



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

STANOVENÍ NEJLEPŠÍHO NÁSTROJE PRO VYSTRUŽOVÁNÍ OTVORU PRO PÍST VE FIRMĚ BOSCH DIESEL, S.R.O.

DETERMINING THE BEST CUTTING TOOL FOR REAMING THE PISTON HOLE IN BOSCH DIESEL
COMPANY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Rauscher

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zdeněk Fiala, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Tomáš Rauscher
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Zdeněk Fiala, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

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:

Stanovení nejlepšího nástroje pro vystružování otvoru pro píst ve firmě Bosch Diesel, s.r.o.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student provede výběr vhodného dodavatele výstružníku pro obrábění otvoru pro píst diesellového čerpadla CP3, a to na základě provedených testů životnosti. Experimenty budou provedeny v reálném provozu ve společnosti Bosch Diesel.

Cíle diplomové práce:

1. Aktuální literární studie dané problematiky
2. Výběr dodavatelů výstružníků a návrh experimentů
3. Provedení a vyhodnocení experimentálních měření

Seznam doporučené literatury:

GHANI, J. A., M. RIZAL, M. Z. NUAWI, M. J. GHAZALI a C. H. C. HARON. Monitoring online cutting tool wear using low-cost technique and user-friendly GUI. *Wear*. 2011. s. 2619-2624. DOI: 10.1016/j.wear.2011.01.038.

DIMLA, E. a Snr. DIMLA. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations - a review of methods. *Machine Tools & Manufacture* [online]. 1999, 40, s. 1073-1098. DOI: S0890-6955(99)00122-4.

HUANG, S. N., K. K. TAN, Y. S. WONG, C. W. DE SILVA, H. L. GOH a W. W. TAN. Tool wear detection and fault diagnosis based on cutting force monitoring. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2006, s. 444-451 . DOI: 10.1016/j.ijmactools.2006.06.011.

TETI, R., K. JEMIELNIAK, G. O'DONNELL a D. DORNFELD. Advanced monitoring of machining operations. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2010, 59, s. 717-739. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.05.010.

BHATTACHARYYA, P., D. SENGUPTA a S. MUKHOPADHYAY. Cutting force-based real-time estimation of tool wear in face milling using a combination of signal processing techniques. Mechanical Systems and Signal Processing. 2007, 21, s. 2665-2683, DOI: 10.1016/j.ymsp.2007.01.004.

WANG, W., Y.S. WONG a G.S. HONG. Flank wear measurement by successive image analysis. Computers in Industry. 2004, 56, s. 816-830, 2005. DOI: 10.1016/j.compind.2005.05.009.

SALGADO, D. R. a F. J. ALONSO. Tool wear detection in turning operations using singular spectrum analysis. Materials Processing Technology [online]. 2006, 171, s. 451-458. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.08.005.

JURKOVIC, J., M. KOROSEC a J. KOPAC. New approach in tool wear measuring technique using CCD vision system. Machine Tools & Manufacture. 2005, 45, s. 1023-1030. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.11.030.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá snížením nákladů na řezný nástroj, který vystružuje otvor pro píst v tělese diesellového čerpadla CP3 od společnosti Bosch Diesel s. r. o. Práce je rozdělena na teoretický popis problematiky, který je výchozím podkladem pro plánované testy obráběním, a experimentální část, která má za cíl nalézt vhodný výstružník pro danou technologickou operaci. Snížení nákladů bude dosaženo výběrem vhodné alternativy za doposud používaný sériový nástroj.

Klíčová slova

výstružník, životnost, těleso CP3, polykrystalický kubický nitrid boru

ABSTRACT

The main goal of this diploma thesis is to increase cost savings on cutting tools, which are used to ream piston hole inside the housing of CP3 diesel pump made by Bosch Diesel s. r. o. Diploma thesis is divided into a theoretical description of the issue, which is initial knowledge for machining tests, and experimental part, whose task it is to find a suitable reamer for this technological operation. Cost savings will be achieved by selecting suitable tool instead of the serial tool that has been used so far.

Keywords

reamer, lifetime, housing CP3, cubic boron nitrid

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RAUSCHER, T. *Stanovení nejlepšího nástroje pro vystružování otvoru pro píst ve firmě Bosch Diesel s. r. o.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Fiala, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Stanovení nejlepšího nástroje pro vystružování otvoru pro píst ve firmě Bosch Diesel s. r. o.**, vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Tomáš Rauscher

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Zdeňku Fialovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Zvláštní poděkování patří společnosti Bosch Diesel s. r. o., za umožnění vypracování diplomové práce a panu Dušanu Nevosadovi za jeho odborné a věcné připomínky při její tvorbě.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 PŘEDSTAVENÍ SPOLEČNOSTI BOSCH GROUP.....	10
1.1 Vznik a vývoj společnosti.....	10
1.2 Vznik Bosch Diesel s. r. o., v Jihlavě	10
1.3 Portfolio výrobků Bosch Diesel s. r. o.....	10
2 TEORETICKÝ ROZBOR ŘEŠENÝCH PROBLÉMŮ	12
2.1 Mechanika řezného procesu.....	12
2.2 Způsoby opotřebení obráběcích nástrojů	16
2.2.1 Opotřebení řezných nástrojů z fyzikálního hlediska.....	16
2.2.2 Formy a kritéria opotřebení	20
2.3 Vystružování	22
3 POLYKRISTALICKÝ KUBICKÝ NITRID BORU	25
3.1 Charakteristika a historie	25
3.2 Nitrid boru.....	26
3.3 Výroba PKNB.....	26
3.4 Fyzikální a mechanické vlastnosti	27
3.5 Opotřebení nástrojů z PKNB	29
4 TĚLESO CP3.....	30
4.1 Common Rail systém.....	30
4.2 Těleso CP3	30
4.2.1 Popis tělesa CP3.....	30
4.2.2 Obrábění tělesa CP3.....	33
4.2.3 Píst a otvor pro píst	33
4.2.4 Obrábění a měření otvoru pro píst	34
4.2.5 Obráběcí centrum GROB 500 BZ	37
4.2.6 Nástroj T14012	38
5 TESTY ŽIVOTNOSTI DODANÝCH NÁSTROJŮ	40
5.1 Zhodnocení dodaných nástrojů	40
5.1.1 Gühring	40
5.1.2 Sandvik	41

5.1.3 Iscar.....	43
5.1.4 LMT.....	44
5.1.5 Hamfinal.....	45
5.2 Návrh experimentu.....	47
5.3 Zhodnocení otestovaných nástrojů.....	48
5.3.1 Gühring.....	48
5.3.2 Sandvik.....	49
5.3.3 Iscar.....	51
5.3.4 LMT.....	52
5.3.5 Hamfinal.....	54
5.3.6 Souhrn.....	56
ZÁVĚR.....	58
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	59
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	61
SEZNAM PŘÍLOH.....	63

ÚVOD

Diplomová práce je zaměřena na výběr vhodného výstružníku pro obrábění otvoru pro píst dieselového čerpadla CP3 ve společnosti Bosch Diesel s. r. o. Neustálé snižování výrobní ceny produktu jde ruku v ruce s obchodní politikou firmy Bosch Diesel s. r. o. Snižování výrobní ceny produktu lze dosáhnout různými způsoby, mezi které patří snižování personálních nákladů, snižováním nákladů na polotovary, snižování nákladů na energie, snižování nákladů na média, snižování nákladů na stroje a v neposlední řadě snižování nákladů na nástroje.

Tato práce se zabývá právě snížením nákladů na řezné nástroje, které zaujímají podstatnou část z výsledné ceny produktu, přičemž se zaměříme na nahrazení stávajícího finančně nákladného výstružníku novým, který splňuje požadované parametry obrobené díry a je zároveň levnější z hlediska ceny za jeden obrobený kus než výstružník používaný v sériové výrobě.

1 PŘEDSTAVENÍ SPOLEČNOSTI BOSCH GROUP

V následujících podkapitolách je představena historie společnosti Bosch a její vývoj. Další část je věnována seznámení s jihlavským výrobním závodem Bosch Diesel s. r. o., a jeho výrobním programem.

1.1 Vznik a vývoj společnosti

Společnost Bosch je známá po celém světě. V dnešní době působí na poli automobilové a průmyslové techniky, spotřebního zboží a techniky budov. Založena byla již roku 1886 ve Stuttgartu Robertem Boschem jako dílna pro jemnou mechaniku a elektrotechniku. Postupně docházelo k zavedení výroby zapalovacích zařízení pro motory a založení prvních zahraničních poboček v Londýně a v Paříži [1].

1.2 Vznik Bosch Diesel s. r. o., v Jihlavě

Historie Bosch v Jihlavě sahá do roku 1927, kdy zde byl založen servis Bosch provozovaný Josefem Binderem a Josefem Poláčkem. Se souhlasem mateřského závodu zde byly opravovány a prodávány produkty firmy Bosch. Z důvodu změněných politických poměrů musel Josef Poláček provoz servisu v roce 1948 ukončit [1].

Bosch se do Jihlavy vrátil po 45 letech, kdy se na spolupráci dohodla společnost Bosch a jihlavský strojírenský podnik Motorpal. Bosch Diesel s. r. o. byl založen 4. ledna 1993 [1, 2].

Nejprve Bosch a Motorpal nechali vystavět novou výrobní halu v Humpolecké ulici, kde se následně vyráběla jednoválcová čerpadla PFM. V roce 1996 Bosch Diesel s. r. o., odkoupil podíl Motorpalu, a stal se tak jediným vlastníkem společnosti. V dalším období došlo ke strmému rozvoji firmy, která byla nucena z důvodu nedostatku výrobní plochy otevřít v Jihlavě další dva výrobní závody, na Dolině a na Pávově. Výrobní závod Pávov se navíc může pyšnit jednou z největších výrobních hal koncernu Bosch na světě. Firma Bosch Diesel s. r. o., je s 5 000 zaměstnanci pravidelně největším zaměstnavatelem v Kraji Vysočina a významným zaměstnavatelem v České republice [1, 2].

Výroba v jihlavském Bosch Diesel s. r. o., je uskutečňována ve třech výrobních závodech:

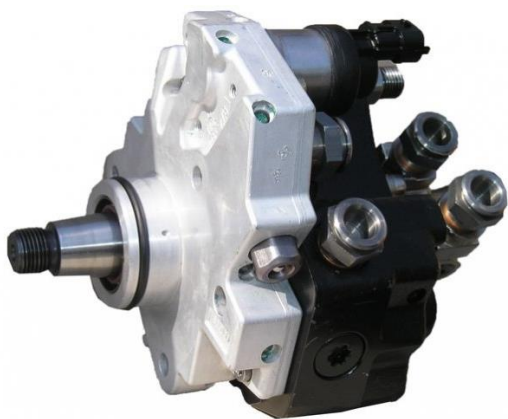
- Výrobní závod I - Humpolecká
- Výrobní závod II – Dolina
- Výrobní závod III - Pávov

1.3 Portfolio výrobků Bosch Diesel s. r. o.

Výrobní program firmy tvoří komponenty pro palivový vstřikovací systém Common Rail, který je dodáván do motoráren po celém světě.

Přehled produktů vyráběných v Jihlavě:

- Vysokotlaké čerpadlo CP3 (viz obr. 1.1)
- Vysokotlaké čerpadlo CP4 (viz obr. 1.2)
- Vysokotlaké čerpadlo CPN5 (viz obr. 1.3)
- Tlakový zásobník paliva rail (viz obr. 1.4)
- Vysokotlaký regulační ventil DRV (viz obr. 1.5)



Obr. 1.1 Vysokotlaké čerpadlo CP3 [2].



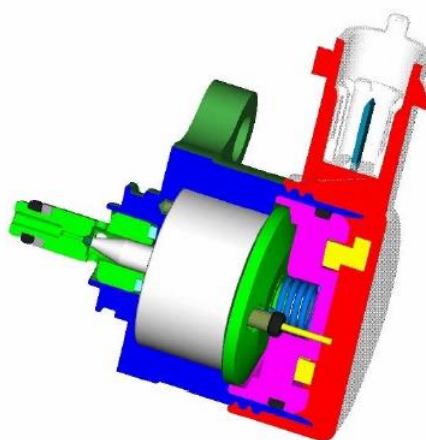
Obr. 1.2 Vysokotlaké čerpadlo CP4 [2].



Obr. 1.3 Vysokotlaké čerpadlo CPN5 [2].



Obr. 1.4 Tlakový zásobník paliva rail [2].



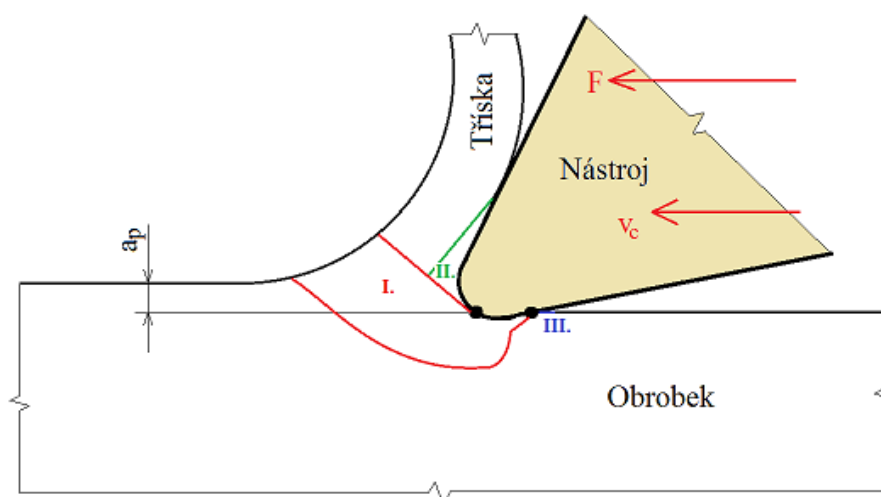
Obr. 1.5 Vysokotlaký regulační ventil DRV [2].

2 TEORETICKÝ ROZBOR ŘEŠENÝCH PROBLÉMŮ

Následující kapitola je věnována teoretickému rozboru obrábění, a to výhradně statím obrábění, které úzce souvisí s touto prací.

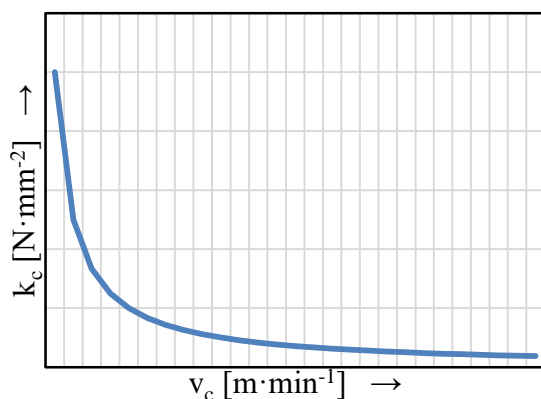
2.1 Mechanika řezného procesu

Obrábění se provádí v soustavě stroj, nástroj, obrobek a rozumí se jím oddělování materiálu obrobku ve formě třísky, přičemž výstupem obrábění jsou parametry obrobené plochy. Řezný nástroj je do materiálu obrobku tlačena silou F , před a pod jeho břitem se koncentruje napětí, které má za následek elastické a plastické deformace obráběného materiálu. Smykové napětí v této oblasti se stále zvětšuje, až je dosaženo plastické deformace, která se projeví skluzem jednotlivých vrstev materiálu v kluzných rovinách. S dalším pohybem nástroje roste plastická deformace a ve směru kolmém ke kluzným rovinám v oblasti před břitem dochází k posunu a pětování vrstev materiálu. Následně dojde k vyčerpání plastické deformace materiálu v daném mikroobjemu a při následném pohybu nástroje nastane odštížení třísky vlivem překročení stříhové meze pevnosti obráběného materiálu [3, 4].

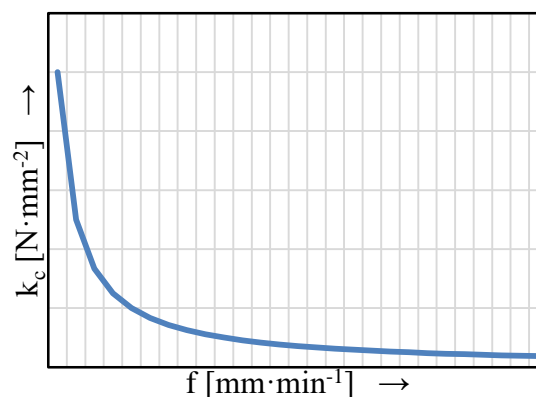


Obr. 2.1 Oblasti primární, sekundární a terciální deformace [3, 4, 5].

K elastickým a plastickým deformacím dochází ve třech oblastech, které jsou znázorněny na obr. 2.1. Největší je oblast primární plastické deformace, která je označována římským číslem I. Její velikost, tvar i stav napjatosti je značně závislý na fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu, a to hlavně na jeho deformační schopnosti a náchylnosti ke zpevnování. Dalším důležitým faktorem je velikost řezné rychlosti, přičemž platí, že se zvyšující se řeznou rychlostí v_c dochází k zužování oblasti I a k jejímu natáčení k břitu. Je tomu tak v důsledku vyšších rychlostí deformací, které způsobují pokles mechanických vlastností materiálu, měrného řezného odporu k_c a řezné síly F_c . Již zmíněný pokles měrného řezného odporu k_c v závislosti na zvyšující se řezné rychlosti v_c znázorňuje obr. 2.2. Podobný vliv jako řezná rychlost má na velikost měrného řezného odporu také posuv f , kdy s jeho zvyšující se hodnotou měrný řezný odpor klesá, protože se plocha odřezávané vrstvy zvětšuje. Závislost měrného řezného odporu na velikosti posuvu zobrazuje obr. 2.3. Určitou roli zde hrají i nástrojové úhly γ a δ . Plastická deformace v této oblasti způsobuje oddělení třísky od obrobku, mění texturu materiálu v tříске a má největší podíl na mechanickém a tepelném zatížení nástroje [3, 4, 5].



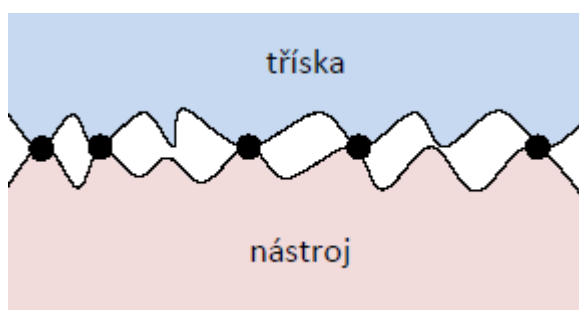
Obr. 2.2 Závislost měrného řezného odporu na řezné rychlosti [5].



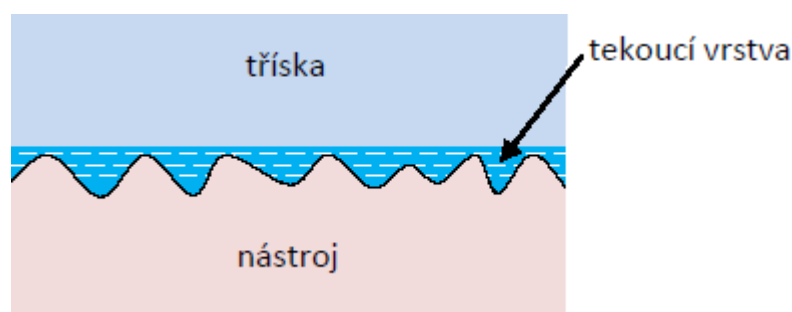
Obr. 2.3 Závislost měrného řezného odporu na posuvu [5].

Další oblastí, kde dochází k elastickým a plastickým deformacím, je oblast sekundární plastické deformace, která je na obr. 2.1 označena II. Tato oblast se nachází ve styčné ploše čela nástroje s třískou. Styk třísky s čelem nástroje má dvojnásobný charakter. První možnou variantou styku třísky s čelem nástroje je bodový styk, který nastává při menším mechanickém a tepelném zatížení obrobku při menších řezných rychlostech, přičemž dochází ke styku mikrone rovností ploch třísky a nástroje (viz obr. 2.4). Bodový styk umožňuje vnik řezné kapaliny mezi třísku a řezný nástroj. V oblasti styku při vysokém měrném tlaku dochází mikrone rovností k adhezi neboli přilnutí, kdy vlivem pohybu třísky vzhledem k řeznému nástroji dochází k přerušení adhezních spojení. Přerušením adhezních spojení nastává buď přilnutí nástrojového materiálu na třísku, což s postupujícím časem vyplyne jako opotřebení čela nástroje, nebo dojde k ulpívání materiálu třísky na řezném nástroji, jejímž důsledkem je tvorba nárustku. Druhým typem styku je plošný styk (viz obr. 2.5), který vzniká při vyšších řezných rychlostech z toho důvodu, že v místě řezu vzniká větší množství tepla. V důsledku toho vzniká na spodní straně třísky tekoucí vrstva, ve které se mění velikost rychlosti materiálu od nuly až po velikost rychlosti odcházející třísky [3, 5].

Jak již tedy bylo zmíněno výše, tak v této oblasti dochází k opotřebení nástroje na jeho čele. Dále vlivem plastické deformace oblasti II. dochází k mechanickému a tepelnému zatížení řezného nástroje [3, 5].



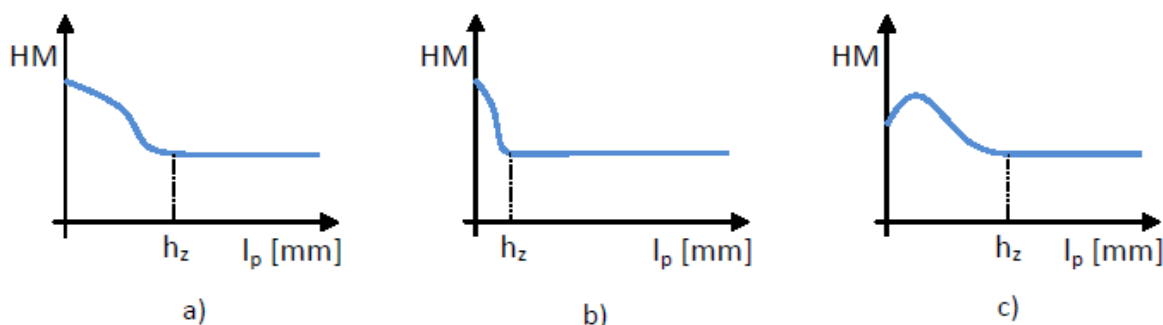
Obr. 2.4 Bodový styk řezného nástroje a třísky [5].



Obr. 2.5 Plošný styk nástroje a třísky [5].

Nejmenší oblastí je oblast terciální plastické deformace, která se nachází v povrchové vrstvě obrobene plochy a je označena číslem III. (viz obr. 2.1) Dochází zde k elastické a plastické deformaci materiálu obrobku, přičemž se mění mechanické vlastnosti povrchové vrstvy, zejména pak mikrotvrdość povrchové vrstvy a hloubka zpevnění povrchové vrstvy [3, 5].

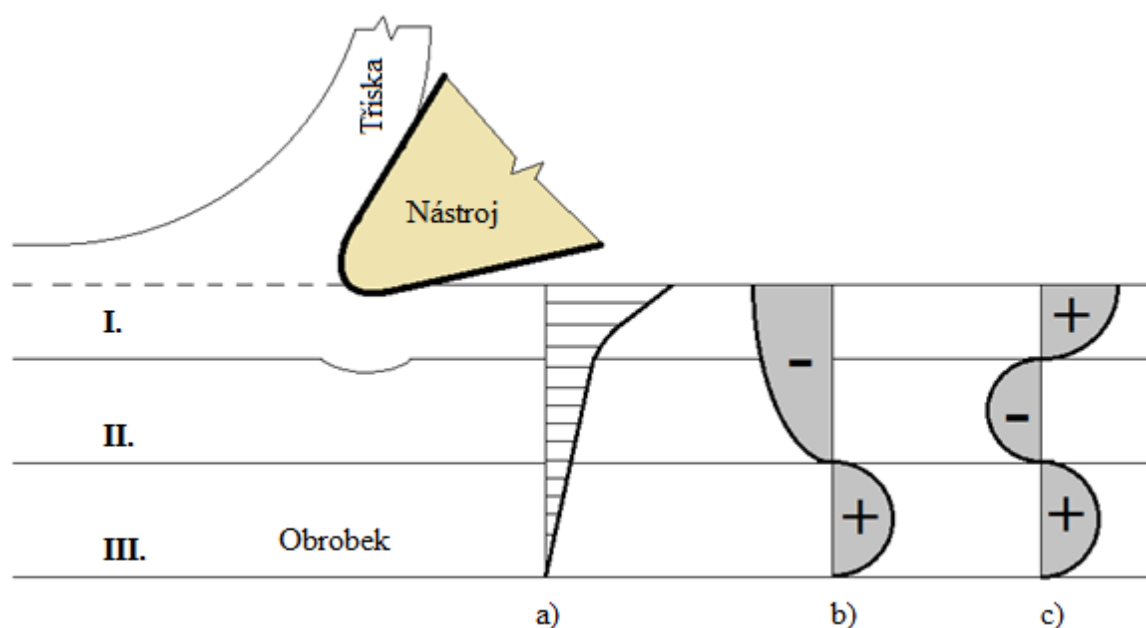
Průběhy změny mikrotvrdości v závislosti na vzdálenosti od obráběného povrchu znázorňuje obr. 2.6, který ukazuje tři různé způsoby průběhu. Hodnota mikrotvrdości značená HM vždy klesá směrem od obráběné plochy do hloubky materiálu značené l_p . V případě, že je přechod plynulý a pozvolný (viz obr. 2.6a), tak je zpevněná vrstva obrobku dobře spojena s nezpevněným materiálem obrobku, což je výhodné z hlediska větší životnosti a lepších vlastností povrchu obrobku. Pokud je přechod mikrotvrdości mezi povrchem a nezpevněnou vrstvou prudký (viz obr. 2.6b), tak hrozí odlupování této zpevněné vrstvy v průběhu provozu součásti z toho důvodu, že povrchová vrstva dobře nepřilnula k nezpevněnému materiálu. Poslední případ průběhu mikrotvrdości v závislosti na vzdálenosti od obráběného povrchu je znázorněn na obr. 2.6c. Zde nejprve s hloubkou mikrotvrdość roste a poté následně klesá až na hodnotu mikrotvrdości nezpevněné vrstvy. To nastane v případě, že byla překročena pevnost materiálu a tyto plochy jsou charakteristické výskytem drobných trhlinek, které snižují životnost povrchu na minimum [5].



Obr. 2.6 Průběh mikrotvrdości obráběné součásti [5].

Při obrábění vlivem namáhání povrchové vrstvy dochází v povrchové vrstvě k deformaci, která zde vyvolá dočasná nebo trvalá napětí. Dočasná napětí jsou reakcí na působení řezného nástroje a po odlehčení zanikají, lze tedy hovořit o elastické deformaci. Trvalá napětí se v obrobku vyskytují po překročení meze kluzu materiálu, a to taktéž vlivem působení řezného nástroje. Trvalá napětí jsou potom nazývána zbytkovými pnutími.

Obecně lze tvrdit, že v obrodku při obrábění vznikají zbytková pnutí, a to jak vlivem mechanického, tak tepelného zatěžování (viz obr. 2.7) [5].



Obr. 2.7 Zbytkové pnutí v povrchové vrstvě vlivem působení řezného nástroje [5].

V případě, že na povrchovou vrstvu obrodku působí pouze mechanické zatížení (viz obr. 2.7b), tak se ve vrstvě I. nachází plastická deformace, ve vrstvě II. dochází k elastické deformaci a ve vrstvě III. žádná deformace není. Ve vrstvě I. dojde vlivem působení řezného nástroje k jejímu natahování a po následném odlehčení zde zůstává napětí. Ve vrstvě II. žádné napětí uloženo nezůstává, protože zde bylo působeno pouze elastickou deformací. Ve vrstvě I., tedy v povrchové vrstvě, je majoritní napětí v tlaku, které je výhodnější z hlediska menší intenzity šíření trhlinek, které jsou tlakovým napětím uzavírány, a z toho důvodu je tlakové napětí výhodnější i z hlediska únavové pevnosti [5].

V případě, že působí mechanické namáhání v kombinaci s tepelným namáháním, jako je tomu např. u obrábění nástroji s velkým nástrojovým úhlem řezu δ , tak se vrstva I. prodlouží jak vlivem tepla, tak i vlivem plastické deformace. Následně dojde k odlehčení namáhání, a tím i k ochlazení vrstvy. Z toho důvodu, že vrstva II. nebyla teplem výrazněji ovlivněna, tak u ní dojde k menšímu zkrácení, než je tomu u vrstvy I. Z předchozího vyplývá, že v povrchové vrstvě je převládající napětí v tahu, které má snahu otevírat trhlinky na obrobené ploše, čímž je nevýhodné z hlediska únavové pevnosti. Průběh tepelného namáhání napříč jednotlivými vrstvami je viditelný na obr. 2.7a a průběh zbytkového pnutí napříč jednotlivými vrstvami znázorňuje obr. 2.7c [5].

Z předchozího tedy vyplývá, že plastická deformace v oblasti III. způsobuje vznik zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobené plochy a také opotřebení nástroje na hlavním hřbetě nástroje [3, 5].

2.2 Způsoby opotřebení obráběcích nástrojů

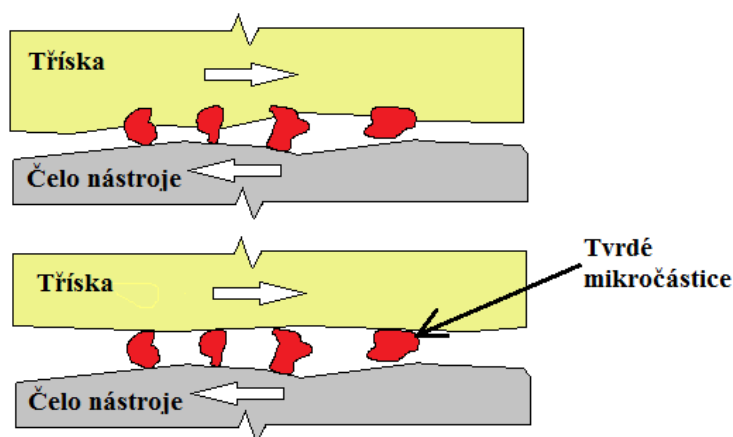
Následující podkapitoly jsou věnovány opotřebení řezných nástrojů z fyzikálního hlediska, dále jsou rozebrány jednotlivé formy opotřebení a kritéria opotřebení.

2.2.1 Opotřebení řezných nástrojů z fyzikálního hlediska

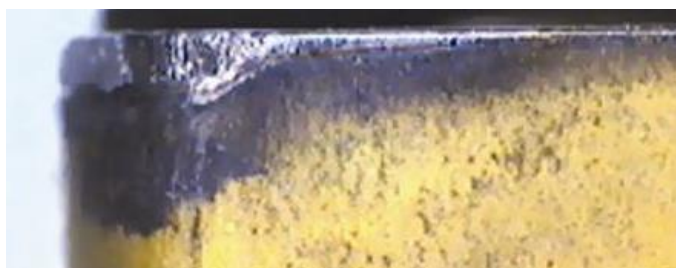
Opotřebení je naprosto běžný jev ve všech aplikacích, kde dochází ke vzájemnému kontaktu a relativnímu pohybu. Toto tvrzení platí samozřejmě při obrábění, kdy dochází k relativnímu pohybu nástroje a obrobku, čela nástroje a třísky i ke vzájemnému kontaktu nástroje s obrobkem, a to na hlavním a vedlejším hřbetě a na špičce nástroje. Z toho důvodu, že je při řezném procesu dosahováno řádově vyšších hodnot sledovaných parametrů, tak je zaznamenáván i odlišný charakter opotřebení. Například tlak v kontaktu dvou běžných strojních součástí dosahuje hodnot řádově 10^2 MPa, kdežto měrný tlak na břit nástroje dosahuje hodnot až 10^4 MPa. Podobně je tomu i v případě teploty, kdy se v běžných strojních aplikacích pohybuje teplota do $100\text{ }^\circ\text{C}$, kdežto na břitu nástroje dosahuje hodnot až $1\text{ }200\text{ }^\circ\text{C}$, přičemž je ořez realizován na kratší dráze [3].

Opotřebení řezných nástrojů závisí na více faktorech, mezi které patří mechanické a fyzikální vlastnosti nástrojového i obráběného materiálu, geometrie nástroje, řezné podmínky a v neposlední řadě také druh obráběcí operace. Opotřebení řezného nástroje je způsobeno působením mechanismů opotřebení. Mezi základní mechanismy opotřebení jsou zařazovány abraze a adheze, což jsou fyzikální mechanismy opotřebení, dále pak oxidace a difúze, což jsou chemické mechanismy opotřebení. Dalšími mechanismy opotřebení jsou pak plastická deformace a křehký lom [3, 6, 7].

Jedním z mechanismů opotřebení je abraze (viz obr. 2.8). Jedná se o brusný ořez nástroje vlivem působení tvrdých mikročástic obráběného materiálu a mikročástic uvolněných z povrchu řezného nástroje. Jedná se tedy o obrušování měkčích částic tvrdšími. Abraze se výrazněji vyskytuje při obrábění materiálu, které mají schopnost se zpevňovat. Podobně je tomu tak při obrábění materiálů s lamelární strukturou, která působí z hlediska abraze více než kupříkladu globulární struktura tvrdých složek. Opotřebení řezného nástroje abrazí znázorňuje obr. 2.9 [3, 5, 6, 7].

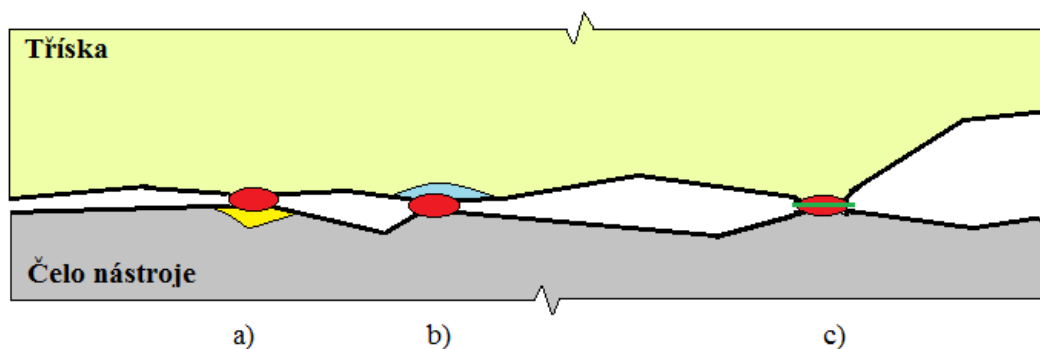


Obr. 2.8 Schéma abrazivního mechanismu opotřebení [3, 7].



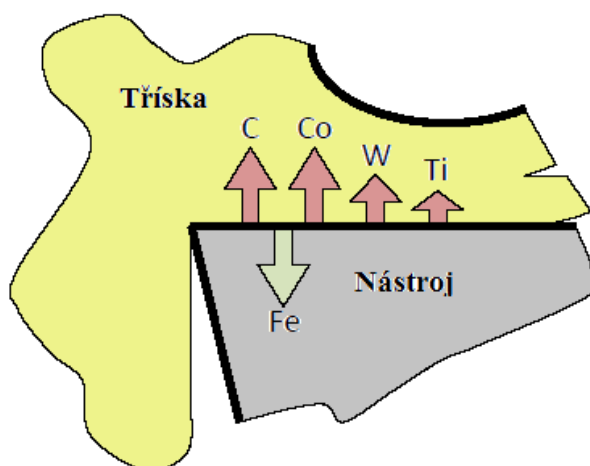
Obr. 2.9 Opotřebení nástroje abrazií [8].

Dalším mechanismem opotřebení je adheze neboli přilnutí. Adheze se vyznačuje vznikem a následným okamžitým porušováním mikrosvarových spojů, které jsou na obr. 2.10 označeny červeně. Tento mechanismus opotřebení vzniká v důsledku vysokých teplot a tlaků na nerovnostech čela řezného nástroje a třísky. Vznik mikrosvarových spojů je mimo jiné závislý na chemické příbuznosti materiálu řezného nástroje a materiálu obrobku. Při vzájemném pohybu nástroje a třísky dojde dle obr. 2.10a k vytržení mikročástice z čela nástroje a tato mikročástice následně odchází spolu s třískou. Druhým případem je podle obr. 2.10b vytržení mikročástice z obráběného materiálu a její přilnutí k čelu nástroje. Poslední případ je znázorněn na obr. 2.10c. Tento obrázek značí porušení mikrosvaru [3, 5].



Obr. 2.10 Schéma adhezního mechanismu opotřebení [3].

První chemický mechanismus opotřebení je oxidace, při níž dochází ke vzniku chemických sloučenin na povrchu řezného nástroje, a to v důsledku reakce nástroje s okolním kyslíkem. Další chemický mechanismus opotřebení je difúze. Při ní dochází k přemísťování atomů z nástrojového materiálu do obráběného materiálu a naopak, přičemž se tvoří nevýhodné chemické sloučeniny, které mají negativní vliv na strukturní vlastnosti nástroje. Obecně lze tvrdit, že spouštěčem difúze je teplota, která musí dosáhnout hodnoty alespoň 680 °C. Při této teplotě začínají difundovat železo a kobalt. Při teplotách vyšších než 950 °C začínají difundovat další prvky, jako například wolfram. Schéma difúze znázorňuje obr. 2.11 [3, 5].



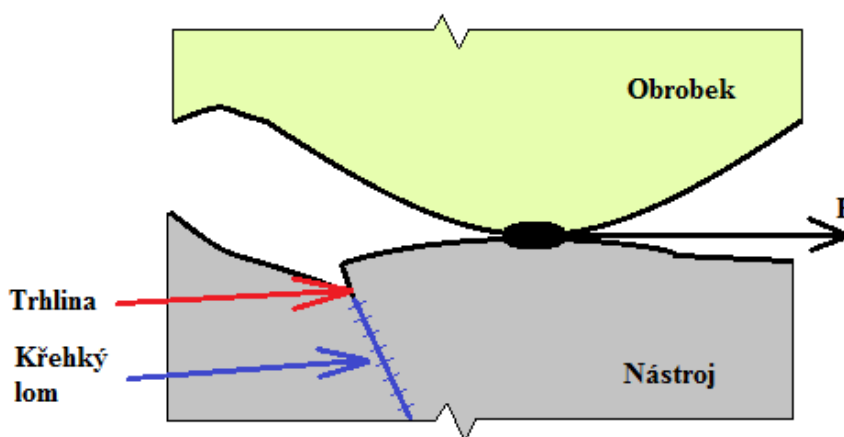
Obr. 2.11 Schéma difúze pro SK [5].

Dalším mechanismem opotřebení je plastická deformace břitu, která vzniká jako důsledek tepelného a mechanického zatížení, které se v břitu za určitý čas nakumuluje. Při překročení limitní teploty řezání nastává prudký pokles tvrdosti nástrojového materiálu, přičemž dojde k zplastizování vrstvy nástroje. Ta je následně odnášena společně s třískou. Vznik a odchod zplastizované vrstvy se nazývá lavinové opotřebení, při kterém dochází u nástroje ke ztrátě jeho řezivosti. Řezný nástroj, který je poškozen plastickou deformací, je znázorněn na obr. 2.12 [3, 5, 8].

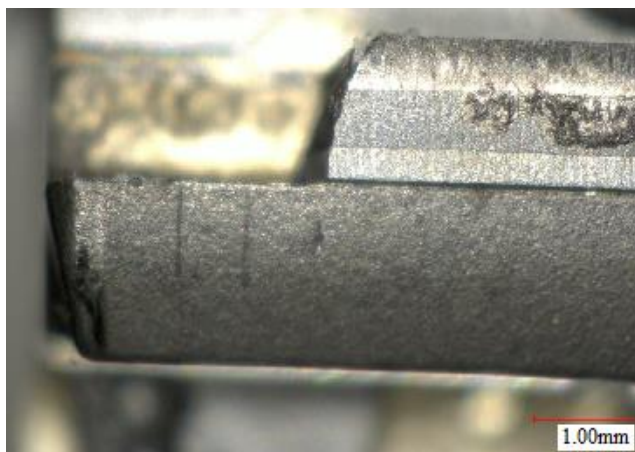


Obr. 2.12 Plastická deformace břitu [8].

Mezi mechanismy opotřebení řezných nástrojů je zařazován také křehký lom (viz obr. 2.13), který je charakteristický vznikem trhlin v povrchových vrstvách a následným vyložením části břitu. Trhliny, které vedou k následnému křehkému lomu řezného nástroje, často vznikají již při ostření řezného nástroje, a to při chybně zvolených řezných podmínkách. Ještě častější je vznik trhlin během procesu řezání. Vznik těchto trhlin je odvislý od proměnlivosti velikosti řezné síly, přítomnosti rázů přerušovaného řezu anebo od zvětšení průřezu třísky. U řezných nástrojů poškozených křehkým lomem je registrovatelné zmenšení či úplná ztráta řezivosti, zvýšení velikosti řezných sil a zkrácení trvanlivosti. PKNB destičku poškozenou křehkým lomem znázorňuje obr. 2.14 [3, 5, 8].

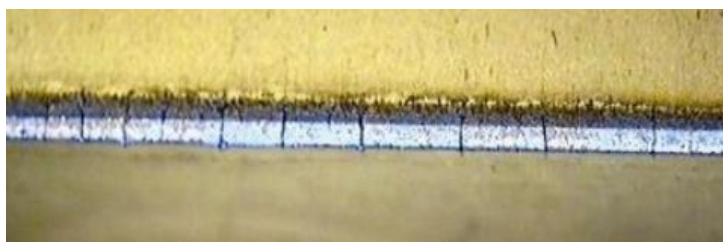


Obr. 2.13 Schéma křehkého lomu [5].



Obr. 2.14 Křehký lom PKNB destičky.

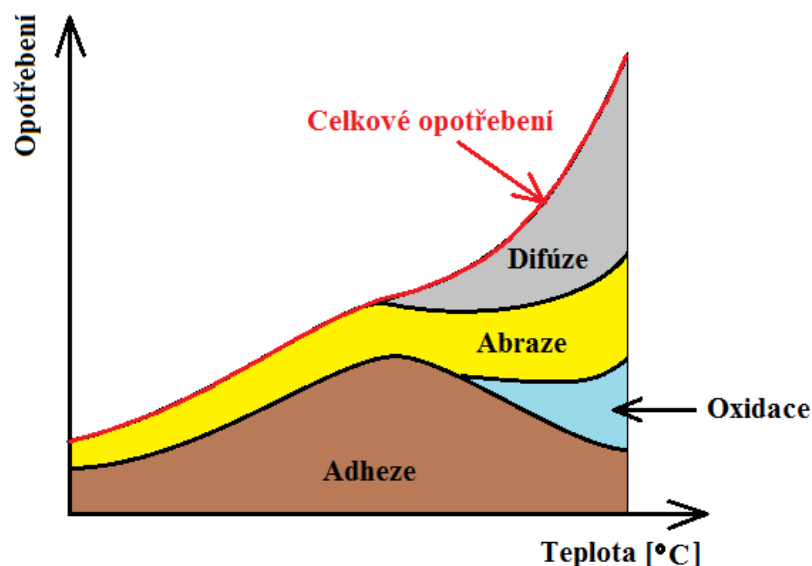
Mimo základních mechanismů opotřebení uvedených výše existují ještě další, jako jsou například mechanická únava, tepelná únava, která se projeví vznikem hřebenovitých trhlinek na čele i hřbetě nástroje (viz obr. 2.15), které jsou vždy kolmé na ostří. Dalším, méně se vyskytujícím mechanismem opotřebení, je delaminační opotřebení, které se projevuje odlupováním tenkých vrstev materiálu z povrchu řezného nástroje [5, 8].



Obr. 2.15 Hřebenovité trhliny na hřbetě řezného nástroje [8].

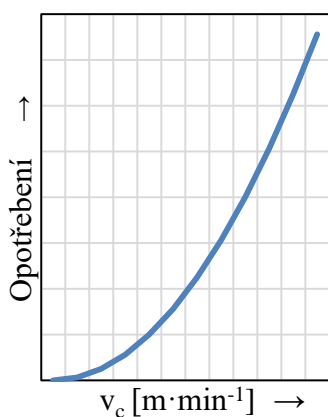
Jak již bylo uvedeno výše, tak míra opotřebení řezného nástroje značně závisí na teplotě, na šířce záběru ostří a na řezné a posuvové rychlosti. Z obr. 2.16 je zřejmé, že se adheze projevuje spíše při nižších teplotách a při nižších řezných rychlostech, tedy v podmínkách, kdy vzniká bodový styk mezi třískou a čelem nástroje. Abraze se vyskytuje při celé škále teplot, pouze kolísá její velikost. Naopak oxidace a difúze nastávají až při větších teplotách a jejich velikost se zvětšuje spolu se stoupající teplotou. Rozhodující vliv na vznik difúzního opotřebení mají tedy, jak již bylo uvedeno výše, teplota řezání, pak chemické

vlastnosti nástrojového materiálu, a to zvláště jeho afinita vůči materiálu obrobku. Zjednodušeně lze tedy tvrdit, že opotřebení nástroje se zvětšuje se zvětšující se teplotou [3, 4, 5].

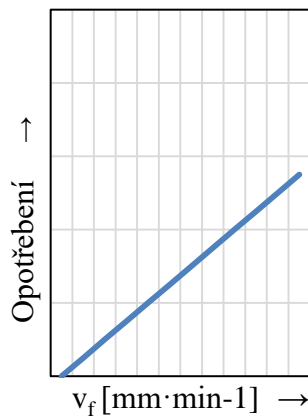


Obr. 2.16 Závislost opotřebení řezného nástroje na teplotě [3].

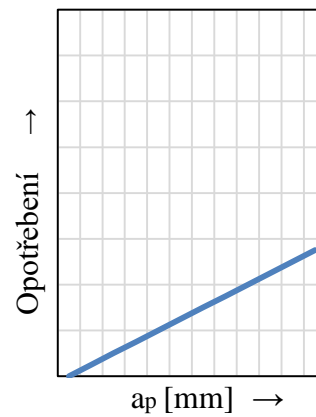
Se zvyšováním řezné rychlosti roste také míra opotřebení (viz obr. 2.17). Obecně lze tvrdit, že řezná rychlost v_c má na míru opotřebení největší vliv. Určitý vliv na míru opotřebení má také posuvová rychlost v_f , kde je registrována lineární závislost (viz obr. 2.18). Obr. 2.19 znázorňuje závislost míry opotřebení na šířce záběru ostří a_p , která je taktéž lineární [8].



Obr. 2.17 Závislost opotřebení na v_c [3, 8].



Obr. 2.18 Závislost opotřebení na v_f [3, 8].

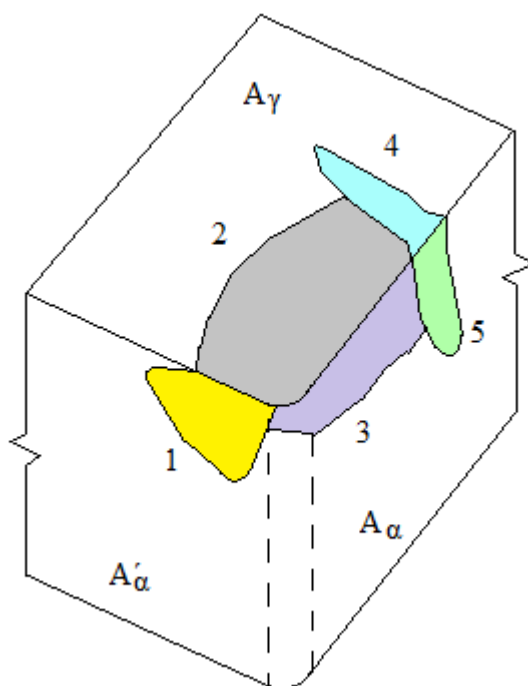


Obr. 2.19 Závislost opotřebení na a_p [3, 8].

2.2.2 Formy a kritéria opotřebení

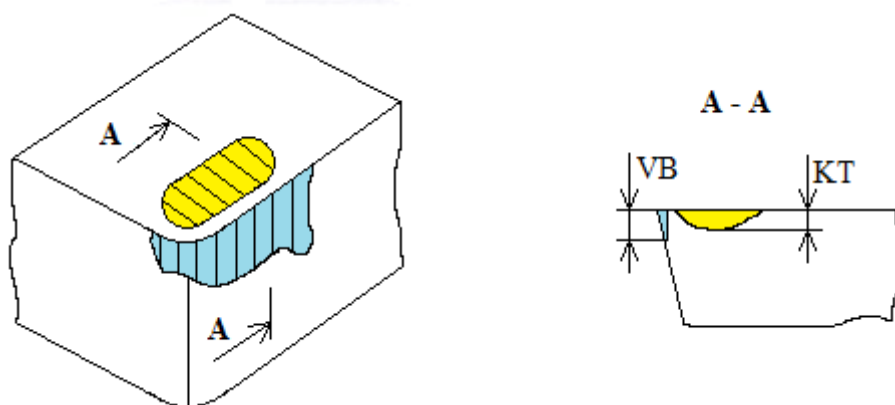
Opotřebení je dále rozlišováno podle jeho umístění. Všechny běžné typy opotřebení jsou znázorněny na obr. 2.20. Zde je číslem 1 označeno opotřebení, které se nazývá oxidační hřbetní rýha nebo někdy také sekundární hřbetní rýha. Číslem 2 je pak označen výmol na čele, který je jednou z častějších forem opotřebení. Opotřebení fasetky na hřbetě

je značeno fialovou barvou a číslem 3. Číslem 4 je na obr. 2.20 označena rýha na čele. Poslední typickou formou opotřebení je primární hřbetní rýha, značena číslem 5 [8].



Obr. 2.20 Formy opotřebení řezného nástroje [3, 7].

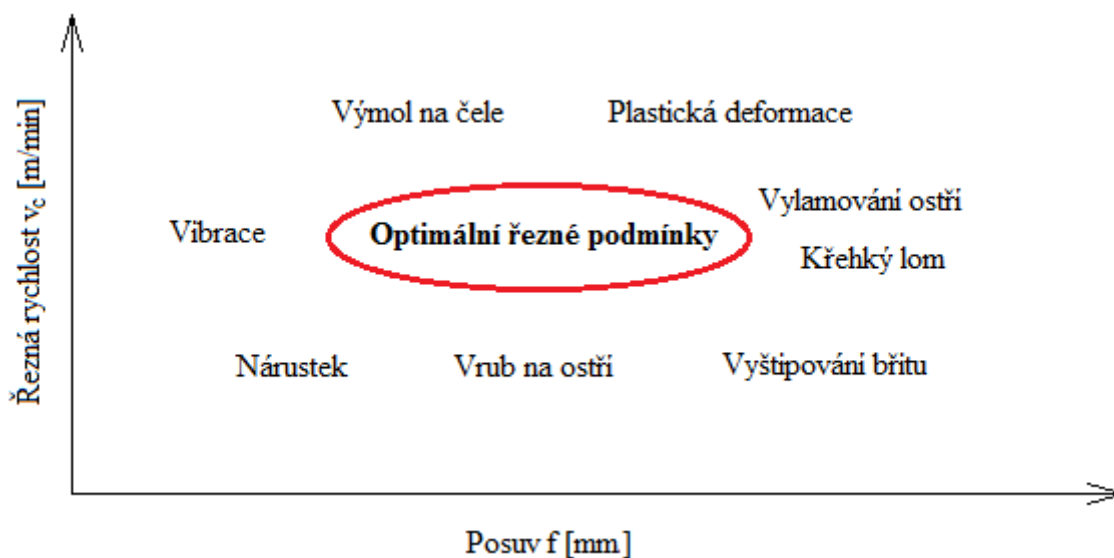
Při posuzování opotřebení řezného nástroje je nutné určit rozhodující kritérium. Základní kritéria opotřebení jsou znázorněny na obr. 2.21. Nejčastěji užívaným kritériem je VB, což je šířka opotřebení na hřbetě, dále pak hloubka výmolu na čele KT. Z hlediska dokončovacích operací je významné kritérium opotřebení KVy [3, 6, 7].



Obr. 2.21 Kritéria opotřebení [3, 7].

Z výše zmíněných teoretických poznatků vyplývá, že aby bylo opotřebení pozvolné, pravidelné, a tudíž kontrolovatelné, tak je zapotřebí najít optimální řezné podmínky pro danou aplikaci. Optimálními řeznými podmínkami je myšlena řezná rychlost v_c posuv f . Při zvýšení řezné rychlosti nad její optimální hodnotu dochází k plastické deformaci břitu nebo k výmolu na čele. Naopak při nižší řezné rychlosti oproti optimální hodnotě nastává tvorba nárůstku, vytváří se vrub na ostří nebo se vyštipuje břit. Když se hodnota posuvu f pohybuje pod optimální hodnotou posuvu, tak dojde buď k vibracím nástroje,

nebo k tvorbě nárůstku. Naopak v případě, že je optimální hodnota posuvu překročena, tak nastává křehký lom nebo dochází k vylamování ostří. Předchozí je schematicky zobrazeno na obr. 2.22 [8].



Obr. 2.22 Určení optimálních řezných podmínek [8].

2.3 Vystružování

Vystružování je jednou ze základních výrobních metod, při které dochází ke zkvalitnění předem zhotovených děr. Řezný nástroj se nazývá výstružník a vykonává obvykle hlavní pohyb, který je rotační. Vedlejší posuvový pohyb vykonává taktéž výstružník. Jestliže je vystružování vykonáváno na soustruhu, což je méně obvyklá varianta, tak hlavní pohyb vykonává obrobek. Osa výstružníku je zpravidla kolmá na plochu, kterou vstupuje do obráběného materiálu. Mezi sledované parametry patří jmenovitý průměr díry, kruhovitost, válcovitost a v neposlední řadě také drsnost povrchu [9].

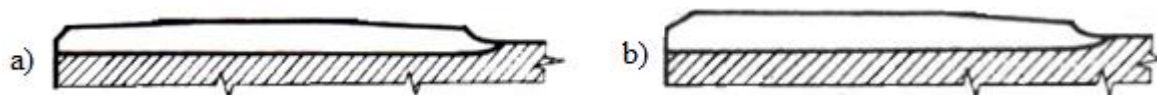
Vystružování je tedy dokončovací operace pro výrobu děr s vysokou přesností parametrů uvedených výše. Důležité je pro vystružování určit správnou hodnotu přídavku. V praxi se tato hodnota určí podle vztahu 2.1. V případě, že je přídavek na vystružování příliš malý, tak nedochází k odřezávání materiálu, ale k jeho vyhrnování, čímž vzniká nekruhová díra s drsností neodpovídající kritériím. Další nevýhodou malé hodnoty přídavku na vystružování je nutnost ostře nabroušeného výstružníku s hodnotou poloměru zaoblení ostří nižší než 10 μm a z toho plynoucí potřeba lapování břitu [9].

$$p = 0,1 + 0,005 * D \quad [mm] \quad (2.1)$$

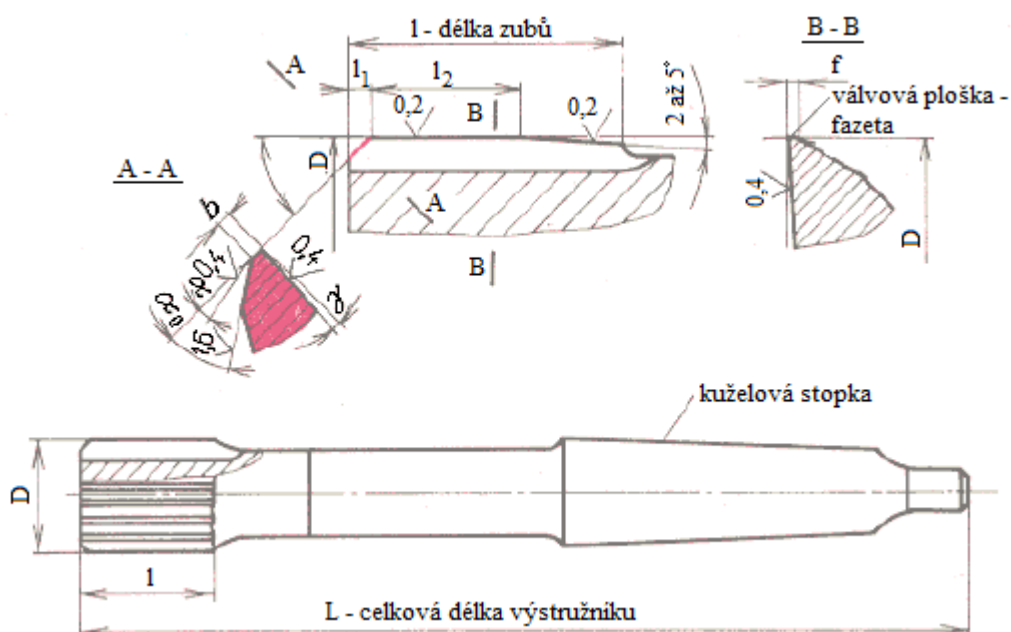
kde: D [mm] - je jmenovitý průměr díry.

Podle jmenovitého vystružovaného průměru mají výstružníky od 4 do 18 zubů, které jsou buď přímé, nebo stočené do šroubovice s úhlem stoupání 5° až 20°. Z obr. 2.24 je zřejmé, že se pracovní část výstružníku skládá z válcové části a řezného kužele. Podle způsobu upínání jsou výstružníky rozdělovány na stopkové a nástrčné. Pohon výstružníku je

bud' uskutečňován ručně, nebo strojně. Ručně poháněný výstružník se liší od strojně poháněného výstružníku delším náběhem na požadovaný vystružovaný průměr (viz obr. 2.23). Obecné parametry strojního výstružníku jsou uvedeny v tab. 2.1. [9, 10].



Obr. 2.23 Tvar zubu a) ručního výstružníku a b) strojního výstružníku [9, 10].



Obr. 2.24 Popis strojního výstružníku [9, 10].

Tab. 2.1 Obecné parametry strojního výstružníku [10].

Parametr	Hodnota
b [mm]	0,2 až 0,4
α_0 [°]	8 až 25
f [mm]	0,2 až 0,4
l_1 [mm]	0,5 až 3
l_2 [mm]	$(2/3 \text{ až } 3/4) \cdot l$

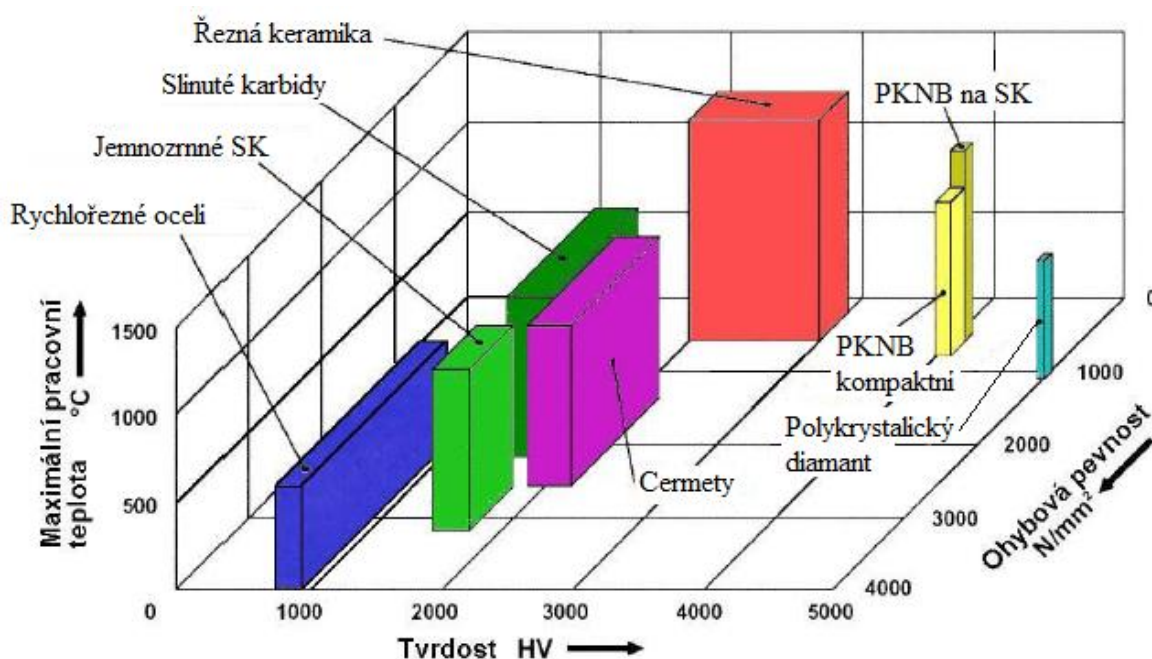
Speciálním typem nástrojů pro vystružování jsou rozpínací výstružníky (viz obr. 2.25), které se vyznačují podélnými vyříznutími mezi jednotlivými zuby a dutým tělesem s kuželovou dírou, do které je vtlačován kužel. Vtlačováním kužele dochází ke zvětšování průměru vystružované díry. Rozpínací výstružníky nacházejí uplatnění hlavně při opravách strojních dílců. Podobným typem nástrojů na vystružování jsou stavitelné výstružníky, které jsou charakteristické posuvnými zuby po kuželové ploše, čímž dochází ke zvětšení, nebo naopak zmenšení průměru vystružované díry. Toho se s výhodou využívá při opravách a renovaci strojních dílců. Jednobřité výstružníky, které jsou schopny zhotovovat velmi přesné díry, se vyznačují jedním břitem a třemi vodítky, které jsou rovněž z nástrojového materiálu. Pokud je nutné velmi produktivně zhotovovat vystružované díry, jsou použity loupací výstružníky [9].



Obr. 2.25 Rozpínací výstružník [9].

3 POLYKRISTALICKÝ KUBICKÝ NITRID BORU

Ve strojírenské praxi je známa velká škála nástrojových materiálů pro různé aplikace v závislosti na použitém typu obráběcího, obráběného materiálu a dalších vlivů. Seřazeno vzestupně podle tvrdosti nástrojového materiálu a zároveň sestupně podle jeho houževnatosti se jedná o rychlořezné oceli bez povlaku i s povlakem, slinuté karbidy bez povlaku i s povlakem, dále pak cermety, řezné keramiky, polykrystalický kubický nitrid boru a polykrystalický diamant, který má sice velmi vysokou tvrdost, ale je nevhodný pro obrábění oceli, a to z toho důvodu, že diamant je vlastně uhlík v kubické modifikaci a uhlík má vysokou afinitu k železu. Protože tato práce je věnována vystružování díry tepelně zpracovaného obrobku, jehož povrchová tvrdost je 62 ± 2 HRC, tak z předchozího vyplývá, že je vhodné použít polykrystalický kubický nitrid boru jako nástrojový materiál. Přehledný trojrozměrný graf (viz obr. 3.1) znázorňuje nástrojové materiály v závislosti na jejich ohybové pevnosti, tvrdosti a maximální pracovní teplotě [3].



Obr. 3.1 Přehled vybraných nástrojových materiálů a jejich vlastností [3].

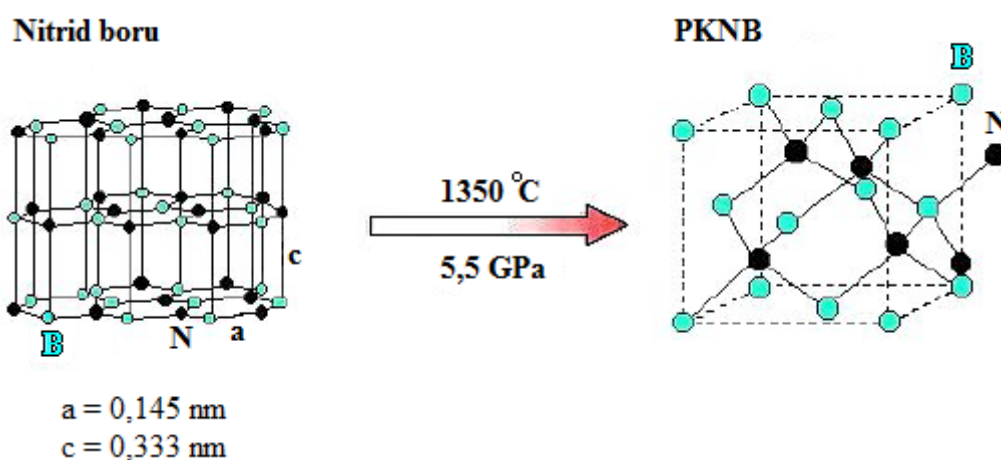
3.1 Charakteristika a historie

Polykrystalický kubický nitrid boru zkráceně PKNB nebo CBN je syntetický nástrojový materiál, jehož využití je především v obrábění velmi tvrdých materiálů, jako jsou například vysokolegované oceli, tepelně zpracované oceli a slitiny se zvýšenými fyzikálně-mechanickými vlastnostmi, které nelze snadno obrobit brusnými nástroji [3, 12].

Za počátek kubického nitridu boru se bere rok 1957, kdy R. H. Wentorf provedl transformaci hexagonální mřížky nitridu boru v kubickou mřížku. První komerční využití KNB nastalo v roce 1966, kdy se jeho krystal používal jako materiál pro výrobu brusných kotoučů. Za dalších pět let bylo zjištěno, že KNB je nejvhodnější používat na obrábění kalených ocelí a tvrzených litin. V roce 1986 došlo k největšímu rozmachu kubického nitridu boru, kdy vznikly jeho nové druhy, v nichž se objevila keramika jako pojivo [12].

3.2 Nitrid boru

Nitrid boru je surovinou pro výrobu PKNB. Tato chemická sloučenina se skládá z 56,4 % dusíku a z 43,6 % boru a má hexagonální mřížku. Šestiúhelníky v soustavě nitridu boru jsou sestavené tím způsobem, že se atomy dusíku a boru střídají ve vertikální ose podle obr. 3.2, přičemž vždy je atom dusíku vázaný se třemi atomy boru. Vzdálenost sousedních atomů v nitridu boru jsou $a = 0,145 \text{ nm}$ a $c = 0,333 \text{ nm}$ (viz obr. 3.2), což jsou hodnoty velmi podobné grafitu, který také krystalizuje v hexagonální mřížce. V mřížce nitridu boru se nachází plochy lehkého skluzu se slabou vazbou ve směru hrany hexagonální soustavy, což naznačuje, že plochy po sobě snáze kloužou. Tuto vlastnost má nitrid boru společnou s grafitem stejně tak jako řadu dalších fyzikálních a strukturních vlastností. Proto je nitrid boru často nazýván pro svoje zbarvení jako bílý grafit [3, 11, 12].



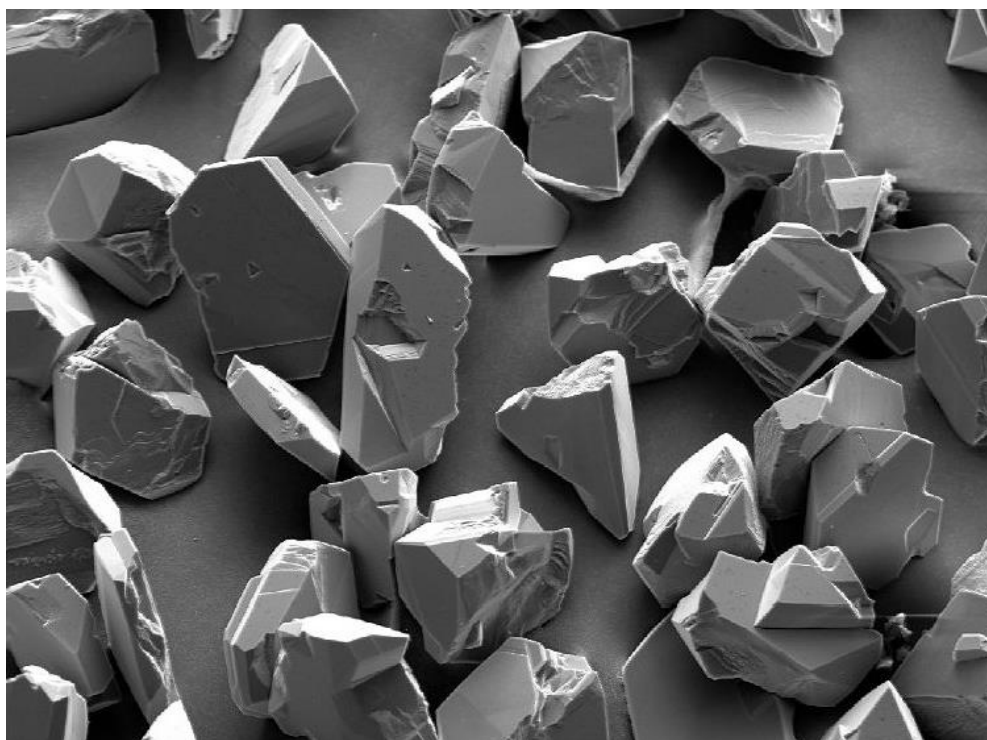
Obr. 3.2 Mřížka nitridu boru a PKNB [12].

Z podobnosti hexagonálních krystalických mřížek nitridu boru a grafitu a dalších podobných vlastností lze usuzovat, že nitrid boru může existovat také v kubické modifikaci s výrazně lepšími vlastnostmi. To se týká fyzikálních a mechanických vlastností a z toho plynoucích rezných vlastností. Podobně je tomu i v případě grafitu, který po modifikaci v kubickou mřížku nazýváme polykrystalický diamant [3, 11, 12].

3.3 Výroba PKNB

Výroba PKNB probíhá syntézou nitridu boru ve speciálních zařízeních při teplotě 1350 °C a tlaku $5,5 \text{ GPa}$, přičemž vzniká modifikovaná kubická mřížka, která disponuje podobnými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi a téměř stejnými krystalickými mřížkami jako má diamant. Výrobou PKNB se tak potvrdila idea, že nitrid boru stejně jako uhlík existuje ve stavu měkkém s hexagonální krystalickou mřížkou a ve stavu tvrdém s kubickou krystalografickou mřížkou [3, 11, 12].

Výroba velkých celistvých zrn byla vyhodnocena jako ekonomicky náročná, proto se přistoupilo k výrobě menších krystalů (viz obr. 3.3) a jejich následnému spékání za pomoci práškové metalurgie [12].



Obr. 3.3 Krystaly polykrystalického kubického nitridu boru [12].

PKNB vykazuje vynikající hodnoty tvrdosti. Dokonce bylo zjištěno, že jeho práškem lze brousit přírodní diamant. V současné době se výroba krystalů PKNB posunula ještě o kus dále, a tak je bez větších problémů možné zajistit výrobu obráběcích nástrojů používaných na obrábění velmi tvrdých obrobků. Obrábění nástroji z PKNB může v mnoha případech nahradit broušení, z důvodu zvýšení efektivity[3, 11, 12].

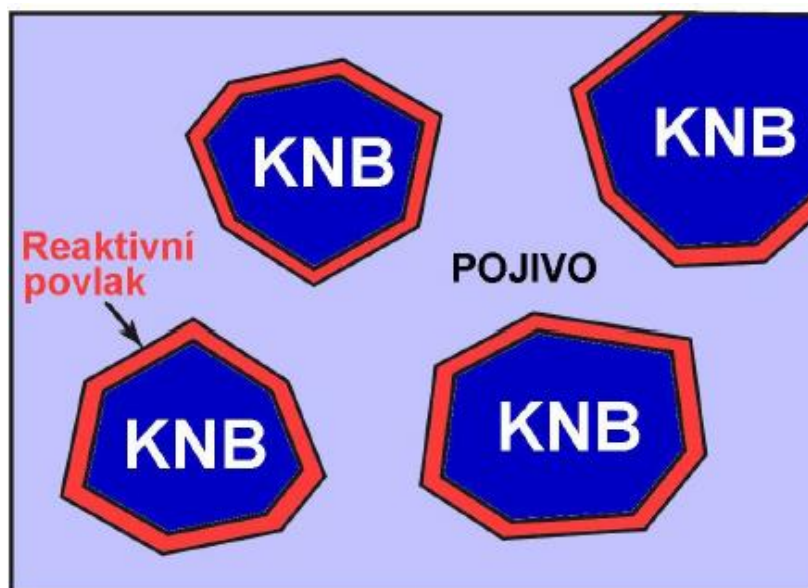
3.4 Fyzikální a mechanické vlastnosti

Polykrystalický kubický nitrid boru se vyznačuje několika vlastnostmi, které jsou vhodné pro obrábění všech druhů materiálů. Jednou z těch důležitějších je teplotní odolnost PKNB, která se pohybuje mezi 1500 °C až 1600 °C, což jsou teploty přibližně stejné jako teplota tavení čistého železa. Při zatížení PKNB vyšší teplotou, než je uvedena výše, dojde za přítomnosti kyslíku k rozložení kubického nitridu boru na oxid dusíku a bor. Další důležitou vlastností je chemická stálost PKNB, který se nerozpouští v běžných rozpouštědlech ani za zvýšené teploty. Další nezbytnou vlastností nástrojového materiálu je jeho tvrdost, která u polykrystalického kubického nitridu boru dosahuje hodnoty až 3500 HV. Další výhodnou vlastností PKNB je jeho chemická inertnost k běžným konstrukčním kovům, což potvrzuje vhodnost použití PKNB na obrábění většiny druhů materiálů. Výše zmíněné vlastnosti vynikají při obrábění velmi tvrdých materiálů s tvrdostí mezi 450 HV a 830 HV. V tabulce 3.1 jsou shrnuty některé fyzikální a mechanické vlastnosti PKNB [3, 11, 12].

Tab. 3.1 Fyzikální a mechanické vlastnosti PKNB [12].

Typ mřížky	Kubická
Délka strany mřížky [nm]	0,3616
Pevnost v tlaku [GPa]	2,7 – 3,5
Pevnost v ohybu [MPa]	500 – 800
Modul pružnosti v tahu [GPa]	587 – 800
Modul pružnosti ve smyku [GPa]	280
Lomová houževnatost K_{IC} [$\text{Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$]	3,5 – 6,7
Poissonova konstanta [-]	0,20 – 0,22
Tvrдость	2700 HV - 3500 HV
Počet atomů v 1 cm^3	$1,69 \times 10^{23}$
Hustota [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]	3,48
Součinitel délkové roztažnosti [$10^{-6} \cdot \text{K}$]	4,6 – 4,9
Teplotní odolnost [$^{\circ}\text{C}$]	1500
Chemická inertnost	Pro téměř všechny obráběné materiály

Polykrystalický kubický nitrid boru je nástrojový materiál tvořený kubickým nitridem boru a pojivem, jímž je spojen do kompaktního celku. Pomocí pojiva lze výrazně ovlivnit výsledné vlastnosti PKNB, a to jak fyzikální, tak mechanické. Dosáhnout toho lze řízením množství pojiva v celkovém objemu, které může dosáhnout hodnoty až 50 %. Mezi pojiva lze zařadit karbidy, kovy a keramiku. Mezi karbidická pojiva řadíme karbid titanu a karbid wolframu. Nejčastěji používanými kovy jsou titan a nitrid titanu, které ovlivňují především houževnatost a tepelnou vodivost. Funkci pojiva znázorňuje obr. 3.4, na kterém lze také vidět reaktivní povlak, který obalí každé zrno [11, 12].



Obr. 3.4 Funkce pojiva v kubickém nitridu boru [12].

Z výše uvedených vlastností PKNB lze usoudit, že jeho použití jako nástrojového materiálu je možné pro speciální vysokolegované oceli, tepelně zpracované oceli, titan,

titanové a žárovzdorné slitiny, slitiny se zvýšenými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi a šedé litiny [12].

3.5 Opotřebení nástrojů z PKNB

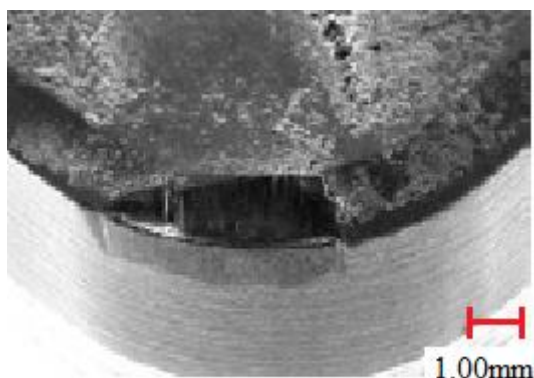
Použití obráběcích nástrojů v různých aplikacích je posuzováno z více pohledů. Jedním z nich je posuzování vhodnosti obráběcího nástroje z hlediska jeho opotřebení, to znamená z hlediska změny geometrie nástroje v závislosti na čase. Ostří každého nástroje se tedy může podrobit křehkému a plastickému porušení [13].

Jestliže maximální tahové napětí v kterémkoliv bodě řezné části nástroje dosáhne svojí kritické hodnoty meze pevnosti, tak dojde ke křehkému narušení řezné části nástroje. Křehká pevnost nástroje je tedy charakterizována kritickou hodnotou meze pevnosti [13].

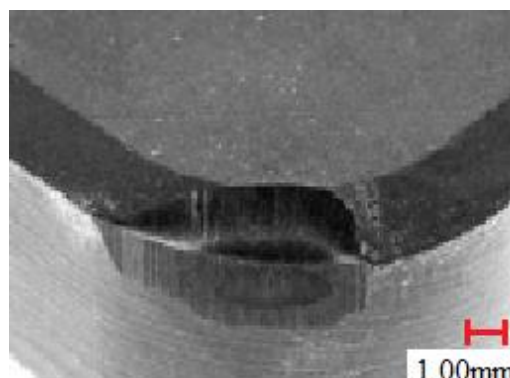
Naopak plastické porušení řezné části nástroje určuje závislost tvrdosti řezného materiálu na teplotě, která se mění v procesu řezání změnou parametrů obrábění. Vysoká plastická pevnost nástroje je tedy podmíněna jeho vysokou tvrdostí za vysokých teplot [13].

Z předchozího vyplývá, že vysoká křehká a plastická pevnost řezného nástroje značně rozšiřuje možnosti jeho použití. Dále musí být nástroj odolný proti opotřebení, aby po celou dobu jeho trvanlivosti zabezpečoval přesnost a produktivitu obrábění [13].

U nástrojů z PKNB při obrábění tvrzených součástí je nejčastěji zaznamenáváno opotřebení ve tvaru žlábků a opotřebení na hřbetě. Průběh opotřebení potom závisí na faktorech, jako jsou materiál obrobku, třída PKNB, řezné podmínky, geometrie břitu a v neposlední řadě stabilita stroje. Opotřebení ve tvaru žlábků (viz obr. 3.5) je typ opotřebení, který se nejvíce vyskytuje při obrábění cementovaných ocelí. Jeho hlavní příčinou je chemický otěr, ke kterému dochází v důsledku velmi vysokých teplot a tlaků v místě styku obrobku a nástroje. Tento typ opotřebení způsobuje zeslabení břitu, které se projeví proměnlivou trvanlivostí břitu. Naopak opotřebení hřbetu, které lze vidět na obr. 3.6, se nejčastěji objevuje při obrábění abrazivnějších typů ocelí, jako např. ložiskových a nástrojových ocelí. Opotřebení na hřbetě se dále objevuje při obrábění nízkými řeznými rychlostmi. V tomto případě je mechanismem opotřebení abraze. S rostoucím opotřebením na hřbetě se zhoršuje rozměrová přesnost obráběné plochy [12, 13].



Obr. 3.5 Opotřebení ve tvaru žlábků [13].



Obr. 3.6 Opotřebení na hřbetě [13].

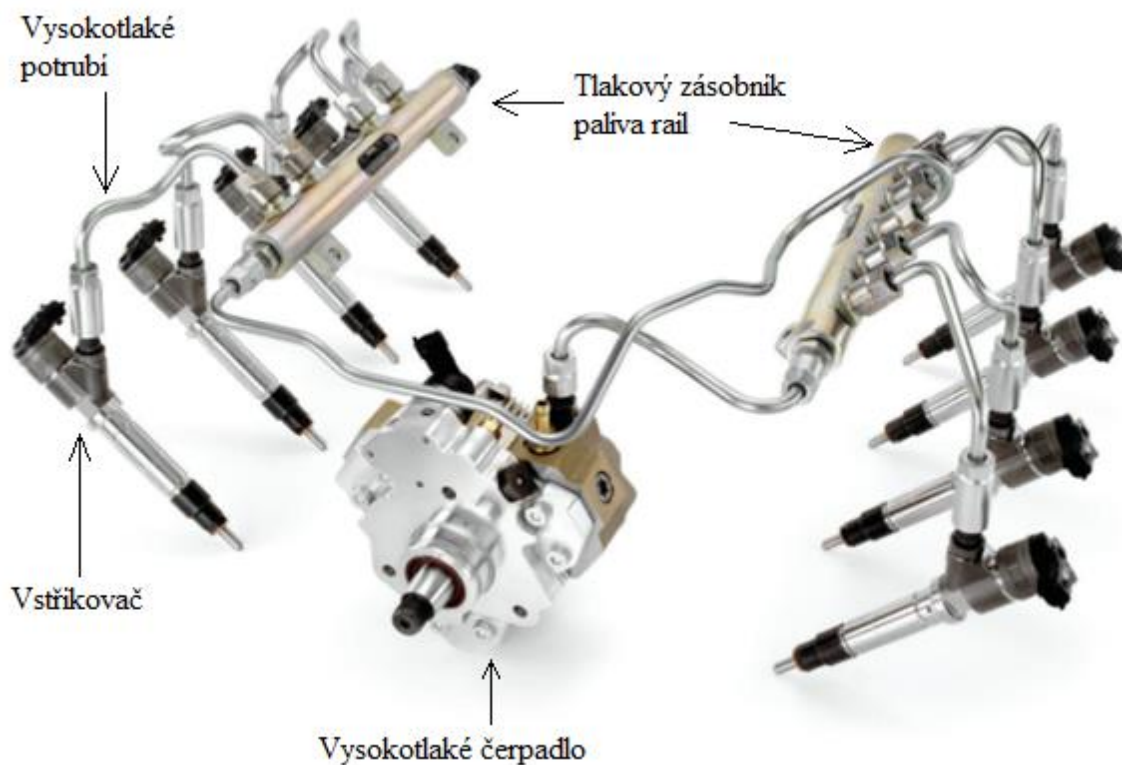
4 TĚLESO CP3

Tato část je věnována funkci systému Common Rail, čerpadlu CP3 a jeho tělesu a následně pak obrábění tělesa diesellového čerpadla CP3 s detailním zaměřením na místo obráběné nástrojem T14012 [1].

4.1 Common Rail systém

Common Rail je systém vstřikování paliva do válce motoru přes tlakový zásobník rail, který je plněn vysokotlakým čerpadlem [1, 2].

Palivo je čerpáno z palivové nádrže přes filtr do radiálního pístového čerpadla, které slouží jako generátor vysokého tlaku o hodnotě až 2 000 bar. Odtud je palivo dopravováno vysokotlakým potrubím do tlakového zásobníku rail, odkud palivo putuje do jednotlivých vstřikovačů, které dávkují přesné množství a dobu vstřiku tak, aby bylo palivo dokonale rozprášeno a efektivita spalování byla nejvyšší možná. Celý proces potom řídí řídicí jednotka motoru. Vizualizaci systému Common Rail znázorňuje obr. 4.1 [1, 2].



Obr. 4.1 Vizualizace systému Common Rail.

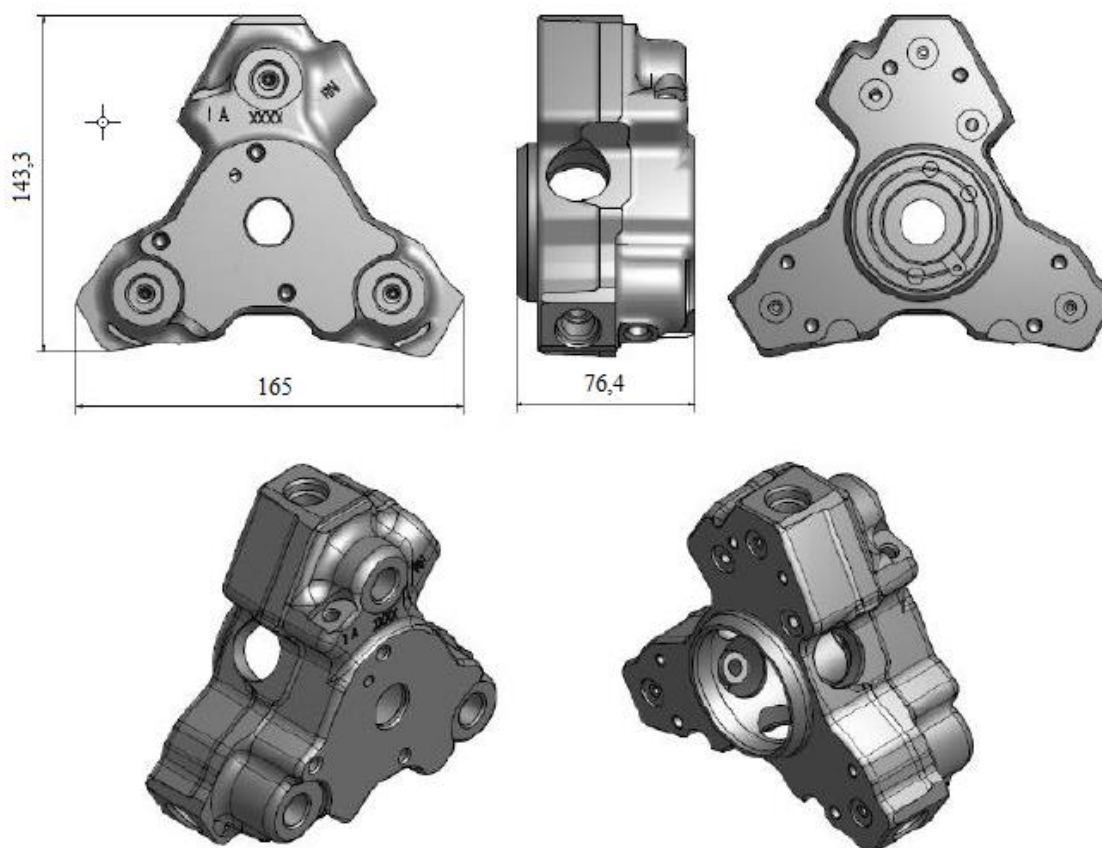
4.2 Těleso CP3

V systému Common Rail je radiální pístové čerpadlo CP3 používáno k vytváření vysokého tlaku kapaliny, kterou neustále dodává do vysokotlakého zásobníku. Hlavní částí tohoto čerpadla je jeho těleso, na kterém jsou namontovány ostatní funkční části [1, 2].

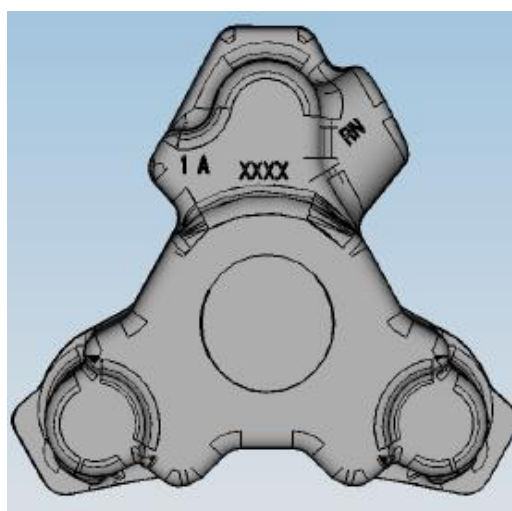
4.2.1 Popis tělesa CP3

Na obr. 4.2 je znázorněno těleso diesellového čerpadla CP3 střední velikosti. Výchozí polotovár pro obrábění je vyluk z oceli 20MnCrS5 dle ČSN EN 10 027-1,

což odpovídá oceli 14 221 dle ČSN 42 0002. Detailní informace o obráběné oceli jsou uvedeny v materiálovém listu v příloze 2. Výkovek je znázorněn na obr. 4.3 [14].



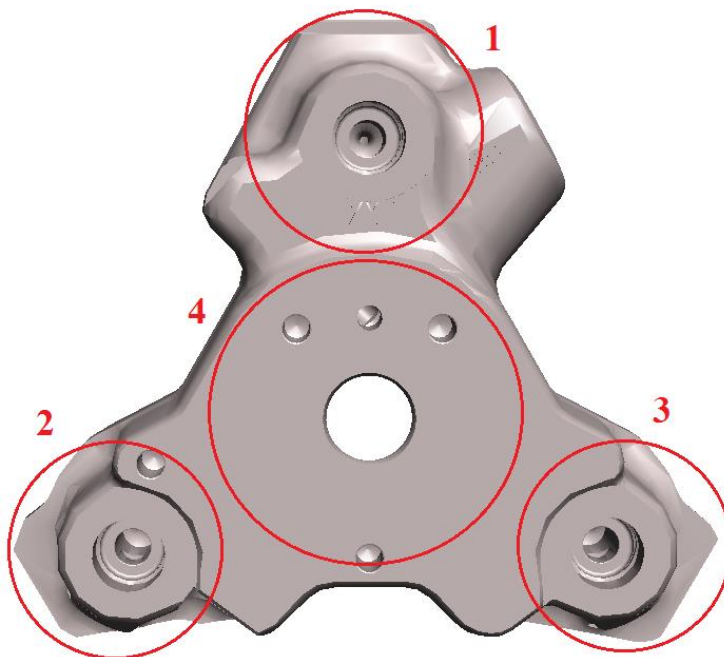
Obr. 4.2 Těleso dieselového čerpadla CP3 [14].



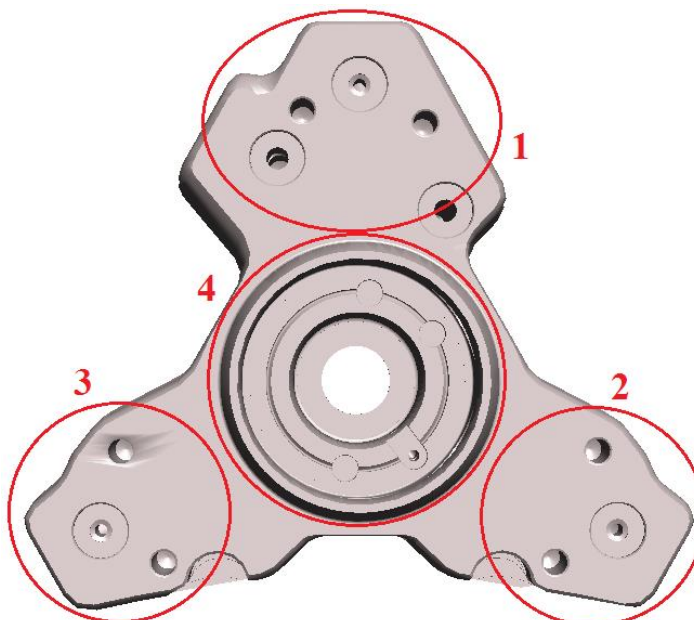
Obr. 4.3 Výkovek CP3[14].

Těleso CP3 má trojcípý tvar, přičemž vrchní část cípu se nazývá hlava. Takže každé těleso má 3 hlavy a v každé z nich je radiálně umístěn píst pro vytváření vysokého tlaku. Na obr. 4.4 a 4.5 je hlava 1 označena číslem 1, hlava 2 číslem 2 a hlava 3 číslem 3. V těchto hlavách se nachází provozní tlak kapaliny až 2 000 bar a stejný tlak se nachází

i v kanálech, které spojují hlavu 1 s hlavou 2 a hlavu 1 s hlavou 3. Výše uvedené části jsou nazývané jako vysokotlaký prostor. Dále je na obr. 4.4 a 4.5 číslem 4 označen vačkový prostor, do kterého se poté namontuje pohonný systém čerpadla CP3. Každé těleso má dvě snadno rozlišitelné strany. Na obr. 4.4 je znázorněna strana zubového čerpadla, na kterou se namontuje zubové čerpadlo a stranu příruby (viz obr. 4.5), která je připravena na montáž příruby [14].



Obr. 4.4 Strana zubového čerpadla [14].

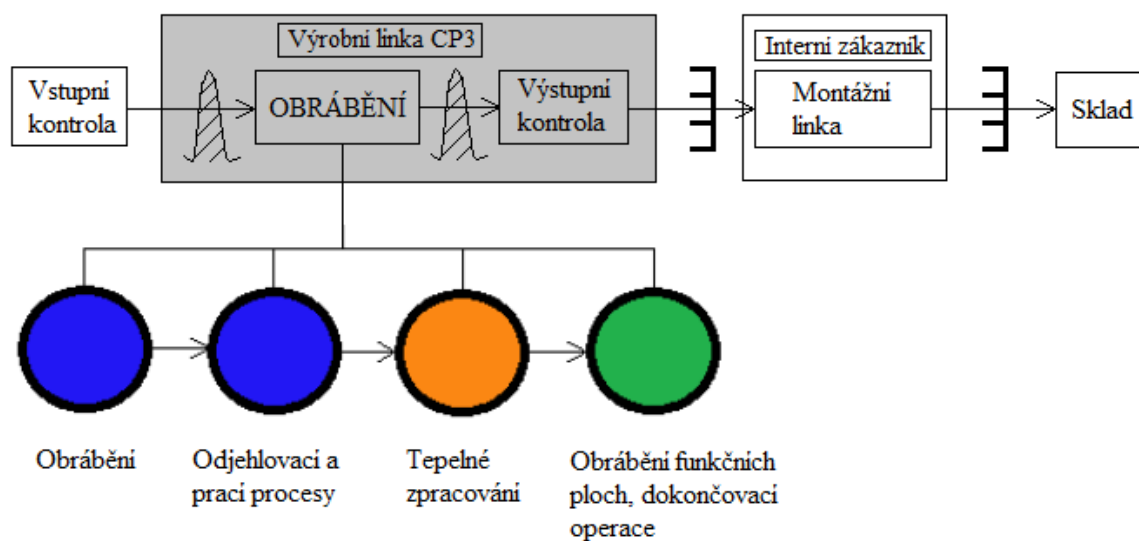


Obr. 4.5 Strana příruby [14].

4.2.2 Obrábění tělesa CP3

Výrobní tok tělesa CP3 je znázorněn na obr. 4.6 a skládá se ze vstupní kontroly výkovků, následného obrábění tělesa z výkovku, poté jsou tělesa na montážní lince spolu s ostatními komponenty smontovány v čerpadlo CP3, které je nakonec převezeno do skladu [2].

Výroba těles CP3 se sestává ze tří základních fází (viz obr. 4.6), kterými jsou obrábění před tepelným zpracováním, označeno modře, po kterém následuje tepelné zpracování, označeno oranžovou barvou, a následuje obrábění po tepelném zpracování, které je označeno zeleně [2].



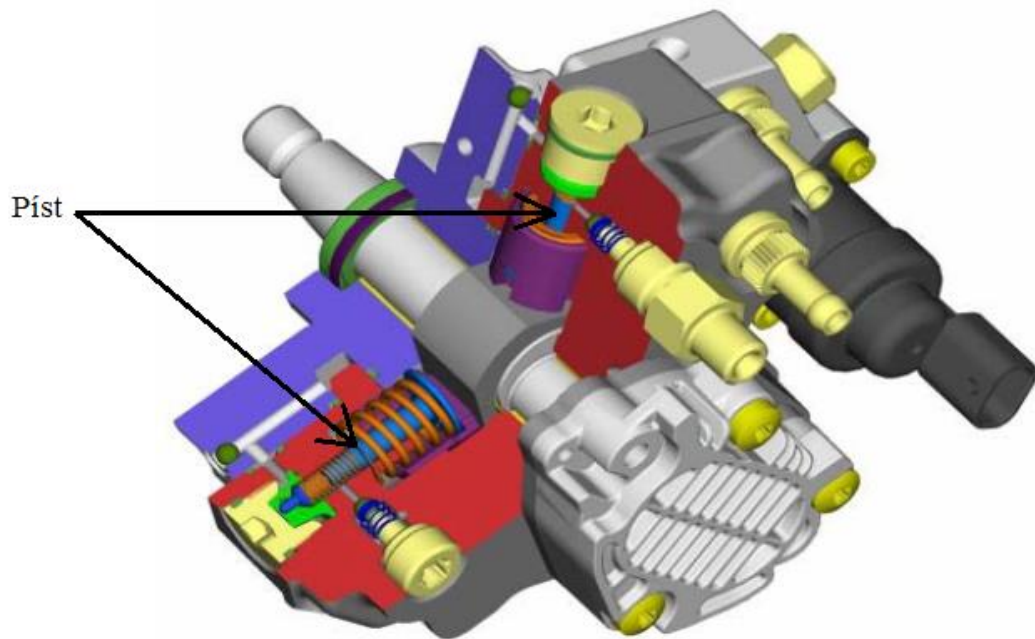
Obr. 4.6 Výrobní tok tělesa CP3.

Vstupním polotovarem pro výrobu tělesa CP3 je výkovek, u kterého je před obráběním zkontrolován jeho vnější vzhled, výška a požadovaná tvrdost dle Brinella. Když jsou vstupní požadavky splněny, tak dojde k obrábění výkovku na požadovaný tvar dle výkresu. Následují odjehlovací procesy, kterými mimo jiné dojde ke zvýšení únavové pevnosti obrobku, a prací procesy, které mají obrobek zbavit procesní kapaliny, třísek a ostatních nežádoucích látek. Následuje tepelné zpracování, jehož účelem je dosáhnout velké tvrdosti na povrchu obrobku a zároveň zachovat houževnaté jádro. Dále dochází k obrábění funkčních ploch, které zahrnuje vystružování, broušení a honování otvoru pro píst. Poté je těleso dieselového čerpadla CP3 zkontrolováno na pracovišti výstupní kontroly. Když jsou všechny sledované parametry v pořádku, tak putuje těleso CP3 na montážní linku [2].

4.2.3 Píst a otvor pro píst

Dieselové čerpadlo CP3 je radiální pístové čerpadlo, z čehož vyplývá, že čerpadlo obsahuje píst pohybující se v otvoru pro píst. Na píst, který je na obr. 4.7 označen modře, i na otvor pro píst jsou kladeny vysoké kvalitativní požadavky.

Obrábění otvoru pro píst se skládá ze tří fází. Tou první je vrtání otvoru na obrábění před tepelným zpracováním, poté následuje vystružování otvoru pro píst na obrábění po tepelném zpracování nástrojem s pájenými PKNB destičkami a třetí fází je honování otvoru pro píst pro získání požadovaných hodnot drsnosti, kolmosti, kruhovitosti, sousosti, rovnoběžnosti a v neposlední řadě průměru otvoru.

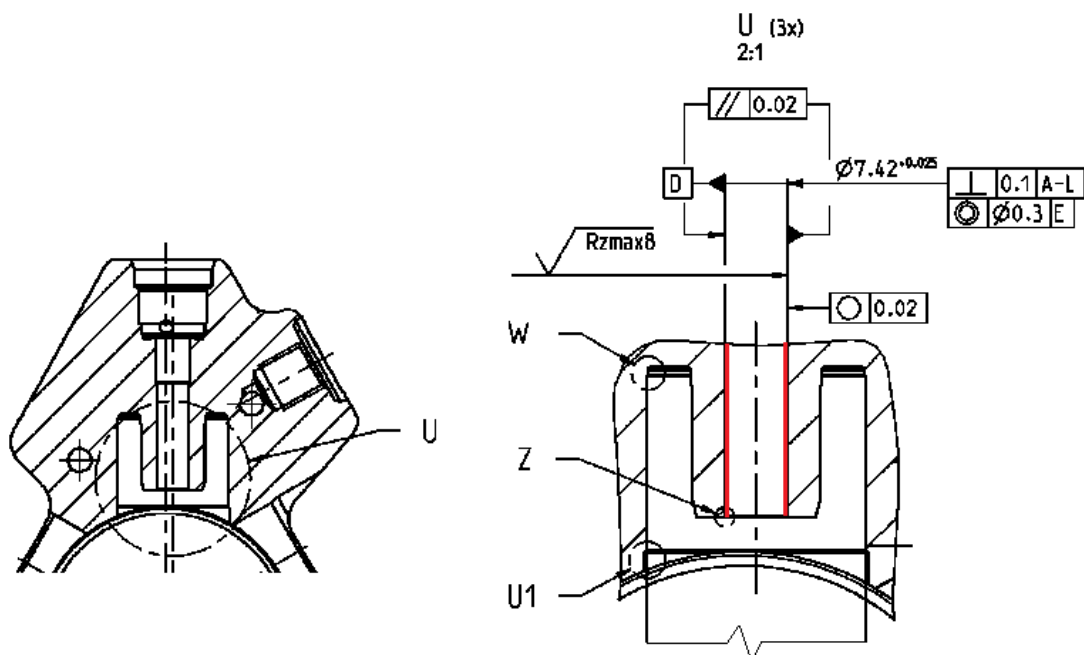


Obr. 4.7 Řez dieselvým čerpadlem CP3 [2].

Jelikož tématem této práce je vystružování otvoru pro píst nástrojem s pájenými PKNB destičkami, tak se následující obsah práce věnuje pouze této problematice.

4.2.4 Obrábění a měření otvoru pro píst

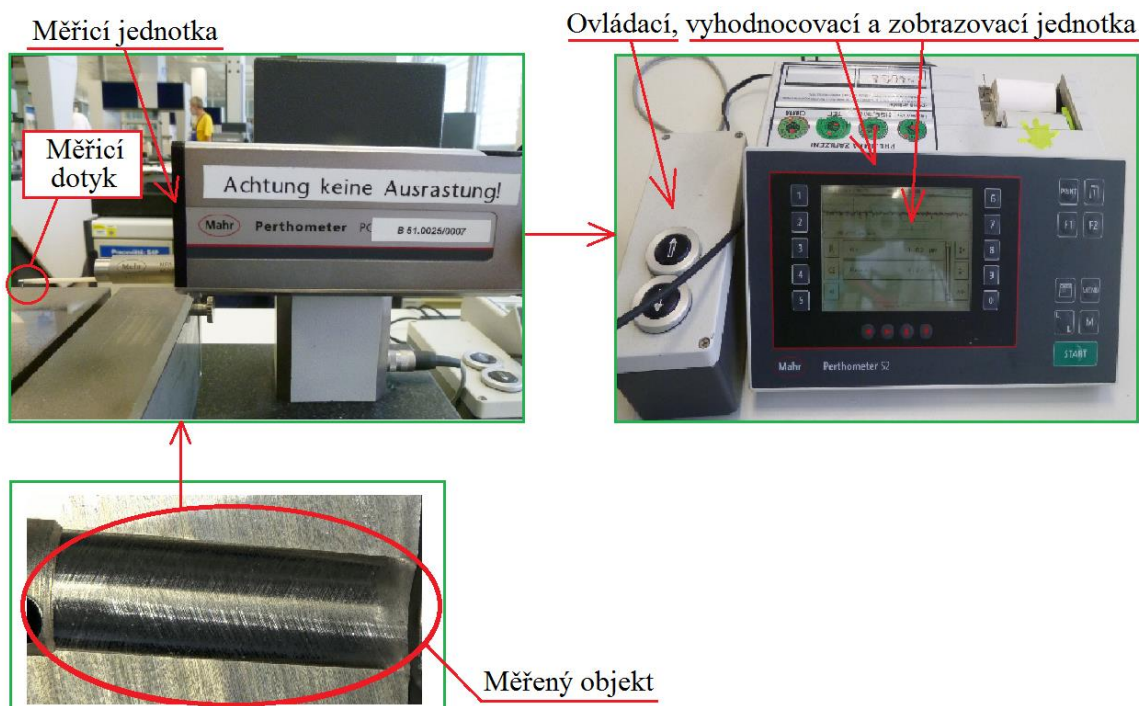
Jak už bylo řečeno výše, jedná se o obrábění tepelně zpracovaného tělesa CP3 s povrchovou tvrdostí 62 ± 2 HRC, a z toho důvodu je nutné pro obrábění otvoru pro píst použít nástroj s PKNB destičkami. Cílem tohoto obrábění je co nejlépe připravit tento otvor pro operaci honování otvoru pro píst.



Obr. 4.8 Otvor pro píst [2].

Na obr. 4.8 je otvor obráběný nástrojem T14012 označen červeně. Jedná se o vystružování otvoru se šířkou záběru ostří $a_p \in (0,13 \text{ mm}; 0,19 \text{ mm})$. Výkresové požadavky na vystružovaný otvor jsou znázorněny na výřezu z výkresu tělesa po tepelném zpracování (viz obr. 4.8). Obrábění probíhá na obráběcím centru GROB 500 BZ.

Měření výkresových požadavků probíhá na dvou měřicích přístrojích. Tím prvním je ručně ovládaný hrotový drsnoměr od firmy Mahr, který měří a následně pomocí softwaru vyhodnocuje maximální hodnotu největších výšek profilu Rz_{max} . Schéma zapojení měřidla je viditelné na obr. 4.9, kde je na měřeném objektu měřena Rz_{max} pomocí zpětného pohybu měřicího dotyku, který je umístěn v měřicí jednotce. Odtud signál putuje do vyhodnocovací jednotky, která přímo spočítá chtěnou veličinu. Na obr. 4.10 je potom ukázka protokolu z měření maximální hodnoty výšky profilu Rz_{max} [2].

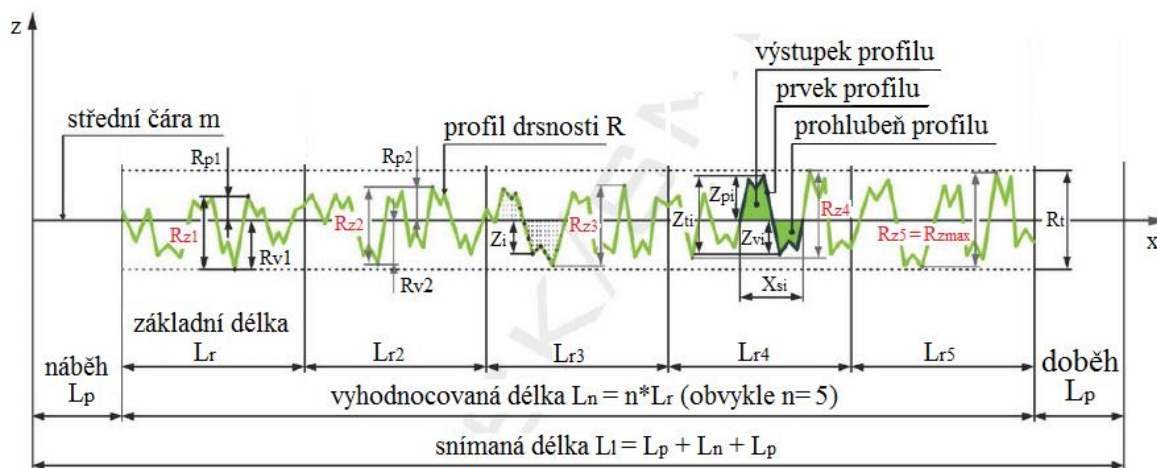


Obr. 4.9 Měřicí přístroj od firmy Mahr.

Mahr MarWin 3.01-03 SP 4		Bosch Diesel III, Jihlava-Pavov Merove středisko 1225/08		11.5.2017 1 08:39:57 Kontrolor: obsluha Podpis:
Díl: XXXXXXX	Číslo výkresu: F 00N XXX XXX	Krok obrábění:		
Číslo dávky:			7529	
Komentář: Těleso CP3 - R,P hodnoty				
66 - Rz element	0,394 μm	0,000		8,000

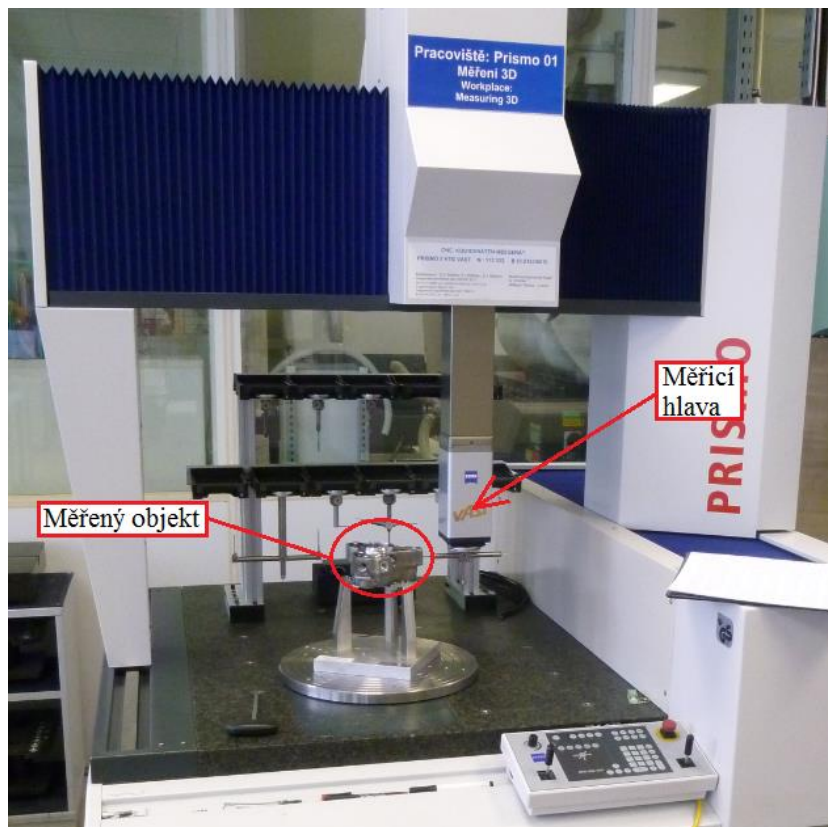
Obr. 4.10 Protokol z měření Rz_{max} [2].

Způsob vyhodnocení Rz_{max} je červeně znázorněn na obrázku 4.11, kdy se jako nejvyšší výška profilu Rz_{max} bere maximální hodnota z nejvyšších výšek profilu Rz_i na jednotlivých úsecích [15, 16].



Obr. 4.11 Vyhodnocování Rz_{max} [15, 16].

Druhým měřicím přístrojem pro kontrolu výkresových požadavků na otvor pro píst je univerzální souřadnicový měřicí stroj od firmy Zeiss (viz obr. 4.12). Jedná se o měřidlo, které je ovládané CNC programem a které vyhodnocuje průměr otvoru pro píst a jeho geometrické tolerance (viz obr. 4.8). Výstupem z měření je protokol, na kterém je červeně zvýrazněno, který rozměr, případně geometrická tolerance, je mimo toleranci.

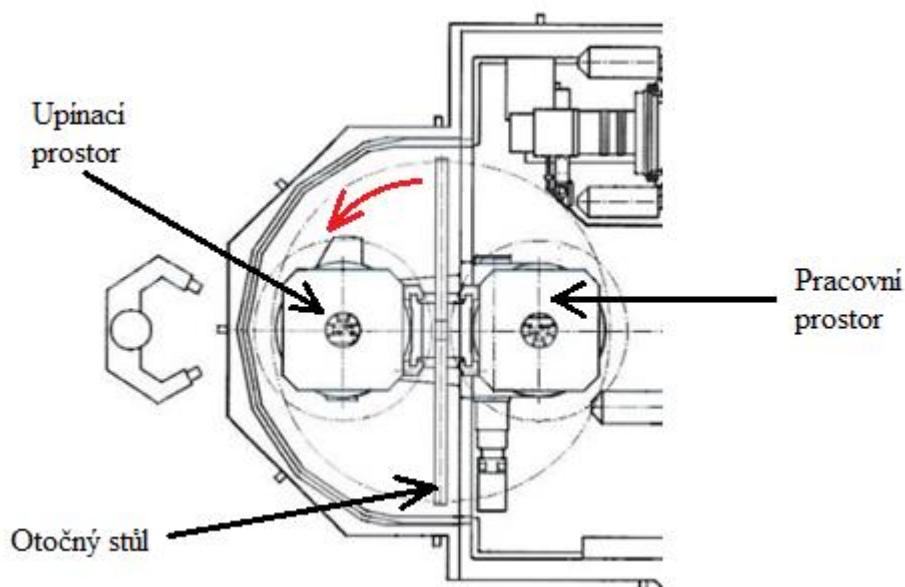


Obr. 4.12 Souřadnicový měřicí stroj Zeiss.

4.2.5 Obráběcí centrum GROB 500 BZ



Obr. 4.13 Obráběcí centrum GROB 500 BZ [17].



Obr. 4.14 Schéma otočného stolu centra GROB 500 BZ [2].

GROB 500 BZ (viz obr. 4.13) je obráběcí centrum, na kterém je obráběn jeden obrobek, zatímco druhý je manuálně upínán do přípravku. Po uplynutí cyklu otočný stůl, který je detailněji znázorněn na obr. 4.14, otočí obrobek ze základacího místa do pracovního prostoru, kde dojde k samotnému obrábění a po obrobení se cyklus opakuje. Při obrábění je obrobek natáčen do příslušné pozice pomocí osy B, stroj je dále vybaven

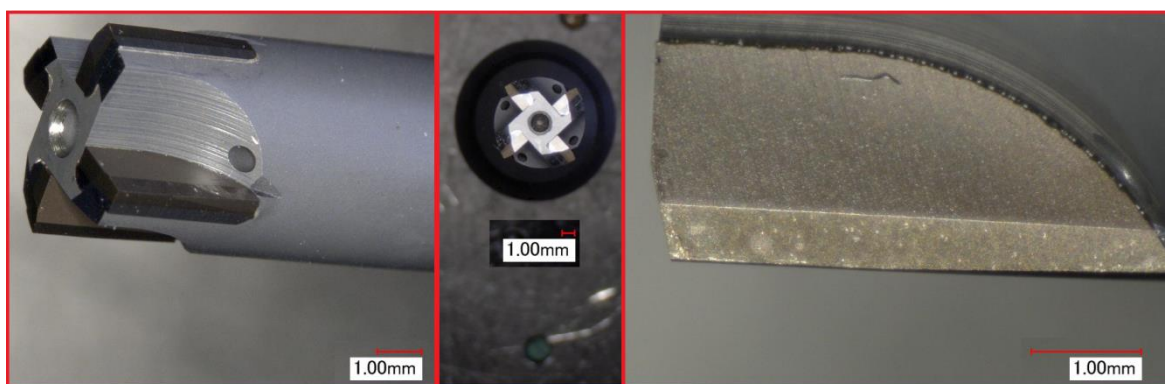
třemi lineárními osami X, Y a Z. Stroj disponuje jedním vřetenem, do kterého jsou upínány nástroje pomocí tepelných upínačů. Řízení stroje je uskutečňováno řídicím systémem Sinumerik 840D. Další technické údaje obráběcího centra jsou zapsány v tabulce 4.1 [2].

Tab. 4.1 Technické parametry obráběcího centra GROB 500 BZ [2].

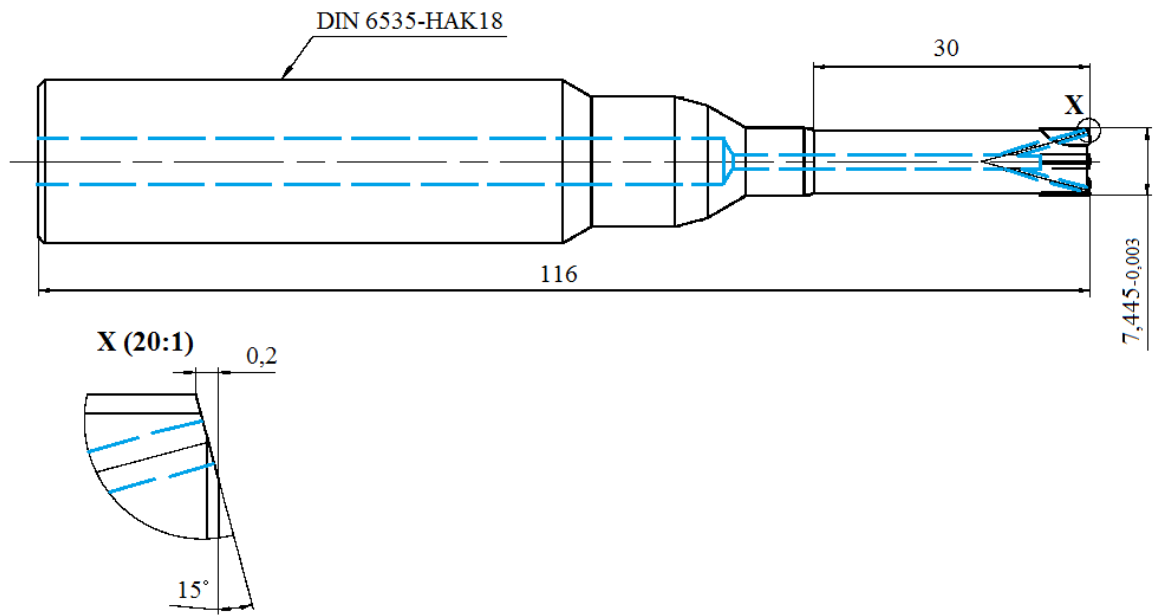
Výkon [kW]	35
Krouticí moment [Nm]	140
Počet vřeten [-]	1
Způsob upínání nástrojů	HSK-A 63
Počet nástrojů v zásobníku [-]	61
Otáčky vřetena [min]	15000
Osy	X,Y,Z,B
Řízení	Sinumerik 840D

4.2.6 Nástroj T14012

Jedná se o čtyřbřitý pravořezný výstružník s pájenými PKNB destičkami, který disponuje vnitřním chlazením až pod břit. Výstružník je vybaven přímými zuby, které obrábí předvrtaný otvor pro píst s přídávkem 0,13 mm až 0,19 mm v závislosti na předvrtání otvoru. Upínání nástroje je uskutečňováno tepelným upínačem za válcovou stopku. V současnosti nástroj dodává společnost Gühring (viz obr. 4.15) s tím, že tělo nástroje je používáno na pět životností PKNB destičky. Tělo i stopka nástroje jsou v tomto případě vyrobeny z tvrdokovu, což značně zvyšuje cenu daného nástroje. PKNB destička má předepsanou trvanlivost 900 těles, což je 2 700 otvorů. PKNB destičky nejsou povlakovány a po skončení jejich trvanlivosti se dále nepřebuší, takže v tomto případě se trvanlivost destičky rovná její životnosti. Na obr. 4.16 je viditelný tvar výstružníku s naznačením jeho geometrie. Dále jsou na obrázku modře znázorněny chladicí kanály, které ústí až pod břit, a zaručují tak intenzivní a přímé chlazení obráběného místa.



Obr. 4.15 Vizualizace nástroje T14012 od společnosti Gühring.



Obr. 4.16 Schéma nástroje T14012 [2].

5 TESTY ŽIVOTNOSTI DODANÝCH NÁSTROJŮ

Při výběru dodavatelů nástroje na vystružování otvoru pro píst byla zohledněna hlavně zkušenost firmy Bosch Diesel s daným dodavatelem a dále pak zkušenost daného dodavatele s nástroji, kde je řezná destička z PKNB. Šanci dodat výstružník dostala i firma LMT, která měla pouze minimální zkušenosti s nástroji z PKNB, a to z důvodu navázání obchodního kontaktu. Úkolem dodavatelů bylo zhotovit nástroj s řeznou destičkou z PKNB, který bude pracovat ve stejných podmínkách jako sériový nástroj a bude levnější, co se týká ceny za jeden obrobený kus. Dále je požadováno, aby tělo nástroje vydrželo na pět životností břitové destičky, která je na něm připevněna pájením. Tvar nástroje, geometrie a počet břitů závisel pouze na volbě dodavatele a jeho zkušenostech s danou aplikací. Jakost PKNB destičky nebyla žádnou z firem uvedených níže prozrazena. Dodavatelem sériového nástroje je firma Gühring. Přehled všech dodavatelů výstružníku pro obrábění otvoru pro píst i s verzemi je zpracován v tabulce 5.1.

Tab. 5.1 Přehled jednotlivých dodavatelů výstružníků.

Dodavatel	Stav	Verze
Gühring	Sériový nástroj	G1
Sandvik	Testovaný nástroj	S1
		S2
		S3
		S4
Iscar	Testovaný nástroj	I1
		I2
LMT	Testovaný nástroj	L1
		L2
Hamfinal	Testovaný nástroj	H1
		H2

5.1 Zhodnocení dodaných nástrojů

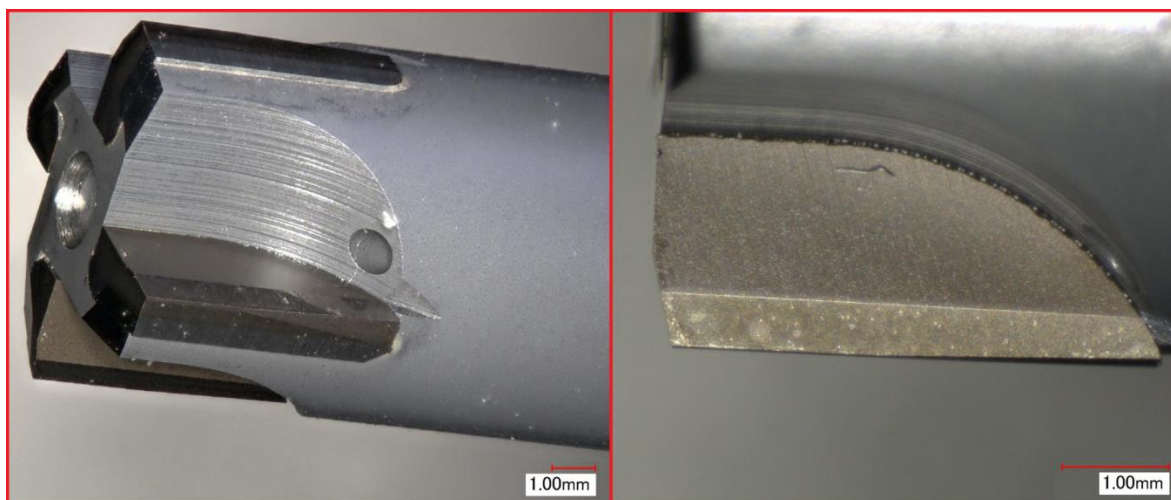
Tato podkapitola pojednává o posouzení dodaných nástrojů pro danou aplikaci obrábění otvoru pro píst tepelně zpracovaného tělesa CP3. V následujícím budou rozebrány jednotlivé parametry dodaných nástrojů.

5.1.1 Gühring

Verze G1

Jedná se o nástroj, který je používán jako sériový. Je to čtyřbřitý pravořezný výstružník s vnitřním chlazením až pod břit, přičemž je vybaven přímými zuby, které jsou rozděleny rovnoměrně po 90°. Upínání nástroje je uskutečňováno tepelným upínačem za válcovou stopku. Tělo i stopka nástroje jsou v tomto případě jeden kus a jsou vyrobeny z tvrdokovu, což značně zvyšuje cenu daného nástroje. PKNB destičky nejsou povlakovány

a po skončení jejich trvanlivosti se dále nepřebušují, takže v tomto případě se trvanlivost destičky rovná její životnosti. Dle tvaru a geometrie nástroje lze usoudit, že se jedná o nástroj s vysokou tuhostí. Rádus na špičce je minimální, což má pozitivní vliv na odřezávání třísky. Úhel κ_r má velikost 15° . Nástroj G1 znázorňuje obr. 5.1.

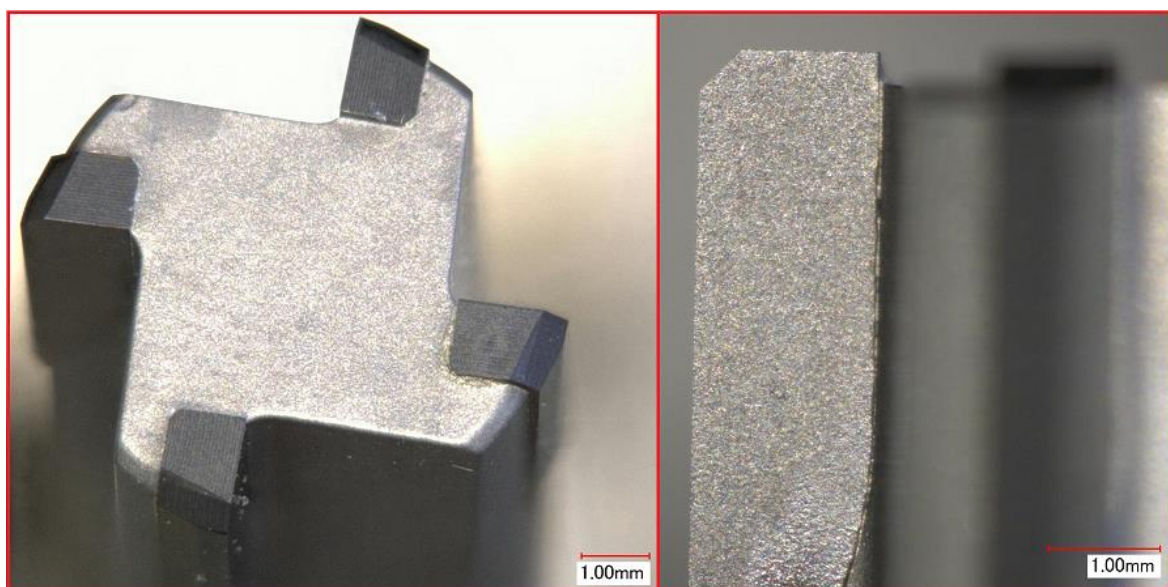


Obr. 5.1 Výstružník verze G1.

5.1.2 Sandvik

Verze S1

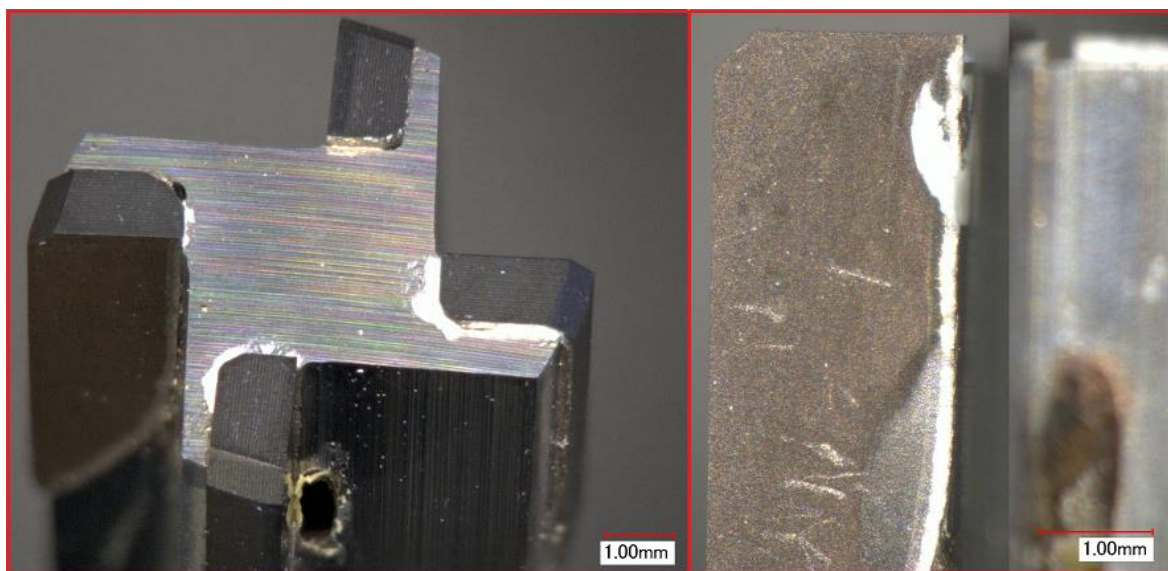
Výstružník od firmy Sandvik verze S1 disponuje čtyřmi přímými zuby, které jsou rozděleny rovnoměrně po 90° . Chladicí kanály jsou vyvedeny v těle nástroje ve vzdálenosti zhruba 40 mm od břitové destičky, a z toho důvodu nemají tak výraznou účinnost. Tělo a stopka nástroje jsou vyrobeny jako celek, přičemž jako materiál pro jejich výrobu byl opět použit slinutý karbid. Nástroj je upnut pomocí tepelného upínače za válcovou stopku. Rádus na špičce je minimální, což naznačuje dobré odřezávání třísky. V porovnání s nástrojem G1 je úhel κ_r větší a nabývá hodnoty 45° . Výstružník S1 je znázorněn na obr. 5.2.



Obr. 5.2 Výstružník verze S1.

Verze S2

Nástroj verze S2 od firmy Sandvik je čtyřbřitý výstružník s přímými zuby, které jsou stejně jako v předchozích případech rozděleny po 90°. Chladicí kanály jsou vyvedeny až pod břit, což naznačuje intenzivní chlazení místa řezu. Další charakteristiky nástroje jsou stejné jako u nástroje verze S1. To znamená, že úhel κ_r je 45° a rádius na špičce nástroje je také minimální, což je výhodné z hlediska odřezávání třísky. Dle obr. 5.3 lze usuzovat, že výstružník nemá dostatečnou tuhost a bude náchylný k vibracím.



Obr. 5.3 Výstružník verze S2.

Verze S3

S3 je další verze výstružníku od firmy Sandvik. Oproti výstružníku S1 a S2 má tato verze odlehčené tělo, které ještě více zdůrazňuje hlavní nevýhodu nástrojů S1 a S2, a to sice nízkou tuhost. Jedná se opět o čtyřbřitý nástroj s přímými zuby rozdělenými rovnoměrně po 90°. Tato verze disponuje chladicími kanály, které jsou vyvedeny v těle nástroje ve vzdálenosti zhruba 40 mm od břitové destičky, a z toho důvodu není chlazení v tomto místě natolik účinné. Tělo i stopka nástroje jsou jeden celek a jsou vyrobeny ze slinutého karbidu. Upínání je uskutečňováno tepelným způsobem za válcovou stopku. Břitová destička má úhel nastavení hlavního ostří κ_r 45° a rádius na špičce nástroje je minimální, což je výhodné z hlediska řezných vlastností. Tělo nástroje je zobrazeno na obr. 5.4 a geometrie břitové destičky je naznačena na obr. 5.5.



Obr. 5.4 Výstružník verze S3.



Obr. 5.5 Výstružník verze S3 – detail břitové destičky.

Verze S4

Poslední verzi nástroje, který byl dodaný firmou Sandvik, je verze S4. Tato verze je velice podobná nástroji S3 pouze s tím rozdílem, že u této verze jsou chladicí kanály vyvedeny až pod břit. Toto je výhodnější z hlediska intenzivnějšího chlazení místa řezu. Geometrie břitové destičky a ostatní vlastnosti nástroje jsou totožné s verzí S3.

5.1.3 Iscar

Verze I1

Jedná se o čtyřbřitý výstružník s přímými zuby (viz obr. 5.6), který má chladicí kanály vyvedeny až pod břit. Zuby nástroje jsou rovnoměrně rozděleny po 90°. Tělo a stopka nástroje jsou vyrobeny z jednoho kusu a materiálem pro jejich výrobu je slinutý karbid. Geometrie břitové destičky je odlišná oproti variantám S1 až S4, přičemž úhel nastavení hlavního ostří κ_r je 15°. Tento nástroj také disponuje poměrně velkým rádiusem na špičce nástroje, což není výhodné z hlediska tvorby třísky a zároveň vzniká velká elastická a plastická deformace v oblasti terciální plastické deformace. V důsledku toho se mění mechanické vlastnosti povrchové vrstvy obrobku zejména pak hloubka zpevnění povrchové vrstvy a její mikrotvrdość.



Obr. 5.6 Výstružník verze I1.

Verze I2

Tento výstružník od firmy Iscar je modifikací verze I1. Jde opět o výstružník se čtyřmi přímými zuby rovnoměrně rozloženými po 90°. Nástroj se skládá z tvrdokovového nosiče a stopky podobně jako u verze I1. Úhel nastavení hlavního ostří je 15°. Modifikace se týkala rádiusu na špičce nástroje, který se oproti předchozí variantě zmenšil, což předpokládá lepší odřezávání třísky a menší plastickou a elastickou deformaci v oblasti terciální plastické deformace, než je tomu u verze I1. Nástroj I2 je zobrazen na obr. 5.7.

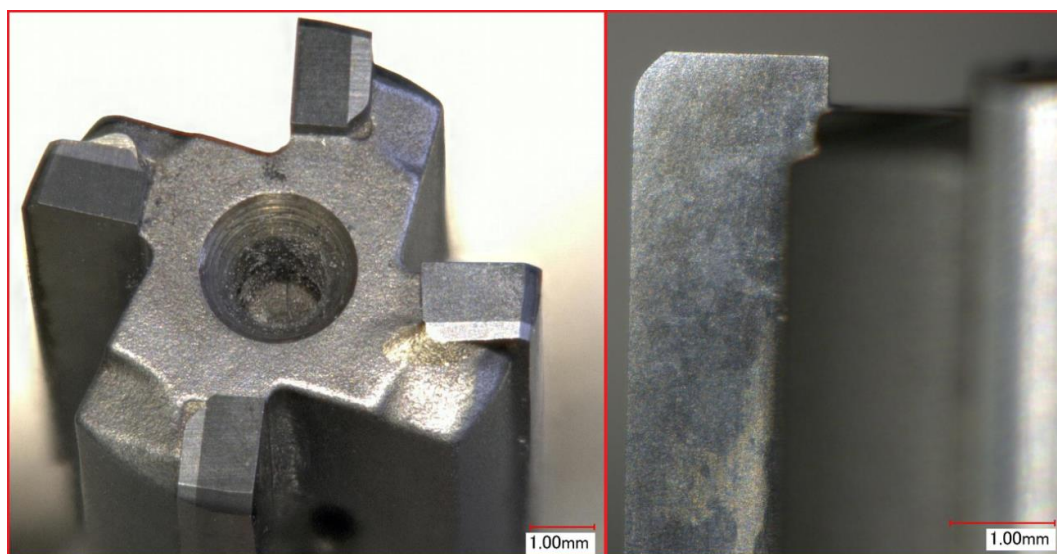


Obr. 5.7 Výstružník verze I2.

5.1.4 LMT

Výrobce nástrojů LMT dostala šanci ukázat, jestli zvládne vyrobít nástroj s pájenými PKNB destičkami navzdory tomu, že s tímto typem nástrojů měla pouze minimální zkušenosti.

Verze L1

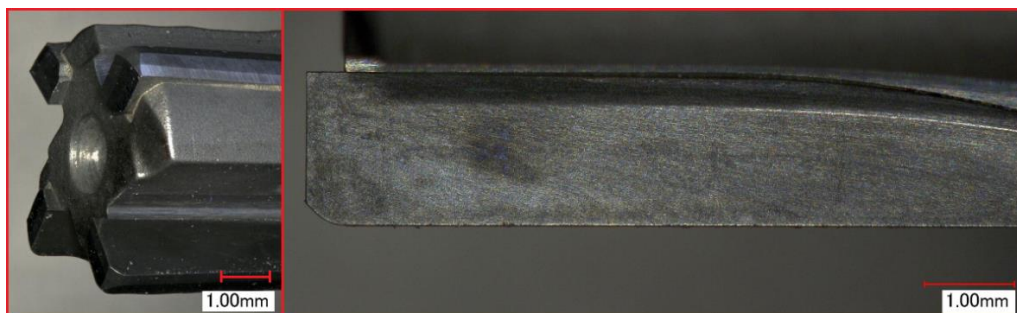


Obr. 5.8 Výstružník verze L1.

Firma LMT se nechala inspirovat podobně jako ostatní dodavatelé sériovým nástrojem a zvolila použití čtyřbřitého výstružníku s přímými zuby, které jsou rovnoměrně rozloženy po 90° (viz obr. 5.8). Na první pohled výstružník disponuje větší tuhostí. Tělo a stopka nástroje jsou tvořeny jedním celkem, přičemž jako materiál pro jejich výrobu byl použit slinutý karbid. Výstružník verze L1 má zcela odlišnou geometrii břitu, než je tomu u sériového nástroje. První odlišností je velikost úhlu nastavení hlavního ostří κ_r , jenž nabývá hodnoty 45°. Druhou odlišností je velký rádius na špičce nástroje, který je nevhodný z hlediska odřezávání třísky a z hlediska velké elastické a plastické deformace v terciální oblasti.

Verze L2

Jedná se o výstružník od dodavatele LMT. Je to čtyřbřitý nástroj s přímými zuby, které jsou rovnoměrně rozloženy po 90°. Tělo a stopka nástroje tvoří jeden celek, přičemž jako materiál pro jejich výrobu byl použit slinutý karbid. Nástroj disponuje chladicími kanály vyvedenými až pod břit, což zajišťuje intenzivní chlazení místa řezu. Rozdíl oproti verzi L1 spočívá podle dodavatele v houževnatější PKNB destičce. Geometrie břitové destičky zůstává stejná jako v předchozím případě u verze L1, a to znamená, že břitová destička disponuje velkým rádiusem špičky nástroje, což je nevýhodné z hlediska odřezávání třísky a zvýšené elastické a plastické deformace v oblasti terciální plastické deformace. Nástroj verze L2 a detailní geometrie břitu je zobrazena na obr. 5.9.



Obr. 5.9 Výstružník verze L2.

5.1.5 Hamfinal

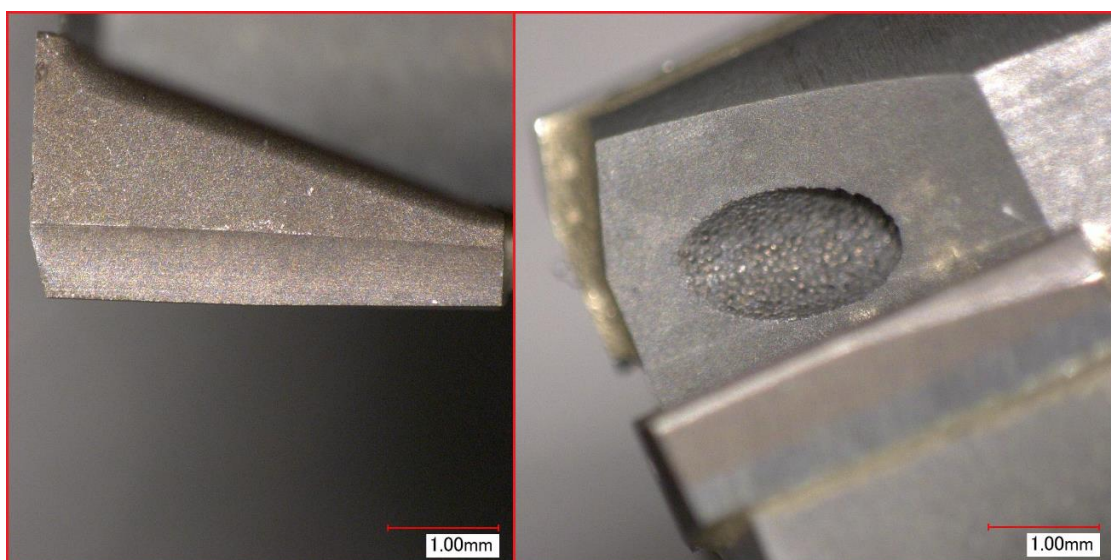
Firma Hamfinal dodala dvě verze výstružníků, které byly svou konstrukcí zcela odlišné od předchozích verzí od ostatních dodavatelů. Jejich odlišnost spočívá v tom, že tělo a stopka nástroje jsou dva odlišné rozebíratelné díly (viz obr. 5.10). Tělo nástroje je tepelně upnuto do stopky nástroje. Tento celek je posléze upnut do upínače rovněž tepelným způsobem. Toto řešení má hlavní výhodu v nižší ceně nástroje, a to z toho důvodu, že stopka nástroje je vyrobena z konstrukční oceli, která je levnější než slinutý karbid, který je použit u ostatních variant. Tělo nástroje je pak stejně jako u ostatních verzí nástrojů vyrobeno ze slinutého karbidu. Naopak nevýhodou tohoto řešení je nižší tuhost nástroje jako celku oproti verzím, kdy tělo i stopka nástroje tvoří jeden celek.



Obr. 5.10 Konstrukce výstružníků od firmy Hamfinal.

Verze H1

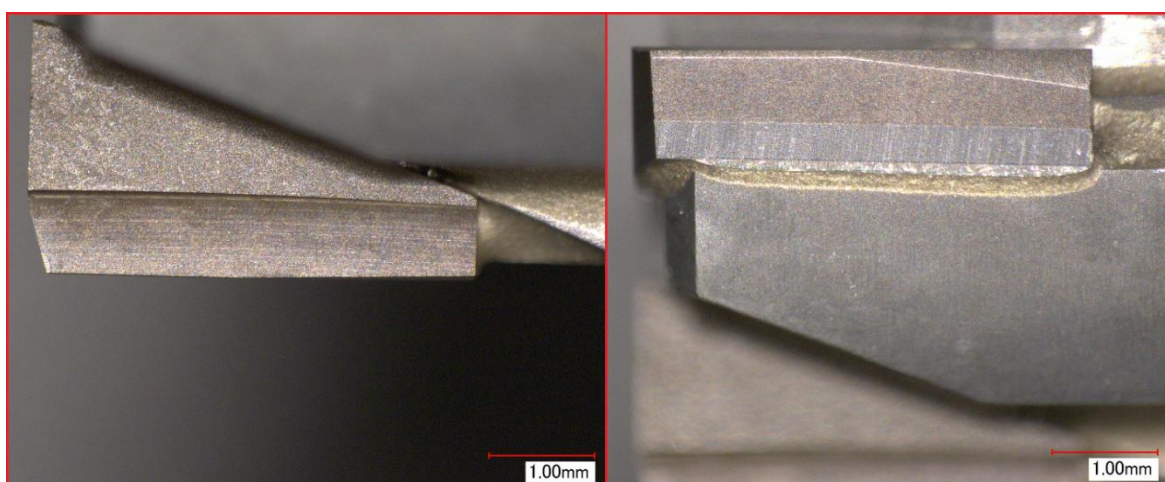
Stejně jako v předchozích případech se jedná o výstružník, který je vybaven čtyřmi přímými zuby rovnoměrně rozloženými po 90° . Chladicí kanály jsou vyvedeny až pod břit, což je výhodné z hlediska intenzivního chlazení místa řezu. Tělo nástroje je na první pohled robustní (viz obr. 5.10) a lze předpokládat, že bude disponovat velkou tuhostí. Úhel nastavení hlavního ostří κ_r byl zvolen 15° . Stejně je tomu i u sériového nástroje. Rovněž rádius na špičce nástroje je minimální, což má pozitivní vliv na odřezávání třísky. Obr. 5.11 znázorňuje pohled na čelo destičky výstružníku verze H1 a vyústění chladicích kanálů až pod břit.



Obr. 5.11 Výstružník verze H1.

Verze H2

Výstružník verze H2 (viz obr. 5.12) má naprosto stejnou konstrukci jako verze H1. Firma Hamfinal použila stejné tělo, na které byla připájena jiná PKNB destička. V porovnání s verzí H1 se jedná o destičku s vyšší tvrdostí, ale nižší houževnatostí, což značí menší odolnost proti křehkému porušení. Geometrie destičky je rovněž stejná jako u verze H1.



Obr. 5.12 Výstružník verze H2.

5.2 Návrh experimentu

Tato podkapitola udává kritéria experimentu, jeho průběh a způsoby vyhodnocení. Zpočátku bylo nutné důkladně promyslet, jaký je vstupní stav obrobku, jak bude experiment probíhat, jaké výstupy jsou z experimentu důležité pro praxi obrábění tělesa CP3 a jaké dopady vzniknou při obrábění nástrojem, který vyrábí mimo danou toleranci.

Jak již bylo uvedeno výše, tak vstupem pro obrábění otvoru pro píst je tepelně zpracovaný obrobek o povrchové tvrdosti 62 ± 2 HRC. Dochází k vystružování otvoru z předhotovené díry, přičemž šířka záběru ostří $a_p \in (0,13 \text{ mm}; 0,19 \text{ mm})$ v závislosti na předvrtání.

Kritéria experimentu jsou shodná s kritérii určenými při zadání úkolu, a to sice udržet kvalitu obráběného otvoru na vysoké úrovni a při tom držet rozměry v horní části tolerance, a to z důvodu menšího zatížení drahého honovacího nástroje, který v následující operaci honuje otvor pro píst a určuje mu tak potřebné geometrické přesnosti, nízkou drsnost a přesné rozměry. Dalším kritériem je potom životnost daného nástroje a cena na jedno obrobené těleso, které disponuje třemi otvory pro píst.

Z předchozích informací bylo rozhodnuto, že budou provedeny testy životnosti jednotlivých nástrojů. Z důvodu eliminace zmetků bylo přistoupeno k průběžné kontrole obráběného otvoru jeho měřením na 3D souřadnicovém měřicím přístroji, přičemž tomu tak bylo u prvního a druhého kusu a potom u každého prvního kusu z výrobní dávky, která čítá 60 kusů. To ve výsledku znamená, že byl měřen kus číslo 1, 2, 3, 63, 123, a tak podobně vyrobený daným testovaným nástrojem a vždy ještě při změně typu. Při obrábění sériovým nástrojem toto měření probíhá jednou za směnu, to znamená u jednoho ze 180 vyrobených kusů plus ještě vždy při změně typu. U kusu číslo 1, 2 a dále pak u dvou kusů ze směny byla měřena drsnost drsnoměrem od firmy Mahr. U každého tělesa je navíc kontrolován průměr otvoru pro píst kalibrem, přičemž stačí, když obsluha zkontroluje jeden ze tří otvorů pro píst na tělese CP3. Reakční doba na nevyšší průměr je tak velmi krátká a nedochází ke zbytečné výrobě zmetků. Pokud dojde ke zjištění, že kus obrobený testovaným nástrojem je zmetek, tak se zjistí jeho dosavadní životnost a dojde k jeho okamžitému vyjmutí ze stroje za účelem posouzení technologem. S vyrobeným zmetkem se poté zachází podle návodu pro neshodné díly. Co se týká parametrů obrábění, tak jsou totožné se sériovým procesem. Otáčky tedy jsou 4400 min^{-1} a posuv je $265 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$.

Výstupem z experimentu jsou zaznamenané životnosti po vyjmutí nástroje ze stroje, jednotlivé protokoly z měření 3D souřadnicovým měřicím strojem, ze kterých lze při větším počtu měření provést statistické vyhodnocení pomocí statistického programu qs-stat. Dalším výstupem jsou potom protokoly z drsnoměru od firmy Mahr. Dalším výstupem potom bude cena za jeden obrobený kus, která vychází ze znalosti životnosti a ceny nástroje. Cena nástroje za jeden kus je velmi důležitý parametr, kterým lze porovnat, zda jeden nástroj je opravdu vhodnější pro danou aplikaci, co se týká technicko-ekonomického hlediska. Nástroj může být sice dražší, ale disponuje větší životností, a tím je cena za jeden obrobený kus nižší. Všechny sledované parametry byly následně porovnány se současným sériovým nástrojem a zhodnoceny.

Pro praxi si je z experimentu možné vzít hlavně předpokládané životnosti a také změnu rozměrů obráběného otvoru v závislosti na opotřebení.

5.3 Zhodnocení otestovaných nástrojů

V této fázi již byly otestovány všechny dodané nástroje. V následujících podkapitolách budou rozebrány všechny otestované nástroje a bude zhodnocena jejich vhodnost k nasazení do série. Rozhodujícím kritériem bude cena za jeden vyrobený kus. Toto kritérium bude z důvodu ochrany obchodní politiky firmy Bosch Diesel s.r.o., udáváno koeficientem k_{cki} , přičemž sériový nástroj bude mít koeficient roven jedné. Pokud bude koeficient nabývat hodnot menších než jedna, tak se dotyčný nástroj bude hodit více na obrábění daného otvoru než nástroj sériový. V případě, že koeficient bude právě jedna, pak budou nástroje srovnatelné. Pokud bude koeficient nabývat hodnot větších než jedna, pak bude testovaná varianta nástroje pro obrábění otvoru pro píst méně vhodná než sériový nástroj. Logika určování koeficientu je znázorněna výpočtovým vztahem 5.1.

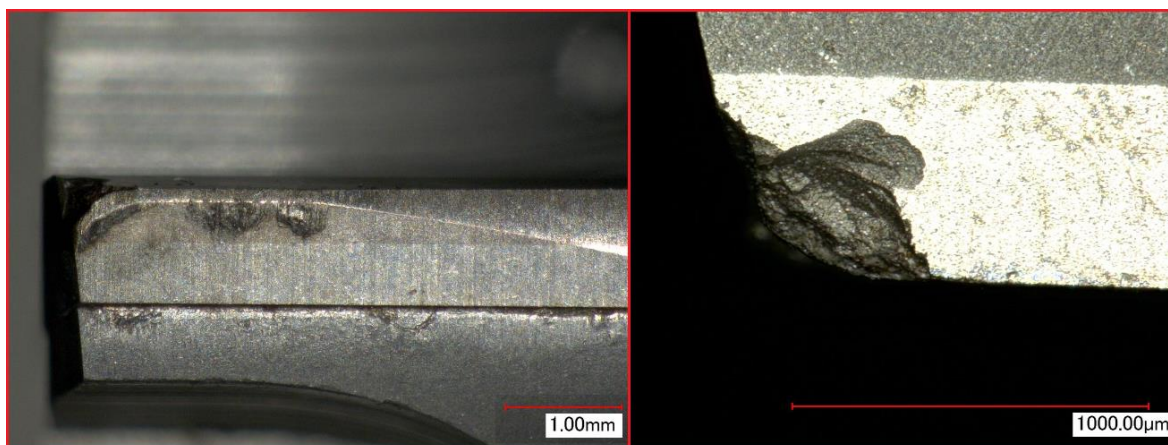
$$k_{cki} = \frac{N_{cki}}{N_{cks}} \quad [-] \quad (5.1)$$

kde: N_{cki} [Kč*ks⁻¹] - náklady na obrobění jednoho kusu testovaným nástrojem,
 N_{cks} [Kč*ks⁻¹] - náklady na obrobění jednoho kusu sériovým nástrojem.

5.3.1 Gühring

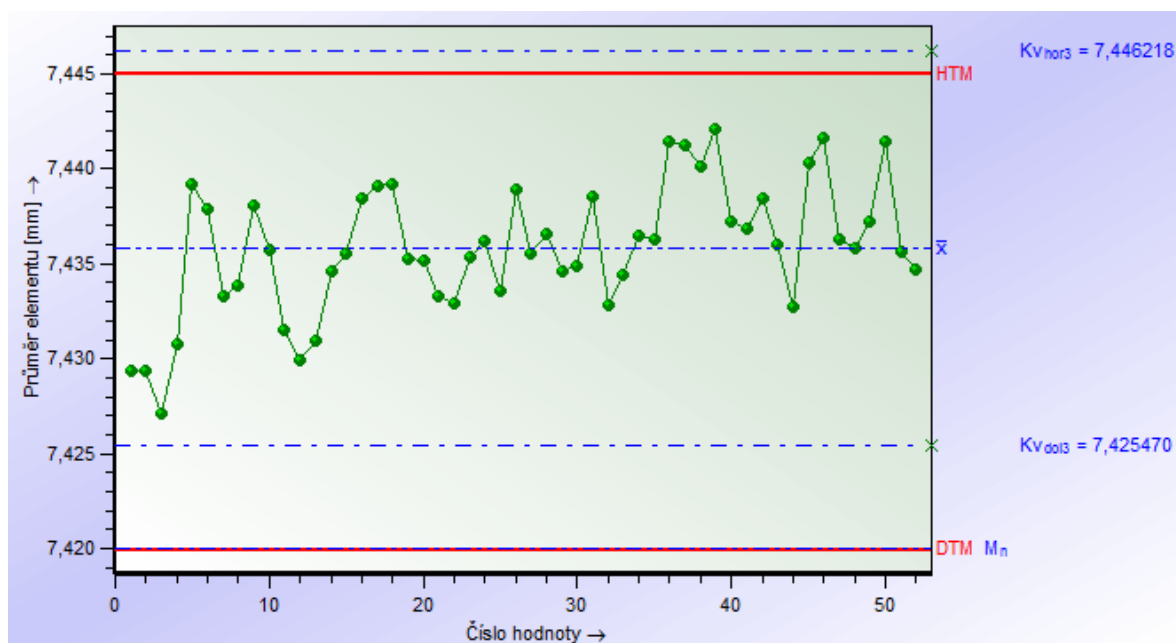
Verze G1

Sériový nástroj vyrábí díru o požadovaných parametrech s průměrnou životností 750 ks za rok 2017. K výměně nástroje dochází v momentě, kdy nástroj začne vyrábět zmetky nebo při dosažení 900 vyrobených kusů. Dle vzorce 5.1 je koeficient $k_{ckG1} = 1$. Břitové destičky na konci životnosti nástroje jsou viditelné na obr. 5.13. Z obrázku je zřejmé, že břitová destička je značně poškozená křehkým lomem, který vznikl vlivem nadměrného opotřebení břitu. Na obrázku vlevo je také viditelné opotřebení na hřbetě, které vzniklo abrazivním působením.



Obr. 5.13 Výstružník verze G1 na konci životnosti.

Z obrázku 5.14 je zřejmý průběh měření průměru elementu po dobu životnosti nástroje. Po sobě jdoucí naměřené hodnoty mají poměrně velký rozptyl, což ve výsledku znamená, že horní kvartil je větší než horní toleranční míra. To znamená, že proces je nezpůsobilý a musí být předepsáno stoprocentní měření. Graf byl vypočítán přes statistický software qs-stat.

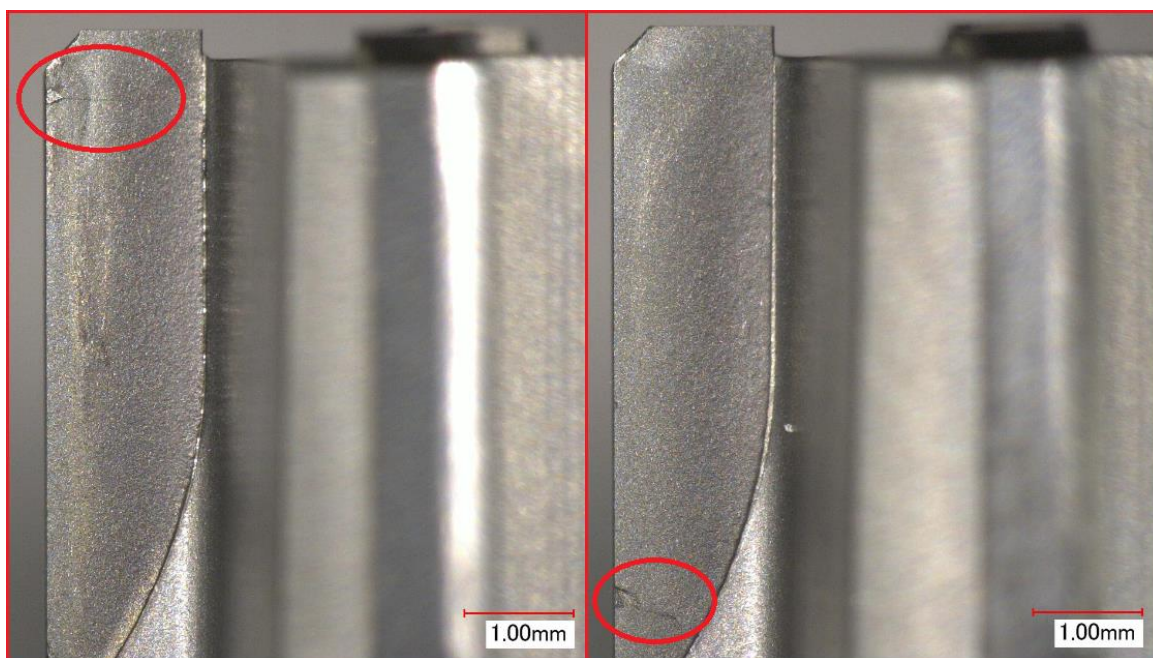


Obr. 5.14 Průměr otvoru pro píst napříč životností nástroje G1.

5.3.2 Sandvik

Verze S1

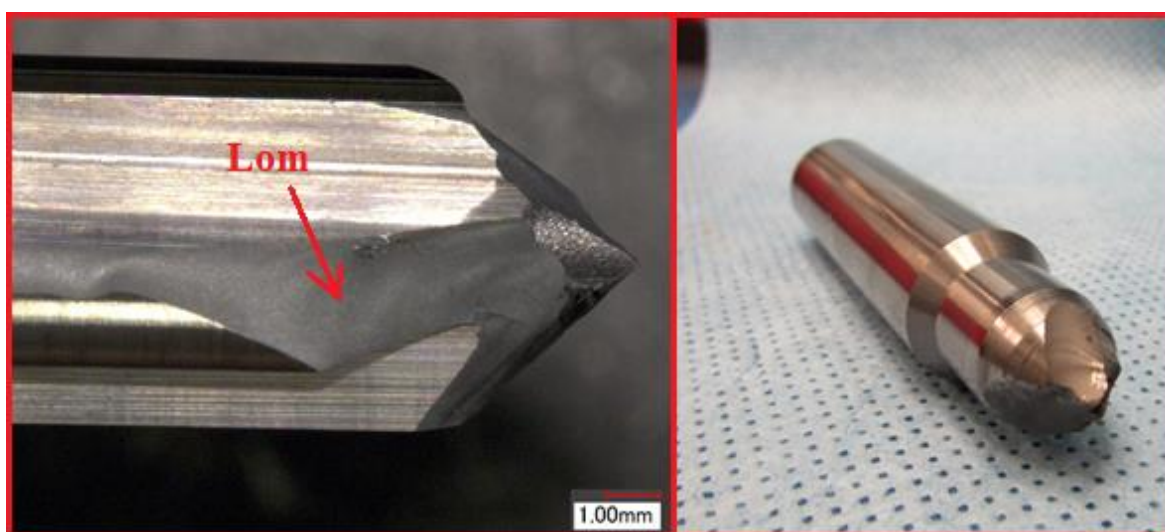
Výstružník této verze se ukázal jako značně nevhodný. Od třetího kusu nebyla dodržena požadovaná tolerance kontrolovaná kalibrem, přičemž se jeho hodnota pohybovala kolem spodní hodnoty tolerance, což značí, že zmetkovou díru lze opravit. Koeficient k_{ckS1} je 520. Tato hodnota má obrovskou velikost hlavně z toho důvodu, že nástroj vyrobil pouze dva kusy. Navíc z obr. 5.15 je viditelné poškození bříty nástroje, a to již po obrobení 8 těles CP3. Tento výstružník byl tedy pro neuspokojivé výsledky vyřazen z vhodných kandidátů.



Obr. 5.15 Výstružník verze S1 po obrobení 8 kusů.

Verze S2

Výstružník verze S2 se zalomil v otvoru pro píst již při obrábění druhého kusu. Z toho vyplývá, že výstružník neměl dostatečnou tuhost těla nebo došlo k chybě upnutí nedostatečným očištěním dosedacích ploch od třísek obsluhou stroje. Výstružník této verze nebyl na opětovný test dodán. Ze získaných dat tedy lze stanovit koeficient k_{ckS2} , který nabývá hodnoty 1 040. Takto velká hodnota je zapříčiněna hlavně nízkým vyrobeným množstvím tímto výstružníkem. Z obr. 5.16 je jasně viditelné, že z výstružníku S2 zůstala pouze upínací stopka a osazení těla. Místo výběhu drážek pro odvod třísek z řezu se ukázalo jako nejvíce náchylné na lom nástroje. Tento výstružník byl stejně jako verze S1 vyřazen z testu pro neuspokojivé výsledky.



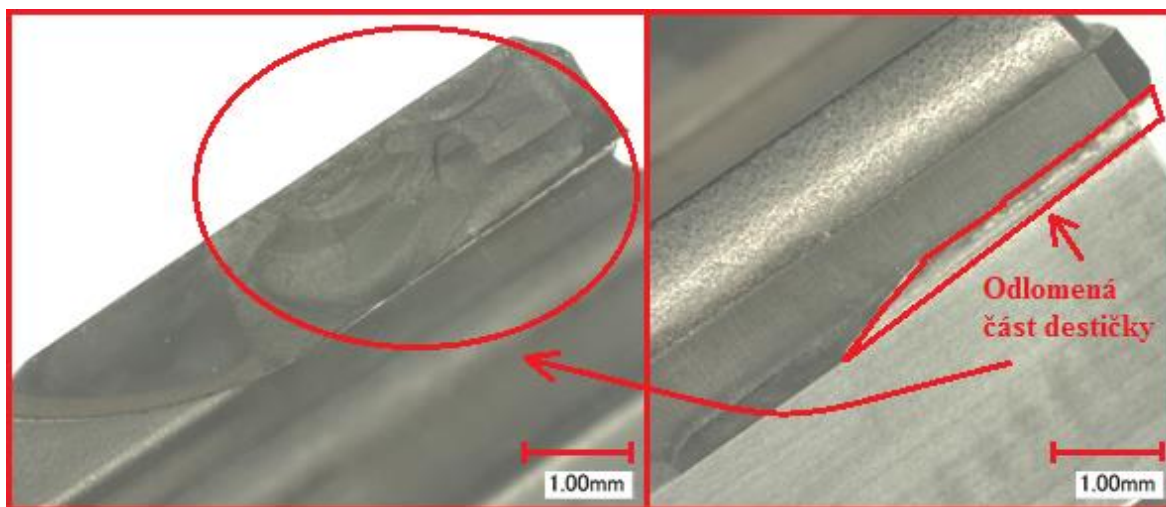
Obr. 5.16 Zalomený výstružník verze S2 po obrobení dvou kusů.

Verze S3

Tento výstružník vypadl z listiny vhodných kandidátů hned po obrobení prvního kusu. Z protokolů z 3D měřicího stroje je zřejmé, že hodnota rovnoběžnosti otvoru pro píst (viz obr. 4.8) je mimo vymezenou toleranci a navíc je naměřen velký rozdíl průměrů v řezech A a C. Tuto skutečnost potvrdila i kontrola otvoru kalibrem. Výstružník verze S3 byl tedy vyřazen z testu pro neuspokojivé výsledky. Jelikož tento nástroj neobrobil ani jeden kus úspěšně, tak se koeficient k_{ckS3} rovná nekonečnu.

Verze S4

Verze výstružníku S4 se ukázala jako nejlepší dodaný nástroj od firmy Sandvik, avšak stále nebylo dosaženo uspokojivých výsledků. Tímto nástrojem bylo vyrobeno 54 kusů v toleranci s tím, že se průměr otvoru blížil horní toleranci. Na 55. obráběném tělese tímto nástrojem byl zjištěn velký průměr otvoru pro píst, nástroj byl vyjmut ze stroje a bylo zjištěno poškození nástroje lomovým charakterem. Z předchozích informací plyne, že koeficient $k_{ckS4} = 18,65$. To znamená, že tento nástroj je 18,65krát horší než sériový nástroj G1 od firmy Gühring. Tento nástroj byl tedy vyřazen z testu pro neuspokojivé výsledky. Poškozený výstružník S4 je znázorněn na obr. 5.17.



Obr. 5.17 Poškozený výstružník verze S4.

U všech čtyřech variant výstružníků od firmy Sandvik byla také zjišťována maximální hodnota největších výšek profilu Rz. Pro jednotlivé varianty byly naměřeny hodnoty okolo Rz1, přičemž maximální přípustná hodnota je $Rz_{max}8$. Z hlediska drsností tedy byly nástroje vyhovující.

Z předchozích odstavců ale vyplývá, že ani jedna verze výstružníku od firmy Sandvik nebyla vyhovující pro obrábění otvoru pro píst, a tudíž všechny čtyři verze výstružníku byly vyřazeny z dlouhodobého testování.

5.3.3 Iscar

Verze I1

Výstružník verze I1 disponoval životností 54 kusů, což se od požadované životnosti značně liší. Tento nástroj byl vyřazen z důvodu malého průměru obrobené díry při kontrole kalibrem. Z měrových protokolů byl nadále zjištěn velký rozdíl průměrů v jednotlivých řezech otvoru pro píst, což značí, že obrobená díra má charakter kuželu. Tomuto jevu může napomáhat i velký poloměr zaoblení špičky. Vzhledem k nízké životnosti se koeficient $k_{ckI1} = 37,45$. To znamená, že výstružník verze I1 je 37,45krát horší z hlediska nákladů na jeden obrobený kus než nástroj sériový. Tento výstružník tedy nebyl zařazen do listiny vhodných kandidátů pro dlouhodobější test.

Verze I2

Výstružník I2 je modifikovanou verzí výstružníku verze I1. Modifikace se týkala úpravy rádiusu na špičce nástroje, který se oproti předchozí verzi zmenšil, což predikovalo lepší odřezávání třísky. Tato modifikace ovšem nebyla účelná a nástroj udržel parametry obráběné díry jen 60 kusů. Poté nastaly podobné problémy jako u verze I1, a to sice nedodržení předepsaného průměru v celé délce otvoru pro píst. Dalším problémem byl velký rozdíl mezi průměrem v řezu A a C a z toho plynoucí velká kuželovitost díry. Koeficient $k_{ckI2} = 34,25$, a to hlavně z důvodu příliš malé životnosti této verze nástroje. Z důvodů uvedených výše je zřejmé, že nástroj I2 je také značně nevhodný pro obrábění otvoru pro píst, a tak došlo k jeho vyřazení z testu. Výstružník verze I2 je znázorněn na obr. 5.18 na konci své životnosti, tedy po obrobení 60 kusů.



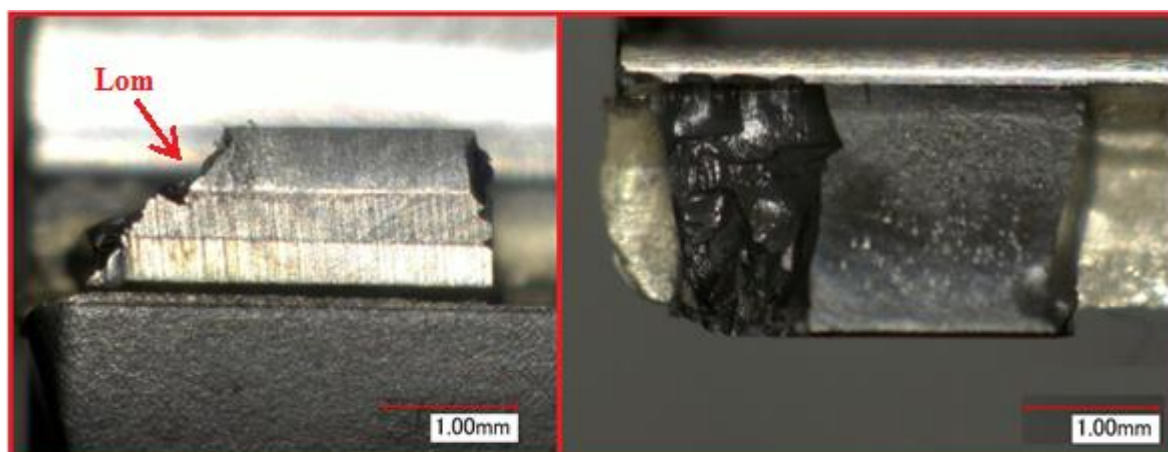
Obr. 5.18 Výstružník I2 poškozený lomem.

Z předchozích testů životnosti je zřejmé, že firma Iscar nedokázala dodat takový výstružník, který by se alespoň přiblížil parametrům sériového nástroje. Obě varianty potom byly vyřazeny z dlouhodobějších testů.

5.3.4 LMT

Verze L1

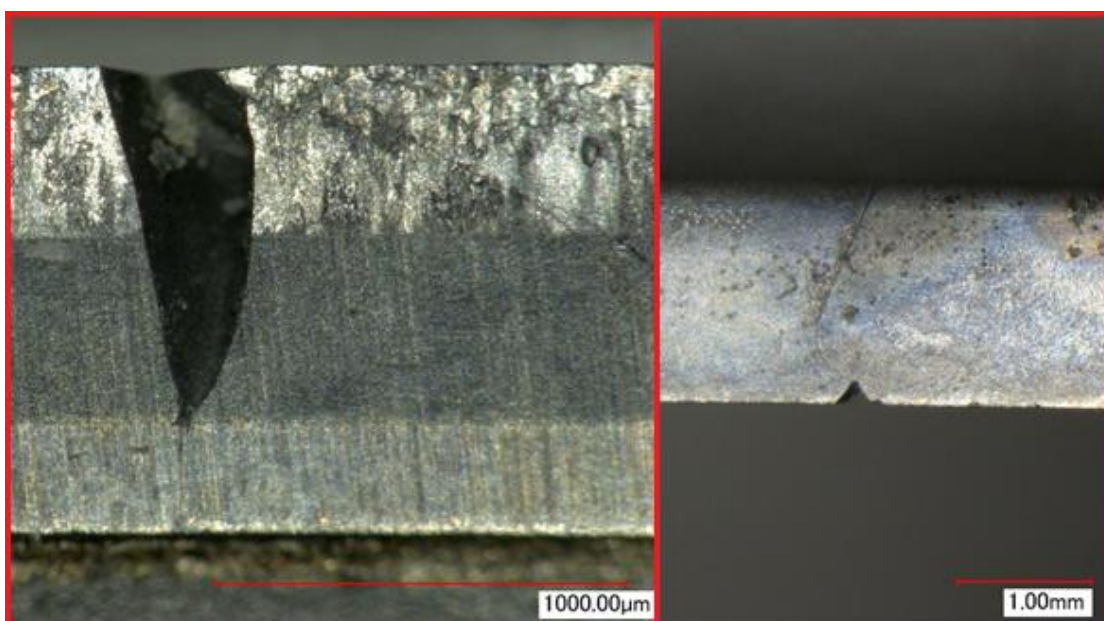
Jak již bylo zmíněno výše, tak firma LMT měla pouze minimální zkušenosti s výrobou rezných nástrojů z PKNB. Tato skutečnost se projevila na kvalitě dodaného výstružníku L1, který neobrobil úspěšně ani jeden kus. Z toho tedy vyplývá, že je značně nevhodný pro obrábění otvoru pro píst. Koeficient k_{ckL1} je tedy nekonečno. Hned první kus byl po kontrole kalibrem označen za zmetek a následnou kontrolou nástroje bylo zjištěno, že tři ze čtyř destiček buď chybí úplně, nebo alespoň jejich části. Poškozený výstružník po obrobení jednoho kusu je znázorněn na obr. 5.19.



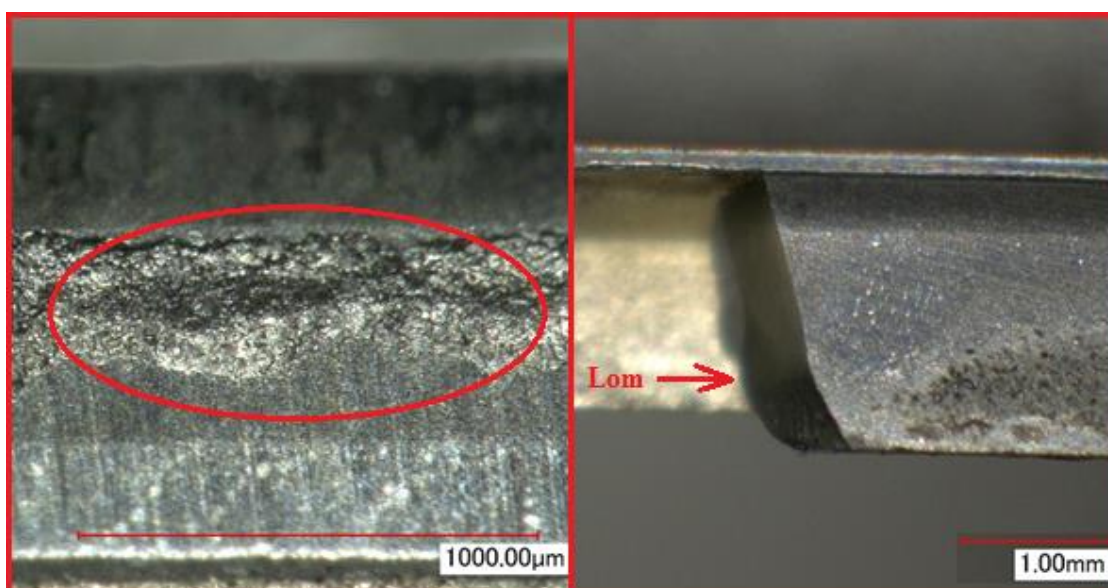
Obr. 5.19 Výstružník verze L1 poškozený lomem.

Verze L2

Geometrie výstružníku verze L2 je stejná jako u verze L1, pouze podle dodavatele byla použita houževnatější PKNB destička. Výrobce nástroje si vyžádal změnu posuvu z původních $265 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ na $660 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ při otáčkách $4\,400 \text{ min}^{-1}$. Hodnota otáček se nijak neliší od sériového stavu. Nástroj však ani po úpravě rezných podmínek neobrobil ani jeden kus požadované kvality a navíc opět došlo k vylamování a prasklinám řezné destičky (viz obr. 5.20). Na obr. 5.21 je navíc viditelné úplné odlomení části břitu a opotřebení hřbetu nástroje. Koeficient k_{ckL1} je stejně jako u verze L1 roven nekonečnu, a z toho vyplývá, že tato verze výstružníku je pro obrábění otvoru pro píst značně nevhodná. Je tedy vyřazena z dlouhodobějšího testování.



Obr. 5.20 Výstružník L2 po obrobění jednoho kusu.



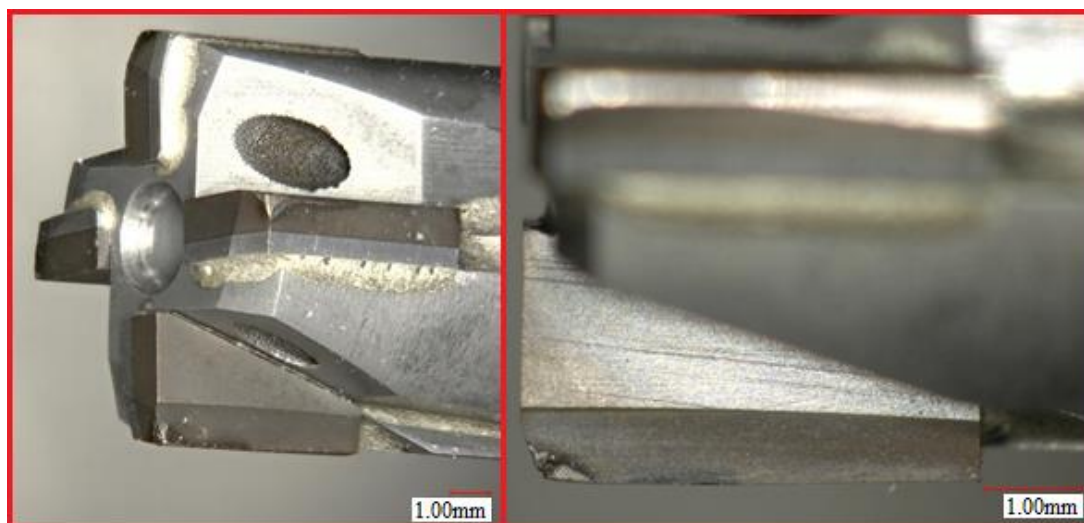
Obr. 5.21 Poškozený výstružník verze L2.

Z předchozího zjištění je zřejmé, že ani firma LMT nedokázala vyvinout výstružník, který by kvalitou obráběné díry a požadovanou životností dokázal nahradit sériový nástroj. Naopak výstružníky verze L1 a L2 nedokázaly obrobít ani jeden kus předepsaných parametrů a byly vyřazeny z dlouhodobých testů.

5.3.5 Hamfinal

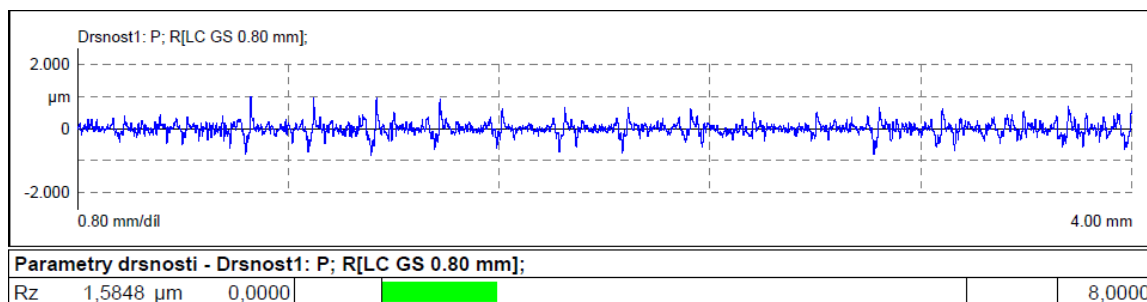
Verze H1

Výstružník verze H1 při testu obrobil v požadovaných parametrech 660 kusů, což znamená, že tento nástroj dosahuje největší životnosti ze všech doposud testovaných verzí. Proto bylo přistoupeno k nasazení dalších dvou nástrojů této verze do testu, přičemž byly zaznamenány životnosti 650 kusů a 900 kusů. Průměrná životnost těchto tří nástrojů je tedy 740 obrobených kusů. Tato hodnota je srovnatelná se sériovým nástrojem a při nižší ceně nástroje verze H1 oproti sériovému nástroji G1 se koeficient k_{ckH1} rovná 0,84. Hodnota koeficientu ukazuje, že tato verze výstružníku je nejvýhodnější z testovaných verzí a navíc je i výhodnější než sériový nástroj. Na obr. 5.22 je znázorněn výstružník verze H1 na konci své životnosti. Při porovnání s ostatními testovanými výstružníky je zřejmé, že je poškození břitové destičky výstružníku H1 minimální vzhledem k počtu obrobených kusů.



Obr. 5.22 Výstružník verze H1 na konci životnosti.

Nástroj vyhovuje z hlediska životnosti, a tak dalším kontrolovaným parametrem je drsnost obrobené díry. Konkrétně maximální hodnotu největších výšek profilu Rz_{max} 8. Z obr. 5.23 je zřejmé, že naměřená hodnota 1,5848 μm zdaleka nedosahuje maximální povolené hodnoty.



Obr. 5.23 Výřez protokolu drsnosti obrobené díry nástrojem H1.

Naměřená data byla podle podkapitoly 5.2 zpracována statistickým programem qs-stat, přičemž sledovaným znakem byl zvolen průměr otvoru pro píst, který je z výkresových parametrů nejméně předvídatelný. Výstup z programu qs-stat je na obr. 5.24. Zde je možné si všimnout, že průměr otvoru pro píst klesá se zvyšující se životností a jeho hodnota leží bezpečně mezi DTM a HTM. Přidanou hodnotou je i ta skutečnost, že proces je dle statistického programu qs-stat způsobilý, což znamená, že není nutná stoprocentní kontrola obrobeného otvoru na rozdíl od sériového výstružníku G1.



Obr. 5.24 Průměr otvoru pro píst napříč životností nástroje H1.

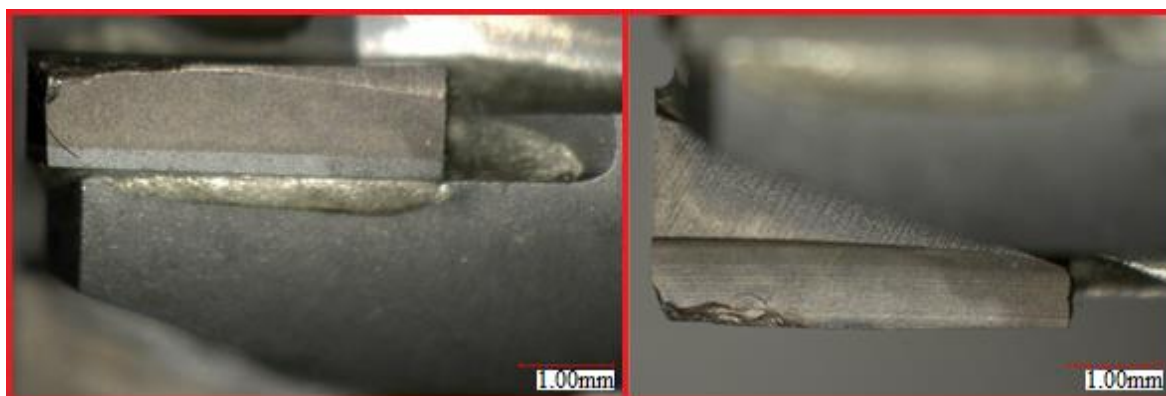
Z předchozích odstavců vyplývá, že tento výstružník je vhodný pro obrábění otvoru pro píst z hlediska životnosti, ceny za jeden obrobený kus a požadované drsnosti.

Verze H2

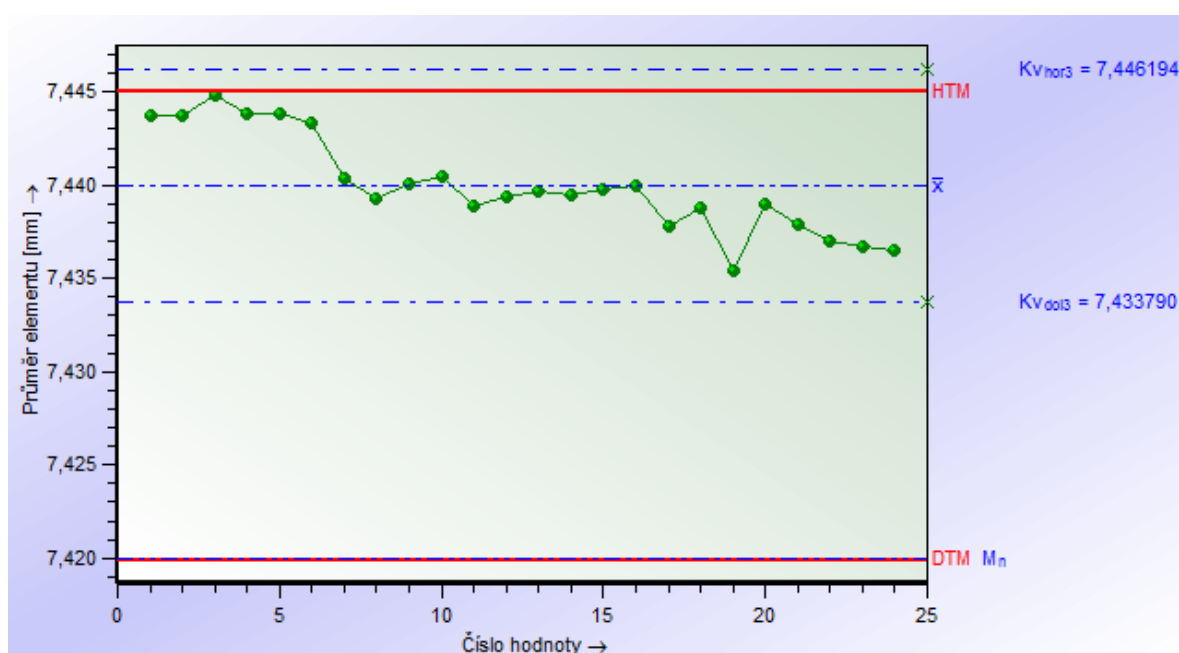
Co se týká geometrie břitové destičky, je výstružník verze H2 stejný jako H1. Odlišnost lze najít pouze v tvrdosti PKNB destičky, která je u verze H2 větší. S větší tvrdostí dochází ale ke snížení houževnatosti. V tomto případě se tento stav projevil větším opotřebením destičky, avšak nástroj byl vyměněn až po obrobení 627 kusů, což naznačuje, že se jedná o druhý nejlepší nástroj z hlediska jeho životnosti. Koeficient k_{ckH2} je pak roven 0,99, přičemž tato hodnota může být zkreslena tím faktem, že byl otestován pouze jeden nástroj, a je tedy statisticky nevěrohodná. Z obr. 5.25 je zřejmé, že je zde výraznější poškození břitu. V relativně velké míře se jedná se o lomové porušení špičky břitu.

Z toho důvodu, že verze H1 vykazuje výrazně lepší výsledky než verze H2, tak bylo rozhodnuto, že verze výstružníku nebude dlouhodoběji testována. Hodnoty drsnosti se pohybují do 2 μm a zdaleka tak nedosahují maximálních hodnot.

Na obr. 5.26 je vidět průběh průměrů otvoru pro píst napříč životností výstružníku H2. Naměřené hodnoty se pohybují výhradně v horní polovině tolerančního pole. Pro určení způsobilosti procesu není dostatečný počet hodnot.



Obr. 5.25 Výstružník verze H2 na konci životnosti.



Obr. 5.26 Průměr otvoru pro píst napříč životností nástroje H2.

5.3.6 Souhrn

Celkem bylo otestováno 10 verzí výstružníků od různých dodavatelů, které byly srovnávány se sériovým výstružníkem od firmy Gühring. Mezi dodavateli se objevily celosvětové firmy vyrábějící rezné nástroje jako Sandvik, Iscar, Hamfinal a jedna méně známá firma LMT. Po otestování všech dodaných verzí lze tyto dodavatele rozdělit do dvou skupin. První skupinou jsou dodavatelé Sandvik, Iscar a LMT, které vůbec nesplnily očekávání hlavně z hlediska jejich životnosti. Do druhé skupiny patří dodavatel sériového nástroje Gühring a dodavatel dvou testovaných verzí Hamfinal. Obě verze od firmy Hamfinal značně převýšili ostatní testované nástroje a v porovnání se sériovým nástrojem dosahovaly dokonce nižší ceny za jeden obrobený kus, přičemž při použití verze H1 je úspora v ceně nástroje za jeden obrobený kus 16 %. Hodnota finanční úspory při používání tohoto nástroje za jeden rok se může pohybovat ve stovkách tisíců českých korun v závislosti na počtu vyráběných kusů. Tab. 5.1 shrnuje všechny testované verze a jejich dosažené výsledky.

Tab. 5.1 Sumární tabulka testovaných verzí výstružníků.

Dodavatel	Stav	Verze	Koeficient k_{cki}	Status
Gühring	Sériový nástroj	G1	1	Vyhovuje
Sandvik	Testovaný nástroj	S1	520	Nevyhovuje
		S2	1 040	Nevyhovuje
		S3	∞	Nevyhovuje
		S4	18,65	Nevyhovuje
Iscar	Testovaný nástroj	I1	37,45	Nevyhovuje
		I2	34,25	Nevyhovuje
LMT	Testovaný nástroj	L1	∞	Nevyhovuje
		L2	∞	Nevyhovuje
Hamfinal	Testovaný nástroj	H1	0,84	Vyhovuje
		H2	0,99	Vyhovuje

ZÁVĚR

Byl zanalyzován výrobní proces tělesa dieselového čerpadla CP3 se zaměřením na obrábění otvoru pro píst včetně vlivu předchozích operací. Dále byla posuzována opodstatněnost výkresových požadavků na obráběný otvor z hlediska následující operace, kterou je honování. Na základě získaných informací bylo rozhodnuto, že je zde velký vliv předchozích operací a byla potvrzena opodstatněnost výkresových požadavků.

Na základě předchozího zjištění byly objednány výstružníky od firem Sandvik, Iscar, LMT a Hamfinal ve více verzích, u kterých byla určena životnost a náklady na jeden obrobený kus v souladu s předem stanovenými podmínkami. Poté došlo k porovnání těchto parametrů se sériovým nástrojem pro obrábění otvoru pro píst od firmy Gühring. Vyhodnocení probíhalo pomocí koeficientu k_{cki} , který určuje úsporu nákladů na výstružník vztáženou na jeden obrobený kus. Z experimentu byly vyvozeny následující závěry:

- Výstružníky dodané firmami Sandvik, Iscar a LMT nejsou vhodné pro danou aplikaci, protože jejich cena v přepočtu na jeden obrobený kus značně převyšuje cenu sériového nástroje.
- Druhý výstružník verze H2 od firmy Hamfinal nabýval hodnoty $k_{ckH2} = 0,99$, což značí, že tento výstružník je srovnatelný se sériovým nástrojem z hlediska ceny na jeden obrobený kus.
- Nejlepší výsledky vykazoval první výstružník verze H1 od firmy Hamfinal, kde byla vypočítána hodnota $k_{ckH1} = 0,84$. To znamená, že tento výstružník byl o 16 % levnější na jeden obrobený kus než sériový nástroj. Navíc bylo zjištěno, že při použití tohoto výstružníku je způsobilý proces, tudíž není nutná 100% kontrola obrobeného otvoru na rozdíl od sériového výstružníku, kde je proces nezpůsobilý.

Verzi výstružníku H1 od firmy Hamfinal je tedy možné okamžitě používat pro obrábění otvoru pro píst v sériové výrobě, protože dodržuje bez problémů výkresové požadavky a je nejlevnější z hlediska ceny za jeden obrobený kus.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KRÁLÍK, J. Robert Bosch GmbH, *Bosch v České republice*. 2007. 102 stran. Praha: BB Partner, s.r.o., neprodejně
2. Bosch Diesel Jihlava spol. s.r.o., *Firemní a školicí materiály*.
3. HUMÁR, A. *Technologie I – Technologie obrábění – 1.část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění. 2004. 138 stran. [online]. [vid. 2017-08-03]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>
4. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. První. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
5. MÁDL, Jan. ČVUT. *Teorie obrábění*. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 1989.
6. GHANI, J. A., M. RIZAL, M. Z. NUAWI, M. J. GHAZALI a C. H. C. HARON. Monitoring online cuttingtoolwearusinglow-costtechnique and user-friendly GUI. *Wear*. 2011. s. 2619-2624. DOI: 10.1016/j.wear.2011.01.038.
7. DIMLA, E. a Snr. DIMLA. Sensor signalsfortool-wear monitoring in metal cuttingoperations - a reviewofmethods. *MachineTools&Manufacture* [online]. 1999, 40, s. 1073-1098. DOI: S0890-6955(99)00122-4.
8. DE VOS, Patrik. *Příručka pro technology: Opotřebení se nevyhneme*. 2012, (6). [vid. 2017-08-08]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-opotrebeni-se-nevyhneme.html>
9. HUMÁR, A. *Technologie I – Technologie obrábění – 2.část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění. 2004. 95 stran. [online]. [vid. 2017-09-10]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>
10. DRIML, Bohuslav. *Vrtání, vyhrubování, vystružování a zahlubování* [online]. In: . s. 14 [vid. 2017-09-10].
11. HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Syllabus [online]. 2006, [vid. 2017-10-03]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr./obrabeni/opory-save/mat_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf
12. MARTINCOVÁ, Zdeňka. Supertvrdé řezné materiály a jejich efektivní využití: Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 65 s., příloh 3. Vedoucí práce doc. Ing. Anton Humár, CSc.
13. *Soustružení tvrzených součástí pomocí CBN* [online]. 2012 [vid. 2017-10-06]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/_layouts/15/tibp/downloadshandler.ashx?url=https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/cs-cz/c-2940-137.pdf&filename=C-2940-137.pdf&view=true
14. RAUSCHER, T. *Analýza interních výpadků na natavené třísky ve firmě Bosch Diesel s.r.o.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 57 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Fiala, Ph.D.

15. ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1999
16. Bumbálek, B., Odvody, V. a Ošřádal B., Drsnost povrchu. Praha, SNTL 1989.
17. *Industry Pilot: GROB 500 BZ* [online]. [vid. 2017-10-23]. Dostupné z: <https://industry-pilot.de/gebrauchtmaschinen/Bearbeitungszentrum-Horizontal-GROB-BZ-500-L/p33087>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
3D	[-]	trojrozměrný prostor
CBN	[-]	cubicboron nitrid
CNC	[-]	Computernumericalcontrol
CP3	[-]	common pump třetí generace
CP4	[-]	common pump čtvrté generace pro osobní automobily
CPN5	[-]	common pump páté generace pro nákladní automobily
DRV	[-]	tlakový regulační ventil
DTM	[mm]	dolní toleranční míra
GX	[-]	označení nástroje Gühring
HM	[-]	Mikrotvrдост
HRC	[-]	tvrdost podle Rockwella
HTM	[mm]	horní toleranční míra
HV	[-]	tvrdost podle Vickerse
HX	[-]	označení nástroje Hamfinal
IX	[-]	označení nástroje Iscar
KNB	[-]	kubický nitrid boru
KT	[mm]	hloubka výmolu na čele
KVy	[mm]	radiální opotřebení špičky
LX	[-]	označení nástroje LMT
PFM	[-]	vysokotlaké dieselové čerpadlo
PKNB	[-]	polykrystalický kubický nitrid boru
SK	[-]	slinutý karbid
SX	[-]	označení nástroje Sandvik
TXX XXX	[-]	označení nástroje
VB	[mm]	šířka opotřebení na hřbetě

Symbol	Jednotka	Popis
D	[mm]	jmenovitý průměr díry
F	[N]	Síla
F_c	[N]	řezná síla
N_{cki}	[Kč/ks]	náklady na obrobení 1 kusu testovaným nástrojem
N_{cks}	[Kč/ks]	náklady na obrobení 1 kusu sériovým nástrojem
R_{zmax}	[μm]	maximální hodnota největších výšek profilu
a	[mm]	vzdálenost atomů PKNB horizontálně
a_p	[mm]	šířka záběru ostří
c	[mm]	vzdálenost atomů PKNB vertikálně
f	[mm/min]	posuv za minutu
k_c	[MPa]	měrný řezný odpor
k_{cki}	[-]	koeficient úspory při použití daného nástroje
l_p	[mm]	hloubka zpevnění materiálu
n	[min ⁻¹]	otáčky
p	[mm]	Přídavek
v_c	[m/min]	řezná rychlost
v_f	[mm/min]	posuvová rychlost
γ	[°]	nástrojový úhel čela
δ	[°]	nástrojový úhel řezu
κ_r	[°]	úhel nastavení hlavního ostří

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Materiálový list oceli 1.7149
Příloha 2 Převodní tabulka tvrdosti

PŘÍLOHA 1 – MATERIÁLOVÝ LIST OCELI 1.7149

WNr. (číslo materiálu) 1.7149		Mn-Cr-S ocel k cementování				OCEL Kurzname (značka) 20MnCrS5	
Chemické složení [hm. %]							
C	Si	Mn	P	S	Cr		
0,17–0,22	max 0,40	1,10–1,40	max 0,035	0,020–0,040	1,00–1,30		
Normy DIN							
DIN 1652/3-90 – cementační oceli							
DIN 17210-86 – cementační oceli							
DIN EN 10084-95 – cementační oceli							
Mechanické vlastnosti							
Rozměr t, d [mm]	–	–	–	11	30	63	
Stav	G ¹⁾	BG ²⁾	BF ³⁾	kalený a popouštěný			
Mez kluzu R _e [MPa] min	–	–	–	735	685	540	
Mez pevnosti R _m [MPa]	–	–	–	1 080–1 370	980–1 270	780–1 080	
Tažnost A ₅ [%] min	–	–	–	7	8	10	
Kontrakce Z [%] min	–	–	–	30	35	35	
Nárazová práce KV [J] min	–	–	–	27	35	–	
Tvrdość HB	max 217	152–207	170–217	–	–	–	
Fyzikální vlastnosti							
Hustota ρ [kg.m ⁻³]	7 850						
Technologické údaje							
TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ							
normalizační žíhání BF ²⁾	850–950 °C						
BG ³⁾	900–1 000 °C	ochlazovat na vzduchu					
žíhání na měkko	650–700 °C	ochlazovat v peci					
cementace	880–980 °C	přímo kalit do oleje nebo do teplé lázně 160–250 °C nebo ochlazovat v peci nebo na vzduchu					
kalení na jádro	860–900 °C	ochlazovat v oleji nebo v teplé lázni, příp. ve vodě					
na vrstvu	780–820 °C	ochlazovat v oleji nebo v teplé lázni, příp. ve vodě					
popouštění	170–210 °C						
prokalitelnost Jominy 1 mm	41–49 HRC						
TVAŘITELNOST							
teploty tváření	1 100–850 °C						
OBROBITELNOST							
velmi dobrá – ocel se zaručeným obsahem S							
Použití							
Převody, klouby, ozubená kola, talířová a kuželová kola, hřídele a čepy větších rozměrů a podobné části s vyšší pevností v jádře.							

Ostatní vlastnosti

Desoxidace – uklidněná

Porovnání se zahraničními materiály

<i>ISO</i>		<i>EURO</i>		<i>Česká republika</i>	
–	–	–	–	–	–
<i>Francie</i>		<i>Velká Británie</i>		<i>Rusko</i>	
–	–	–	–	–	–
<i>USA</i>		<i>Japonsko</i>		<i>Kanada</i>	
–	–	–	–	–	–
<i>Itálie</i>		<i>Rakousko</i>		<i>Švédsko</i>	
–	–	–	–	–	–
<i>Polsko</i>		<i>Maďarsko</i>		<i>Norsko</i>	
–	–	–	–	–	–
<i>Finsko</i>		<i>Švýcarsko</i>		<i>Španělsko</i>	
–	–	–	–	–	–
<i>Jugoslávie</i>		<i>Rumunsko</i>		–	
Č.4382	JUS C.B9.020-89	20MnCr12S	STAS 791-88	–	

Poznámky

- 1) žihání na měkko
- 2) tepelné zpracování pro získání feriticko-perlitické struktury
- 3) tepelné zpracování pro dosažení určité pevnosti

PŘÍLOHA 2 – PŘEVODNÍ TABULKA TVRDOSTI

Rockwell			Brinell		Vickers	Shore
HRA	HRB	HRC	30000 kg	500 kg	136	
600 N kužel	1500 N 1/16" kulička	1500 N kužel	10mm ocel. kulička	10mm ocel. kulička	diam. jehlan	skleroskop
86,5		70			1076	101
86		69			1044	99
85,6		68			940	97
85		67			900	95
84,5		66			865	92
83,9		65	739		832	91
83,4		64	722		800	88
82,8		63	705		772	87
82,3		62	688		746	85
81,8		61	670		720	83
81,2		60	654		697	81
80,7		59	634		674	80
80,1		58	615		653	78
79,6		57	595		633	76
79		56	577		613	75
78,5	120	55	560		595	74
78	120	54	543		577	72
77,4	119	53	525		560	71
76,8	119	52	500		544	69
76,3	118	51	487		528	68
75,9	117	50	475		513	67
75,2	117	49	464		498	66
74,7	116	48	451		484	64
74,1	116	47	442		471	63
73,6	115	46	432		458	62
73,1	115	45	421		446	60
72,5	114	44	409		434	58
72	113	43	400		423	57
71,5	113	42	390		412	56
70,9	112	41	381		402	55
70,4	112	40	371		392	54
69,9	111	39	362		382	52
69,4	110	38	353		372	51
68,9	110	37	344		363	50

Rockwell			Brinell		Vickers	Shore
HRA	HRB	HRC	30000 kg	500 kg	136	
600 N kužel	1500 N 1/16" kulička	1500 N kužel	10mm ocel. kulička	10mm ocel. kulička	diam. jehlan	skleroskop
68,4	109	36	336		354	49
67,9	109	35	327		345	48
67,4	108	34	319		336	47
66,8	108	33	311		327	46
66,3	107	32	301		318	44
65,8	106	31	294		310	43
65,3	105	30	286		302	42
64,7	104	29	279		294	41
64,3	104	28	271		286	41
63,8	103	27	264		279	40
63,3	103	26	258		272	39
62,8	102	25	253		266	38
62,4	121	24	247		260	37
62	100	23	240	201	254	36
61,5	99	22	234	195	248	35
61	98	21	228	189	243	35
60,5	97	20	222	184	238	34
59	96	18	216	179	230	33
58	95	16	210	175	222	32
57,5	94	15	205	171	213	31
57	93	13	200	167	208	30
56,5	92	12	195	163	204	29
56	91	10	190	160	196	28
55,5	90	9	185	157	192	27
55	89	8	180	154	188	26
54	88	7	176	151	184	26
53,5	87	6	172	148	180	26
53	86	5	169	145	176	25
52,5	85	4	165	142	173	25
52	84	3	162	140	170	25
51	83	2	159	137	166	24
50,5	82	1	156	135	163	24
50	81	0	153	133	160	24