povlaků. Největší nevýhodou je nemožnost vytvořit povlak na hranách [5].

Metoda PVD probíhá ve vakuu za nízkých pracovních teplot (500 °C). Povlakový materiál je odpařován z kladné elektrody, emitované atomární částice reagují s atmosférou komory a dopadají na nástroj připevněný k záporné elektrodě, kde se usazují a vytváří tenkou vrstvu. Hlavní výhodou je možnost povlakování ostrých hran a nízká teplota, která neovlivňuje podklad. Mezi nevýhody lze zařadit náročnější přípravu povrchu, nerovnoměrnou a celkově omezenou tloušťku povlaku [2; 5].

1.2 Opotřebení nástroje

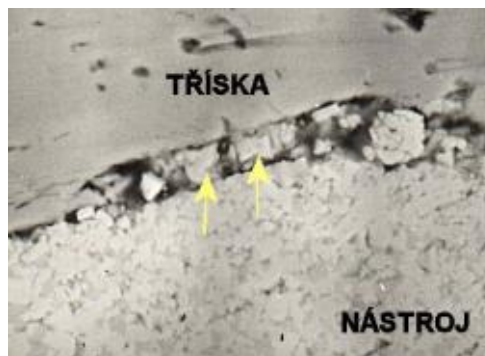
Obráběním kovových materiálů dochází k vytvoření velkého množství tepla, které sice v největší míře odchází z místa řezu odstraňovanými třískami, přesto ale výrazně ovlivňuje i samotný nástroj. Zvýšené teploty v kombinaci s vysokým tlakem potřebným pro oddělení třísky se projevují opotřebením břitu. Kombinací těchto mechanických, fyzikálních a chemických faktorů jsou rozlišeny základní mechanismy opotřebení [2; 3; 4].

Abrazivní opotřebení – jedná se o velmi rozšířený mechanismus, který vzniká zejména působením tvrdých částic obráběného materiálu na nástroj, čímž dochází k obrušování a vytvoření rovinné plošky na hřbetě břitu, viz obr. 7. Odolnost vůči tomuto jevu je tedy dána hlavně tvrdostí nástroje [2; 4; 5].



Obr. 7 Abrazivní opotřebení [5].

Adhezivní opotřebení – vzniká v procesu obrábění hlavně při nízkých teplotách na čele břitu nástroje. Prvotním projevem tohoto mechanismu je vytváření nárůstku mezi třískou a čelem břitu, viz obr. 8, s postupným narůstáním počtu vrstev, které jsou z třísky navařovány a vytvrzovány. Nárůstek se stává součástí ostří, tím mění jeho geometrii a podmínky obrábění. V momentě, kdy dojde k jeho odtržení, hrozí vytrhnutí částic břitu v důsledku těchto adhezivních spojů mezi třískami a nástrojem [2; 4; 5].

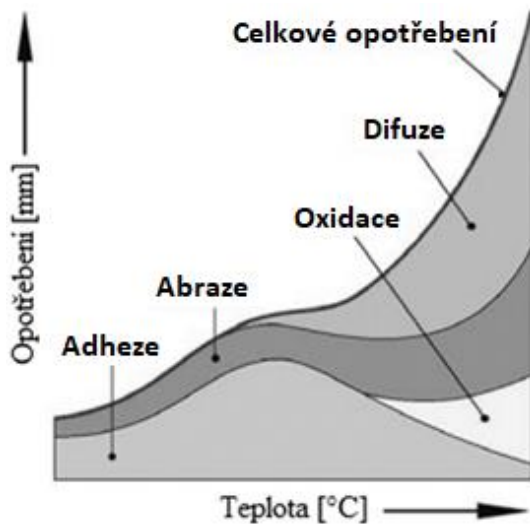


Obr. 8 Adhezivní spoj třísky a nástroje [5].

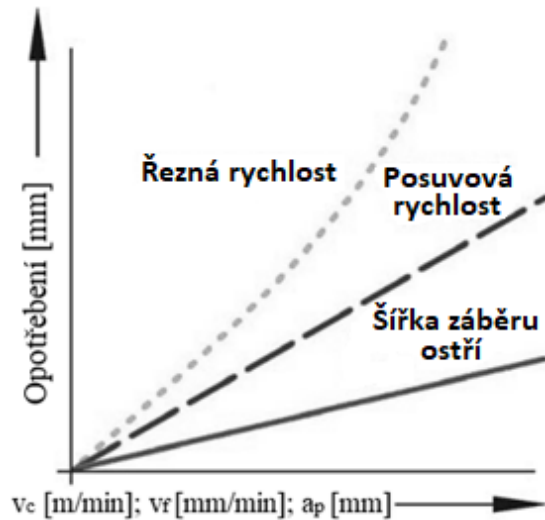
Difuzní opotřebení – jedná se o chemický mechanismus opotřebení. Rozhodujícím činitelem jsou chemické vlastnosti řezného materiálu a jeho afinita vůči materiálu obrobku. Vlivem difuze dochází k vzájemné migraci atomů mezi nástrojem a polotovarem, čímž vznikají nežádoucí mezikovové sloučeniny. Při obrábění pomocí slinitých karbidů začíná značná difuze železa s kobaltem již při teplotě 680 °C a zintenzivňuje až do teploty kolem 900 °C. Uhlík uvolněný z nástroje přechází do třísky [2; 3; 4].

Oxidační opotřebení – tento chemický mechanismus je ze všech zmiňovaných nejméně častý. Nastává při vysokých teplotách řezného procesu, kdy dochází k oxidaci nástrojového materiálu. Každý vzniklý oxid má jiné vlastnosti, a proto se výrazně liší náchylnost jednotlivých nástrojových materiálů k tomuto druhu opotřebení [2; 4].

Největší vliv na opotřebení břitu má teplota řezného procesu, viz obr. 9, takže chlazení kapalinou či vzduchem má pozitivní vliv na velikost opotřebení. Při obrábění v nízkých teplotách je dominantním mechanismem adheze s abrazí. S rostoucí teplotou se více začíná projevovat difuze a v nejvyšších přípustných hodnotách i oxidace. Z řezných podmínek má na teplotu největší vliv řezná rychlost, a proto právě tato podmínka nejvíce urychluje opotřebení, viz obr. 10. Další významným parametrem je posuvová rychlost [3; 5; 8].



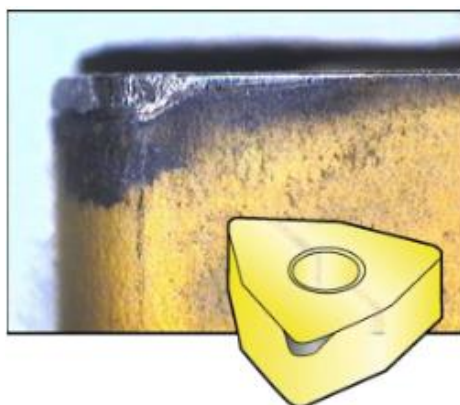
Obr. 9 Vliv teploty na opotřebení [3].



Obr. 10 Vliv řezných podmínek na opotřebení [3].

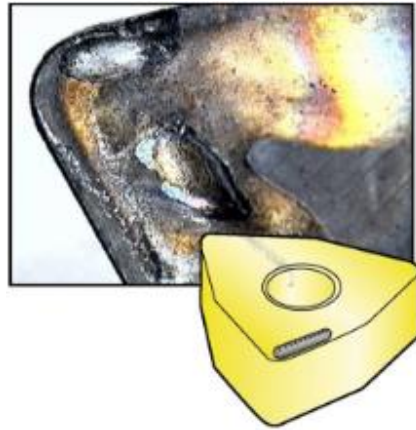
Důležitými předpoklady pro vznik předvídatelného opotřebení jsou vhodné podmínky pro obrábění, jakost materiálu, správný nástroj a odpovídající řezné podmínky. Opotřebení se na nástroji projevuje mnoha způsoby. Klasifikace těchto způsobů umožňuje identifikaci a následné napravení případných nedostatků nebo alespoň jejich minimalizaci při příliš rychlém otupení břitu [2; 10; 11; 12].

Otěr na hřbetu – tento druh opotřebení se rozvíjí stabilně, což má za důsledek jasný vztah mezi opotřebením a trvanlivostí nástroje, díky čemuž je velmi dobře předvídatelný, a proto se jedná o nejprůzračnější projev opotřebení. Při nízkých rychlostech dominuje abraze nástroje o obrobek a s rostoucí teplotou převládá spíše difuze. Otěr na hřbetu vypadá jako relativně pravidelná abraze podél ostří, viz obr. 11. Velké opotřebení má za následek zhoršení kvality povrchu, nepřesnost rozměrů a větší tření projevující se zvýšenou teplotou [2; 11; 12; 13].



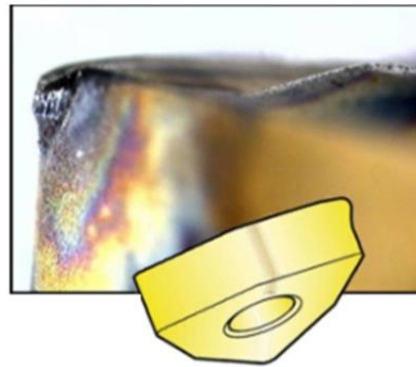
Obr. 11 Opatření hřbetu [13].

Výmol na čele – jedná se o druh opotřebení, který se nachází v místě kontaktu třísky s nástrojem, jinak je ale způsobeno stejnými mechanismy jako hřbetní opotřebení. Výraznější projev zde má difuze, neboť třísky dosahují nejvyšších teplot v rámci celého procesu obrábění, což podporuje migraci atomů. Hluboký výmol na čele, viz obr. 12, mění podmínky obrábění, tvar třísky, zeslabuje břit, a dokonce i vychyluje směr působení řezných sil [2; 4; 12; 13].



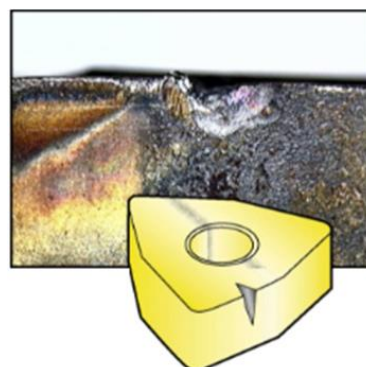
Obr. 12 Výmol na čele [13].

Plastická deformace – vzniká při obrábění vysokými řeznými rychlostmi a posuvovými rychlostmi. Nadměrné teplo způsobuje zvýšení plasticity pojiva materiálu nástroje a velké tlaky následně mechanicky přetěžují břit, čímž ho deformují, viz obr. 13. Důsledkem změny tvaru je generování dalšího tepla, které rychle dovede ostří do kritického stádia [2; 4; 11; 13].



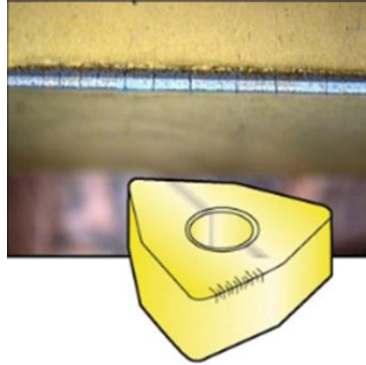
Obr. 13 Plastická deformace břitu [13].

Vrub na hřbetě – tento druh opotřebení nastává při obrábění obrobků, které mají povrch obrobku tvrdší než základní materiál v nižších vrstvách. Zpevnění může být způsobeno předchozím řezem (korozivzdorné oceli či superslitiny) nebo výrobou polotovaru kováním. Samotný vrub, viz obr. 14, vzniká na úrovni šířky záběru ostří vlivem koncentrovaného zatížení. Opotřebení je zde podporováno rovněž oxidací, neboť přesně v tomto místě se nachází vysoká teplota břitu v kombinaci s přístupem k vzdušnému kyslíku [2; 4; 11; 12; 13].



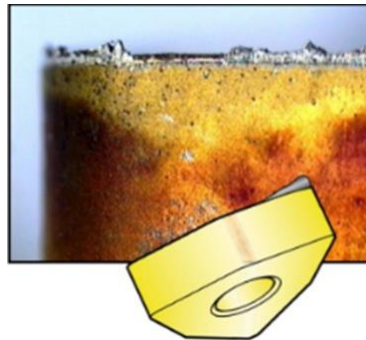
Obr. 14 Vrub na hřbetě [13].

Hřebenovité trhliny – z největší části jsou způsobeny střídavým namáháním vysokými a nízkými teplotami. Tyto teplotní šoky v kombinaci s mechanickými rázy tvoří tepelné trhliny po celé délce břitu, viz obr. 15, které dále podporují vylamování břitu. V případě soustružení se vyskytují zejména u přerušovaných řezů. Nápravným opatřením při tomto druhu opotřebení bývá nejčastěji změna přísunu chladiva do místa řezu [2; 11; 13].



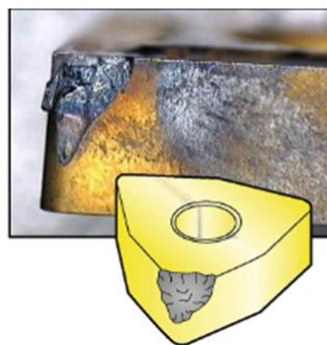
Obr. 15 Hřebenovité trhliny [13].

Nárůstek – vzniká důsledkem navaření materiálu obrobku na oblast ostří nástroje. Dochází k tomu zejména v případě silné chemické afinity prvků, vysokého tlaku a vhodné teploty. Nárůstek mění geometrii břitu, viz obr. 16, a navíc může dojít k vytržení části ostří při jeho oddělení, což dále vede k vyštipování hřbetu a zrychlenému opotřebení [2; 4; 13].



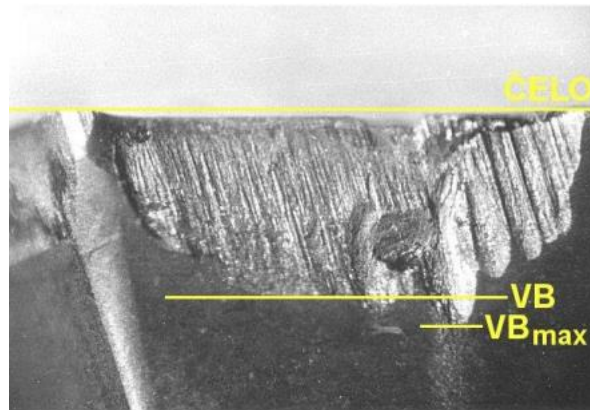
Obr. 16 Nárůstek [13].

Lom břitu – je definitivním koncem každého břitu, viz obr. 17. Při obrábění takovým nástrojem se celý proces stává velice nestabilní a nelze predikovat jeho výsledky. Nastává při zvolení naprosto nevhodných řezných podmínek, anebo pokud se některý z výše uvedených druhů opotřebení rozšíří takovým způsobem, že nástroj nadále není schopen zvládat působící zatížení. Řešením tohoto problému je včasná výměna ostří [2; 4; 12; 13].



Obr. 17 Lom břitu [13].

Opotřebení lze hodnotit pomocí přímých metod, kterými jsou měření rozměru vybraného kritéria, vážení břitové destičky, optické sledování funkční plochy, elektrické metody (odporové, indukční, polohové), ultrazvukové metody a radioaktivní metody. Mezi nepřímé metody patří měření složek řezných sil, měření příkonu obráběcího stroje, měření kmitání, měření teploty řezu a měření drsnosti obrobku. V praxi se nejčastěji měří opotřebení na hřbetě VB, viz obr. 18, pomocí dílenského mikroskopu a opotřebení na čele pomocí profiloměru [14].

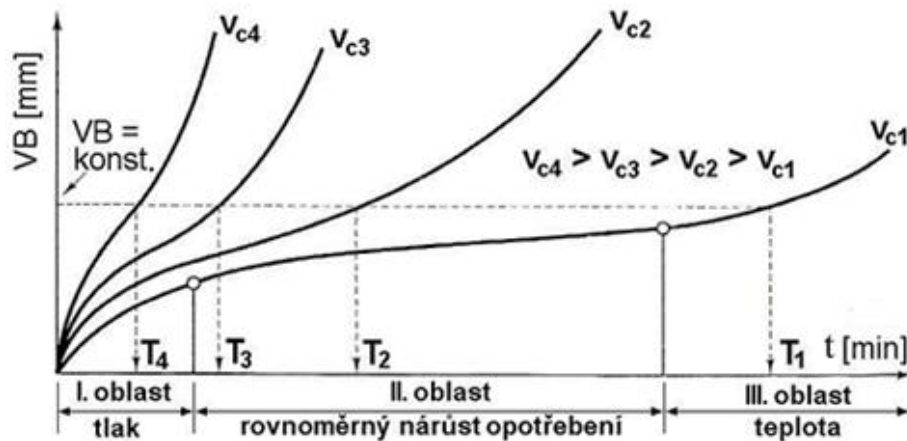


Obr. 18 Opotřebení na hřbetě VB [14].

1.3 Trvanlivost nástroje

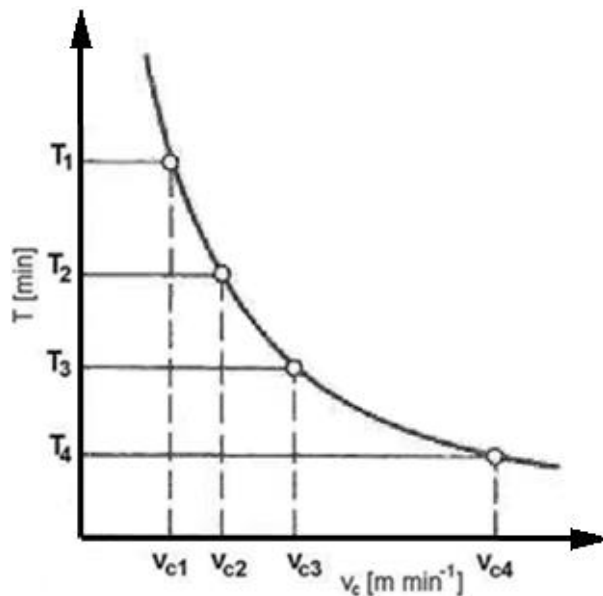
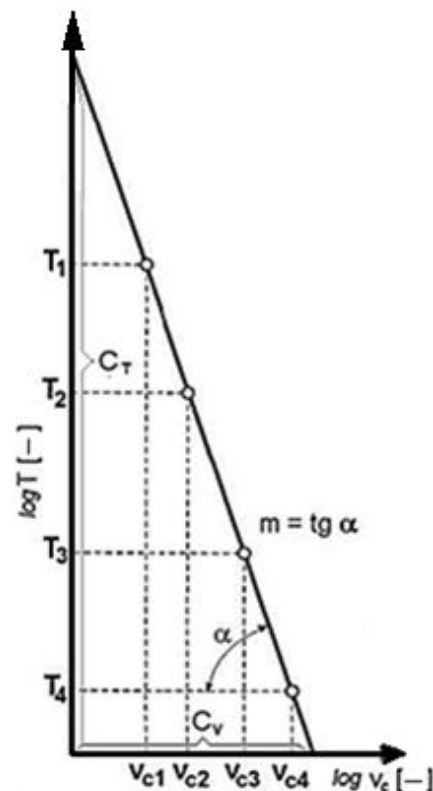
Ostří řezného nástroje podléhá při obrábění určitému druhu opotřebení až do okamžiku konce své trvanlivosti. Ta byla dříve uváděna nejčastěji 15 min, nicméně v dnešní době často dosahuje i výrazně nižší hodnoty. Blížící se konec schopnosti nástroje obrábět v požadované kvalitě lze poznat dle několika ukazatelů, které jsou např. zvýšení řezné síly, vibrace stroje, vyšší teplota v místě řezu a zhoršení drsnosti obrobku. V extrémním případě hrozí i náhlý lom destičky. Moderní materiály a geometrie břitu jsou nejen mnohem produktivnější, ale zároveň také spolehlivější, protože se v určité míře dá předpovědět délka jejich trvanlivosti. Běžné VBD mají více řezných hran, takže při opotřebení jedné z nich stačí pro obnovení funkčnosti nástroje pouze pootočit destičku na nové ostří. Celková životnost je pak dána součtem trvanlivostí jednotlivých ostří [2; 4].

K porovnání trvanlivostí nástroje pro různé řezné rychlosti se používají křivky opotřebení, viz obr. 19. Pro jejich tvorbu je potřeba provést experiment pro nejméně tři řezné rychlosti s tím, že při nejvyšší z nich by trvanlivost neměla klesnout pod 5 min. V první části křivky dochází ke zrychlenému opotřebení, které souvisí s vysokým tlakem působícím na velmi malou stykovou plochu, neboť nástroj je stále velice ostrý. Následkem prvotního opotřebení dochází k vytvoření větší stykové plochy a měrný tlak na nástroj klesá. Výsledkem je druhá oblast lineárního nárůstu opotřebení. Po dosažení určité meze lze vidět exponenciální nárůst opotřebení vlivem snížení tvrdosti řezného materiálu (např. opotřebení povlaku) [3; 4; 5; 12].



Obr. 19 Křivky opotřebení [3].

Kritická mez opotřebení na hřbetu bývá v rozmezí $VB = 0,3 - 0,4$ mm. Pro danou hodnotu jsou z těchto křivek odečteny trvanlivosti příslušící ke zvolené řezné rychlosti. Získané dvojice hodnot jsou jako body vyneseny do grafu $T-v_c$ závislosti, viz obr. 20, která je známá též pod názvem Taylorova závislost. Tato závislost platí pouze v případě, že jsou splněny omezující podmínky $a_p = \text{konst.}$ a $f = \text{konst.}$ Pro usnadnění matematického popisu průběhu této křivky je nutné ji převést do logaritmických souřadnic T a v_c , viz obr. 21 [2; 3; 4; 12].


 Obr. 20 $T-v_c$ závislost [4].

 Obr. 21 Zlogaritmovaná $T-v_c$ závislost [4].

Zlogaritmovaná $T-v_c$ závislost umožňuje odečtení klíčových parametrů pro další výpočet. Hodnotu konstanty C_T lze odečíst na ose T pro řeznou rychlost $v_c = 1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a konstantu C_V na ose v_c pro trvanlivost $T = 1 \text{ min}$. Poslední konstantou je exponent m , který vyjadřuje směrnici přímky $m = \text{tg } \alpha$. Jeho hodnota se u nástrojů ze slinutých karbidů pohybuje v rozmezí 2–5. Tyto konstanty jsou pro každý materiál a kombinaci řezných podmínek odlišné, neboť jsou závislé na řadě činitelů [3; 5].

Matematické vyjádření $T-v_c$ závislosti reprezentuje Taylorův vztah. Prvním tvar vzorce slouží k výpočtu trvanlivosti T [5]:

$$T = \frac{C_T}{v_c^m}, \quad (1.9)$$

kde: C_T – konstanta trvanlivosti [–],

m – exponent (míra závislosti trvanlivosti na řezné rychlosti) [–].

V upraveném tvaru slouží vzorec pro výpočet řezné rychlosti v_c [5]:

$$v_c = \frac{C_v}{T^{\frac{1}{m}}}, \quad (1.10)$$

kde: C_v – konstanta řezné rychlosti [–].

Tyto základní vztahy mohou být dále rozšířeny ještě o veličiny zohledňující posuv a šířku záběru ostří. Jedná se o přesnější způsob, ale jeho značnou nevýhodou je potřeba mnohem rozsáhlejšího testování pro vyjádření vlivu těchto veličin [5; 12].

1.4 Náklady na obrábění

Náklady při reálném obráběcím procesu se nejčastěji určují v přepočtu na jeden kus konkrétní součásti. Největší část tvoří náklady na obráběcí stroj a řezný nástroj, pokud ale proces zahrnuje i jiné činnosti, tak je v rámci cenové kalkulace vhodné zohlednit i tyto položky pro dosažení přesnějšího výsledku. Obecný postup při výpočtu celkových operačních výrobních nákladů N_c vypadá následovně [3; 4; 5]:

$$N_c = N_S + N_N + N_V, \quad (1.11)$$

kde: N_S – náklady na strojní práci [Kč],

N_N – náklady na nástroj a výměnu vztažené na jeden kus [Kč],

N_V – náklady na vedlejší práci [Kč].

Náklady na strojní práci N_S souvisí s jednotkovým strojním časem [3]:

$$N_S = t_{AS} \cdot N_{sm} = \frac{l_n + l + l_p}{n \cdot f} \cdot \frac{N_{sn}}{60}, \quad (1.12)$$

kde: t_{AS} – čas automatického chodu stroje [min],

N_{sn} – hodinová sazba stroje [Kč].

Část nákladů připadajících na řezný nástroj N_N je dána cenou nástroje, cenou jeho výměny a počtem kusů, která dané ostří obrobí [3]:

$$N_N = \frac{N_T}{Q_T}, \quad (1.13)$$

kde: N_T – náklady na nástroj a jeho výměnu [Kč],

Q_T – počet kusů obrobených daným břitem [ks].

Náklady na nástroj a jeho výměnu N_T se pro jednu trvanlivost břitu určí podle vztahu [3]:

$$N_T = \frac{N_1}{n_B} + \frac{N_2}{z} + N_3, \quad (1.14)$$

kde: N_1 – cena VBD [Kč],

n_B – počet břitů VBD [ks],

N_2 – cena držáku [Kč],

z – životnost držáku [ks],

N_3 – náklady na upnutí a případné seřízení VBD [Kč].

Počet obrobených kusů během trvanlivosti břitu Q_T lze vypočítat podle vztahu [3]:

$$Q_T = \frac{T}{\lambda \cdot t_{AS}}, \quad (1.15)$$

kde: λ – poměr mezi dráhou nástroje záběru a celkovou dráhou [-],

$$\lambda = \frac{l}{L} = \frac{l}{l_n + l + l_p}. \quad (1.16)$$

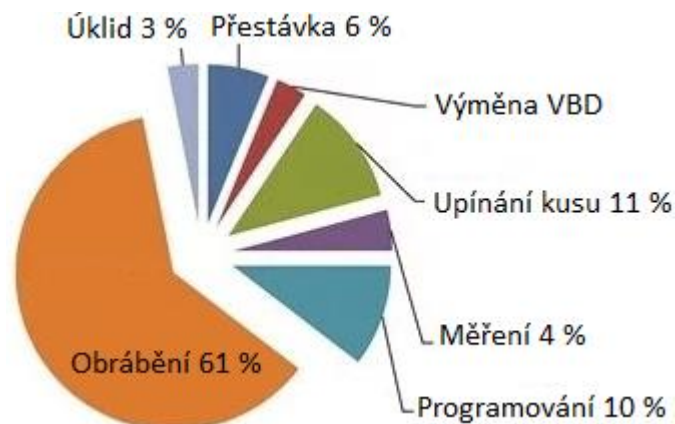
Náklady na vedlejší práci N_V lze vyjádřit jako [3]:

$$N_V = t_{AV} \cdot \frac{D_V}{60}, \quad (1.17)$$

kde: t_{AV} – čas vedlejší práce [min],

D_V – hodinová sazba na vedlejší práci [Kč].

Věnovat pozornost efektivnosti vedlejších prací při obráběcím procesu je téměř stejně důležité jako u samotného obrábění. Náklady na vedlejší práce mohou dosahovat až 40 % z celkových nákladů, viz obr. 22. Nejvíce času se ve většině případů spotřebuje na upínání polotovaru. Automatizovanou manipulací s obrobky lze přinést velké úspory a navýšení strojní kapacity. Další výhodou je také větší pohodlí operátorů výrobních strojů, kteří mohou pracovat produktivněji [15].



Obr. 22 Přehled nákladů na obrábění [15].

1.5 Optimalizace trvanlivosti

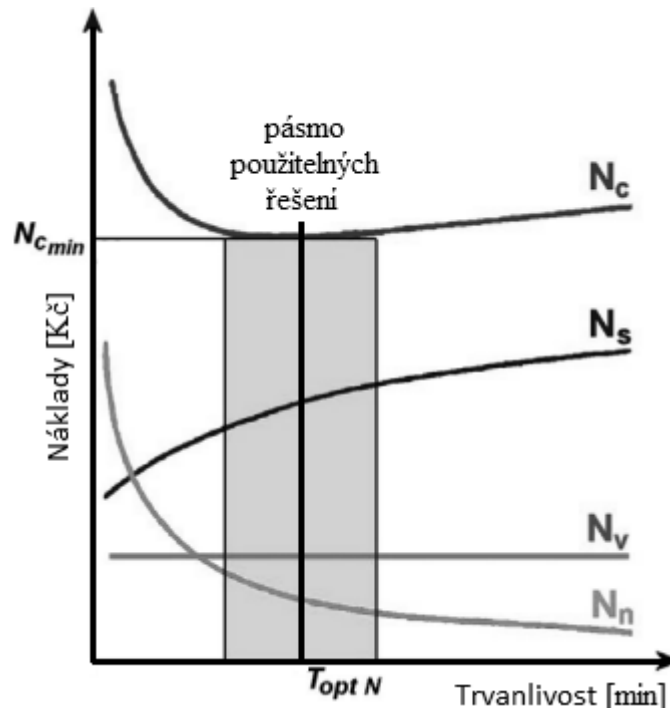
Trvanlivost břitu nástroje závisí na řezných podmínkách, materiálu nástroje, obrobku a řezném prostředí. Pro co nejefektivnější výrobu je při zpracovávání výrobních postupů, programování a seřizování CNC strojů potřeba znát optimální hodnotu trvanlivosti. Nejen že tato informace umožňuje obrábět s vhodnými podmínkami, ale zároveň také určuje moment včasné výměny VBD pomocí sledování počtu opracovaných kusů, díky čemuž lze redukovat pravděpodobnost vytvoření zmetkových součástí [15].

Optimalizace trvanlivosti z hlediska maximální výroby slouží pro vyrobení co největšího počtu kusů za co nejkratší časový úsek. Tato metoda se obvykle střetává s omezujícími podmínkami, kvůli kterým není možno dosáhnout optimálních hodnot, a proto se dále hledá kompromisní řešení. Těmito omezení mohou být například nedostatečné otáčky vřetene, jeho výkon či řezivost nástroje. V praxi se nejčastěji používá optimalizace trvanlivosti T z hlediska minimálních nákladů [3; 5; 9]:

$$T_{opt} = (m - 1) \cdot \lambda \cdot \frac{N_T}{N_{sm}}, \quad (1.18)$$

kde: N_{sm} – minutová sazba stroje [min].

Tento vztah vychází z rovnice pro výpočet celkových operačních nákladů (1.11) pomocí derivace dle trvanlivosti. V podstatě se jedná o hledání extrému funkce v podobě její minimální hodnoty. Graficky je znázorněna závislost celkových operačních nákladů a jejich dílčích složek na trvanlivosti nástroje v obr. 23 [3; 4; 5; 9].



Obr. 23 Závislost nákladů na trvanlivosti [5].

2 SOUČASNÝ STAV VÝROBY

Studie současného stavu výroby je důležitým nástrojem pro porozumění výrobnímu procesu. Obsahem této analýzy je rozbor používaného materiálu, samotné součástí, technologického postupu a strojních zařízení. Získaná data jsou klíčová při identifikaci problémů, zefektivnění procesů, zlepšení kvality výroby anebo plánování budoucího rozvoje. Všechny jmenované oblasti jsou potřebné pro rozvoj a konkurenceschopnost podniku.

2.1 Představení společnosti

Šroubárna Kyjov, spol. s.r.o., viz obr. 24, byla založena v 1950. Od té doby zaujímá na trhu výraznou pozici jakožto výrobce spojovacího materiálu. O čtyřicet let později byla firma privatizována, což výrazně zjednodušilo možnost vývozu zboží za hranice České republiky. V dnešní době představuje podíl exportovaných výrobků více než 80 %. V roce 1997 započala restrukturalizace, která spočívala zejména v technologickém vývoji a postupnému obměňování výrobních zařízení orientovaných na zakázky v oblasti železničního svršku. Od roku 2008 je součástí skupiny Třinecké železárny – Moravia steel a.s. jako dceřiná společnost spolu s mnoha dalšími podniky. Na základě této změny došlo k další velké modernizaci a zejména také k rozšíření portfolia o polotovary ložiskových kroužků. [16]



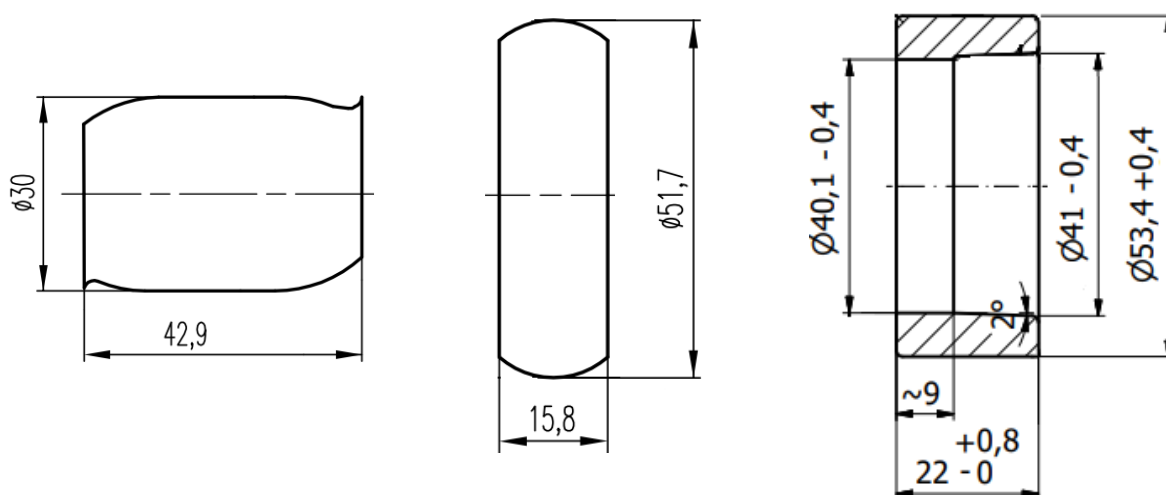
Obr. 24 Šroubárna Kyjov, spol. s.r.o. [16].

V současnosti představuje nejvýznamnější část činnosti firmy výroba pražcových, svěrkových a konstrukčních šroubů, matic a spojovacích součástí pro speciální použití. Přibližně pětinu produkce reprezentují výkovky vaček pro automobilový průmysl a polotovary pro výrobu ložisek. Mezi technologie, které je v rámci společnosti možno využít, patří kování za tepla, tváření závitů za studena, soustružení, frézování, fosfátování a žihání [16].

2.2 Postup výroby ložiskových kroužků

Materiál pro výrobu ložiskových kroužků vstupuje do hlavního skladu ve formě drátu o průměru 30 mm vinutého na cívky, které dosahují hmotnosti až 2 000 kg. Tyto cívky jsou skrze příruční sklad dopravovány do zásobníku kovacího stroje Sakamura. Drát je dále unášen přímo do stroje pomocí tratě složené z vodicích kladek. Součástí tratě je také indukční cívka vytvářející vysokofrekvenční magnetické pole. Tato cívka umožňuje rychlý ohřev polotovaru lehce nad teplotu kování. Kovací teplota oceli 100Cr6 se pohybuje v mezi 1 150 – 1 180 °C, ale jelikož mezi ohřevem a samotným tvářením uběhne několik sekund, dochází k ochlazení žhnoucího kovu relativně chladným vzduchem, a proto je potřeba ho indukčně ohřát až na teplotu 1 210 °C.

Další část výrobního postupu v rámci kovacího stroje spočívá v dělení drátu na krátkou tyč o takové délce, aby se její objem rovnal objemu výkovku zvětšenému o přídavek na opal a vyděrovaný dopad ve formě blány předkované dutiny. Následuje samotný proces kování, jehož součástí je postupné pěchování, dokování a děrování otvoru, viz obr. 25. Zhotovené dílce jsou zchlazeny vzduchem na dopravníku během přepravování do plechové palety a dále pokračují na kontrolu.



Obr. 25 Postup kování.

Velké deformace a změny teplot v průběhu tváření způsobují změny v mikrostruktúře i makrostruktúře oceli, čímž dochází ke zpevnování materiálu. Takto zpevněná ocel není vhodná pro obrábění, protože dochází k výrazně většímu opotřebení nástroje, a proto následuje tepelné zpracování formou žíhání na měkko v průběžné plynové válečkové peci s řízenou ochrannou atmosférou. Před samotným obráběním ložiskových kroužků jsou pomocí trýskání odstraněny oxidy železa, částice sazí a další nečistoty vzniklé na povrchu výkovků, které ovlivňují vzhled a vlastnosti povrchové vrstvy. Takhle upravené polotovary jsou připraveny na obrábění.

Obrábění celého kroužku na dvě upnutí obstarává CNC (*Computer Numerical Control*) soustruh Takisawa. K zamezení přístupu kyslíku obsaženého ve vzduchu a tím pádem i k prevenci před vznikem koroze slouží konzervace povrchu. Zakonzervované obrobky směřují přes výstupní kontrolu do balírny a následně do expedičního skladu, odkud jsou odesílány ke svým zákazníkům do celého světa.

2.3 Materiál 100Cr6

Jedná se o chromovou nízkolegovanou konstrukční ocel, která se řadí do třídy s číselným označením 14. Celé označení této oceli je pak dle ČSN 41 4109 a podle EN 100Cr6. Materiál je dobře tvářitelný za tepla a vhodný k přímému kalení do oleje z teploty 820 – 850 °C, po kterém dosahuje tvrdosti až 62 HRC. Ve stavu žíhaném na měkko dosahuje obrobitelnosti 13b. Vzhledem ke svým mechanickým vlastnostem, viz tab. 1, nachází často využití mimo jiné právě pro výrobu ložisek, díky čemuž bývá nejčastěji přímo označen jako ložisková ocel [17].

Tab. 1 Mechanické vlastnosti oceli 100Cr6 po žíhání na měkko [17].

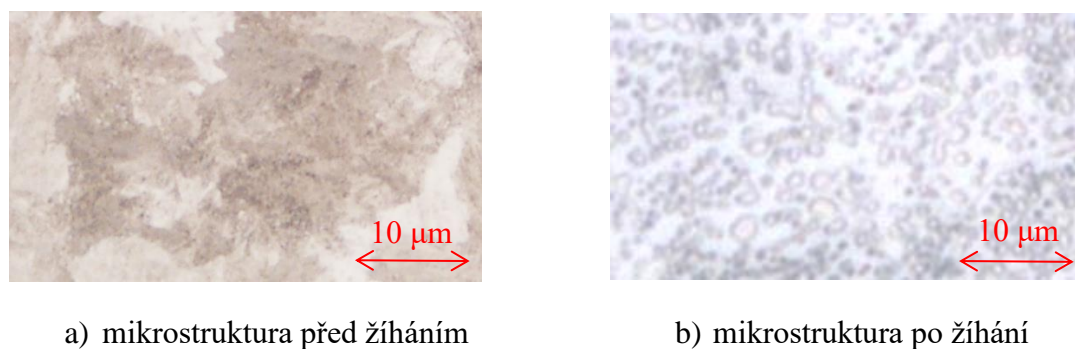
Pevnost v tahu R_m [MPa]	Mez kluzu R_e [MPa]	Tvrdość [HB]
660	440	max. 225

Chemické složení je jedním z hlavních parametrů materiálu, které určují jeho výsledné vlastnosti, a proto se vystavuje k materiálu vždy i atest potvrzující požadovanou kvalitu. Pro ujištění byla dodaná ocel navíc ještě prověřena pomocí spektrometru SPECTROMAXx F7. Naměřená data byla porovnána s materiálovým listem, viz tab. 2.

Tab. 2 Chemické složení oceli 100Cr6 [17].

Výskyt prvku	C [hm. %]	Mn [hm. %]	Si [hm. %]	Cr [hm. %]
Minimální podíl	0,90	0,30	0,15	1,30
Naměřená hodnota	0,984	0,314	0,192	1,42
Maximální podíl	1,10	0,50	0,35	1,65
Výskyt prvku	Ni [hm. %]	Cu [hm. %]	P [hm. %]	S [hm. %]
Naměřená hodnota	0,0288	0,0245	0,0113	0,0059
Maximální podíl	0,30	0,25	0,027	0,030

Jeden z návrhů řešení celé problematiky spočíval v naprostém vynechání tepelného zpracování v procesu výroby polotovarů ložiskových kroužků, a tím ušetření nákladů spojených s touto operací. Z tohoto důvodu byla provedena analýza materiálu před a po žíhání. Součástí této analýzy bylo měření tvrdosti pomocí tvrdoměru BRIVISKOP 187,5M. Tvrdość oceli v žíhaném stavu byla naměřena 187 HBW, kdežto u nežíhaného vzorku byla naměřena hodnota 434 HBW. Na základě výsledků lze prohlásit, že díky tepelnému zpracování dochází k poklesu tvrdosti oceli o více než 50 %, takže jeho provedení má opravdu velký význam. Další výhodou žíhání spočívá ve vytvoření homogennější struktury, která je daleko vhodnější pro následné kalení zákazníkem. Pro sledování změny struktury byl proveden metalografický výbrus obou vzorků umožňující pozorování mikrostruktury, viz obr. 26, pomocí mikroskopu Axiovert 40 MAT.

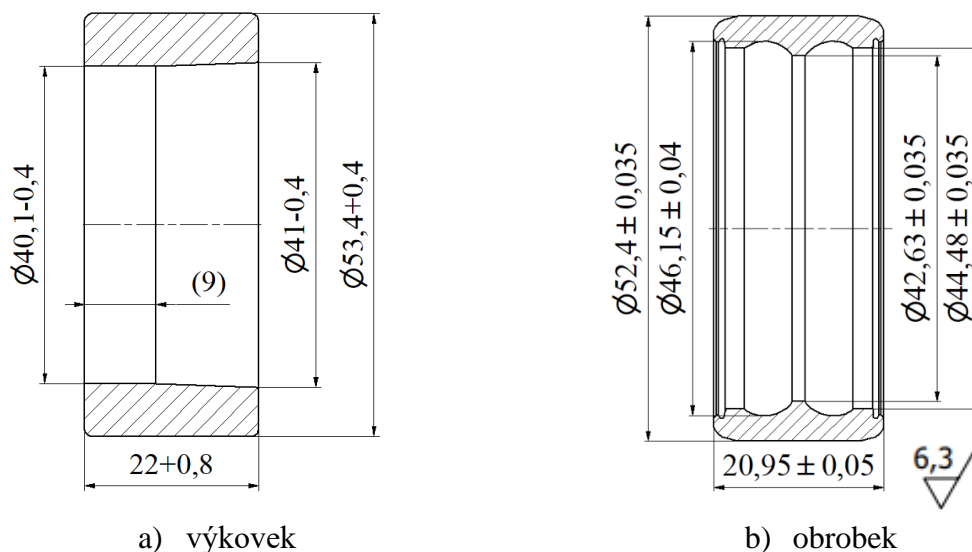


Obr. 26 Mikrostruktura oceli 100Cr6.

Přestože obsah uhlíku přesahuje hodnotu 0,77 hm. %, struktura vzorků je vlivem legování chromem feriticko–perlitická, neboť se jedná o feritotvorný prvek. Velký rozdíl mezi vzorky však nastává při porovnávání tvaru perlitu. Mikrostrukturu před tepelným zpracováním tvoří zrna feritu a lamelárního perlitu, díky kterému materiál vykazuje velkou tvrdost. Po tepelném zpracování dochází k rovnoměrnému rozptýlu měkčího globulárního perlitu ve feritické matici. Tato analýza materiálu dostatečně potvrdila vhodnost použití žíhání na měkko před obráběním.

2.4 Obrábění ložiskových kroužků

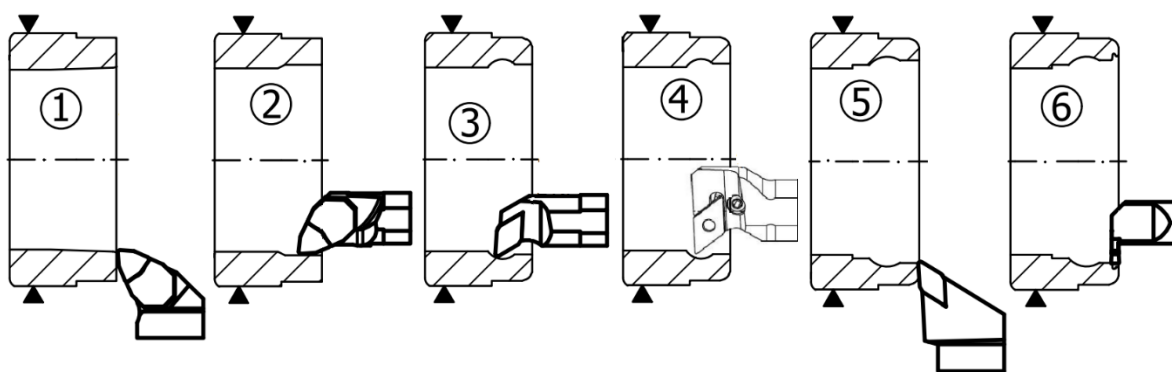
Polotovarem pro obrábění ložiskových kroužků je otryskaný výkovek žíhaný na měkko. Cílem obráběcího procesu je odstranění technologických přídavků, které umožňují správný průběh tváření, a konstrukčních přídavků, které zaručují možnost dosažení požadované přesnosti výsledného kroužku. Ložiska jsou vyráběna v mnoha velikostech a provedeních, nicméně příklad rozdílnosti hlavních rozměrů mezi výkovkem a obrobkem znázorňuje obr. 27.



Obr. 27 Náčrt výkovku a obrobku.

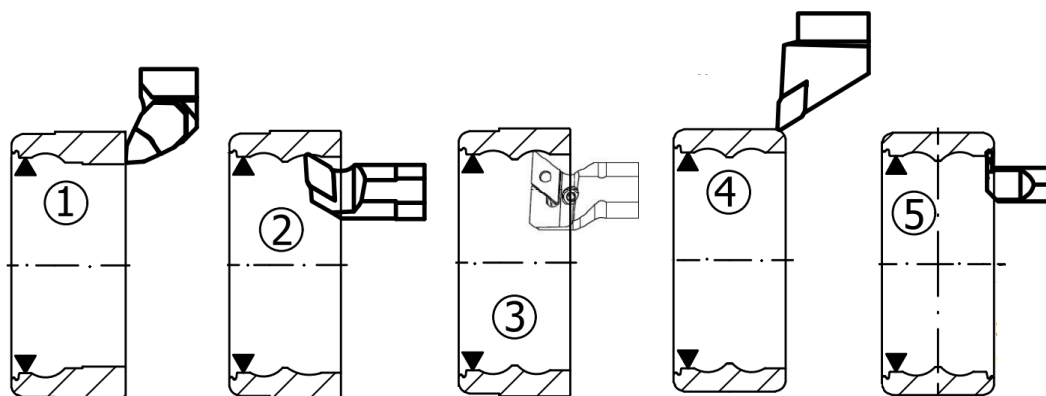
Přídavky na vnějším průměru činí maximálně 1,4 mm, délkový přídavek je nejčastěji také 1,4 mm, což odpovídá 0,7 mm na každé čelo. Přídavky na vnitřním průměru jsou zpravidla větší kvůli technologickým podmínkám potřebným pro výrobu polotovaru kování. Vzhledem k úkosu a relativně složitějšímu tvaru ložiskové dráhy pro kuličky nelze jednoznačně určit velikost přídavku na vnitřním průměru, ale obecně se pohybuje v rozmezí 3 – 5 mm. Přídavky na dokončení jsou dle technologického postupu stanoveny na průměru 0,5 mm. Drsnost obrobku nesmí přesáhnout hodnotu $Ra = 6,3 \mu\text{m}$.

Výkovky jsou operátorem manuálně nakládány na stojany dopravníku, jenž dodává polotovary k lineárnímu podavači s čelistmi, který přenáší dílce ze zásobníku do hydraulického sklíčidla. Sklíčidlo upíná polotovar doražený na čelo za vnější průměr. Následuje první operace obrábění, viz. obr. 28. První úsek spočívá v hrubování čela a části vnějšího průměru výměnnou břitovou destičkou WNMG060408–MF4 TP2501 a držákem PWLNR2020K06. Dále následuje hrubování vnitřního průměru pomocí stejného typu VBD v držáku A20Q–PWLNR06. Příští segment spočívá v hrubování ložiskové dráhy VBD DNMU110408–MF2 TP0501 a držákem A20Q–SDUNR11. Ve čtvrtém úseku dochází k dokončování ložiskové dráhy VBD DNMG110408–LP MC6015. Následuje dokončování čela a vnějšího průměru stejnou VBD jako v případě kroku s číselným označením 3 v držáku PDJNR2020K11. Poslední částí je vytvoření zápichu na vnitřním průměru VBD S302.0230.2521 EG35. Takto opracovaný dílec je přenesen druhým podavačem ke druhému vřetenu a upnut za již obrobek vnitřní průměr.



Obr. 28 Přehled obráběcích úkonů první operace.

Druhá operace obrábění, viz obr. 29, začíná hrubováním čela a zbylé části vnějšího průměru VBD WNMG060408–MF4 TP2501 v držáku PWLNL2020K06. Příští úsek spočívá v hrubování ložiskové dráhy VBD DNMU110408–MF2 TP0501 a držákem A20Q–SDUNL11. Ve třetím segmentu dochází k dokončování ložiskové dráhy VBD DNMG110408–LP MC6015. Následuje dokončování čela a vnějšího průměru stejnou VBD jako v případě kroku s číselným označením 2 v držáku PDJNL2020K11. Poslední částí je vytvoření zápichu na vnitřním průměru VBD S302.0230.2521 EG35.



Obr. 29 Přehled obráběcích úkonů druhé operace.

Na obrobení ložiskových kroužků jsou tedy z největší části použity dva druhy VBD, jimiž jsou WNMG060408–MF4 TP2501 a DNMU110408–MF2 TP0501. Zbylé VBD se do procesu zapojují pouze jako destičky pro dokončování obtížně dostupných částí, jejich doba v záběru je tedy mnohem kratší, a tudíž nemá cenu se výrazně zabývat zefektivněním obrábění pomocí těchto specičtějších nástrojů.

2.5 Obráběcí stroj a měřicí zařízení

Firma využívá pro obrábění ložiskových kroužků paralelní dvou vřetenový CNC soustruh od japonské společnosti Takisawa s označením TT–2100G, který je vybaven vysokorychlostními portálovými nakladači s hydraulickými tříčelistovými sklíčovými, a tak podporuje hromadnou výrobu s vysokou přesností. Provedení s překrývajícím dvojitým nakladačem, kdy se mohou obě ramena pohybovat v prostoru obou vřeten, dosahuje vysoké pružnosti manipulace s obrobky, díky čemuž lze naprosto minimalizovat čas potřebný pro naložení a vyložení obrobků. Zásobníky, kde jsou na tyčích uloženy výkovky a obrobky, se nachází po stranách samotného stroje. Skládají se ze 16 posuvných palet, z nichž každá má nosnost 40 kg. Stroj je zobrazen na obr. 30 a jeho technické parametry jsou vypsány v tab. 3 [18].



Obr. 30 Takisawa TT-2100G [18].

Tab. 3 Technické parametry Takisawa TT-2100G [18].

Max. soustružený průměr	240 mm
Max. soustružená délka	135,5 mm
Počet vřeten a nožových hlav	2
Počet nástrojových pozic	12 + 12
Max. otáčky vřetene	4 500 min ⁻¹
Výkon vřetene (nepřetržitě/15 min)	5,5/7,5 kW
Rychlost rychloposuvu	24 m·min ⁻¹

Drsnost povrchu je hlavním ukazatelem kvality obrobeneho povrchu, který zákazník vyžaduje. Její měření zajišťuje kontaktní drsnoměr SurfTest SJ-410 od společnosti Mitutoyo. Součástí zařízení je i žulový stojánek, viz obr. 31, zaručující přesné ustavení drsnoměru i měřeného kusu. Pro usnadnění obsluhy je propojen s PC programem SurfTest communication tool [19; 20].



Obr. 31 Drsnoměr SurfTest SJ-410 [13].

Pro hodnocení efektivity použitých nástrojů je potřeba stanovit jejich životnost. V případě soustružení pomocí běžných VBD se opotřebení měří pomocí mikroskopu, neboť měřené hodnoty se zpravidla pohybují v pouhých desetinách milimetru, a proto je také vhodné zařízení i často kalibrovat. Nejedná se o kontinuální metodu, takže ji nelze použít pro měření opotřebení v průběhu obrábění. Digitální mikroskop Levenhuk DRX 350 LCD, viz obr. 32, je vhodný pro měření vzdálenosti, plochy, úhlů a poloměrů. Umožňuje pozorování objektů ve zvětšení až tři set násobku reálné velikosti. Zařízení lze připojit i k PC a provádět měření pohodlněji v prostředí softwaru PortableCaptur [21; 22].



Obr. 32 Mikroskop Levenhuk DRX 350 LCD [14].

3 NÁVRH INOVACE VÝROBNÍHO PROCESU

Inovace výrobního procesu bude spočívat v efektivnějším využití nástrojů, a tím i obráběcího stroje. Toho bude dosaženo analýzou a následnou úpravou řezných podmínek při soustružení žíhaných výkovků. Cílem této kapitoly je navrhnout, experimentálně otestovat, vyhodnotit a na základě toho následně stanovit nejvhodnější podmínky, což v konečném důsledku sníží náklady na výrobu ložiskových kroužků.

3.1 Návrh experimentu

Experiment proběhne přímo ve firmě Šroubárna Kyjov na stroji Takisawa TT–2100G, čímž budou zaručeny stejné testovací podmínky jako při výrobě. Úkolem je stanovení trvanlivosti VBD při soustružení výkovků. Analýzou stávající výroby bylo zjištěno, že nejvíce používané jsou hrubovací destičky WNMG060408–MF4 TP2501 a dokončovací destičky DNMU110408–MF2 TP0501. Přídavky jsou stejné pro všechny typy kroužků, což v případě dokončovacího obrábění znamená dle podnikového technologického listu 0,5 mm, a to odpovídá hodnotě $a_p = 0,25$ mm. Pro hrubování vnějšího průměru pak zbývá část přídavku o velikosti 1 mm tedy $a_p = 0,5$ mm. Kvůli většímu přídavku na vnějším průměru lze šířku záběru ostří výrazně zvýšit, nicméně pro zajištění bezpečnosti není možno překročit limit $a_p = 1$ mm, protože potřebná řezná síla v kombinaci s vysokými řeznými rychlostmi by překročili výkon vřetene. Hrubovací destička bude tedy testována pro dvě různé šířky záběru ostří. Díky znalosti šířky záběru ostří lze na základě doporučení výrobce VBD Seco Tools CZ, s.r.o. zvolit ostatní řezné podmínky, viz tab. 4. Kategorie materiálu byla zvolena P7, jejíž referenční materiál je přímo ocel 100Cr6. Destičky jsou určeny pro obrábění s emulzí.

Tab. 4 Doporučené řezné podmínky [23].

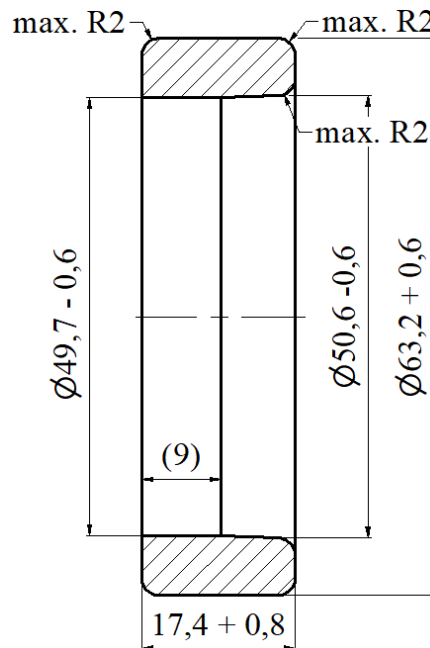
VBD	Doporučené hodnoty		
	a_p [mm]	f [mm]	v_c [m·min ⁻¹]
WNMG060408–MF4 TP2501	1,6 (0,4–3,2)	0,30 (0,20–0,42)	420 (260–540)
DNMU110408–MF2 TP0501	0,8 (0,2–2,9)	0,24 (0,14–0,35)	540 (330–690)

Jedná se o doporučené podmínky pro obrábění danými destičkami. V případě změny potřebné šířky záběru ostří v rámci základního rozmezí dochází ke změně doporučené řezné rychlosti i rychlosti posuvu. Pro vytvoření aproximované Taylorovi přímky je nutné znát trvanlivost destičky nejméně pro tři různé řezné rychlosti. Ty jsou voleny směrem k maximu rozsahu, aby testování zabralo co nejméně času, a tím bylo i méně nákladné. Kromě řezných podmínek výrobce udává i odhadovanou trvanlivost destičky za daných podmínek, což následně pomůže k odhadnutí spotřeby materiálu a času na experiment. Destičky typu WNMG budou dále značeny WNMG05 a WNMG10, kde poslední dvojčíslí reprezentuje šířku záběru ostří, viz tab. 5, se zvolenými řeznými podmínkami.

Tab. 5 Zvolené řezné podmínky [23].

VBD	Zvolené hodnoty dle doporučení			Odhad trvanlivosti T [min]
	a_p [mm]	f [mm]	v_c [m·min ⁻¹]	
WNMG05	0,50	0,42	440; 470; 500	13; 10,5; 8,6
WNMG10	1,00	0,34	440; 470; 500	13,1; 10,7; 8,8
DNMU	0,25	0,35	480; 520; 560	15,2; 11,5; 8,9

Jako testovací vzorky pro obrábění budou použity žíhané výkovky z oceli 100Cr6, viz obr. 33. Těchto dílců je pro testování k dispozici kolem tisíce. Jedná se o kusy vyřazené do šrotu, neboť zákazník zrušil svou objednávku až v průběhu výroby.



Obr. 33 Náčrt testovacího výkovku.

3.2 Realizace experimentu

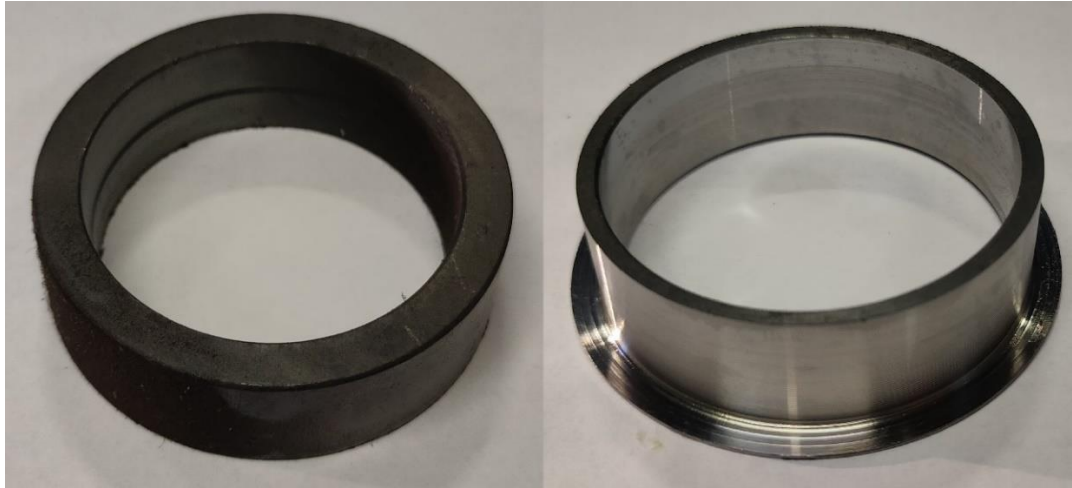
Experiment byl realizován dle návrhu v předchozí kapitole během dvou pracovních dnů s tím, že stroj byl seřízen pro obrábění daného dílce o den dříve. Vyřazené výkovky byly uloženy v plechové paletě vedle stroje a následně manuálně přeskládány mezi tři tyče vymezující prostor na posuvné paletě zásobníku stroje, viz obr. 34.



Obr. 34 Výkovky v zásobníku stroje.

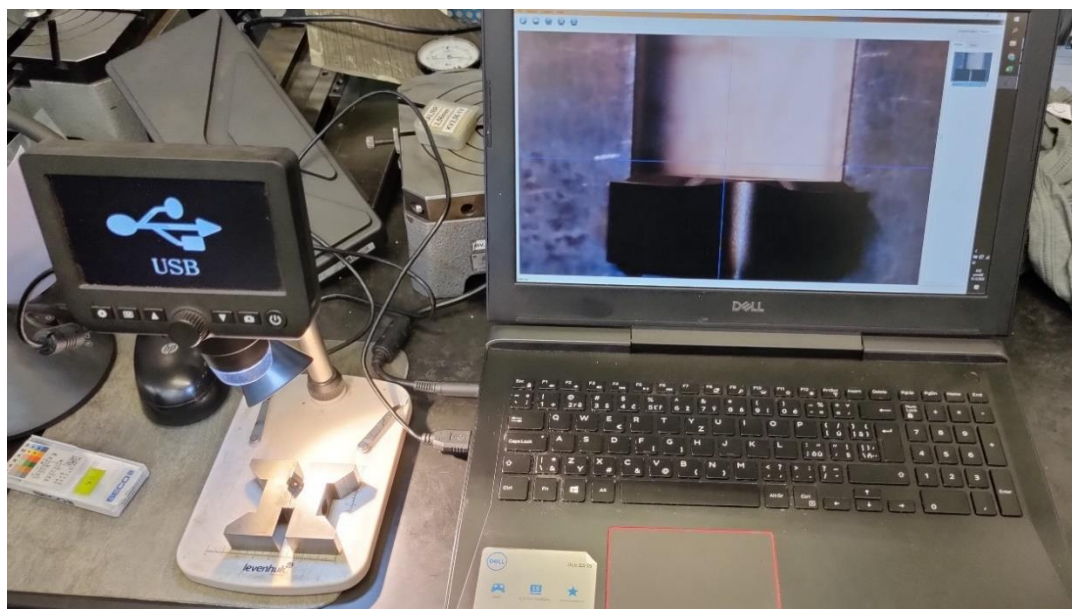
Ze zásobníků byly výkovky automaticky přenášeny nakladačem k prvnímu vřetení stroje a upnuty do hydraulického sklíčidla za vnější část kroužku. V první operaci došlo k obrobení vnitřního průměru vzorku na rozměr 50,85 mm, což sloužilo pouze jako příprava pro spolehlivé upnutí kleštinou za již opracovaný vnitřní průměr v další operaci. Mezi jednotlivými vřeteny byly vzorky přeneseny opět prvním nakladačem.

Samotné testování VBD probíhalo na druhém vřetení v rámci další operace. Vzorky zde byly obráběny vnějším podélným soustružením z původního průměru 63,8 mm na průměr 55,8 mm v délce 17 mm, viz obr. 35. Na menší rozměr už nebylo obráběno, aby nehrozila deformace kroužku hydraulickým upnutím. Obrobené vzorky byly poznačeny číslem značící sérii testů, díky čemuž se později mohla změřit jejich drsnost povrchu. Kromě vzorků byly u každé série odebrány i třísky k posouzení vhodnosti jejich utváření.



Obr. 35 Vzorek před a po obrobení.

Vzhledem ke známosti strojního času potřebného na opracování součásti ve druhé operaci bylo možno určit, jak dlouho daná VBD obráběla jeden kus. Díky tomu bylo možno zastavovat stroj a měřit mikroskopem Levenhuk DRX 350 opotřebení destičky, viz obr. 36, v požadovaných intervalech. Během počátečních fází obrábění bylo měřeno opotřebení každé 3 min, nicméně tento interval se s postupně zvětšujícím opotřebením zkracoval, aby byla co nejlépe zaznamenána oblast kritického opotřebení. Po jeho dosažení byl test dané VBD ukončen.



Obr. 36 Měření opotřebení VBD mikroskopem.

Jako kritické opotřebení byla stanovena hodnota $VB = 0,3$ mm, protože při překročení této meze docházelo k vyštipování ostří VBD. Překročení této meze bylo v pěti testech doprovázeno i zářivě oranžovými třískami odcházejícími z místa řezu. Taková změna barvy třísky indikuje velkou deformaci ostří destičky, což způsobuje větší tření a tím i zvýšenou teplotu.

Takovýmto způsobem byly testovány a měřeny destičky pro všechny tři zvolené řezné rychlosti. Celkově se tedy jednalo o sérii devíti testů. Spotřeba výkovek na testování je znázorněna v tab. 6.

Tab. 6 Vzorky spotřebované na testování.

VBD	v_c [$m \cdot min^{-1}$]	Počet kusů [ks]
WNMG05	440	80
	470	69
	500	62
WNMG10	440	119
	470	100
	500	85
DNMU	480	48
	520	43
	560	35
Celkový počet kusů		641

Po obrobení všech výkovek a stanovení průběžných hodnot opotřebení byla provedena poslední část experimentu. Ta spočívala v měření drsnosti obrobeného povrchu. Toto měření bylo provedeno na pracovišti kontroly pomocí dotykového drsnoměru SurfTest SJ-410, viz obr. 37.



Obr. 37 Stanice na měření drsnosti povrchu.

3.3 Vyhodnocení experimentu

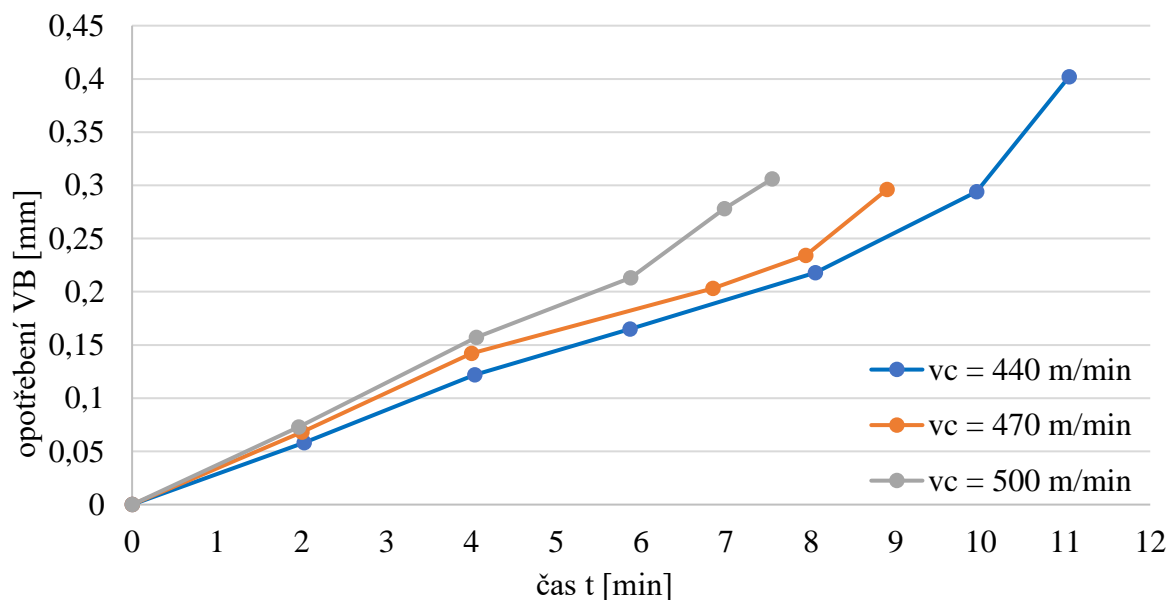
Vyhodnocení experimentu spočívá v reprezentaci naměřených dat, kterými jsou opotřebení bříty nástroje a drsnost obrobeneho povrchu. Součástí vyhodnocení je také analýza odebraných třísek, která je důležitá pro určení hospodárnosti vytvořeného odpadu při obrábění.

VBD WNMG060408–MF4 TP2501 0,5 mm

Pro testování byla zvolena šířka záběru ostří $a_p = 0,5$ mm a posuv $f = 0,42$ mm. Řezné rychlosti jsou spolu s naměřenými daty zobrazeny v tab. 7. Velikost opotřebení hřbetu VBD graficky znázorňuje obr. 38.

Tab. 7 Naměřené hodnoty při testování WNMG05.

$v_{c1} = 440 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$			$v_{c2} = 470 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$			$v_{c3} = 500 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$		
Čas [min]	VB [mm]	Ra [μm]	Čas [min]	VB [mm]	Ra [μm]	Čas [min]	VB [mm]	Ra [μm]
2,03	0,058	4,435	1,97	0,068	4,521	1,96	0,073	4,287
4,04	0,122	3,919	3,98	0,142	3,864	4,06	0,157	4,052
5,87	0,165	3,526	6,84	0,203	3,660	5,87	0,213	3,718
8,05	0,218	3,397	7,94	0,234	3,370	6,98	0,278	3,543
9,95	0,294	5,426	8,90	0,296	4,874	7,54	0,306	4,427
11,04	0,402	4,935						



Obr. 38 Opotřebení VB při testování WNMG05.

Na základě naměřených hodnot lze konstatovat, že k dosažení kritické meze opotřebení při řezné rychlosti $v_{c1} = 440 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ dojde po 10 min obrábění oceli 100Cr6. Při řezné rychlosti $v_{c2} = 470 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ vydrží 8,9 min a při $v_{c3} = 500 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ pouze 7,5 min. Třísky oceli vzniklé obráběním při daných podmínkách, viz obr. 39, mají tvar dlouhé souvislé šroubovice, což není vhodné z pohledu hospodárnosti odpadu, nicméně při snížení velikosti posuvu docházelo k tvoření ještě daleko horšího tvaru třísek, viz obr. 40.



Obr. 39 Tříska ve formě dlouhé souvislé šroubovice.



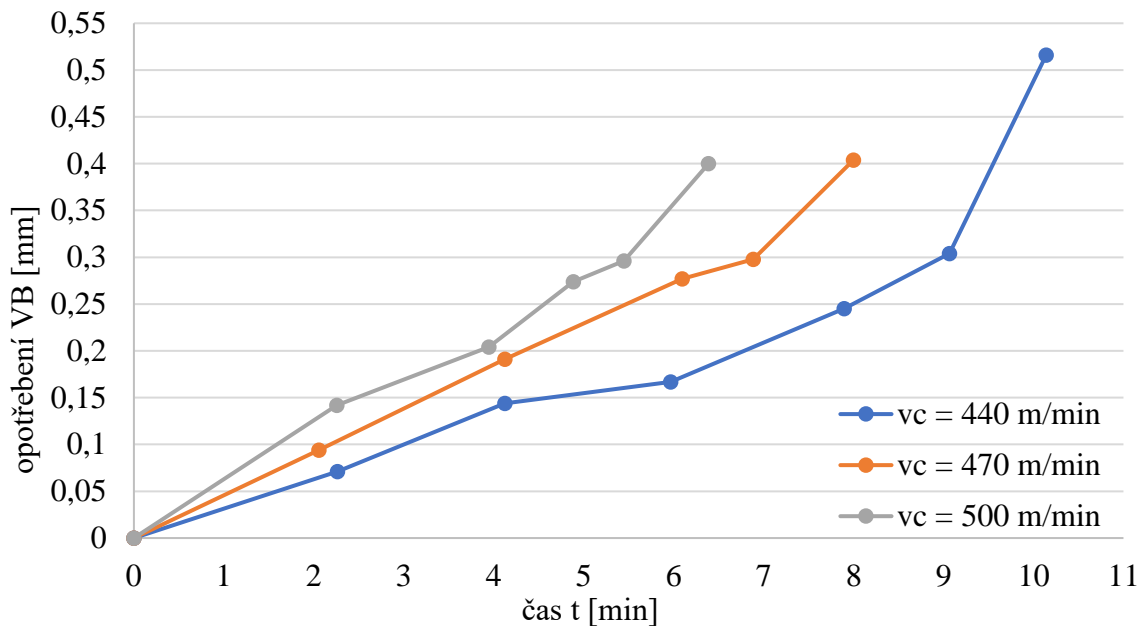
Obr. 40 Nevhodná tříška.

VBD WNMG060408–MF4 TP2501 1 mm

Dále byla pro testování zvolena šířka záběru ostří $a_p = 1$ mm a posuv $f = 0,34$ mm. Řezné rychlosti jsou spolu s naměřenými daty zobrazeny v tab. 8. Velikost opotřebení hřbetu VBD graficky znázorňuje obr. 41.

Tab. 8 Naměřené hodnoty při testování WNMG10.

$v_{c1} = 440 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$			$v_{c2} = 470 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$			$v_{c3} = 500 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$		
Čas [min]	VB [mm]	Ra [μm]	Čas [min]	VB [mm]	Ra [μm]	Čas [min]	VB [mm]	Ra [μm]
2,26	0,071	3,218	2,05	0,094	3,156	2,25	0,142	3,028
4,13	0,144	2,869	4,13	0,191	2,762	3,94	0,204	2,88
5,97	0,167	2,438	6,10	0,277	2,691	4,88	0,274	1,802
7,90	0,245	1,954	6,89	0,298	2,902	5,45	0,296	2,165
9,07	0,304	2,266	7,97	0,404	3,403	6,39	0,400	3,075
10,14	0,516	3,082						



Obr. 41 Opotřebení VB při testování WNMG10.

Na základě naměřených hodnot lze konstatovat, že k dosažení kritické meze opotřebení při řezné rychlosti $v_{c1} = 440 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ dojde po 9 min obrábění oceli 100Cr6. Při řezné rychlosti $v_{c2} = 470 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ vydrží 6,9 min a při $v_{c3} = 500 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ pouze 5,5 min. Třísky oceli vzniklé obráběním při daných podmínkách, viz obr. 42, jsou krátkého šroubovitého válcového tvaru s občasným výskytem drobných třísek. Tyto třísky dosahují nízkého objemového součinitele, tudíž jsou velice hospodárné.



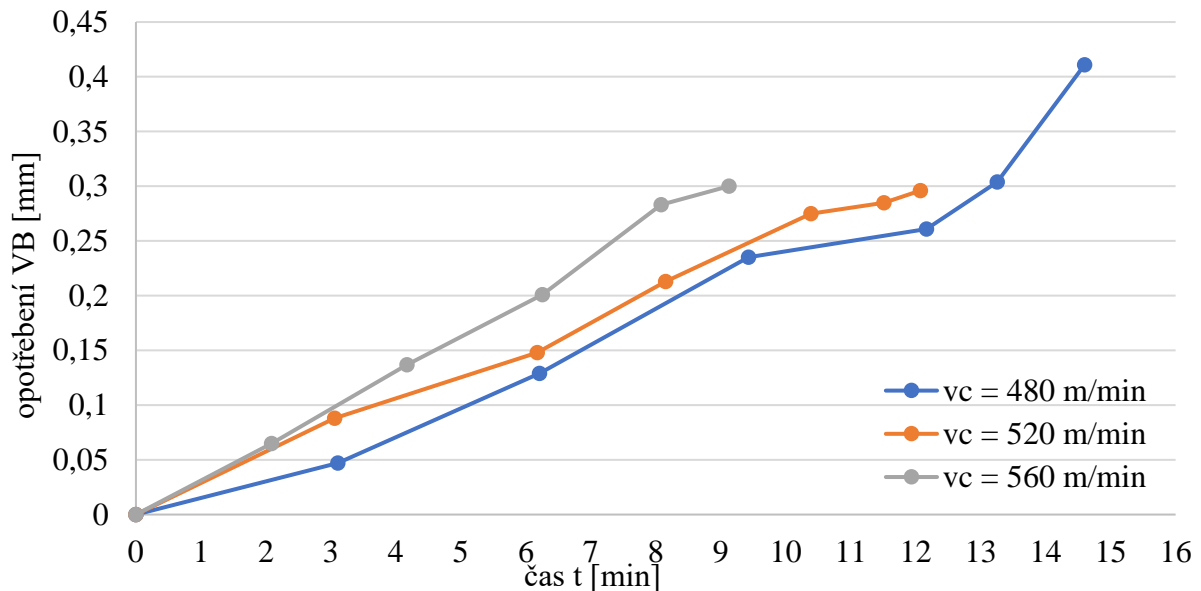
Obr. 42 Tříska ve formě krátkých článků.

VBD DNMU110408–MF2 TP0501

Pro testování byla zvolena šířka záběru ostří $a_p = 0,25 \text{ mm}$ a posuv $f = 0,35 \text{ mm}$, který při použití destičky s poloměrem zaoblení špičky $r_e = 0,8 \text{ mm}$ zaručuje drsnost povrchu menší než požadovaných $R_a = 6,3 \mu\text{m}$. Řezné rychlosti a naměřené hodnoty znázorněny v tab. 9. Velikost opotřebení hřbetu VBD graficky znázorňuje obr. 43.

Tab. 9 Naměřené hodnoty při testování DNMU.

$v_{c1} = 480 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$			$v_{c2} = 520 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$			$v_{c3} = 560 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$		
Čas [min]	VB [mm]	Ra [μm]	Čas [min]	VB [mm]	Ra [μm]	Čas [min]	VB [mm]	Ra [μm]
3,105	0,047	6,105	3,06	0,088	6,025	2,09	0,065	5,660
6,211	0,129	5,431	6,18	0,148	5,625	4,17	0,137	3,056
9,43	0,235	5,183	8,15	0,213	5,156	6,26	0,201	5,684
12,17	0,261	5,205	10,39	0,275	5,529	8,0	0,283	6,098
13,25	0,304	5,628	11,51	0,285	5,812	9,12	0,300	6,214
14,60	0,411	5,894	12,07	0,296	6,167			



Obr. 43 Opotřebení VBD při testování DNMU.

Na základě naměřených hodnot lze konstatovat, že k dosažení kritické meze opotřebení při řezné rychlosti $v_{c1} = 480 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ dojde po 13,2 min obrábění oceli 100Cr6. Při řezné rychlosti $v_{c2} = 520 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ vydrží 12,1 min a při $v_{c3} = 560 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ pouze 9,1 min. Třísky oceli vzniklé obráběním při daných podmínkách, viz obr. 44, mají vhodný tvar, neboť dochází ke správnému utváření třísky a zároveň se dělí po krátkých úsecích. Drsnost povrchu je nižší než $Ra = 6,3 \mu\text{m}$.



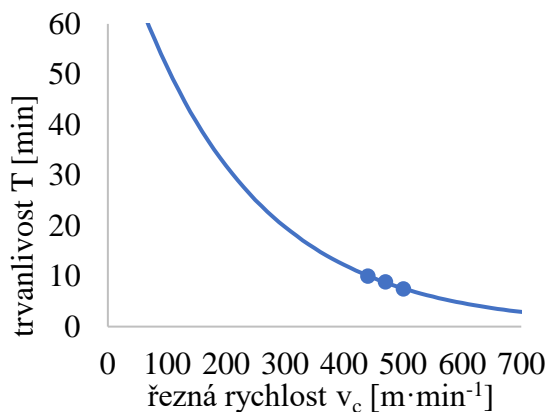
Obr. 44 Tříska ve formě krátké šroubovice.

3.4 Zpracování výsledků experimentu

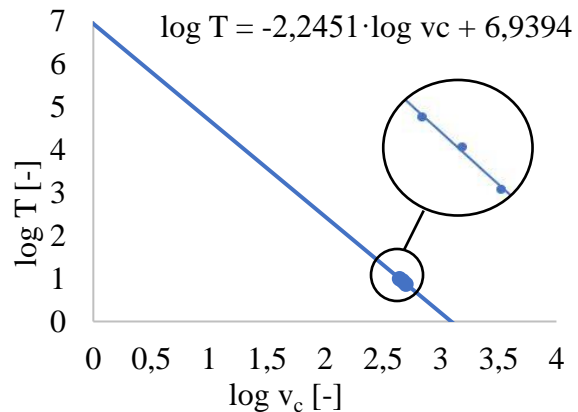
Data získaná experimentem umožní popsat závislost mezi řeznou rychlostí a trvanlivostí nástroje. Tato závislost bude využita pro získání dalších parametrů, které budou klíčové pro stanovení optimální trvanlivosti i řezné rychlosti pro dosažení minimálních nákladů na výrobu ložiskových kroužků.

Vynesím naměřených hodnot trvanlivosti nástroje pro danou řeznou rychlost je dosaženo exponenciální závislosti mezi těmito veličinami, viz obr. 45. Pro následné využití těchto dat je potřeba vytvořit lineární závislost, a proto musí být převedena do logaritmických souřadnic, viz obr. 46. Takto získaná přímka určuje svým sklonem citlivost nástroje na změnu řezné rychlosti. Následně lze stanovit efektivní hodnotu trvanlivosti a tomu odpovídající řeznou rychlost.

VBD WNMG060408–MF4 TP2501 0,5 mm



Obr. 45 Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti.



Obr. 46 Logaritmická závislost T – v_c.

Konstanta trvanlivosti C_T se určí dle rovnice přímky jakožto průsečík s osou log T:

$$\log C_T = -2,2451 \cdot \log v_c + 6,9394 = -2,2451 \cdot 0 + 6,9394 = 6,939 \quad (3.1)$$

Konstanta řezné rychlosti C_v se určí rovněž dle rovnice přímky jakožto průsečík s osou log v_c:

$$\log C_v = \frac{6,9394 - \log T}{2,2451} = \frac{6,9394 - 0}{2,2451} = 3,091 \quad (3.2)$$

Exponent m se stanoví jako směrnice přímky dle vztahu:

$$m = \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \left[\operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\log C_T}{\log C_v} \right) \right] = \operatorname{tg} \left[\operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{6,939}{3,091} \right) \right] = 2,245 \quad (3.3)$$

Celkové náklady na nástroj a jeho výměnu N_T lze vyjádřit podle vztahu:

$$N_T = \frac{N_1}{n_B} + N_3 = \frac{N_1}{n_B} + t_{AX} \cdot N_{sm} = \frac{200}{6} + 3 \cdot 20 = 93,333 \text{ Kč} \quad (1.14)$$

kde: t_{AX} – čas na výměnu nástroje [min].

Vztah pro optimální hodnotu trvanlivosti T_{opt} řezného nástroje pro kritérium minimálních výrobních nákladů:

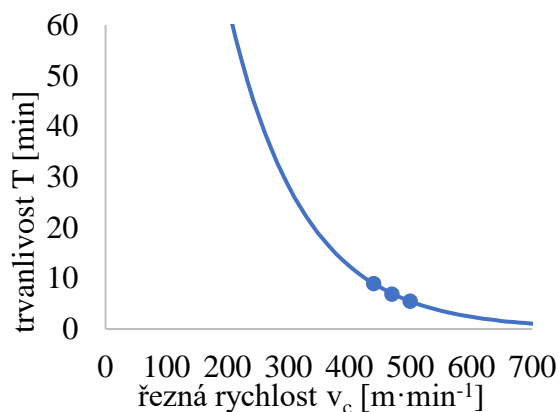
$$T_{opt} = (m - 1) \cdot \lambda \cdot \frac{N_T}{N_{sm}} = (2,245 - 1) \cdot 0,875 \cdot \frac{93,3}{20} = 5,084 \text{ min} \quad (1.18)$$

Optimální řezná rychlost $v_{c\text{opt}}$ se poté stanoví dle Taylorova vztahu:

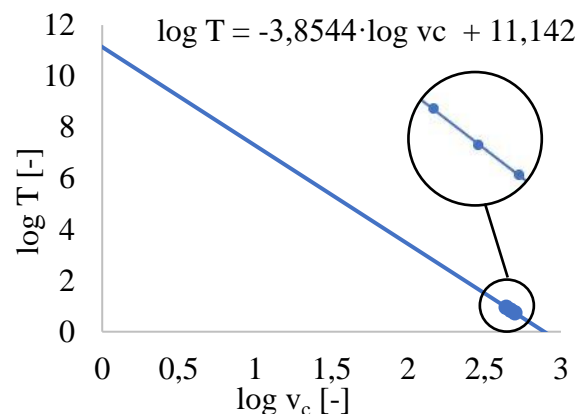
$$v_{c\text{opt}} = \frac{C_v}{T^{\frac{1}{m}}} = \frac{1\,233,105}{5,084^{\frac{1}{2,245}}} = 597,642 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} \quad (1.10)$$

Optimální hodnota řezné rychlosti byla určena jako $v_{c\text{opt}} = 597,6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, nicméně výrobce Seco Tools doporučuje pro VBD WNMG060408–MF4 TP2501 maximální řeznou rychlost ve výši $540 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Vzhledem k tomu, že při dosavadní produkci jsou používány u tohoto nástroje hodnoty dosahující až $630 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, bude doporučení výrobce ignorováno. Zvolená rychlost se tedy rovná $v_{cl} = 600 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ při trvanlivosti $T_1 = 5,1 \text{ min}$.

VBD WNMG060408–MF4 TP2501 1 mm



Obr. 47 Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti.



Obr. 48 Logaritmičká závislost $T - v_c$.

Konstanta trvanlivosti C_T se určí dle rovnice přímky jakožto průsečík s osou $\log T$:

$$\log C_T = -3,8544 \cdot \log v_c + 11,142 = -3,8544 \cdot 0 + 11,142 = 11,142 \quad (3.4)$$

Konstanta řezné rychlosti C_v se určí rovněž dle rovnice přímky jakožto průsečík s osou $\log v_c$:

$$\log C_v = \frac{11,142 - \log T}{3,8544} = \frac{11,142 - 0}{3,8544} = 2,891 \quad (3.5)$$

Exponent m se stanoví jako směrnice přímky dle vztahu:

$$m = \text{tg } \alpha = \text{tg} \left[\text{tg}^{-1} \left(\frac{\log C_T}{\log C_v} \right) \right] = \text{tg} \left[\text{tg}^{-1} \left(\frac{11,142}{2,891} \right) \right] = 3,854 \quad (3.3)$$

Celkové náklady na nástroj a jeho výměnu N_T lze vyjádřit podle vztahu:

$$N_T = \frac{N_1}{n_B} + N_3 = \frac{N_1}{n_B} + t_{AX} \cdot N_{sm} = \frac{200}{6} + 3 \cdot 20 = 93,333 \text{ Kč} \quad (1.14)$$

Vztah pro optimální hodnotu trvanlivosti T_{opt} řezného nástroje pro kritérium minimálních výrobních nákladů:

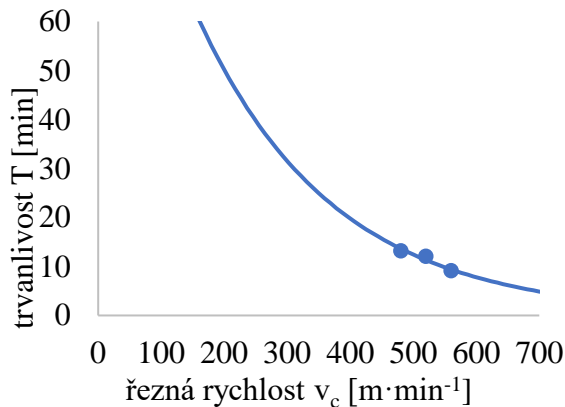
$$T_{\text{opt}} = (m - 1) \cdot \lambda \cdot \frac{N_T}{N_{sm}} = (3,854 - 1) \cdot 0,875 \cdot \frac{93,3}{20} = 11,654 \text{ min} \quad (1.18)$$

Optimální řezná rychlost $v_{c\text{opt}}$ se poté stanoví dle Taylorova vztahu:

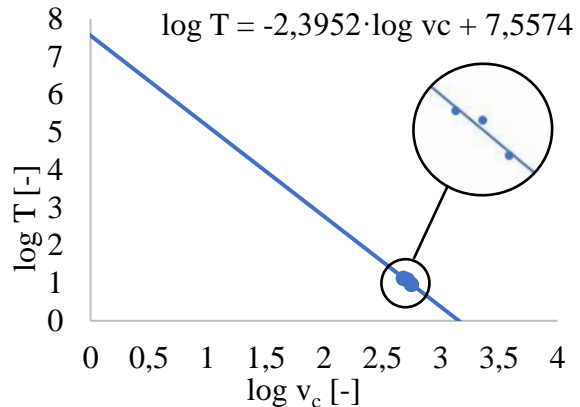
$$v_{c\text{opt}} = \frac{C_v}{T^m} = \frac{778,037}{11,654^{\frac{1}{3,854}}} = 411,417 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} \quad (1.10)$$

Výsledná řezná rychlost se nachází v rozmezí doporučeném výrobcem VBD, viz tab. 4, a proto byla rovnou použita hodnota $v_{c\text{II}} = 410 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Odpovídající trvanlivost činí $T_{\text{II}} = 11,6 \text{ min}$.

VBD DNMU110408–MF2 TP0501



Obr. 49 Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti.



Obr. 50 Logaritmická závislost $T - v_c$.

Konstanta trvanlivosti C_T se určí dle rovnice přímky jakožto průsečík s osou $\log T$:

$$\log C_T = -2,3952 \cdot \log v_c + 7,5574 = -2,3952 \cdot 0 + 7,5574 = 7,5574 \quad (3.6)$$

Konstanta řezné rychlosti C_v se určí rovněž dle rovnice přímky jakožto průsečík s osou $\log v_c$:

$$\log C_v = \frac{7,5574 - \log T}{2,3952} = \frac{7,5574 - 0}{2,3952} = 3,155 \quad (3.7)$$

Exponent m se stanoví jako směrnice přímky dle vztahu:

$$m = \text{tg } \alpha = \text{tg} \left[\text{tg}^{-1} \left(\frac{\log C_T}{\log C_v} \right) \right] = \text{tg} \left[\text{tg}^{-1} \left(\frac{7,5574}{3,155} \right) \right] = 2,395 \quad (3.3)$$

Celkové náklady na nástroj a jeho výměnu N_T lze vyjádřit podle vztahu:

$$N_T = \frac{N_1}{n_{B3}} + N_3 = \frac{N_1}{n_{B3}} + t_{AX} \cdot N_{sm} = \frac{200}{4} + 3 \cdot 20 = 110 \text{ Kč} \quad (1.14)$$

Vztah pro optimální hodnotu trvanlivosti T_{opt} řezného nástroje pro kritérium minimálních výrobních nákladů:

$$T_{\text{opt}} = (m - 1) \cdot \lambda \cdot \frac{N_T}{N_{sm}} = (2,395 - 1) \cdot 0,875 \cdot \frac{110}{20} = 6,713 \text{ min} \quad (1.18)$$

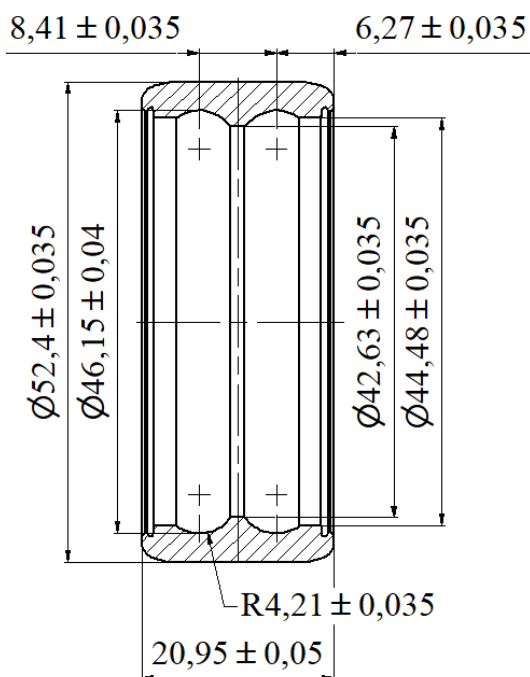
Optimální řeznou rychlost $v_{c\text{opt}}$ se poté stanoví dle Taylorova vztahu:

$$v_{c\text{opt}} = \frac{C_v}{T^m} = \frac{1\,428,894}{6,713^{\frac{1}{2,395}}} = 645,238 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} \quad (1.10)$$

Volená řezná rychlost je $v_{c\text{III}} = 645 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ s trvanlivostí $T_{\text{III}} = 6,7 \text{ min}$.

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Tato kapitola se zabývá technicko-ekonomickým zhodnocením, což je v konečném důsledku pro firmu tím nejdůležitějším aspektem. Schopnost vyrábět své produkty na požadované technické úrovni s co nejnižšími náklady je klíčové pro konkurenceschopnost na trhu a tím i úspěch podniku. Nejprve jsou stanoveny náklady na obrobení ložiskového kroužku v současném stavu a po inovaci. Následně dochází k porovnání obou způsobů výroby. Jelikož se kroužky vyrábí pro ložiska různých tvarů a rozměrů, bylo pro zjednodušení počítáno s reprezentačním kroužkem, viz obr. 51.



Obr. 51 Vnější kroužek dvouřadého kuličkového ložiska.

Používaný obráběcí stroj Takisawa TT-2100G umožňuje nakládání i vykládání obrobků automaticky pomocí dvou nakladačů, a proto bude ve výpočtu nákladů použit celkový cyklový čas stroje, který zahrnuje strojní čas včetně doby potřebné pro manipulaci s obrobkem v rámci zařízení. Hodinová sazba stroje je stanovena ekonomickým úsekem na $N_{sn} = 1\,200 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1}$ a cena VBD činí $N_1 = 200 \text{ Kč}$. Náklady na nožový držák nebudou ve výpočtu zahrnuty, jelikož jeho životnost nelze jednoznačně stanovit a při určování rozdílu mezi dvěma způsoby obrábění stejnými VBD má minimální význam.

4.1 Náklady na obrobení v současném stavu

Dosavadní rezné podmínky použité pro obrábění ložiskových kroužků včetně trvanlivosti VBD jsou znázorněny v tab. 10. Řezná rychlost při obrábění destičkou WNMG05 překračuje maximální doporučenou hodnotu výrobcem $v_c = 540 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, viz tab. 4.

Tab. 10 Současné rezné podmínky a trvanlivost.

VBD	f [mm]	$v_c [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$	T [min]
WNMG05	0,3	630	4,5
WNMG10	0,3	474	6,8
DNMU	0,25	600	8

Cyklový čas $t_{AS1} = 0,6$ min byl odečten přímo z displeje řídicího systému obráběcího stroje pro výpočet nákladů na strojní práci N_s dle vztahu:

$$N_{S1} = t_{AS1} \cdot N_{sm} = t_{AS1} \cdot \frac{N_{sn}}{60} = 0,6 \cdot \frac{1200}{60} = 12,0 \text{ Kč} \quad (1.12)$$

Pro stanovení nákladů na nástroj vztažených na jeden obrobený kus je potřeba určit počet kusů obrobených daným břitem Q_T :

$$Q_{T111} = \frac{T_1}{t_{111}} = \frac{4,5}{0,0114} \cong 395 \text{ ks} \quad (1.15)$$

kde: T_1 – trvanlivost WNMG05 před inovací [min],

t_{111} – čas obrábění WNMG05 na prvním vřetenu úsek 1 [min],

$$Q_{T121} = \frac{T_1}{t_{121}} = \frac{4,5}{0,0184} \cong 245 \text{ ks}$$

kde: t_{121} – čas obrábění WNMG05 na druhém vřetenu úsek 1 [min],

$$Q_{T212} = \frac{T_2}{t_{212}} = \frac{6,8}{0,0213} \cong 320 \text{ ks}$$

kde: T_2 – trvanlivost WNMG10 před inovací [min],

t_{212} – čas obrábění WNMG10 na prvním vřetenu úsek 2 [min],

$$Q_{T313} = \frac{T_3}{t_{313}} = \frac{8}{0,0130} \cong 615 \text{ ks}$$

kde: T_3 – trvanlivost DNMU před inovací [min],

t_{313} – čas obrábění DNMU na prvním vřetenu v úseku 3 [min],

$$Q_{T315} = \frac{T_3}{t_{315}} = \frac{8}{0,0146} \cong 545 \text{ ks}$$

kde: t_{315} – čas obrábění DNMU na prvním vřetenu v úseku 5 [min],

$$Q_{T322} = \frac{T_3}{t_{322}} = \frac{8}{0,0122} \cong 655 \text{ ks}$$

kde: t_{322} – čas obrábění DNMU na druhém vřetenu v úseku 2 [min],

$$Q_{T324} = \frac{T_3}{t_{324}} = \frac{8}{0,0205} \cong 390 \text{ ks}$$

kde: t_{324} – čas obrábění DNMU na druhém vřetenu v úseku 4 [min].

Náklady na nástroj a jeho výměnu N_T lze vyjádřit:

$$N_{T1,2} = \frac{N_1}{n_B} + N_3 = \frac{N_1}{n_B} + t_{AX} \cdot N_{sm} = \frac{N_1}{n_B} + t_{AX} \cdot \frac{N_{sn}}{60} = \frac{200}{6} + 3 \cdot \frac{1200}{60} = 93,3 \text{ Kč} \quad (1.14)$$

$$N_{T3} = \frac{N_1}{n_{B3}} + N_3 = \frac{N_1}{n_{B3}} + t_{AX} \cdot N_{sm} = \frac{N_1}{n_{B3}} + t_{AX} \cdot \frac{N_{sn}}{60} = \frac{200}{4} + 3 \cdot \frac{1\,200}{60} = 110 \text{ Kč}$$

Náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na jeden obrobený kus N_N se určí podle vzorce:

$$\begin{aligned} N_{N1} &= \frac{N_{T1,2}}{Q_{T111}} + \frac{N_{T1,2}}{Q_{T121}} + \frac{N_{T1,2}}{Q_{T212}} + \frac{N_{T3}}{Q_{T313}} + \frac{N_{T3}}{Q_{T315}} + \frac{N_{T3}}{Q_{T322}} + \frac{N_{T3}}{Q_{T324}} = \\ &= \frac{93,3}{395} + \frac{93,3}{245} + \frac{93,3}{320} + \frac{110}{615} + \frac{110}{545} + \frac{110}{655} + \frac{110}{390} = 1,74 \text{ Kč} \end{aligned} \quad (1.13)$$

Celkové operační výrobní náklady na jeden kus N_c dle vztahu:

$$N_{c1} = N_{S1} + N_{N1} = 13,3 + 1,74 = 15,07 \text{ Kč} \quad (1.11)$$

4.2 Náklady na obrobení po inovaci

Inovované řezné podmínky použité pro obrábění ložiskových kroužků včetně trvanlivosti VBD jsou znázorněny v tab. 11. Navržená řezná rychlost u destičky WNMG05 sice překračuje maximální doporučenou hodnotu výrobcem, viz tab. 4, nicméně v současnosti je řezná rychlost ještě větší, takže není nutno obávat se překročení tohoto limitu.

Tab. 11 Inovované řezné podmínky a trvanlivost.

VBD	f [mm]	v_c [m·min ⁻¹]	T [min]
WNMG05	0,42	600	5,1
WNMG10	0,34	410	11,6
DNMU	0,35	645	6,7

Cyklový čas t_{AS2} je spočítán přičtením rozdílu čistého času řezání jednotlivých VBD před a po inovaci ke stávajícímu času t_{AS1} :

$$\begin{aligned} t_{AS2} &= t_{AS1} - t_{111} + t_{I11} - t_{121} + t_{I21} - t_{212} + t_{III2} - t_{313} + t_{III3} - t_{315} + \\ &+ t_{III15} - t_{322} + t_{III22} - t_{324} + t_{III24} = \\ &= 40 - 0,684 + 0,515 - 1,105 + 0,832 - 1,275 + 1,31 - 0,781 + 0,533 - \\ &- 0,878 + 0,656 - 0,733 + 0,419 - 1,228 + 0,962 = 38,54 \text{ s} = 0,642 \text{ min} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Výpočet nákladů na strojní práci N_s dle vztahu:

$$N_{S2} = t_{AS2} \cdot N_{sm} = t_{AS2} \cdot \frac{N_{sn}}{60} = 0,642 \cdot \frac{1200}{60} = 12,84 \text{ Kč} \quad (1.12)$$

Pro stanovení nákladů na nástroj vztažené na jeden obrobený kus je potřeba určit počet kusů obrobených daným břitem Q_T :

$$Q_{TI11} = \frac{T_I}{t_{I11}} = \frac{5,1}{0,0086} \cong 595 \text{ ks} \quad (1.15)$$

kde: T_I – trvanlivost WNMG05 po inovaci [min],

t_{I11} – čas obrábění WNMG05 na prvním vřetenu úsek 1 [min],

$$Q_{TI21} = \frac{T_I}{t_{I21}} = \frac{5,1}{0,0139} \cong 368 \text{ ks}$$

kde: t_{I21} – čas obrábění WNMG05 na druhém vřetenu úsek 1 [min],

$$Q_{TII12} = \frac{T_{II}}{t_{II12}} = \frac{11,6}{0,0218} \cong 532 \text{ ks}$$

kde: T_{II} – trvanlivost WNMG10 po inovaci [min],

t_{II12} – čas obrábění WNMG10 na prvním vřetenu úsek 2 [min],

$$Q_{TIII13} = \frac{T_{III}}{t_{III13}} = \frac{6,7}{0,0089} \cong 754 \text{ ks}$$

kde: T_{III} – trvanlivost DNMU po inovaci [min],

t_{III13} – čas obrábění DNMU na prvním vřetenu v úseku 3 [min],

$$Q_{TIII15} = \frac{T_{III}}{t_{III15}} = \frac{6,7}{0,0109} \cong 612 \text{ ks}$$

kde: t_{III15} – čas obrábění DNMU na prvním vřetenu v úseku 5 [min],

$$Q_{TIII22} = \frac{T_{III}}{t_{III22}} = \frac{6,7}{0,0070} \cong 960 \text{ ks}$$

kde: t_{III22} – čas obrábění DNMU na druhém vřetenu v úseku 2 [min],

$$Q_{TIII24} = \frac{T_{III}}{t_{III24}} = \frac{6,7}{0,0160} \cong 418 \text{ ks}$$

kde: t_{III24} – čas obrábění DNMU na druhém vřetenu v úseku 4 [min].

Náklady na nástroj a jeho výměnu N_T lze vyjádřit:

$$N_{T1,2} = \frac{N_1}{n_B} + N_3 = \frac{N_1}{n_B} + t_{AX} \cdot N_{sm} = \frac{N_1}{n_B} + t_{AX} \cdot \frac{N_{sn}}{60} = \frac{200}{6} + 3 \cdot \frac{1\,200}{60} = 93, \bar{3} \text{ Kč} \quad (1.14)$$

$$N_{T3} = \frac{N_1}{n_{B3}} + N_3 = \frac{N_1}{n_{B3}} + t_{AX} \cdot N_{sm} = \frac{N_1}{n_{B3}} + t_{AX} \cdot \frac{N_{sn}}{60} = \frac{200}{4} + 3 \cdot \frac{1\,200}{60} = 110 \text{ Kč}$$

Náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na jeden obrobený kus N_N se určí podle vzorce:

$$\begin{aligned} N_{N2} &= \frac{N_{T1,2}}{Q_{TI11}} + \frac{N_{T1,2}}{Q_{TI21}} + \frac{N_{T1,2}}{Q_{TII12}} + \frac{N_{T3}}{Q_{TIII13}} + \frac{N_{T3}}{Q_{TIII15}} + \frac{N_{T3}}{Q_{TIII22}} + \frac{N_{T3}}{Q_{TIII24}} = \\ &= \frac{93, \bar{3}}{595} + \frac{93, \bar{3}}{368} + \frac{93, \bar{3}}{532} + \frac{110}{754} + \frac{110}{612} + \frac{110}{960} + \frac{110}{418} = 1,289 \text{ Kč} \end{aligned} \quad (1.13)$$

Celkové operační výrobní náklady na jeden kus N_c dle vztahu:

$$N_{c2} = N_{S2} + N_{N2} = 12,84 + 1,29 = 14,13 \text{ Kč} \quad (1.11)$$

4.3 Porovnání způsobů obrábění

Dosavadní způsob opracovávání ložiskových kroužků byl založen na doporučeních výrobce nástrojů a praktických zkušenostech technologů výroby. Inovovaný způsob obrábění spočívá v úpravě řezných podmínek. Šířka záběru ostří je daná na základě přídavek, podle ní pak výrobce doporučuje danou velikost posuvu. Řezná rychlost byla volena na základě experimentu a následného výpočtu optimální rychlosti. Při porovnávání řezných podmínek, viz tab. 12, je patrné, že obecně došlo ke zvýšení velikosti posuvů na úkor snížení řezných rychlostí, nicméně u destičky DNMU stoupla i ta. Navzdory výraznému zvýšení posuvu splňovala při experimentu drsnost povrchu podmínku $R_a = 6,3 \mu\text{m}$. Trvanlivost u této VBD poklesla o 1,3 min. U WNMG05 došlo k prodloužení trvanlivosti o 0,6 min a u nejvíce silově zatěžované WNMG10 došlo k nejvýraznějšímu prodloužení trvanlivosti o 4,8 min.

Tab. 12 Porovnání řezných podmínek a trvanlivosti.

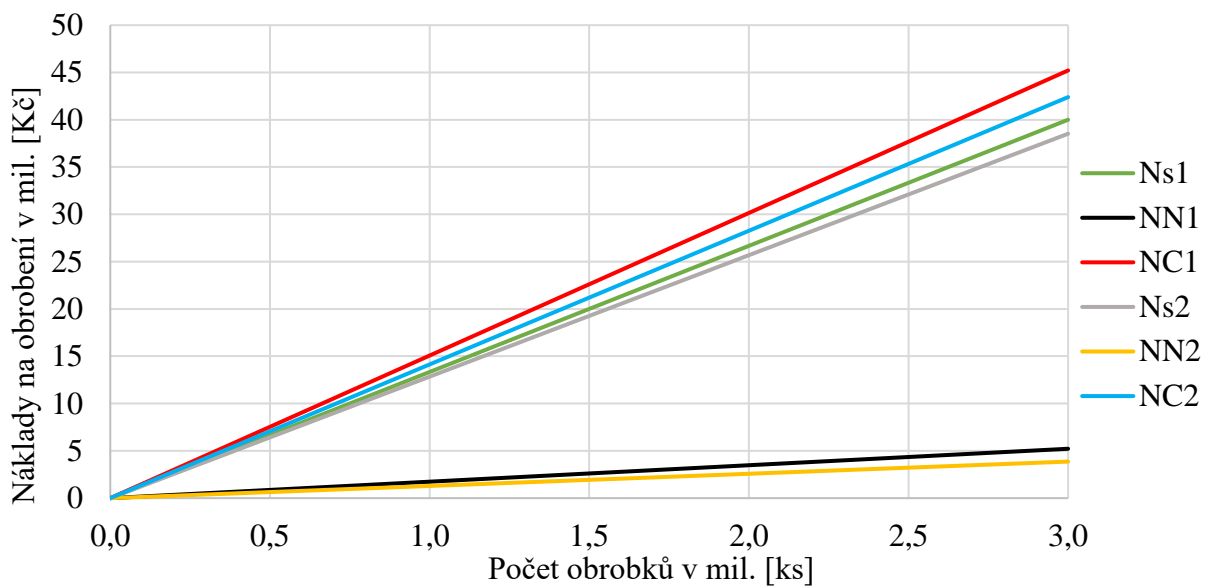
VBD	f [mm]		v _c [m·min ⁻¹]		T [min]	
	Současné	Inovace	Současné	Inovace	Současné	Inovace
WNMG05	0,3	0,42	630	600	4,5	5,1
WNMG10	0,3	0,34	474	410	6,8	11,6
DNMU	0,25	0,35	600	645	8	6,7

Změna těchto podmínek umožnila snížení cyklového času stroje o 1,46 s. Díky zrychlení obrábění a prodloužení trvanlivosti VBD klesly i náklady s tím spojené, viz tab. 13. Zvýšení rychlosti produkce zároveň umožňuje obrobení většího počtu výkovků za stejný časový úsek o 3,6 %, nicméně nelze jednoznačně vyčíslit zisk generovaný touto změnou, neboť stav výroby je výrazně ovlivněn množstvím aktuálních zakázek.

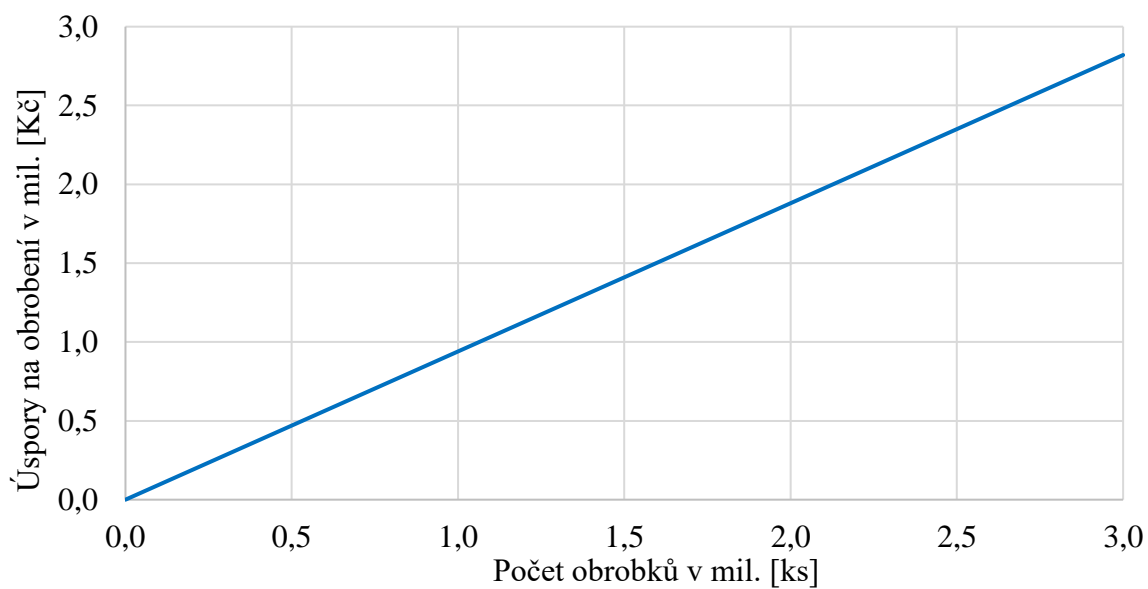
Tab. 13 Porovnání nákladů na obrobení.

Způsob výroby	N _s [Kč]	N _N [Kč]	N _c [Kč]
Současnost	13,33	1,74	15,07
Inovace	12,84	1,29	14,13
Úspora inovací	0,49	0,45	0,94

Celkové náklady na opracování ložiskového kroužku díky tomu klesly o 0,94 Kč, což odpovídá úspoře 6,2 %. Tato hodnota sama o sobě sice není nijak závratná, ale při průměrném ročním objemu výroby 2 600 000 ks (2 765 000 v roce 2021, 2 398 000 v roce 2022), kdy náklady na soustružení dosahují desítek milionů korun, viz obr. 52, se jedná o úspory v řádech až jednotek milionů korun ročně, viz obr. 53.



Obr. 52 Výše nákladů dle objemu produkce.



Obr. 53 Výše úspor dle objemu produkce.

ZÁVĚR

Teoretická část této diplomové práce se zabývá problematikou obrábění technologií soustružení, používanými nástroji a zejména jejich opotřebením. Popisuje jednotlivé druhy opotřebení a vliv řezných podmínek na jeho velikost. Dále se tato část věnuje trvanlivosti, její závislosti na řezné rychlosti a následně i její optimalizaci pro dosažení minimálních výrobních nákladů.

Praktická část začíná studií současného stavu výroby ložiskových kroužků od hutnického polotovaru až po výsledný produkt. První operací je kování na stroji, po kterém následuje žíhání na měkko a trýskání. Takto připravený výkovek postupuje na obrobnu, kde se nachází CNC soustruhy Takisawa TT–2100G. Analýza se dále zabývá materiálem 100Cr6, jeho chemickým složením a mechanickými vlastnostmi před a po žíhání. Podrobný rozbor strategie obrábění ložiskových kroužků určil nejvíce používané výměnné břitové destičky WNMG060408–MF4 TP2501 a DNMU110408–MF2 TP0501, jejichž efektivita je předmětem studie.

Experiment spočívá v obrábění ložiskové oceli vybranými VBD a měření opotřebení v průběhu času. Šířka záběru ostří byla volena dle přídavek výkovek na obrábění. Posuv byl zvolen na základě doporučení výrobce pro správné utváření třísky. K získání závislosti trvanlivosti ostří na velikosti řezné rychlosti byl proveden experiment u každé destičky pro tři různé řezné rychlosti. Celkem byla provedena série devíti testů. Mez opotřebení byla stanovena dle průběhu obrábění na $VB = 0,3$ mm. Součástí bylo i měření drsnosti povrchu obrobku, aby byla zaručena požadovaná jakost $Ra = 6,3$ μm .

Data získaná experimentem byla použita pro stanovení optimální trvanlivosti vzhledem k minimálním výrobním nákladům a tomu odpovídající řezné rychlosti pro všechny VBD. Tyto hodnoty jsou však pro praxi příliš konkrétní, a proto byly zaokrouhleny. Destička WNMG060408–MF4 TP2501 s $a_p = 0,5$ mm a $f = 0,42$ mm dosahuje efektivní trvanlivosti $T = 5,1$ min při $v_c = 630$ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. Stejná destička v případě kombinace řezných podmínek $a_p = 1,0$ mm a $f = 0,34$ mm dosahuje více než dvojnásobné efektivní trvanlivosti $T = 11,6$ min při $v_c = 410$ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. DNMU110408–MF2 TP0501 pak pro $a_p = 0,25$ mm a $f = 0,35$ mm obrábí efektivně s trvanlivostí $T = 6,7$ min při $v_c = 645$ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$.

Změnou řezných podmínek došlo ke zkrácení cyklového času o 1,46 s, čímž se zvýšila celková produkce ložiskových kroužků o 3,6 %. Náklady na jejich obrobání klesly o 0,94 Kč na každý kus, což činí 6,2 % a v případě průměrného ročního objemu výroby 2,6 mil. kusů to znamená úsporu 2,4 mil. Kč. Jedná se o inovaci, která spočívá pouze v úpravě řezných podmínek, takže jedinou investicí bylo provedení experimentu na obráběcím stroji v průběhu dvou směn.

Dalších úspor by mohlo být dosaženo volbou vhodnějších VBD a úpravou technologického postupu obrábění za účelem sloučení hrubovacích a dokončovacích operací u tvarově jednoduchých válcových částí ložiskových kroužků v jednu operaci, protože přídávky výkovek na obrábění se u těchto ploch pohybují pouze v desetinách milimetrů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Different Types Of Bearings And Their Characteristics. In: *WAYKEN: Rapid manufakturně* [online]. ShenZhen: WAYKEN and WEIKE, 2021 [cit. 2023-01-13]. Dostupné z: <https://waykenrm.com/blogs/>.
 2. Příručka obrábění-kniha pro praktiky. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. Přel. KUDELA, M. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: *Modern Metal Cutting – A Practical Handbook*. ISBN 91-97 22 99-4-6.
 3. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
 4. KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
 5. HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění – 1. část* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003 [cit. 2023-03-03]. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf
 6. Lathe Cutting Tool Angle Selection Principle. *Harsle* [online]. Nanjing: Nanjing Harsle Machine Tool Co., 2022 [cit. 2023-03-04]. Dostupné z: <https://www.harsle.com/Lathe-Cutting-Tool-Angle-Selection-Principle-id49735467.html>
 7. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
 8. ZEMAN, Pavel. *Účinek řezného prostředí na trvanlivost břitu*. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2005 [cit. 2023-03-04]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/ucinek-rezneho-prostredi-na-trvanlivost-britu>
 9. MÁDL, Jan. *Optimalizace řezných podmínek v teorii obrábění*. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1990. ISBN 80-01-00323-X.
 10. DE VOS, Patrick. *Příručka pro technology – Opatření se nevyhneme!*. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2012 [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-opotrebenise-nevyhneme.html>
 11. GRAHAM, Don. *Rozpoznání a vyřešení osmi nejčastějších typů opotřebení břitových destiček*. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2014 [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/novinka/rozpoznani-a-vyreseni-osminejcastejsich-typu-opotrebeni-britovych-desticek.html>
 12. ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Úvod do teorie obrábění: Opatření řezných nástrojů* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2023-03-05]. ISBN 978-80-248-3013-1. Dostupné z: https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_002/
 13. Přehled základních projevů opotřebení nástrojů pro obrábění kovů. *SECO* [online]. Brno: Seco Tools CZ, 2023, 7. 2. 2023 [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/article/122073?language=cs>
-

14. FOREJT, Milan, Anton HUMÁR, Miroslav PÍŠKA a Libor JANÍČEK. *Experimentální metody: Syllabus* [online]. 4. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://moodle.vut.cz/mod/folder/view.php?id=254194>
 15. BĚLÍN, Zdeněk. *Věnujte pozornost vedlejším časům při obrábění*. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2018, 6.6.2018 [cit. 2023-03-08]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/venuujte-pozornost-vedlejsim-casum-pri-obrabeni>
 16. Profil společnosti. In: *Šroubárna Kyjov, spol. s r.o.* [online]. Kyjov: Šroubárna Kyjov, spol. s r.o., c2006-2023 [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://www.sroubk.cz/hlavni-stranka/1/uvod>
 17. Materiálový list: 100Cr6. In: *Ložiskové kuličky* [online]. Napajedla: WebSnadno, 2023 [cit. 2023-02-17]. Dostupné z: <http://www.kulicky.wbs.cz/Ocel-14-109.html>
 18. Takisawa: CNC Lathe. In: *Takisawa* [online]. Okayama: Takisawa, 2015 [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: <https://www.takisawa.co.jp/english/product/cnc/tt/tt-2100g.html>
 19. Mitutoyo: Přístroje na měření drsnosti povrchu. In: *Mitutoyo* [online]. Teplice: Mitutoyo Česko, 2023 [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs_CZ
 20. Měření struktury povrchu. In: *ACCRETECH* [online]. Mnichov: ACCRETECH (Europe), 2019 [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: <https://www.accretech.eu/cs/mereni-struktury-povrchu/>
 21. Levenhuk. In: *Levenhuk* [online]. Praha: Levenhuk Optics, 2023 [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: <https://cz.levenhuk.com/catalogue/mikroskopy/>
 22. ČEP, Robert. *Měření opotřebení nástrojů* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2003 [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_05.pdf
 23. Technologie Duromatic. In: *SECO* [online]. Brno: Seco Tools CZ, 2023 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/m_7098
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
A_D	jmenovitý průřez třísky	[mm ²]
a_p	šířka záběru ostří	[mm]
b_d	jmenovitá šířka třísky	[mm]
C_{Fc}	materiálová konstanta	[-]
C_T	konstanta trvanlivosti	[-]
C_v	konstanta řezné rychlosti	[-]
D	obráběný průměr	[mm]
D_v	hodinová sazba vedlejší práce	[Kč]
F	celková řezná síla	[N]
F_c	řezná síla	[N]
F_f	posuvová síla	[N]
F_p	Pasivní síla	[N]
f	posuv	[mm]
h_d	jmenovitá tloušťka třísky	[mm]
k_c	měrná řezná síla	[MPa]
L	délka dráhy obrábění	[mm]
l	obráběná délka součásti	[mm]
l_n	délka náběhu	[mm]
l_p	délka přeběhu	[mm]
m	exponent	[-]
N_1	cena VBD	[Kč]
N_2	cena držáku	[Kč]
N_3	náklady na upnutí a případné seřízení VBD	[Kč]
N_C	celkové operační výrobní náklady	[Kč]
N_{C1}	celkové operační výrobní náklady před inovací	[Kč]
N_{C2}	celkové operační výrobní náklady po inovaci	[Kč]
N_N	náklady na nástroj a výměnu vztažené na jeden kus	[Kč]
N_{N1}	náklady na nástroj a výměnu vztažené na jeden kus před inovací	[Kč]
N_{N2}	náklady na nástroj a výměnu vztažené na jeden kus po inovaci	[Kč]
N_S	náklady na strojní práci	[Kč]
N_{S1}	náklady na strojní práci před inovací	[Kč]
N_{S2}	náklady na strojní práci po inovaci	[Kč]
N_{sm}	inutová sazba stroje	[Kč]
N_{sn}	hodinová sazba stroje	[Kč]
N_T	náklady na nástroj a jeho výměnu	[Kč]
$N_{T1,2}$	náklady na nástroj WNMG a jeho výměnu	[Kč]
N_{T3}	náklady na nástroj DNMU a jeho výměnu	[Kč]
N_V	náklady na vedlejší práce	[Kč]
n	otáčky obrobku	[min ⁻¹]
n_B	počet břitů VBD	[ks]
P_m	výkon obráběcího stroje	[W]
Q_T	počet kusů obrobených daným břitem	[ks]
Q_{T111}	počet kusů obrobených WNMG05 na prvním vřetenu v úseku 1	[ks]
Q_{T121}	počet kusů obrobených WNMG05 na druhém vřetenu v úseku 1	[ks]
Q_{T212}	počet kusů obrobených WNMG10 na prvním vřetenu v úseku 2	[ks]
Q_{T313}	počet kusů obrobených DNMU na prvním vřetenu v úseku 3	[ks]

Označení	Legenda	Jednotka
QT315	počet kusů obrobených DNMU na prvním vřetenu v úseku 5	[ks]
QT322	počet kusů obrobených DNMU na druhém vřetenu v úseku 2	[ks]
QT324	počet kusů obrobených DNMU na druhém vřetenu v úseku 4	[ks]
QTII1	počet kusů obrobených WNMG05 na prvním vřetenu v úseku 1	[ks]
QTII21	počet kusů obrobených WNMG05 na druhém vřetenu v úseku 1	[ks]
QTIII2	počet kusů obrobených WNMG10 na prvním vřetenu v úseku 2	[ks]
QTIII13	počet kusů obrobených DNMU na prvním vřetenu v úseku 3	[ks]
QTIII15	počet kusů obrobených DNMU na prvním vřetenu v úseku 5	[ks]
QTIII22	počet kusů obrobených DNMU na druhém vřetenu v úseku 2	[ks]
QTIII24	počet kusů obrobených DNMU na druhém vřetenu v úseku 4	[ks]
r_ε	poloměr zaoblení špičky	[mm]
T	trvanlivost	[min]
T ₁	trvanlivost WNMG05 před inovací	[min]
T ₂	trvanlivost WNMG10 před inovací	[min]
T ₃	trvanlivost DNMU před inovací	[min]
T _I	trvanlivost WNMG05 po inovaci	[min]
T _{II}	trvanlivost WNMG10 po inovaci	[min]
T _{III}	trvanlivost DNMU po inovaci	[min]
T _{opt}	optimální trvanlivost	[min]
t ₁₁₁	čistý čas řezání WNMG05 na prvním vřetenu v úseku 1	[min]
t ₁₂₁	čistý čas řezání WNMG05 na prvním vřetenu v úseku 1	[min]
t ₂₁₂	čistý čas řezání WNMG10 na prvním vřetenu v úseku 1	[min]
t ₃₁₃	čistý čas řezání DNMU na prvním vřetenu v úseku 3	[min]
t ₃₁₅	čistý čas řezání DNMU na prvním vřetenu v úseku 5	[min]
t ₃₂₂	čistý čas řezání DNMU na druhém vřetenu v úseku 2	[min]
t ₃₂₄	čistý čas řezání DNMU na druhém vřetenu v úseku 4	[min]
t _{II1}	čistý čas řezání WNMG05 na prvním vřetenu v úseku 1 po inov.	[min]
t _{II21}	čistý čas řezání WNMG05 na prvním vřetenu v úseku 1 po inov.	[min]
t _{III2}	čistý čas řezání WNMG10 na prvním vřetenu v úseku 1 po inov.	[min]
t _{III13}	čistý čas řezání DNMU na prvním vřetenu v úseku 3 po inovaci	[min]
t _{III15}	čistý čas řezání DNMU na prvním vřetenu v úseku 5 po inovaci	[min]
t _{III22}	čistý čas řezání DNMU na druhém vřetenu v úseku 2 po inovaci	[min]
t _{III24}	čistý čas řezání DNMU na druhém vřetenu v úseku 4 po inovaci	[min]
t _{AS}	jednotkový strojní čas	[min]
t _{AS1}	jednotkový strojní čas před inovací	[min]
t _{AS2}	jednotkový strojní čas po inovaci	[min]
t _{AV}	čas vedlejší práce	[min]
V _c	řezná rychlost	[m·min ⁻¹]
V _{cI}	řezná rychlost zvolená pro WNMG05	[m·min ⁻¹]
V _{cII}	řezná rychlost zvolená pro WNMG10	[m·min ⁻¹]
V _{cIII}	řezná rychlost zvolená pro DNMU	[m·min ⁻¹]
V _{copt}	optimální řezná rychlost	[m·min ⁻¹]
V _f	posuvová rychlost	[m·min ⁻¹]
X _{fc}	exponent vlivu šířky záběru ostří	[-]
Y _{fc}	exponent vlivu posuvu	[-]
Z	životnost držáku	[ks]

Označení	Legenda	Jednotka
α_o	úhel hřbetu	[°]
γ_o	úhel čela	[°]
ε	úhel špičky	[°]
η	mechanická účinnost obráběcího stroje	[-]
κ_r	úhel nastavení hlavního ostří	[°]
λ	poměr mezi dráhou nástroje záběru a celkovou dráhou	[-]
λ_s	úhel sklonu ostří	[°]

Zkratky

Označení	Legenda
SK	slinutý karbid
HRC	tvrdost dle Rockwella
HBW	tvrdost dle Brinella
PVD	Physical Vapour Deposition
CVD	Chemical Vapour Deposition
VBD	výměnná břitová destička
PD	polykrystalický diamant
PKNB	polykrystalický kubický nitrid boru
RO	rychlořezná ocel
CNC	computer numerical control
ČSN	česká státní norma
EN	evropská norma

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Materiálový list SLM materiálu IN 939
Příloha 2 Protokol o měření chemického složení oceli 100Cr6
Příloha 3 Vybrané fotografie měření opotřebení
-

OCEL 14 109		CHROMOVÁ OCEL PRO VALIVÁ LOŽISKA					ČSN 41 4109 STN 41 4109		
Chemické složení [hm. %]									
C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Ni+Cu	P	S	
0,90-1,10	0,30-0,50	0,15-0,35	1,30-1,65	max 0,30	max 0,25	max 0,50	max 0,027	max 0,030	
Polotovary									
[1] předvalky				[4] bezešvé trubky tvářené za tepla					
[2] tyče válcované za tepla				[5] tyče tažené za studena					
[3] výkovky				[6] dráty tažené za studena					
Mechanické vlastnosti									
Polotovary	[1] [2] [3]		[4]		[5] [6]				
Rozměr t,d [mm]	-		-		-				
Stav	.3		.3		.3				
Mez kluzu R_e [MPa]	441		-		441				
Mez pevnosti R_m [MPa]	608-726		608-726		628-765				
Tažnost A_5 [%] inf.podél	18		18		18				
Kontrakce Z [%] inf.	35		35		35				
Vrbová houževnatost KCU 2	-		-		-				
Tvrdość HB	max 210		max 220		max 225				
Modul pružnosti E [GPa]	213 (při 23 HRC), 210 (při 54HRC), 202 (při 63HRC)								
Modul pruž.ve smyku G [GPa]	-								
Teplota [°C] / tvrdość			20		200		400		600
Modul pružnosti E [GPa]	23HRC		213		202		188		166
za zvýšených teplot	54HRC		210		197		182		-
Fyzikální vlastnosti									
Hustota	ρ [kg.m ⁻³]		7 850						
Měrná tepelná kapacita	c_p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]		480						
Teplotní součinitel roztažnosti	α [K ⁻¹]		12,5.10						
Tepelná vodivost	λ_s [W.m ⁻¹ . K ⁻¹]		37,26						
Rezistivita	ρ [Ω . m]		256.10						
Technologické údaje									
Ocel je dobře tvařitelná za tepla a je vhodná k přímému kalení, ve stavu žíhaném na měkko dobře obrobitelná. Optimální průměr, nebo tloušťka zušlechťení je asi 20mm. Ocel je vhodná na součásti s velmi tvrdým povrchem odolným proti opotřebenění.									
▶ kování 750 až 1 100 °C				▶ kalení do vody 790 až 820 °C					
▶ normalizační žíhání 860 až 890 °C				▶ kalení do oleje 820 až 850 °C					
▶ žíhání na měkko 720 až 760 °C				▶ popouštění 150 až 220 °C					
Nejnižší tvrdość po kalení do oleje 62HRC Mikrostruktura ve stavu .3: zrnitý perlit, zbytky lamelárního perlitu jsou dovoleny do 10% tvrdość HRC při teplotě popouštění									
Teplota	150 °C		175 °C		200 °C		250 °C		
doba popouštění [h]	2		63,0		62,0		60,2		58,0
	4		62,5		61,0		59,1		57,0
Tvařitelnost za tepla třída 2									
Obrobitelnost		soustružení		frézování, vrtání		broušení			
polotovary	[2],[3]	stav .3	13b		13b		-		
	[4]	stav .3	13b		13b		-		
	[5]	stav .3	12b		12b		-		

OCEL 14 109		CHROMOVÁ OCEL PRO VALIVÁ LOŽISKA		ČSN 41 4109 STN 41 4109										
Odolnost proti degradačním procesům														
Odolnost proti korozi		normální.												
Odolnost proti opotřebení														
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>HRC</th> <th colspan="2">opotřebení [mg . mm⁻² . m⁻¹]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>58 - 59</td> <td colspan="2">0,0267</td> </tr> <tr> <td>61 - 62</td> <td colspan="2">0,0240</td> </tr> </tbody> </table>				HRC	opotřebení [mg . mm ⁻² . m ⁻¹]		58 - 59	0,0267		61 - 62	0,0240	
HRC	opotřebení [mg . mm ⁻² . m ⁻¹]													
58 - 59	0,0267													
61 - 62	0,0240													
Hodnoty platí pro odvalování válečků bez mazání, při zatížení 981MPa. Opotřebení je dáno úbytkem hmotnosti [mg], součinitelem stykové plochy [mm] a proběhnuté dráhy [m].														
Odolnost proti únavě														
mez únavy v ohybu při syntetickém cyklu [MPa]														
pro:		<table border="1"> <tbody> <tr> <td>HRC</td> <td>58,5-59,0</td> <td>630</td> </tr> <tr> <td>HRC</td> <td>60,5-61,0</td> <td>715</td> </tr> <tr> <td>HRC</td> <td>62,5-63,0</td> <td>645</td> </tr> </tbody> </table>				HRC	58,5-59,0	630	HRC	60,5-61,0	715	HRC	62,5-63,0	645
HRC	58,5-59,0	630												
HRC	60,5-61,0	715												
HRC	62,5-63,0	645												
Použití														
Pro výrobu kuliček do Ø 25mm, válečků a kuželíků valivých ložisek do tloušťky stěny 16 mm.														
Ostatní vlastnosti														
Druh oceli podle způsobu výroby		Barevné značení ČSN 42 0010		Třída odpadu ČSN 42 0030										
elektroocel		modrá - bílá - oranžová		8										
Porovnání se zahraničními materiály														
ISO		EURO		Německo										
Type 1-0	ISO 683/17-73	100Cr6	EN94-73	100Cr6	DIN 17230-80									
Francie		Velká Británie		Rusko										
100Cr6	NF A35 - 565 - 94	535 A99	BS 970/10-083	ŠCh 15	GOST 801-81									
100Cr6	NF A35 - 552 - 86	2S135												
100Cr6	NF A35 - 553 - 82													
100Cr6	NF A36 -102 - 93													

Příloha 2

Protokol o měření chemického složení oceli 100Cr6



Datum a čas měření 04.10.2022 11:29:02 **Název metody** Fe-11-F

Číslo výkresu SLV / KL **Tavba** T15829 **Jakosti** 100Cr6-S700+AR **Norma jakosti** 3M.5/26.9.2016 , 3L.E/1/2.2.2016 - TIMKEN **Poznámka**

Meas.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0,998	0,193	0,313	0,0114	0,0056	1,42	0,0021	0,0289	0,00089	0,0022
2	0,968	0,191	0,316	0,0112	0,0059	1,43	0,0021	0,0288	0,00070	0,0019
A. Min	0,930	0,150	0,250			1,35				
<x>	0,984	0,192	0,314	0,0113	0,0059	1,42	0,0021	0,0288	0,00080	0,0021
A. Max	1,05	0,350	0,450	0,0250	0,0150	1,60	0,1000	0,250	0,0500	

Meas.	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Zr	Bi
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0,0245	0,0033	<0,00020	0,0021	<0,00050	<0,00100	0,0054	0,0029	0,0011	<0,00100
2	0,0245	0,0031	<0,00020	0,0019	<0,00050	<0,00100	0,0049	0,0017	0,0010	<0,00100
<x>	0,0245	0,0032	<0,00020	0,0020	<0,00050	<0,00100	0,0051	0,0023	0,0010	<0,00100
A. Max	0,300		0,0050				0,0200	0,0300		

Meas.	Ca	Ce	Sb	Se	Te	Ta	B	Zn	La	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0,00048	<0,00100	0,0028	0,0035	0,0019	<0,00070	<0,00020	<0,00100	<0,00030	97,0
2	0,00029	<0,00100	0,0029	0,0026	0,0018	<0,00070	<0,00020	<0,00100	<0,00030	97,0
<x>	0,00039	<0,00100	0,0028	0,0030	0,0019	<0,00070	<0,00020	<0,00100	<0,00030	97,0
A. Max			0,0150							

Příloha 3
Vybrané fotografie měření opotřebení

