

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝVOJ NÁSTROJŮ S PKD, CVD VRSTVOU A CVD POVLAKEM PRO DOKONČOVÁNÍ DĚR

DEVELOPMENT OF TOOLS WITH PCD, CVD LAYER AND CVD COATING FOR BORE
FINISHING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MILAN ČMIEL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. KAREL KOUŘIL, Ph.D.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Milan Čmiel

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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:

VÝVOJ NÁSTROJŮ S PKD, CVD VRSTVOU A CVD POVLAKEM PRO DOKONČOVÁNÍ DĚR

v anglickém jazyce:

DEVELOPMENT OF TOOLS WITH PCD, CVD LAYER AND CVD COATING FOR BORE FINISHING

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Podíl výrobků z neželezných materiálů především hliníku a jeho slitin významně roste. Podle statistických informací výrobců automobilů se jedná v průměru o dvojnásobný růst za posledních 20 let. Jde především o komponenty motorů, bloky motorů, hlavy válců, čerpadla a kompresory. Na všech uvedených dílech je mnoho děr ve vysoké přesnosti a s požadavkem na kvalitní obroběný povrch. Většina těchto děr je vystružována.

Česká republika patří v přepočtu na obyvatele k předním zemím Evropy v produkci automobilů. Také v sousedních státech jako jsou Slovensko a Polsko roste podíl automobilové výroby.

Z uvedených souvislostí je zřejmá příležitost pro vývoj nových produktivních nástrojů pro obrábění hliníku a jeho slitin.

Pro obrábění neželezných materiálů jako jsou již uvedené slitiny hliníku, jsou dnes nepostradatelné diamantové nástroje. Ve většině případů máme na mysli nástroje s břitem z PKD. Vedle tohoto nejrozšířenějšího rezného materiálu na bázi diamantu jsou ještě další typy. Jedná se o monokrystalické – přírodní diamanty. Dále diamantové vrstvy nebo diamantové povlaky nanášené metodou CVD na slinuté karbidy.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je vývoj nástrojů pro obrábění přesných děr s břity z PKD a CVD - diamantu. Porovnání užitečných vlastností PKD a CVD diamantových vrstev při vystružování.

Seznam odborné literatury:

1. FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje, pp.1-226, ISBN 80-214-2374-9, 2006. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno
2. PÍŠKA, M. Všeobecný vývoj a testování řezných nástrojů a materiálů, MM Průmyslové spektrum, Vol.CZK 65, 2005. No.4, pp.14-16, ISSN 1212-2572
3. PÍŠKA, M., HUMÁR, A. Testování řezivosti nových nástrojových materiálů, MM Průmyslové spektrum, Vol. 2004, 2004. No.Speciál IX, pp.98-108, ISSN 1212-2572
4. PÍŠKA, M. Všeobecný vývoj a testování řezných nástrojů a materiálů, MM Průmyslové spektrum, Vol.CZK 65, 2005. No.4, pp.14-16, ISSN 1212-2572
5. KOUŘIL, K., VANĚK, V. MM Průmyslové spektrum. Dokončovací operace vystružování. [online]. 2006, č. 6. [cit. 2007-02-11]
6. KOCMAN, K. a PROKOP, J. Technologické parametry vystružovacích nástrojů. Strojírenská technologie – Časopis pro vědu, výzkum a výrobu. Leden 2001, roč. VI, č. 1, s.5–10. ISSN 1211-4162.
7. KOCMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270s. ISBN 80-214-1996-2.
8. BUMBÁLEK, B., ODVODY, V., OŠŤÁDAL, B. Drsnost povrchu. 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1989. 338s.
9. BUMBÁLEK, B., MALEC, J. Dokončovací operace a jejich význam pro funkci součásti. Strojírenská technologie – Časopis pro vědu, výzkum a výrobu. Září 2006, roč. XI, č. 3, s.25–28. ISSN 1211-4162.
10. BUMBÁLEK, B., BUMBÁLEK, L. Zbytková napětí a jejich význam při řešení integrity povrchu. Strojírenská technologie – Časopis pro vědu, výzkum a výrobu. Září 2006, roč. XI, č. 3, s.9–17. ISSN 1211-4162.
11. BÁTORA, B., VASILKO, K. Obrobené povrchy: technologická dedičnosť, funkčnosť. 1. vyd. Trenčín: Trenčianska univerzita, 2000. 183s. ISBN 80-88914-19-1
12. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění – kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s.r.o. 1997. 857s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-972299-4-6.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Kouřil, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 20.11.2008

L.S.

doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Obsahem této práce je návrh, provedení a vyhodnocení experimentu, který ověří užité vlastnosti nově vyvinutých nástrojů firmy HAM-FINAL, které jsou osazeny břity z polykrystalického diamantu (PKD) a CVD diamantu. Teoretická část práce se zabývá materiály řezných nástrojů se zaměřením na diamantové materiály, dále pak opotřebením řezných nástrojů, požadavky kladenými na přesnost vystružených děr a také nástroji na výrobu přesných děr. Součástí práce je také přehled sortimentu vybraných světových výrobců PKD, CVD diamantových povlaků, CVD diamantových vrstev a výrobců výstružníků s břity z PKD.

Klíčová slova

Polykrystalický diamant (PKD), CVD diamant, diamantové povlaky, diamantové vrstvy, vystružování, výstružník, přesné obrábění děr.

ABSTRACT

The aim of the thesis is to design, conduct and assess an experiment seeking to look into the utility properties of recent tools manufactured by HAM-FINAL. The tools include polycrystalline diamond (PCD) and CVD diamond cutting edges. In the theoretical part, the attention is devoted to cutting materials with an emphasis on diamond materials, as well as to issues associated with the wearing of the cutting tools, requirements specified for precision of bores and tools used in the manufacture of precision bores. The paper further provides an overview of a selection of world's leading manufacturers of PCD blanks, CVD diamond coatings, CVD diamond layers and reamers with PCD cutting edges.

Key words

Polycrystalline diamond (PCD), CVD diamond, diamond coating (diamond thin film), diamond layer (diamond thick film), reaming, reamer, precision hole machining.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ĆMIEL, M. *Vývoj nástrojů s PKD, CVD vrstvou a CVD povlakem pro dokončování děr*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 80 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Kouřil, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Vývoj nástrojů s PKD, CVD vrstvou a CVD povlakem pro dokončování děr** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

22. 5. 2009

.....
Bc. Milan Čmiel

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Karlu Kouřilovi, Ph.D. za čas věnovaný konzultacím a za cenné připomínky a rady, které byly přínosem pro vypracování mé diplomové práce. Dále bych rád poděkoval firmě HAM-FINAL za umožnění realizace této diplomové práce.

OBSAH

TITULNÍ LIST	1
ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE	2
ABSTRAKT	3
PROHLÁŠENÍ	4
PODĚKOVÁNÍ.....	5
OBSAH.....	6
ÚVOD	8
1 MATERIÁLY PRO ŘEZNÉ NÁSTROJE	9
1.1 Vlastnosti řezných materiálů.....	9
1.2 Přehled řezných materiálů.....	10
1.2.1 <i>Nástrojové oceli (NO).....</i>	<i>11</i>
1.2.2 <i>Slinuté karbidy (SK).....</i>	<i>12</i>
1.2.3 <i>Cermety</i>	<i>13</i>
1.2.4 <i>Řezná keramika (ŘK).....</i>	<i>14</i>
1.2.5 <i>Supertvrdé materiály (STM).....</i>	<i>15</i>
1.2.5.1 <i>Diamant.....</i>	<i>15</i>
1.2.5.2 <i>Kubický nitrid bóru (KNB)</i>	<i>16</i>
1.3 Zhodnocení kapitoly	17
2 DIAMANT JAKO MATERIÁL ŘEZNÝCH NÁSTOJŮ	19
2.1 Obecně o diamantu	19
2.2 Diamantové materiály používané pro řezné nástroje.....	20
2.2.1 <i>Přírodní monokrystalické diamanty.....</i>	<i>20</i>
2.2.2 <i>Syntetické diamanty.....</i>	<i>21</i>
2.2.2.1 <i>Polykrystalický diamant (PKD)</i>	<i>21</i>
2.2.2.2 <i>CVD diamant.....</i>	<i>23</i>
2.3 Zhodnocení kapitoly	29
3 OPOTŘEBENÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ	30
3.1 Mechanizmy opotřebení.....	30
3.2 Formy opotřebení.....	32
3.3 Kritéria opotřebení	35
3.4 Měření opotřebení	35
3.5 Časový průběh opotřebení.....	36
3.6 Opotřebení řezných nástrojů z PKD a CVD diamantu.....	37
3.7 Zhodnocení kapitoly	38
4 POŽADAVKY KLADENÉ NA PŘESNÉ DÍRY	40
4.1 Úchylka rozměru	40
4.2 Geometrické úchyly	40
4.2.1 <i>Úchylka tvaru</i>	<i>40</i>
4.2.2 <i>Úchylka polohy</i>	<i>41</i>
4.3 Parametry struktury povrchu	41
4.4 Vlastnosti povrchové vrstvy.....	44

4.4.1	Zbytková napětí	44
4.4.2	Zpevnění povrchu	45
4.4.3	Trhliny v povrchové vrstvě	46
4.5	Zhodnocení kapitoly	46
5	NÁSTROJE PRO VÝROBU PŘESNÝCH DĚR.....	47
5.1	Rozdělení nástrojů pro výrobu přesných děr	47
5.2	Technologie vystružování	47
5.2.1	Přídavek pro vystružování	48
5.3	Výstružníky	48
5.3.1	Geometrie a tvar zubu strojního výstružníku.....	48
5.3.2	Rozdělení výstružníků.....	49
5.3.3	Toleranční pole výstružníku	49
5.4	Zhodnocení kapitoly	50
6	EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ UŽITNÝCH VLASTNOSTÍ VÝSTRUŽNÍKŮ FIRMY HAM-FINAL S BŘITY Z PKD A CVD DIAMANTU.....	51
6.1	Cíl experimentu	51
6.2	Popis vystružovacích nástrojů použitých při testech.....	51
6.3	Obrábění děr vodítek ventilů na „TRANSFER LINKÁCH“	51
6.4	Návrh experimentu	53
6.4.1	Metodika provedení zkoušek vystružovacích nástrojů	53
6.4.2	Sledované parametry přesnosti obrobene díry	54
6.4.3	Metodika měření parametrů přesnosti	54
6.5	Podmínky experimentu	54
6.5.1	Zkušební obrobek	54
6.5.2	Obráběcí stroj	55
6.5.3	Nástroj	56
6.5.4	Řezné podmínky při vystružování	57
6.5.5	Měřicí přístroje, pomůcky a zařízení	57
6.6	Naměřené hodnoty	58
6.6.1	Jednobřítý výstružník s břitem z PKD	59
6.6.2	Jednobřítý výstružník s břitem z CVD diamantu	59
6.7	Statistické zpracování naměřených dat	60
6.7.1	Jednobřítý výstružník s břitem z PKD	61
6.7.2	Jednobřítý výstružník s břitem z CVD diamantu	62
6.8	Vyhodnocení experimentu.....	64
6.8.1	Jednobřítý výstružník s břitem z PKD	66
6.8.2	Dvoubřítý výstružník s břity z PKD.....	66
6.8.3	Jednobřítý výstružník s břitem z CVD diamantu	66
6.8.4	Dvoubřítý výstružník s břity z CVD diamantu	66
6.8.5	Celkové zhodnocení testovaných nástrojů.....	67
7	TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	68
	ZÁVĚR.....	69
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	71
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	77
	SEZNAM PŘÍLOH	80

ÚVOD

Podíl neželezných a nekovových materiálů mezi konstrukčními materiály není zanedbatelný. Zejména podíl výrobků z hliníkových slitin významně roste, což je způsobeno hlavně rychle se rozvíjejícím automobilovým průmyslem, kde tyto slitiny nacházejí široké uplatnění. Mimo jiné se slitiny hliníku uplatňují také v leteckém a kosmickém průmyslu a v konstrukci hydraulických a pneumatických zařízení.

Obecně lze mezi součásti ze slitin hliníku zařadit: komponenty motorů, bloky motorů, hlavy válců, čerpadla, kompresory apod. Obrobitelnost těchto hliníkových slitin je díky přítomnosti křemíku ve slitině obtížná. Při použití nástrojů ze slinutých karbidů dochází při obrábění hliníkových slitin ke značnému abrazivnímu otěru. Vhodným řešením zde může být aplikace nástrojů s břitem z diamantu, které mimo jiné disponují vysokou tvrdostí a odolností proti abrazivnímu opotřebení.

Existují dva typy diamantů, a to přírodní a synteticky vyrobené. V dnešní době se již opouští od použití přírodních diamantů, neboť jejich cena je vysoká a jejich velikost a množství je omezené. Mnohem vhodnější pro aplikaci diamantu jako řezného materiálu je použití synteticky vyrobeného diamantu, jehož výrobu lze přesně řídit, čímž lze vyrobit diamanty větší čistoty a většího tvaru. Velmi často se pro obrábění neželezných a nekovových materiálů používá polykrystalický diamant (PKD). Méně rozšířený pak je diamant vyrobený pomocí depozice z plynné fáze, neboli tzv. CVD metody nanášení povlaků. Tento diamant se proto také někdy označuje jako CVD diamant. Struktura a vlastnosti CVD diamantu se téměř neliší od přírodního diamantu.

Nástroji s břity z diamantu lze kromě již zmíněných slitin hliníku také efektivně obrábět slitiny titanu, hořčíku, mědi, dále jsou pak vhodné pro obrábění kompozitních materiálů, grafitu, keramiky, slinutých karbidů či jiných tvrdých přírodních materiálů. Lze tedy říci, že se nástroje s řeznou částí z diamantu používají hlavně pro speciální aplikace, kde požadujeme vysokou produktivitu, přesnost a kvalitu obroběných ploch.

Mezi přesné obrábění bezesporu také patří výroba přesných děr, kterou lze realizovat jak nástroji s nedefinovanou geometrií břitu, tak nástroji s definovanou geometrií břitu. Do druhé jmenované skupiny patří např. vnitřní soustružnické nože, vyvrtávací tyče, vyvrtávací hlavy či výstružníky. Právě výstružníky jsou velmi často používány pro obrábění velmi přesných děr, protože jimi lze dosáhnout dobré kvality povrchu a vysoké rozměrové a tvarové přesnosti.

Účelem této práce je poskytnout přehled o diamantových materiálech vhodných pro řezné nástroje s definovanou geometrií břitu a také o sortimentu světových výrobců výstružníků s břity z PKD. Další částí této práce je návrh, provedení a vyhodnocení experimentu, jehož cílem je ověřit užité vlastnosti nově vyvinutých vystružovacích nástrojů firmy HAM-FINAL, které jsou osazeny břity z PKD a CVD diamantu.

1 MATERIÁLY PRO ŘEZNÉ NÁSTROJE

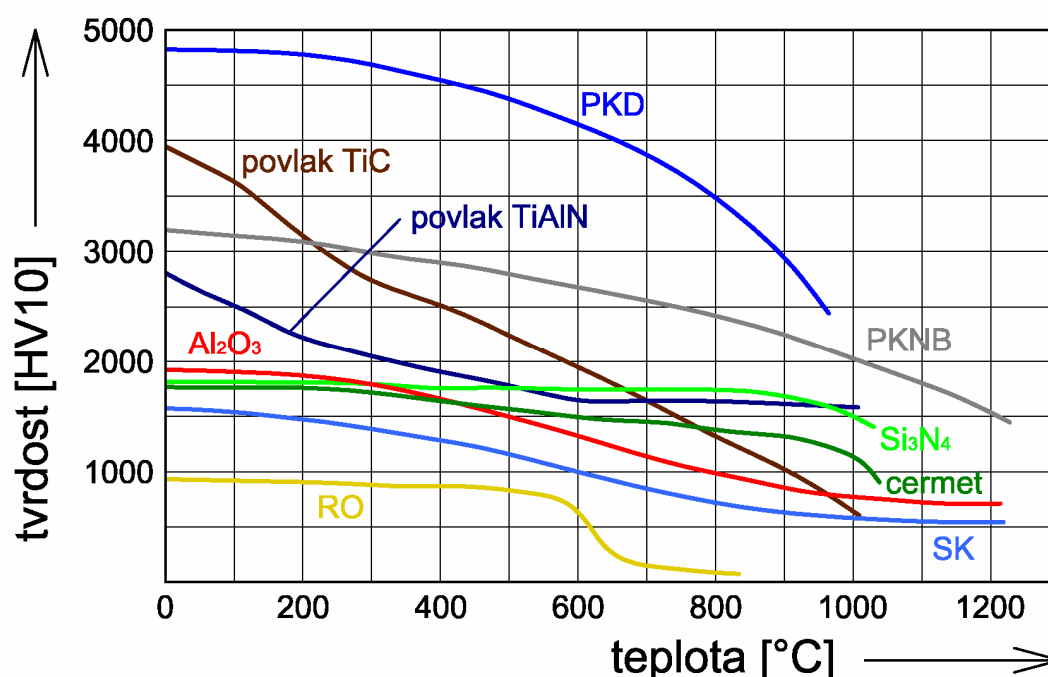
Pro konstrukci strojních součástí je v dnešní době používáno mnoho rozličných materiálů, mezi něž patří materiály kovové (oceli, litiny, slitiny Al, Cu, Ni, Ti) a také materiály nekovové (keramika, plasty, kompozity atd.). Tyto strojní součásti jsou zároveň také opracovány různými technologiemi obrábění, z nichž nejpoužívanější jsou soustružení, frézování a vrtání. Z těchto poznatků je zřejmé, že pro obrábění je nutno používat různé nástrojové materiály, což potvrzuje také fakt, že žádný nástrojový materiál není tak univerzální, aby se dal efektivně použít pro obrábění všech konstrukčních materiálů. Jednotlivé druhy nástrojových materiálů se od sebe liší svými fyzikálními, chemickými, tepelnými a mechanickými vlastnostmi, které zároveň určují jejich aplikační oblasti. [33]

1.1 Vlastnosti řezných materiálů

Jednou z definic procesu řezání je, že se jedná o proces plastické deformace probíhající za extrémních podmínek zatěžování, tj. za vysokých tlaků, teplot a vysoké deformační rychlosti. [5]

Nástroj je tedy zatěžován jak mechanicky, tak tepelně. Při dokončovacím obrábění převládá spíše tepelné zatížení nástroje nad mechanickým, kdežto u hrubovacího obrábění převládá mechanické zatížení nástroje nad tepelným zatížením. [33]

Mezi základní požadavky na nástrojový materiál patří tvrdost, která by měla být větší, než tvrdost obráběného materiálu nejméně o 5 až 6 HRC. Souhrnu vlastností nástrojového materiálu, který ovlivňuje jeho vhodnost k obrábění se nazývá řezivost. [74]



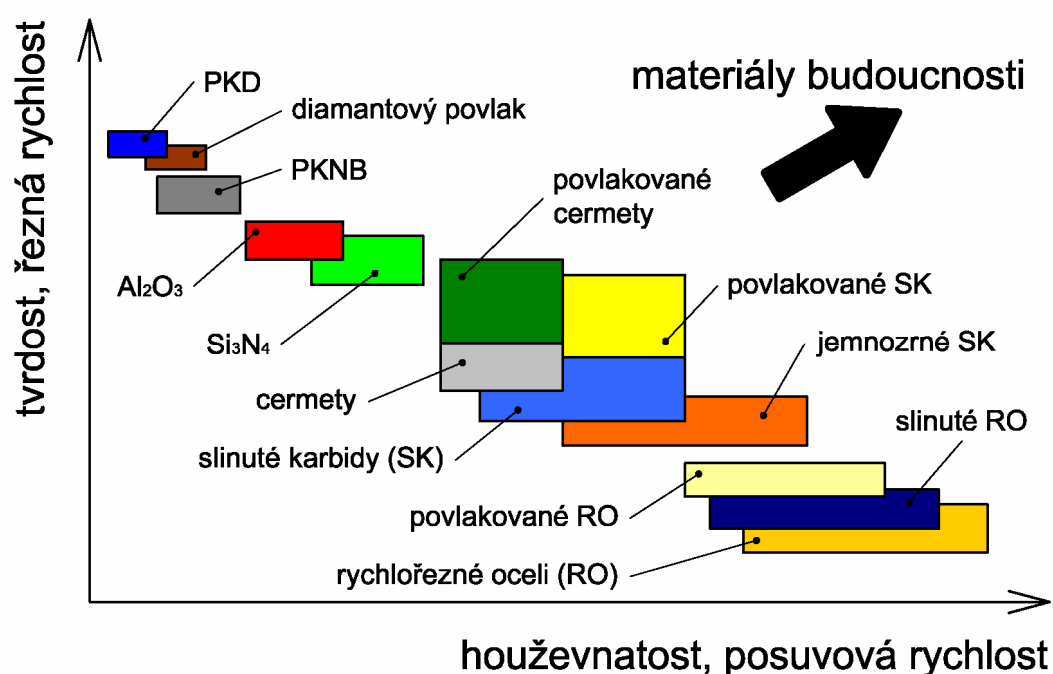
Obr. 1.1 Závislost tvrdosti nástrojových materiálů na teplotě [32]

Požadavky na vlastnosti řezných materiálů:

- vysoká tvrdost (i za zvýšených teplot – obr. 1.1),
- vysoká houževnatost,

- vysoká pevnost v tlaku,
- vysoká ohybová pevnost,
- vysoká otěruvzdornost (odolnost proti opotřebení),
- vysoká chemická stabilita. [41]

Z výše uvedených požadavků na vlastnosti nástrojových materiálů vyplývá, že některé vlastnosti se navzájem vylučují (např. tvrdost a houževnatost). Materiály s vysokou tvrdostí lze použít pro dokončovací obrábění (vysoké řezné rychlosti a malý průřez třísky), materiály s vysokou houževnatostí zase pro hrubovací obrábění (vyšší posuvové rychlosti) – obr. 1.2. [33]



Obr. 1.2 Vliv mechanických vlastností nástrojového materiálu na pracovní podmínky [32]

1.2 Přehled řezných materiálů

Jak již bylo uvedeno, žádný nástrojový materiál není tak univerzální, aby se dal efektivně použít pro obrábění všech konstrukčních materiálů. Zároveň nelze očekávat, že by se v současnosti ani v blízké budoucnosti objevil nějaký nový řezný materiál, a proto se výzkumné týmy všech předních výrobců nástrojů a nástrojových materiálů zaměřují na zdokonalování technologie výroby již známých materiálů a na specifikaci jejich optimálního využití s přesným vymezením aplikační oblasti. [33]

Druhy řezných materiálů:

- a) nástrojové oceli (NO),
- b) slinuté karbidy (SK),
- c) cermety,
- d) řezná keramika (ŘK),
- e) supertvrdé materiály (STM). [24]

1.2.1 *Nástrojové oceli (NO)*

Nástrojové oceli patří mezi nejstarší nástrojové materiály. Ze všech dosud známých materiálů pro řezné nástroje mají nejvyšší houževnatost. Jejich tvrdost je však poměrně nízká a proto se používají pro nástroje pracující při nízkých řezných rychlostech a pro nástroje tvarově složité, které se nedají vyrobit z ostatních řezných materiálů.

Nástrojové oceli je možno rozdělit podle několika hledisek (dle použití, chemického složení, způsobu výroby, atd.). [24]

Podle chemického složení lze nástrojové oceli rozdělit do těchto skupin:

- nelegované oceli (uhlíkové),
- legované oceli (nízko, středně),
- vysokolegované oceli (rychlořezné). [41]

Vlastnosti **nelegovaných (uhlíkových) nástrojových ocelí** nejvíce ovlivňuje obsah uhlíku (s jeho rostoucím obsahem roste tvrdost těchto ocelí) a také vhodné tepelné zpracování. Tyto oceli mohou pracovat do teploty 200 °C s řeznými rychlostmi do 12 m·min⁻¹, avšak v dnešní době se v podstatě nepoužívají. Obsah uhlíku se u těchto ocelí pohybuje od 0,5 do 1,35 %, výjimečně až 1,5 %. Nejčastěji jsou vyráběny oceli s obsahem uhlíku od 1,0 do 1,35 %, které mají dostatečnou tvrdost i houževnatost. Používají se na výrobu ručních nástrojů, jako např. výstružníky, závitníky, dláta, pily, pilníky apod.

Legované nástrojové oceli obsahují karbidotvorné legující prvky (Cr, V, W, Mo) a nekarbidotvorné legující prvky (Ni, Si, Co), které dodávají těmto ocelím větší prokalitelnost a zvýšenou odolnost proti popouštění. Obsah uhlíku je u těchto ocelí od 0,8 do 1,2 % a obsah legur se pohybuje v rozmezí 10 až 15 %. Tepelné zpracování těchto ocelí je ovšem oproti nelegovaným NO náročnější. Legované nástrojové oceli jsou schopny pracovat do teploty 250 až 350 °C při řezných rychlostech 15 až 25 m·min⁻¹. Tyto oceli se používají na téměř všechny druhy řezacích, stříhacích, tvářecích a jiných nástrojů. Používají se např. pro: závitorezné nástroje, vrtáky, frézy, řezné nástroje s malými břity, tvrdé pilníky, výstružníky a nástroje na dřevo. [74]

Rychlořezné oceli (RO, HSS) jsou pro své specifické vlastnosti a využitelnost uváděny jako samostatná skupina legovaných NO. Obsahují karbidotvorné (W, Cr, V, Mo) a nekarbidotvorné (Co) prvky. Obsah uhlíku je zpravidla menší než 1 % a obsah legujících prvků je více než 30 %. Nástroje z RO snesou pracovní teploty do 500 až 700 °C při řezných rychlostech 25 až 50 m·min⁻¹. Rychlořezné oceli mají střední odolnost proti opotřebení a vysokou lomovou houževnatost. Podle obsahu legujících prvků a vlastností se používají pro řezné nástroje na obrábění ocelí, ocelí na odlitky o vysoké pevnosti a tvrdosti a na obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Nejčastěji jsou tyto oceli používány pro tvarové nástroje, výstružníky, závitníky, frézy menších rozměrů, protahovací trny a nástroje vystavené rázům při přerušovaném řezu. [41]

Tyto materiály lze vyrábět litím, tvářením nebo lisováním z prášků za tepla (využívající technologie *Hot Isostatic Pressing – HIP*, *Anti-Segregation Process – ASP*, atd.). [24]

1.2.2 Slinuté karbidy (SK)

Slinuté karbidy jsou nástrojové materiály, které se vyrábí pomocí práškové metalurgie z karbidů těžkých kovů a pojících kovů. Mezi nejdůležitější karbidy používané pro výrobu SK patří: karbid wolframu (WC), karbid titanu (TiC), karbid tantalu (TaC) a karbid niobu (NbC). Těchto velmi tvrdých karbidů je ve SK i více jak 90 %. Jako pojivo se nejčastěji používá kobalt (Co). Slinuté karbidy jsou směsí dvou i více fází a není možné je dále tepelně zpracovávat. Z důvodu jejich velké tvrdosti se po slinování dají jen omezeně tvarově a rozměrově opracovávat (broušením, elektroerozivním obráběním, lapováním, anodomechanickým obráběním). [30]

Základní vlastnosti slinutých karbidů:

- vysoká tvrdost,
- malá pevnost v ohybu,
- velká odolnost proti opotřebení,
- dobré mechanické a fyzikální vlastnosti (pevnost v tlaku, odolnost proti korozi, malý součinitel tepelné roztažnosti, vysoká měrná hmotnost),
- dobrá tepelná a elektrická vodivost. [74]

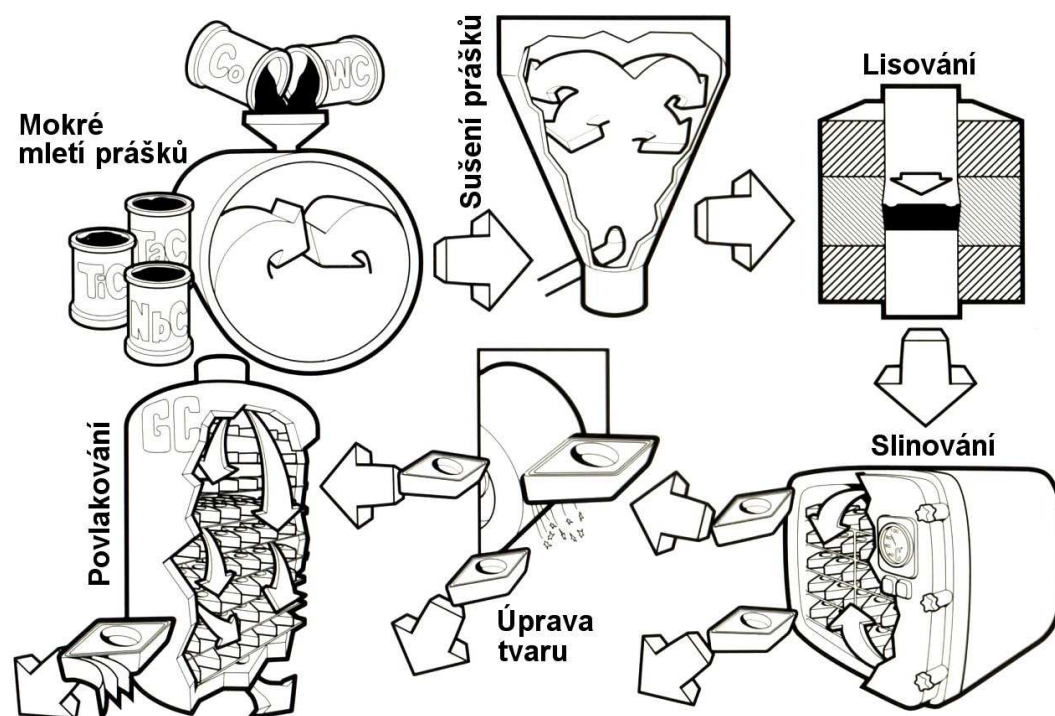
SK se používají pro výrobu monolitních nástrojů (např. vrtáky a frézy malých rozměrů), nebo ve formě břitových destiček, jejichž rozměry a tvary jsou normalizovány. Tyto destičky jsou pak buď pájeny (v dnešní době spíše výjimečně), nebo mechanicky upínány do nástrojového držáku. Mechanicky upínané vyměnitelné břitové destičky (VBD) mají několik ostří. Jestliže dojde k otupení určitého ostří, destička se vyjme a otočí na nové, ještě nepoužité ostří. Po otupení všech ostří se destička vyřadí. [41]

Obecný postup výroby slinutých karbidů (obr. 1.3):

- » výroba práškového wolframu;
- » výroba práškových karbidů (WC, TiC, TaC, NbC atd.) a pojiva (Co);
- » příprava směsí uvedených prášků (míchání, homogenizace, mletí, v případě mokrého mletí sušení a granulace);
- » formování směsí (lisování, vytlačování, atd.);
- » předslinování zformovaných směsí (700 – 850 °C);
- » úprava tvaru předslinutého tělesa (v případě potřeby);
- » slinování (1350 až 1650 °C);
- » vysokoteplotní izostatické lisování (HIP);
- » dodatečné úpravy povrchu (broušení, povlakování). [32]

Z důvodu zlepšení vlastností slinutých karbidů se v dnešní době většina SK povlakuje. Existují dvě metody povlakování a to: CVD metoda (Chemical Vapour

Deposition – chemické napařování z plynné fáze) a PVD metoda (Physical Vapour Deposition – fyzikální napařování), plus jejich modifikace (MTCVD, PACVD atd.). Metoda PVD je charakteristická nízkými pracovními teplotami (500 °C), kdežto CVD metoda probíhá za vyšších teplot (1 000 až 1200 °C) a je také hlavní metodou povlakování slitutých karbidů. [32]



Obr. 1.3 Obecný postup výroby VBD ze SK [33]

Povlaky řezných nástrojů v podstatě tvoří karbidy (TiC), nitridy (TiN), oxidy (Al_2O_3), boridy a jejich kombinace (např. karbonitridy TiCN). Povlaky řezných nástrojů mohou být jak jednovrstvé, tak i vícevrstvé (multivrstvé), které kombinují vlastnosti jednotlivých typů povlaků. [33]

Nepovlakované SK se dle ISO 513 rozdělují podle použití na [33]:

- ⇒ **typ P** (pro obrábění železných kovů s dlouhou třískou);
- ⇒ **typ M** (pro obrábění železných kovů s dlouhou nebo krátkou třískou a pro obrábění neželezných kovů);
- ⇒ **typ K** (pro obrábění železných kovů s krátkou třískou, neželezných kovů a nekovových materiálů);
- ⇒ **typ N** (pro obrábění neželezných slitin na bázi hliníku, hořčíku nebo mědi, obrábění plastů, kompozitů a dřeva);
- ⇒ **typ S** (pro obrábění slitin titanu a žáropevných slitin na bázi niklu, kobaltu nebo železa);
- ⇒ **typ H** (pro obrábění zušlechtěných a kalených ocelí a obrábění tvrzených litin).

1.2.3 Cermety

Název CERMET těchto řezných materiálů vznikl složením prvních tří písmen slov „**CER**amics“ (keramika) a „**MET**al“ (kov). Podle tohoto názvu by se tedy mělo jednat o nástrojový materiál, který výhodně kombinuje vlastnosti keramiky (tvrdost) a kovu (houževnatost). Realita je však jiná, cermety jsou sice tvrdé, ale jejich houževnatost je oproti SK menší. [33]

Cermety jsou stejně jako slinuté karbidy vyráběny práškovou metalurgií a jsou také někdy nazývány jako bezwolframové slinuté karbidy. To proto, že u nich je karbid wolframu (WC) nahrazen jinými karbidy, nitridy nebo karbonitridy, jako např. karbidem titanu (TiC), nitridem titanu (TiN), nitridem tantalu (TaN) nebo karbonitridem titanu (TiCN). Jako pojivo se používá nejčastěji kobalt (Co), nikl (Ni) či molybden (Mo). [41]

Vlastnosti cermetů:

- vysoká odolnost proti opotřebení,
- vysoká chemická stabilita a tvrdost za tepla,
- malá náchylnost k vytváření nárůstku,
- malý sklon k oxidačnímu opotřebení,
- nízká měrná hmotnost,
- velmi nízký koeficient tření při obrábění kovů. [1]

Stejně jako slinuté karbidy se cermety vyrábějí ve formě monolitních nástrojů, nebo vyměnitelných břitových destiček, které se podobně jako u SK dají povlakovat. Jejich použití je hlavně pro obrábění ocelí, litiny, lité oceli, neželezných kovů a snadno obrobitelných slitin. Jsou vhodné zejména pro dokončovací operace s použitím vysokých řezných rychlostí. [41]

1.2.4 Řezná keramika (ŘK)

Rozdíl mezi tradiční keramikou (porcelán, glazur apod.) a řeznou keramikou je v tom, že řezná keramika je látka krystalická, která neobsahuje značný podíl skelné (amorfní) fáze. Keramické látky jsou vázány iontovými a kovalentními meziatomovými vazbami, nicméně jejich vazba není čistě iontová nebo kovalentní (obvykle se vyskytují oba typy vazby současně). [24]

Rozdělení řezné keramiky:

► oxidická keramika:

- čistá (Al_2O_3);
- polosměsná ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{CoO}$);
- směsná ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Ti(C,N)}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{TiC}$);

► neoxidická (nitridová) keramika: Si_3N_4 , $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Y}_2\text{O}_3$, $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{TiN}$, sialony. [33]

Výroba vyměnitelných břitových destiček z řezné keramiky je velmi podobná procesu výroby slinutých karbidů a cermetů. Rozdíl je v tom, že keramické řezné materiály neobsahují žádný materiál, jehož funkcí by bylo spojení zrn tvrdé fáze do jednoho tělesa (tzv. pojivo). Tento fakt výrobu keramických materiálů podstatně znesnadňuje a klade velmi vysoké nároky na výrobní zařízení a na dodržení všech předepsaných parametrů technologického postupu výroby. [33]

Vlastnosti řezné keramiky:

- má vysokou tvrdost (i za zvýšených teplot),
- chemicky nereaguje s materiálem obrobku,
- snáší teplotu na břitu až 1200 °C,
- zaručuje vysokou trvanlivost břitu,
- může být použita při vysokých řezných rychlostech (300 – 1600 m·min⁻¹),
- je velmi křehká,
- má nízkou tepelnou vodivost a nízkou měrnou hmotnost. [41]

V dnešní době lze prakticky všechny druhy keramických materiálů pro řezné nástroje vyrábět ve formě s vyztužujícími vlákny – whiskery (např. SiC nebo Si₃N₄). Whiskery jsou vlákna krystalu, které mají průměr pouze cca 1 μm a délku více než 20 μm. Také povlakování řezné keramiky pomocí CVD a PVD povlaků je možné.

Použití řezné keramiky se liší podle jejího druhu. Například oxidická keramika se používá pro obrábění šedé litiny a konstrukčních ocelí nepřerušovaným řezem. Polosměsná keramika se používá pro obrábění šedé, tvárné i temperované litiny, dále pak pro obrábění konstrukčních, zušlechtěných i rychlořezných ocelí. Směsná keramika se používá na obrábění kalených ocelí a šedé litiny plynulým i přerušovaným řezem. Nitridová keramika se pak používá např. pro obrábění šedé litiny. [33]

1.2.5 Supertvrde materiály (STM)

Mezi supertvrde řezné materiály se díky svým výborným mechanickým vlastnostem řadí **diamant** a **kubický nitrid bóru** (KNB). Jedná se o synteticky vyrobené řezné materiály, které mají vysokou pevnost v tlaku a vykazují největší tvrdost mezi dosud známými materiály. [32]

1.2.5.1 Diamant

Nástroje s břity z diamantu patří mezi nejnovější řezné materiály. V dnešní době je nejvíce rozšířený polykrystalický diamant (PKD), což je uměle vytvořený materiál, který vzniká při vysokotlakém a vysokoteplotním procesu (tzv. *HPHT – high pressure high temperature proces*).

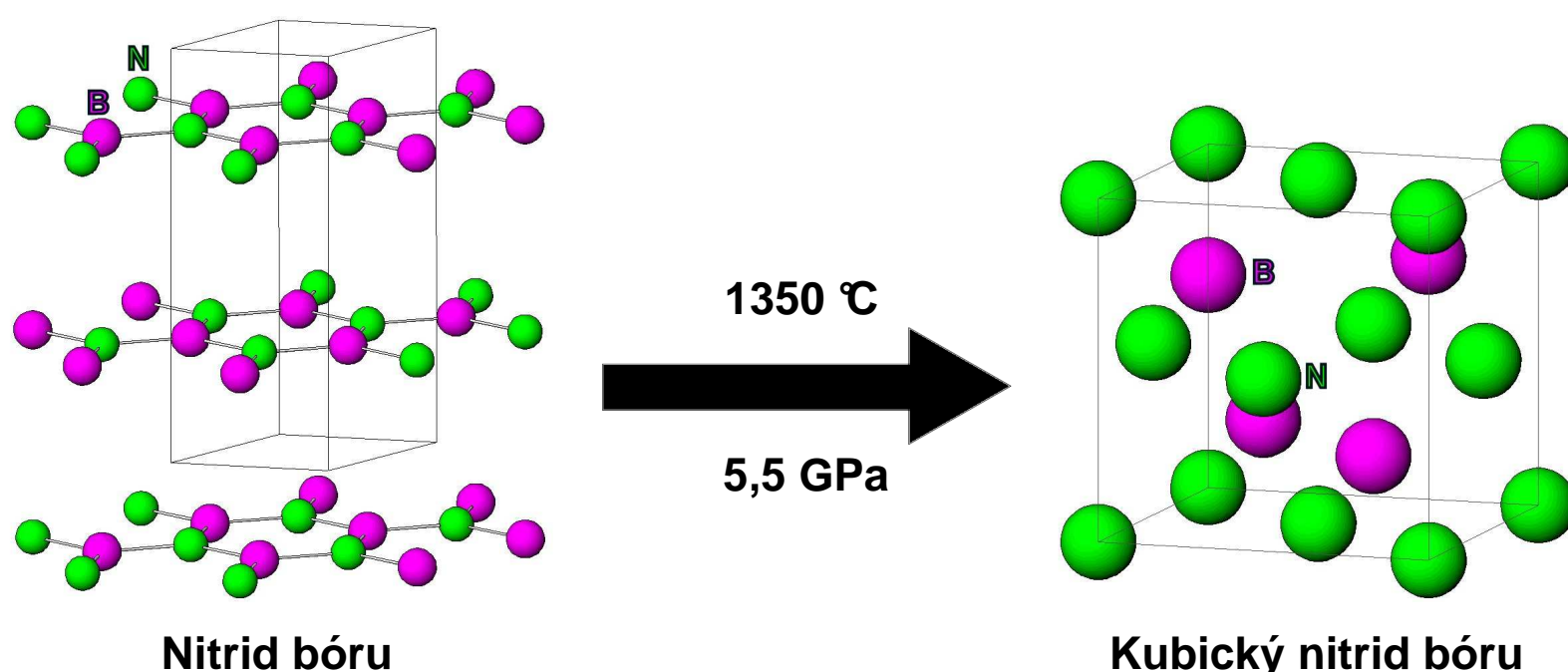
Kromě PKD se jako materiálu pro řezné nástroje používá také přírodní monokrystalický diamant a CVD diamant (vyrobený pomocí nízkotlaké CVD metody nanášení vrstev). Tyto materiály však nejsou tolik rozšířené jako PKD, protože přírodní monokrystalické diamanty jsou drahé a jejich zdroje jsou omezené a CVD diamanty jsou vhodné zejména pro speciální aplikace, kde je vyžadována velká produktivita, vysoká přesnost obrobekových ploch a dlouhá životnost nástrojů.

O všech typech diamantů používaných pro řezné nástroje bude podrobněji pojednáno v kapitole 2.

1.2.5.2 Kubický nitrid bóru (KNB)

Jedná se o uměle vytvořený materiál, který se v přírodě volně nevyskytuje. Vyrábí se za vysokých tlaků a teplot, při nichž se spojují kubické krystaly bóru s keramickým nebo kovovým pojivem. Základní surovinou pro výrobu kubického nitridu bóru je nitrid bóru (BN), který ovšem má hexagonální mřížku (ta se při působení vysokých teplot a tlaků mění na kubickou – viz. obr. 1.4). [33]

Polykrystalický kubický nitrid bóru (PKNB) je vyráběn ve formě vyměnitelných břitových destiček s připájeným roubíkem z PKNB (obr. 1.5), ve formě silné vrstvy PKNB na podkladu ze SK, nebo ve formě monolitní destičky z PKNB. Proces výroby vyměnitelných břitových destiček s roubíkem z PKNB je zobrazen na obr. 1.6. [41]



Obr. 1.4 Změna hexagonální mřížky nitridu bóru na kubickou mřížku. [32]

Kubický nitrid bóru se používá pro obrábění kalených ocelí a tvrzených litin, slinovaných materiálů na bázi kobaltu a železa a na obrábění žáruvzdorných ocelí. Je také doporučeno obrábět materiály o tvrdosti vyšší než 48 HRC (čím tvrdší je materiál obrobku, tím menší je opotřebení břitu nástroje). Při obrábění materiálů o nižší tvrdosti je obrábění vzhledem k vyšší ceně nástroje neekonomické. Použití nástrojů z KNB na obrábění tvrdých materiálů obrobků s výhodou nahrazuje operace broušení. [1]

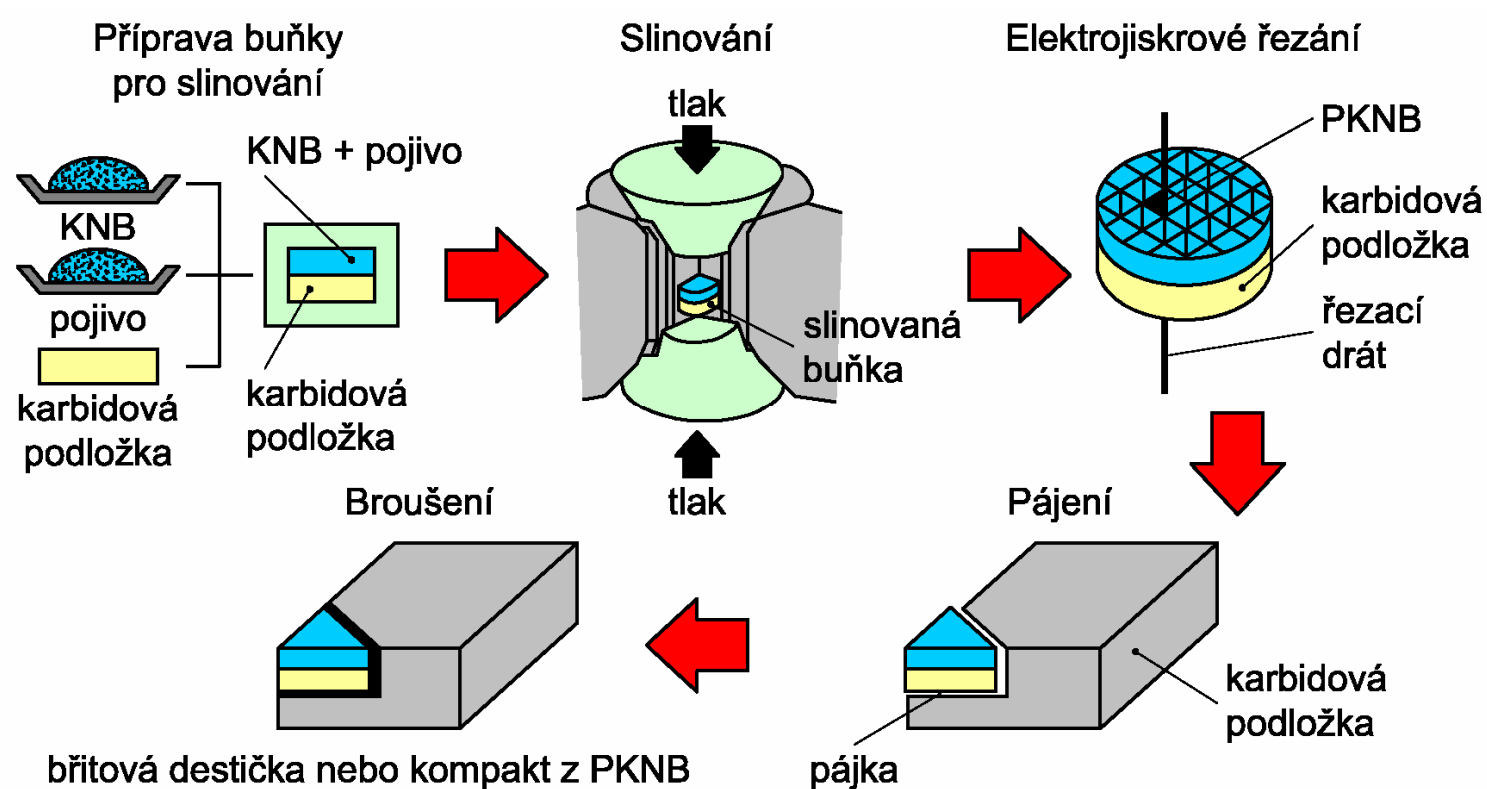


Obr. 1.5 Vyměnitelné břitové destičky z PKNB od firmy Sumitomo [64]

KNB má mimořádnou tvrdost (i při extrémních teplotách 2000 °C), velkou odolnost proti abrazivnímu opotřebení, dobrou chemickou stabilitu. Je však poměrně křehký. [1]

Mechanické, tepelné a řezné vlastnosti nástrojů ze supertvrdých materiálů jsou do značné míry ovlivněny velikostí zrna tvrdých částic a použitým pojivem (jeho druhem a obsahem). [33]

Nízký obsah KNB v kombinaci s vysokým obsahem keramického pojiva vytváří větší odolnost proti opotřebení a chemickou stabilitu. Naopak vysoký obsah KNB zajišťuje větší houževnatost nástroje. [1]



Obr. 1.6 Proces výroby VBD s roubíkem z PKNB [32]

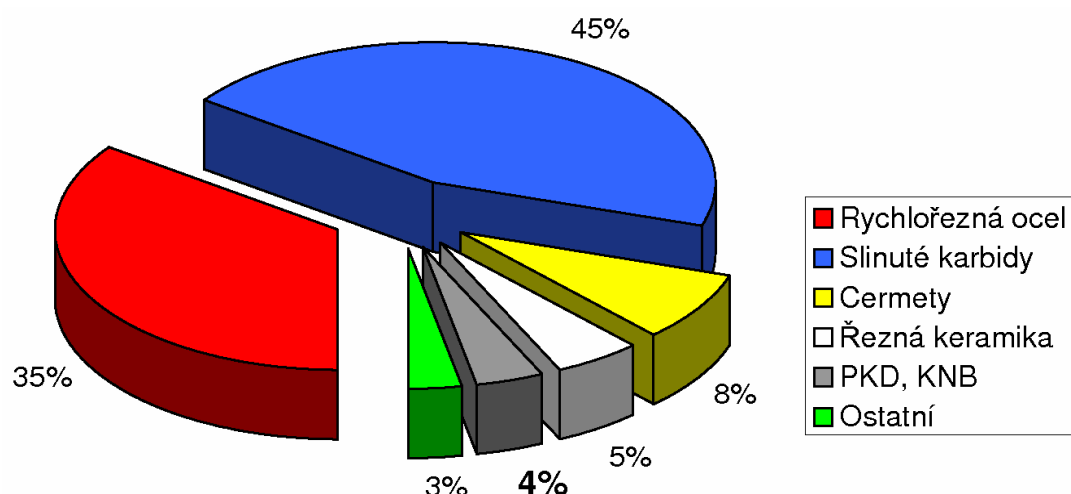
1.3 Zhodnocení kapitoly

Jak je vidět z výše uvedeného přehledu, v dnešní době existuje široké spektrum řezných materiálů. Mnohé z nich přitom pokrývají poměrně velkou aplikační oblast, ale žádný z těchto materiálů nelze efektivně použít pro obrábění všech konstrukčních materiálů. Jednotlivé řezné materiály se vhodně doplňují, čímž je umožněno efektivně obrábět široké spektrum konstrukčních materiálů.

Rychlořezná ocel patří mezi nejstarší nástrojové materiály, ale její podíl ve světové produkci řezných materiálů není zanedbatelný (cca 35 % – viz. obr. 1.7). Tyto materiály jsou totiž díky své relativně dobré obrobitelnosti (ve srovnání se SK) stále hojně používány pro nástroje na výrobu ozubení, protahovací nástroje, závitníky, vrtáky a jiné tvarové nástroje.

Ze všech dnes známých řezných materiálů jsou nejvíce rozšířené slinuté karbidy (cca 45 %). Mají totiž optimální poměr mezi tvrdostí a houževnatostí, čímž lze použít pro obrábění s plynulým i přerušovaným řezem. Aplikací povlaků na tyto řezné materiály se jejich možnosti použití dále rozšiřují. Povlaky svou tvrdostí a otěruvzdorností chrání SK proti abrazivnímu opotřebení, působí také jako bariéra proti difúznímu opotřebení a proti tepelnému zatížení nástroje.

SK se nejčastěji vyrábí ve formě VBD, dále se také vyrábí ve formě monolitních nástrojů.



Obr. 1.7 Přibližné podíly jednotlivých druhů řezných materiálů ve světové produkci [19]

Cermety se vůči slinutým karbidům vyznačují nižší houževnatostí. Tento fakt je předurčuje spíše pro dokončovací obrábění s použitím vysokých řezných rychlostí.

Řezná keramika je podobně jako cermety méně houževnatá než SK, používá se však jak pro dokončování, tak pro hrubování. V minulosti se řezná keramika díky její vysoké křehkosti používala pouze pro nepřerušované řezy. V dnešní době však technologie výroby řezné keramiky je na takové úrovni, že ji lze použít i pro přerušované řezy (řezná keramika vyztužená whiskery, nitridová keramika).

Polykrystalický kubický nitrid bóru je díky své vysoké tvrdosti a teplotní stálosti velmi vhodný pro obrábění kalených ocelí a tvrzených litin. Aplikací tohoto řezného materiálu na obrábění tvrdých materiálů je dosahováno dobré kvality povrchu a lze tak efektivně nahradit operaci broušení. Cena PKNB je však ve srovnání se SK několikanásobně vyšší a proto se použití PKNB pro obrábění materiálů o tvrdosti nižší než 48 HRC nedoporučuje.

I přes nárůst objemu spotřeby neželezných kovů a slitin (zejména v automobilovém průmyslu) se v konstrukci strojních součástí stále nejvíce používají slitiny železa, tedy oceli a litiny. Použití diamantu je pak značně omezeno, protože diamant je v podstatě čistý uhlík, takže má k železu vysokou afinitu. Při obrábění slitin železa diamantem by pak vlivem difúze uhlíku docházelo k nadměrnému opotřebení nástroje. Nástroje z diamantu jsou však velmi vhodné pro obrábění neželezných a nekovových materiálů, přičemž dovolují použití velmi vysokých řezných rychlostí. Tyto skutečnosti předurčují diamantové řezné nástroje ke speciálním aplikacím, kde je požadována vysoká přesnost a kvalita obroběných ploch.

2 DIAMANT JAKO MATERIÁL ŘEZNÝCH NÁSTOJŮ

2.1 Obecně o diamantu

Diamant je v podstatě modifikace čistého uhlíku. Krystalizuje v kubické soustavě a každý atom uhlíku se kovalentně váže k dalším čtyřem atomům umístěným ve vrcholech čtyřstěnu, což mu také dává největší tvrdost mezi přírodními látkami. Druhou nejznámější modifikací uhlíku je grafit. Ten krystalizuje v hexagonální soustavě ve formě desek a na rozdíl od diamantu je elektricky vodivý. [67]

Diamant má teplotu tavení více jak 4000 °C, má nejlépeší známou tepelnou vodivost, vysoký index lomu a je elektricky nevodivý. Mřížkový parametr diamantu je 0,356 nm a minimální meziatomová vzdálenost je 0,154 nm. [32]

Další vlastností diamantu je jeho extrémní chemická inertnost. V běžných rozpouštědlech je diamant nerozpustný, pouze v některých roztavených kovech (železo, kobalt, nikl, platina, atd.) se diamant rozpouští a po jejich ochlazení se vylučuje ve formě grafitu. Při teplotě vyšší jak 700 °C diamant na vzduchu začíná oxidovat a grafitizovat. [67]

V tabulce 2.1 je porovnání některých vlastností monokrystalu diamantu, polykrystalického diamantu a CVD diamantu.

Tab. 2.1 Vlastnosti monokrystalu diamantu, polykrystalu diamantu a CVD diamantu [20]

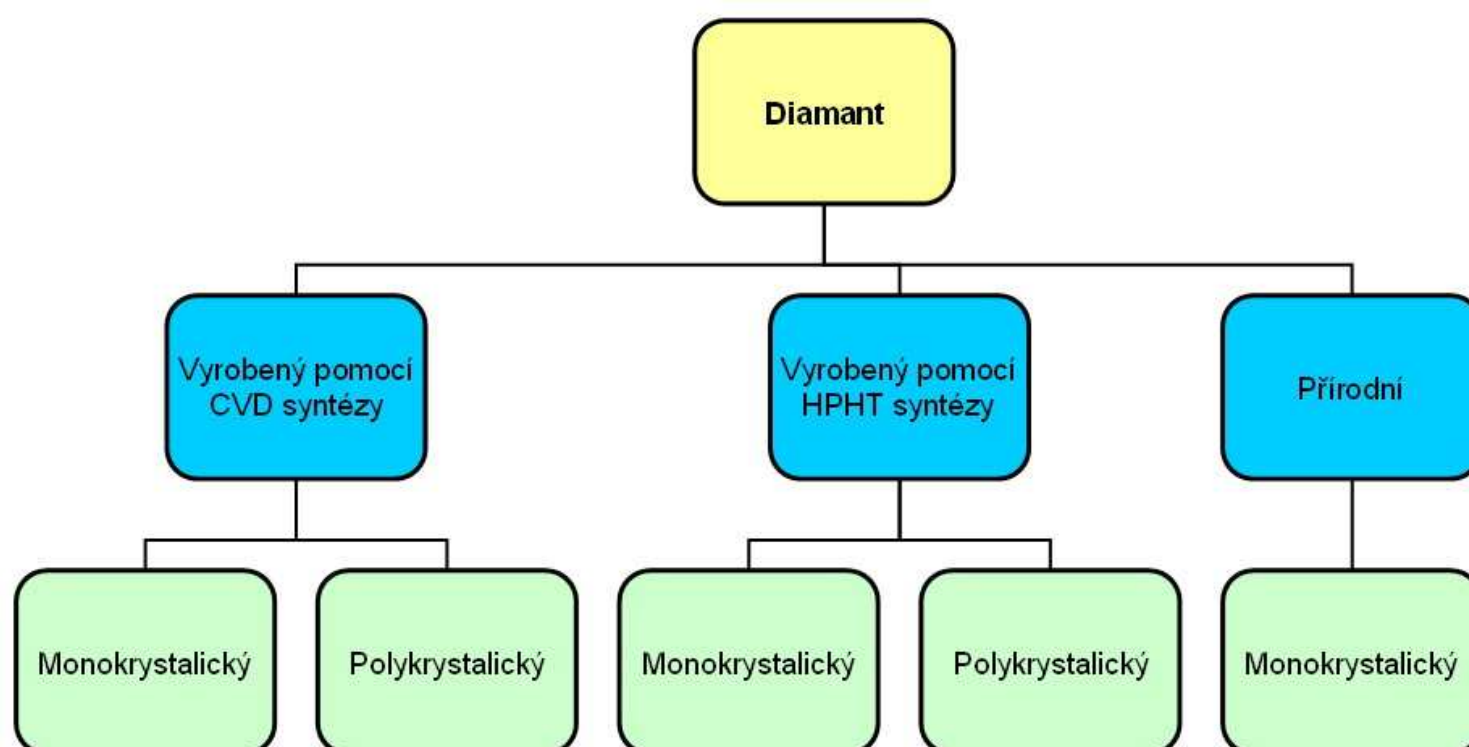
Vlastnost	CVD diamant (CVDITE)	Monokrystalický diamant	Polykrystalický diamant (SYNDITE)
Hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	3,52	3,52	4,12
Tvrdost [GPa]	85 – 100	50 – 100	50
Lomová houževnatost [$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$]	5,5 – 8,5	3,4	8,81
Youngův modul [GPa]	1000 – 1100	1000 – 1100	776
Poissonovo číslo [-]	0,07	0,07	0,07
Pevnost v tahu [MPa]	450 – 1100 (růst – nukleace)	1050 – 3000 (v závislosti na orientaci)	1260
Pevnost v ohybu [GPa]	1,3	2,9	1,2
Pevnost v tlaku [GPa]	9,0	9,0	7,6
Měrná tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] při 20 °C při 200 °C	500 – 2200 500 – 1100	600 – 2200 600 – 1100	560 200
Součinitel teplotní roztažnosti [$10^{-6}\cdot\text{K}^{-1}$] při 100 °C při 500 °C při 750 °C	1,21 3,84 4,45	1,21 3,84 4,45	4,2 – 6,3

Je všeobecně známo, že diamant není vhodný k obrábění železných kovů. Důvodem tohoto faktu je, že diamant je schopen rozpouštět se a reagovat s těmito kovy. Při obrábění pak vzniká zvýšené opotřebení funkčních ploch nástroje v důsledku difúze uhlíku do obrobku a současně dochází k urychlení grafitizace diamantu. [28]

Obecně jsou diamantové řezné nástroje vhodné pro obrábění neželezných a nekovových materiálů, tzn. pro obrábění hliníkových slitin (zvláště pak slitin s vysokým obsahem křemíku), slitin mědi (mosazi, bronzy), titanu a jeho slitin, grafitu, kompozitů vyztužených různými druhy vláken (skleněná, uhlíková, aramidová – kevlar, polyetylenová atd.), keramiky, dřeva a tvrdých přírodních materiálů (žula, mramor apod.). [33]

Diamantové materiály pro řezné nástroje lze podle metody výroby rozdělit na (obr. 2.1):

- ⇒ **přírodní diamanty** (monokrystalické),
- ⇒ **syntetické diamanty**, které se dále dělí na diamanty vyrobené pomocí vysokých tlaků a vysokých teplot – tzv. HPHT metoda (polykrystalické diamanty) a na diamanty vyrobené za nízkých tlaků pomocí CVD metody povlakování (CVD diamanty). [13]



Obr. 2.1 Rozdělení diamantových materiálů podle metody výroby a struktury [13]

2.2 Diamantové materiály používané pro řezné nástroje

2.2.1 Přírodní monokrystalické diamanty

Přírodní diamant vznikl před 990 až 3300 miliony let v hloubce více než 150 km pod zemskou kůrou a v době před 100 až 1200 miliony let byl diamant vynesena v horninách kimberlit a lamproit do vrchní vrstvy zemské kůry. [33]

Mezi nejvýznamnější světová ložiska diamantů patří: Brazílie, Jižní Afrika, Austrálie, Kanada, Rusko a další. [73]

Jednou z možností využití přírodních diamantů je jejich použití pro klenotnické účely, tzn. k výrobě šperků. Jejich hlavní využití však je v průmyslu, kde se používají v řadě aplikací, jako např.: součásti měřicích přístrojů (indentory, doteky), průvlastky pro tažení drátu, vrtací korunky, brousící kotouče, nebo jako materiály pro řezné nástroje. [67]

Monokrystalické přírodní diamanty se používají na řezné nástroje pro dokončovací obrábění. Jejich výhodou jsou extrémně ostré hrany a nízký koeficient tření, díky kterým se dosahuje velmi dobrá kvalita obrobeného povrchu. [24]

Mezi nevýhody přírodního monokrystalického diamantu patří: vysoká cena, omezené množství přírodních zdrojů, malé rozměry krystalů, anizotropie (tzn. jeho vlastnosti nejsou ve všech směrech stejné), křehkost a citlivost na lom (zvláště pak podél určitých krystalografických rovin). [29], [47]

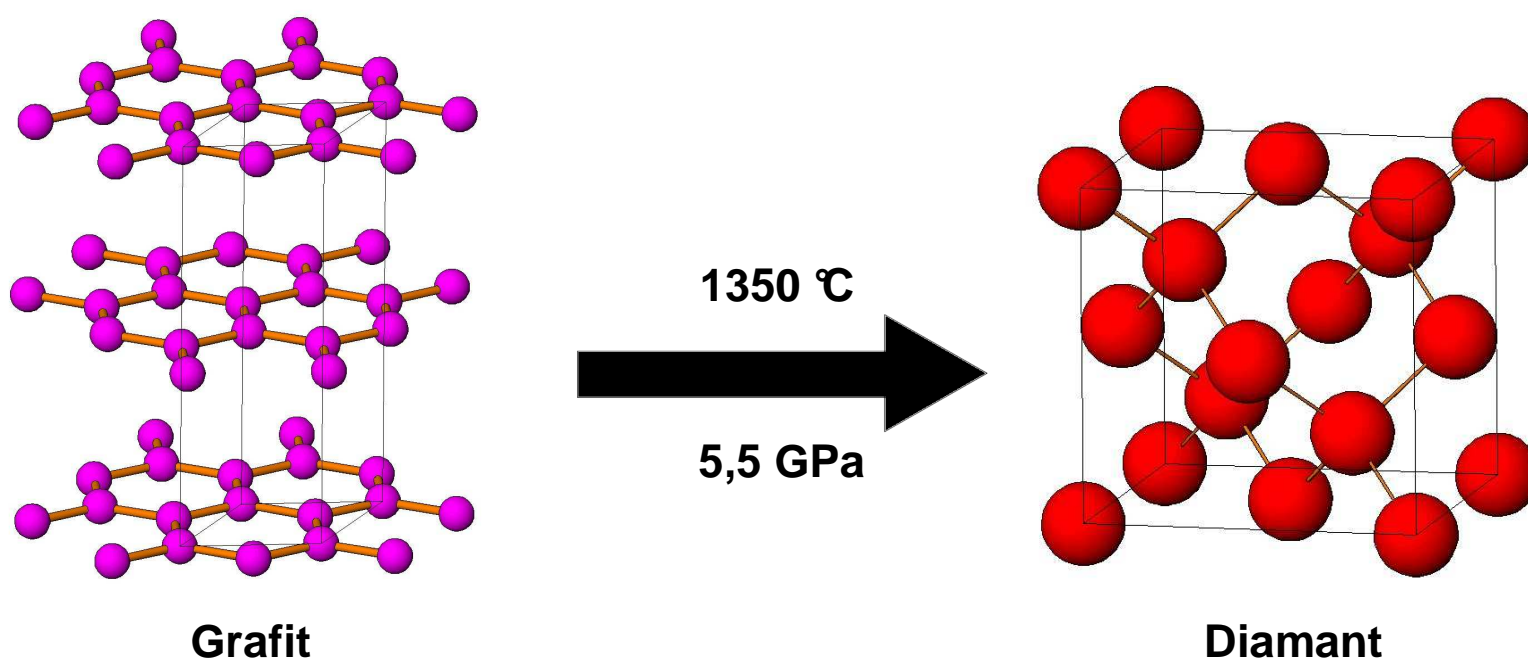
Z výše uvedených nevýhod vyplývá, že u nástrojů z přírodních monokrystalů diamantu je velmi důležitá orientace krystalu vůči řezným silám, což také ovlivňuje výsledný výkon a trvanlivost nástroje. [13]

2.2.2 Syntetické diamanty

2.2.2.1 Polykrystalický diamant (PKD)

K první reprodukovatelné syntéze diamantů pomocí metody HPHT došlo v roce 1955 pracovníky firmy General Electric v USA. Tito pracovníci také poprvé popsali definovaný a opakovatelný vědecky podložený proces, za což jim také byla udělena patentová práva. [33]

V bývalém Československu se první syntéza diamantu uskutečnila v roce 1965 ve VÚPM Šumperk. Tímto se Československo pokládá za 6. zemi na světě, které se podařilo úspěšně vyrobit syntetický diamant. [51]



Obr. 2.2 Změna hexagonální mřížky grafitu na kubickou mřížku diamantu. [32]

Výroba syntetického diamantu spočívá v přeměně hexagonální mřížky grafitu na kubickou mřížku diamantu (obr. 2.2) při vysokých tlacích a teplotách za přítomnosti malého množství katalyzátorů. Katalyzátory mohou být kovové (Cr, Mn, Fe, Co, Ni, nebo jejich slitiny či sloučeniny) i nekovové. Tyto katalyzátory rozpouštějí grafitický uhlík a umožňují jeho krystalizaci ve formě diamantu.

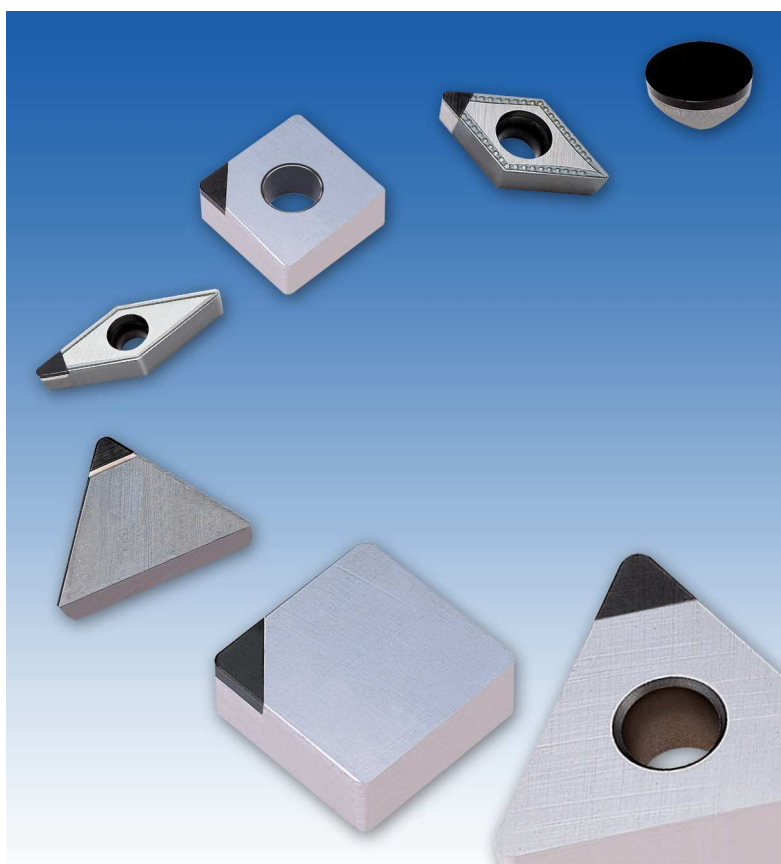
Polykrystalický diamant (PKD) je kompaktní materiál, který obsahuje diamantová zrna uložená v pojivové matrici (nejčastěji Co, ale také Ni, SiC). [33]

PKD se vyrábí pomocí tavného slinování, kde dochází k natavování pojiva (Co), které je schopno rozpouštět uhlík (v tomto případě povrchy diamantových zrn). Vytváří se eutektikum (Co – C) a tavenina se postupně infiltruje do pórů mezi slinovanými zrny a při chladnutí se z ní znovu překrystalizuje diamant. Výsledná struktura je tedy tvořena diamantovými zrny spojenými přímo mezi sebou nebo přes kobaltové pojivo (s ojedinělými místy čistého kobaltu). [29]

Polykrystalický diamant se většinou vyrábí ve formě tlustých vrstev (až 0,5 mm) slinovaných na podkladovém materiálu ze slinutého karbidu ve tvaru kruhových polotovarů (kotoučů). [47]

Tyto kotouče z PKD jsou následně dle potřeby děleny např. pomocí elektroerozivního drátového řezání či laserového paprsku na požadované tvary (čtvercové, obdélníkové, trojúhelníkové, kruhové apod.) a pájeny buď k držáku nástroje ze SK či z rychlořezné oceli, nebo k VBD (obr. 2.3), které jsou k držáku nástroje upínány mechanicky. Po připájení se nástroje brousí na požadovanou geometrii buď za pomoci elektroerozivního broušení nebo pomocí klasického broušení či lapování. [13]

Mezi významné výrobce PKD polotovarů (kotoučů) patří firmy: Diamond Innovations, Element Six, Iscar, Mitsubishi, Seco, Sumitomo, Tungaloy a další. V příloze č. 1 je uveden přehled sortimentu vybraných světových výrobců PKD polotovarů vhodných pro výrobu rezných nástrojů.



Obr. 2.3 VBD firmy ISCAR s připájenými rožky z PKD [36]

Mezi výhody PKD patří jeho větší houževnatost oproti monokrystalům diamantu, díky kterým může být PKD použit pro přerušované řezy. Tato větší houževnatost je způsobena přítomností pojiva. Další výhodou PKD jsou jeho izotropní vlastnosti způsobené náhodnou orientací krystalů diamantových zrn uložených v kobaltové matici, takže trhliny jen zřídka přecházejí z jednoho krystalu do druhého. [1], [28]

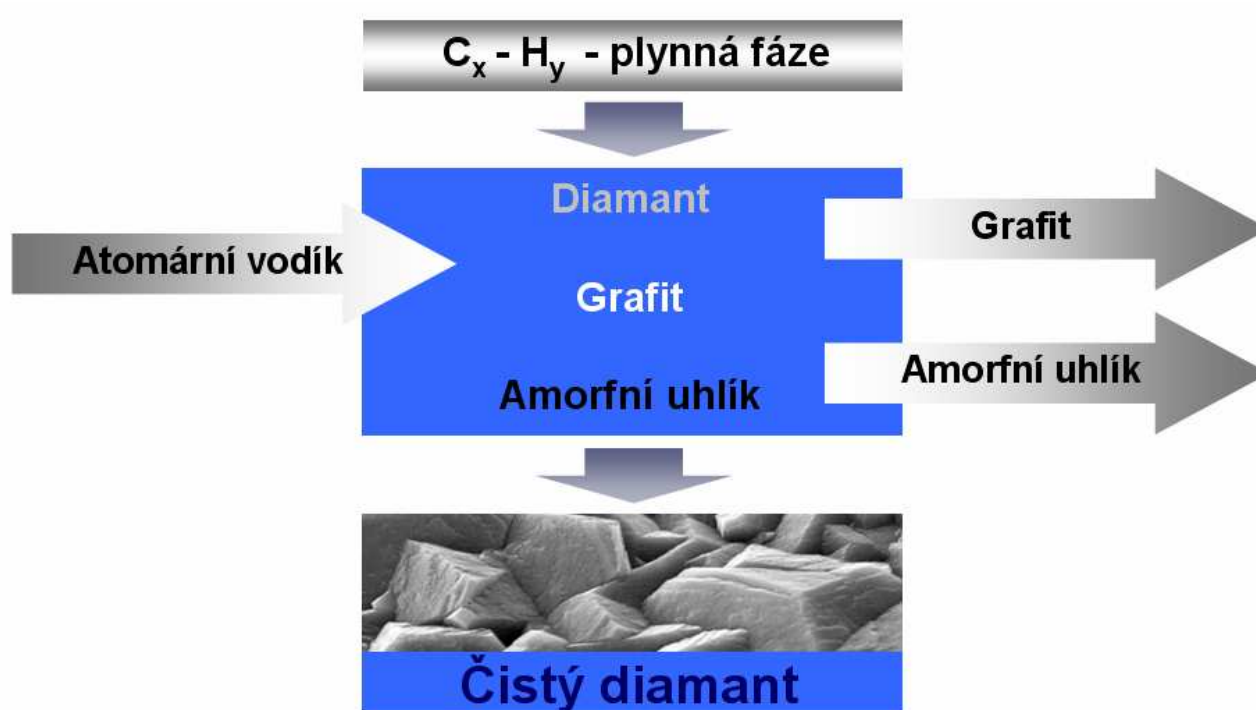
Na druhou stranu pojivo způsobuje také řadu nevýhod, mezi něž patří hlavně náchylnost PKD ke korozi, snížení tvrdosti a větší sklon PKD k oxidaci. Velkou nevýhodou polykrystalických diamantů také je, že je nelze vyrábět ve složitějších tvarech a tak např. nelze vyrobit komplexní utvařeče třísek. [28], [72]

Polykrystalický diamant se nejčastěji používá pro soustružení a frézování abrazivních slitin hliníku a křemíku. Dále také pro obrábění jiných abrazivních nekovových materiálů, jako např. kompozitní materiály, umělé pryskyřice, pryž, plasty, grafit, slinuté karbidy, předlisovaná keramika a SK, ale také pro obrábění mědi, olova, mosazi, bronzů, slitin hořčíku a slitin zinku. [1]

2.2.2.2 CVD diamant

Na rozdíl od polykrystalického diamantu, který se vyrábí za vysokých tlaků a vysokých teplot při tzv. HPHT metodě se CVD diamant vyrábí při nízkých tlacích a teplotách cca 1000 °C. Svůj název (CVD diamant) dostal tento typ diamantu právě díky metodě jeho výroby, tedy CVD metodě nanášení vrstev. [72]

Princip výroby CVD diamantu je zobrazen na obr. 2.4. Do komory zařízení pro výrobu CVD diamantu se přivede směs dvou plynů. Jedním je vodík a druhým je např. metan (nebo jiný uhlovodíkový plyn). I když koncentrace metanu ve směsi je nízká (cca 1 až 5 %) je právě metan ten plyn, který poskytuje uhlík, ze kterého se vytváří diamant. [21]



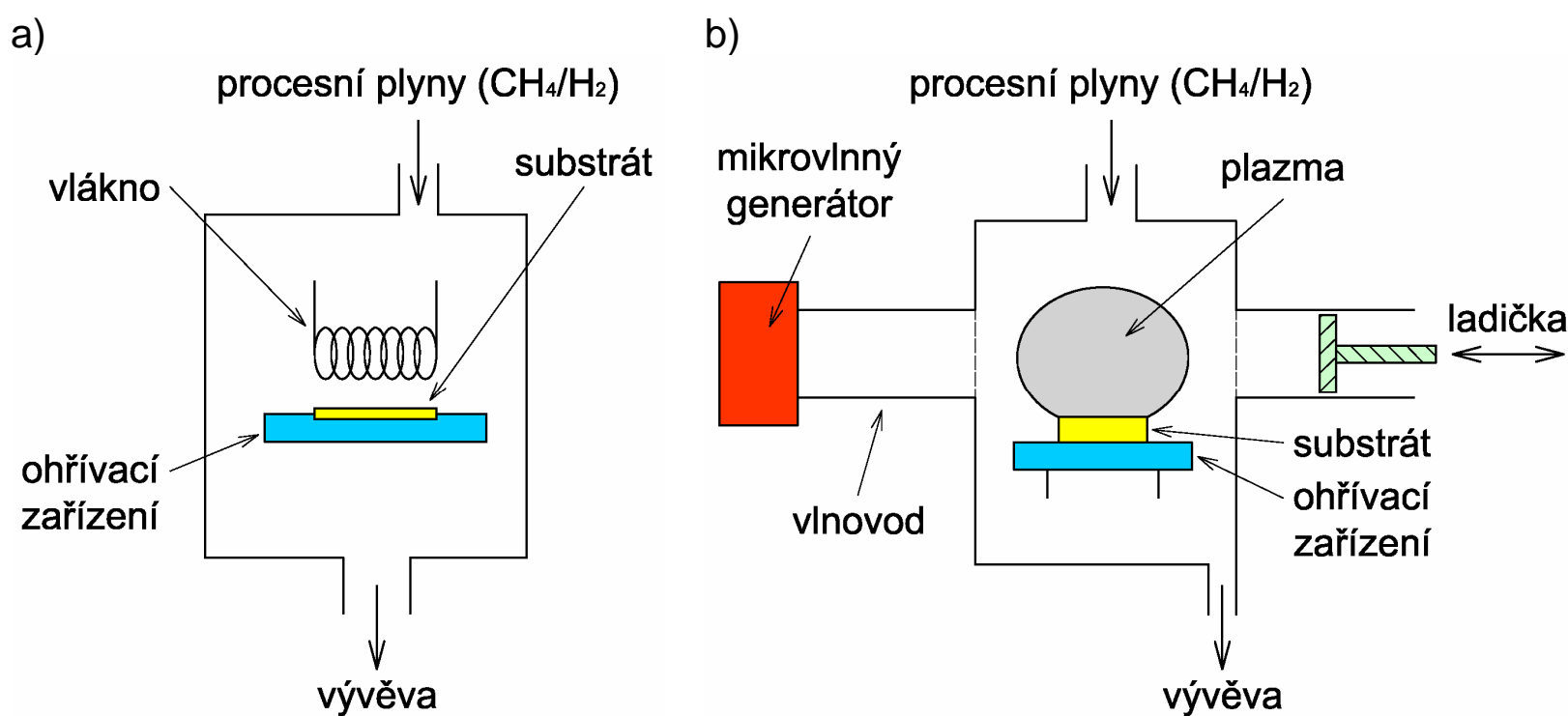
Obr. 2.4 Schéma výroby CVD diamantu [9]

Nicméně hlavní roli v procesu syntézy hraje vodík, který musí být přítomen ve formě vodíkových radikálů. Při podmínkách používaných při CVD diamantové

syntéze je grafit oproti diamantu termodynamicky stabilnější fáze. Právě vodíkové radikály jsou schopny odleptat grafit tvořící se na substrátu mnohem rychleji, než jsou schopny odleptat diamant. Další funkcí vodíku při CVD syntéze je ukončit volné uhlíkové vazby atomů uhlíku na rostoucím diamantovém povrchu, stabilizace povrchu a zabránění přeměny uhlíku na jinou než diamantovou formu. Právě proto je na konci syntézy diamant jedinou formou uhlíku vzniklou na povrchu substrátu.

Jako podkladový substrát může být použit: diamant, křemík, karbid křemíku a řada jiných karbidů, jako např. karbid molybdenu nebo karbid wolframu. [21]

Nejvíce komerčně využívané metody pro výrobu diamantových filmů jsou HFCVD (Hot Filament CVD – metoda se žhavicím vláknem) – viz. obr. 2.5a a MPCVD (Microwave Plasma CVD – metoda s využitím mikrovlnné plazmy) – viz. obr. 2.5b. Tlak v komoře zařízení je nižší než atmosférický (běžně mezi 1 až 26 kPa, vyvozen vývěvami) a teplota se pohybuje od 700 do 1200 °C. [21], [33]



Obr. 2.5 Schéma zařízení pro výrobu CVD diamantu [50]
 a) zařízení využívající metodu HFCVD
 b) zařízení využívající metodu MPCVD

CVD diamant rozlišujeme podle tloušťky filmu na dva typy:

- ⇒ **tenké filmy, tzv. CVD diamantové povlaky** – jejich tloušťka je méně než 30 μm ,
- ⇒ **tlusté filmy, tzv. CVD diamantové vrstvy** – jejich tloušťka je nejčastěji do 0,5 mm (lze ale vyrobit vrstvu tlustou až 1 mm). [69]

CVD DIAMANTOVÉ POVLAKY

V roce 1975 byl ruskými vědci poprvé nanesen povlak z CVD diamantu na podkladový substrát z nediamantového materiálu. První diamantem komerčně povlakovaná VBD byla na trh uvedena v roce 1993. Dnes je dostupné široké spektrum diamantových povlaků pro řezné nástroje. [72]

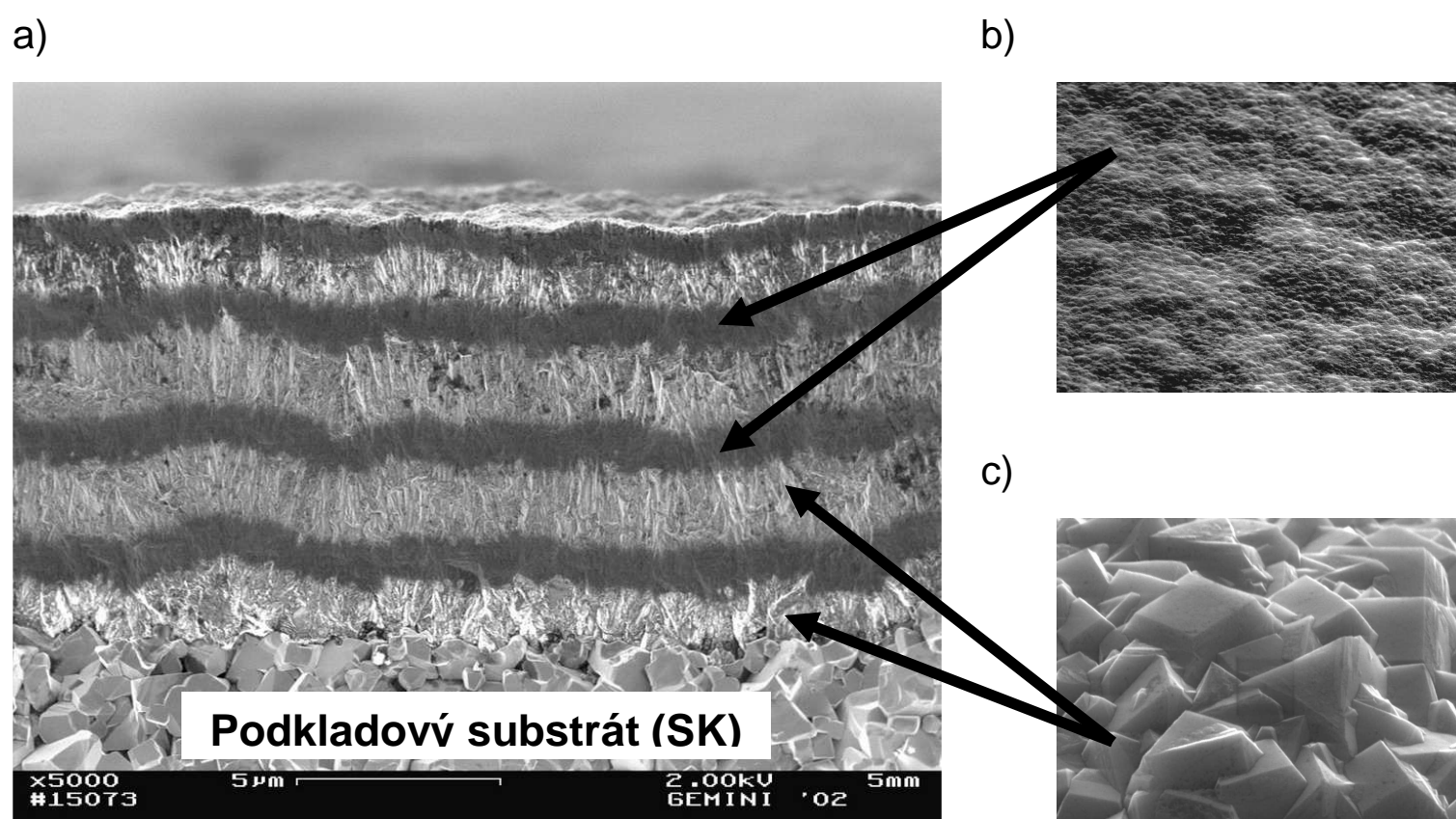
Mezi významné výrobce diamantových povlaků patří firmy: CemeCon, Oerlikon Balzers, Ceratonia, Gühring a další. Přehled sortimentu vybraných světových výrobců CVD diamantových povlaků vhodných pro řezné nástroje je uveden v příloze č. 2.

Tyto firmy nabízejí mnoho druhů diamantových povlaků, v podstatě však existují pouze dva druhy diamantových povlaků. Jedná se o krystalický (obr. 2.6c) a nanokrystalický (obr. 2.6b) diamantový povlak plus jejich kombinace (multivrstvý povlak – obr. 2.6a). [8]

Krystalický diamantový povlak se používá jako spodní vrstva při výrobě multivrstvého diamantového povlaku. Tento povlak totiž obsahuje větší diamantová zrna, která se mohou „zaklínit“ do zrn podkladového substrátu (sli nutý karbid), čímž se dosáhne tzv. mechanické adheze (obr. 2.7). Oproti tomu nanokrystalický diamantový povlak má díky svým jemným zrnům větší houževnatost a používá se proto u multivrstvých diamantových povlaků jako vrchní vrstva. [22]

Problémem u CVD diamantových povlaků je nízká adheze povlaku k substrátům ze sli nutých karbidů. Tato nízká adheze je způsobena rozdílnými hodnotami koeficientů délkové roztažnosti, modulů pružnosti a chemických a atomových struktur mezi diamantem a SK. Adhezi povlaku k podkladovému materiálu také snižuje kobaltové pojivo obsažené ve SK, které podporuje vznik grafitu na povrchu substrátu. [33]

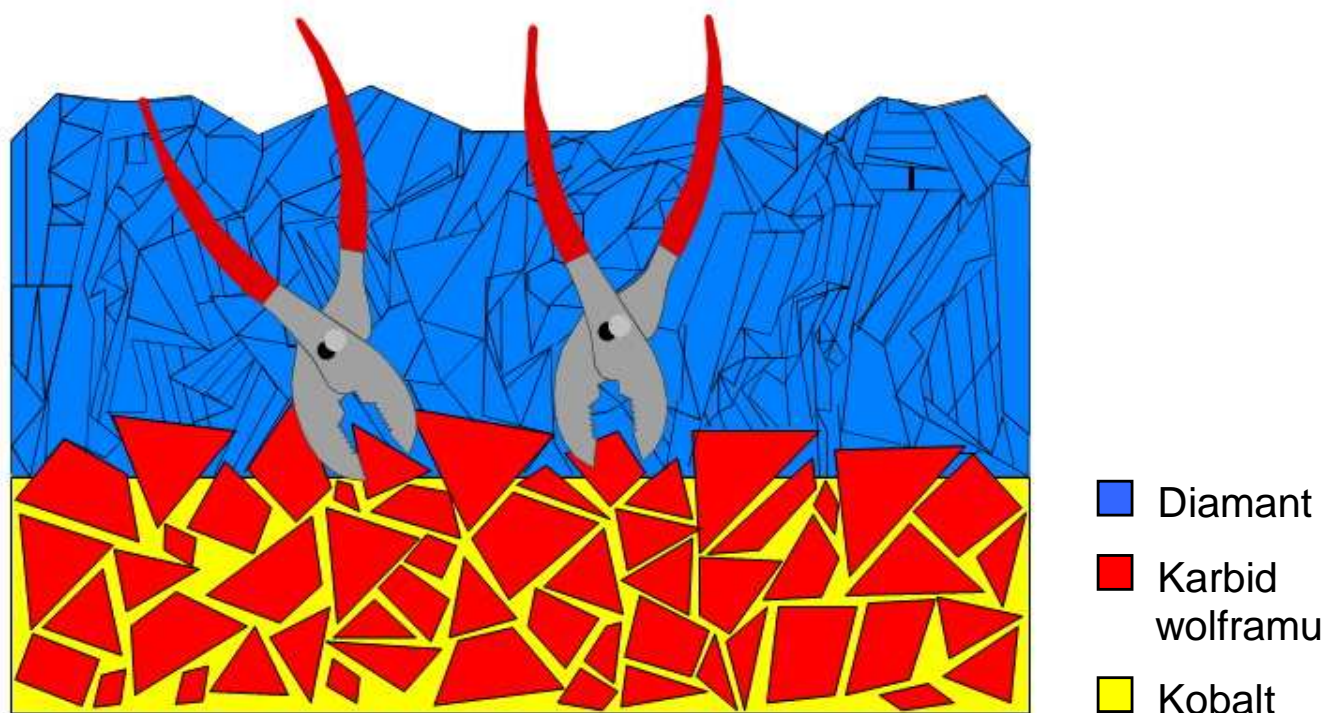
Z tohoto důvodu nelze jako podkladový substrát použít jakýkoliv sli nutý karbid (rozhoduje obsah kobaltu). Výrobci diamantových povlaků proto mají zpracovány seznamy sli nutých karbidů od různých výrobců vhodných pro povlakování CVD diamantem. Před samotným povlakováním je nutno odstranit vrstvu kobaltu z povrchu SK, aby se zlepšila adheze a zabránilo se přímému styku mezi povlakem a kobaltem. [18], [22], [33]



Obr. 2.6 Diamantové povlaky firmy CemeCon [9]
a) multivrstvý povlak, b) nanokrystalický povlak, c) krystalický povlak

Úpravy zabraňující přímému styku povlaku s kobaltem:

- leptání substrátu pomocí kyselin a jiných činidel, např. H_2SO_4 ;
- odstranění kobaltu pulzním laserem;
- vytvoření bariérních mezivrstev z různých materiálů;
- zdrsňení povrchu substrátu jemným broušením;
- čištění v ultrazvukové lázni;
- oduhličení povrchu substrátu pomocí směsi plynů $H_2 + 2\% O_2$;
- čištění povrchu substrátu mikrovlnnou plazmou. [33]

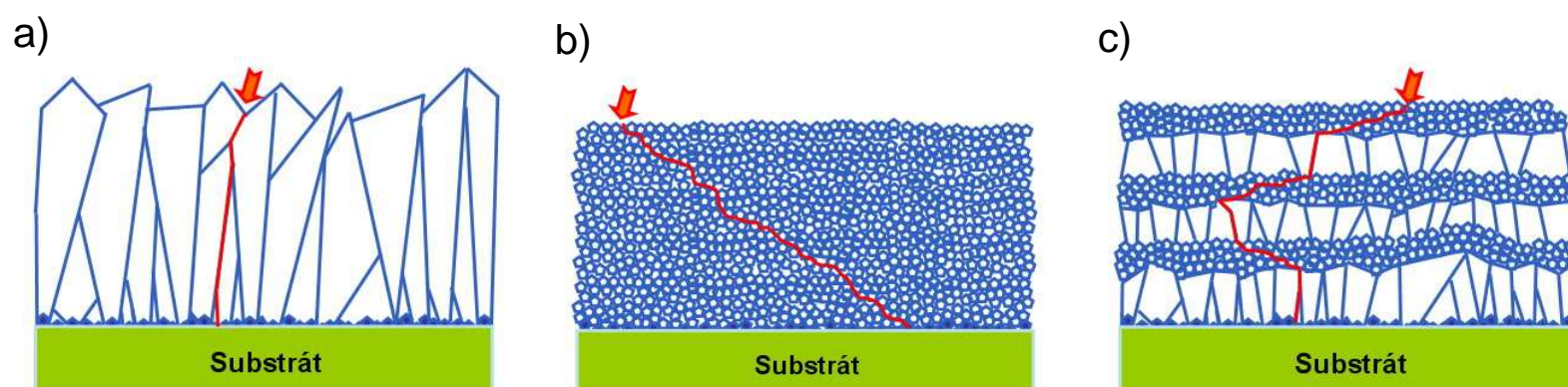


Obr. 2.7 Schéma mechanické adheze u CVD diamantového povlaku [10]

Velkou výhodou CVD diamantových povlaků oproti PKD a CVD diamantovým vrstvám je, že mnohou být nanášeny na podkladové substráty složitých tvarů. Mohou tak být povlakovány VBD s utvařeci třísek i složité vícebřité monolitní nástroje (vrtáky, frézy, výstružníky apod.), jejichž celý funkční povrch je pokryt povlakem, čímž není omezena šířka záběru ostří ap. [33]

Na obr. 2.8 je zobrazen vliv typu diamantového povlaku na šíření trhlin. U jednovrstvého krystalického diamantového povlaku se trhliny mohou lehce šířit, protože postupují přímočaře po hranicích velkých zrn až k povrchu nástroje (obr. 2.8a). Velmi jemná zrna u jednovrstvého nanokrystalického diamantového povlaku výrazně zvětšují lomovou houževnatost a zapříčiňují, že se trhliny šíří k povrchu podkladového substrátu pod úhlem 45° (obr. 2.8b). U multivrstvého diamantového povlaku se díky mnohonásobným vrstvám výrazně zvětší pevnost a trhliny jsou neustále odchylovány od povrchu nástroje (obr. 2.8c). [16]

CVD diamantové povlaky stejně jako ostatní diamantové materiály nejsou vhodné pro obrábění železných materiálů a slitin (oceli, litiny). Jsou však vhodné pro obrábění grafitu, kompozitů a plastů vyztužených různými vlákny, hliníku a jeho slitin, dřeva, slinutých karbidů, keramiky a ostatních neželezných materiálů, jako např. mědi a jejich slitin (mosaz, bronz), hořčíkových slitin, MMC materiálů (metal matrix composites – kompozity s kovovou maticí), slitin olova či drahých kovů. [8], [17], [54], [56]



Obr. 2.8 Vliv typu diamantového povlaku na šíření trhlin [16]

- a) jednovrstvý krystalický povlak z CVD diamantu
 b) jednovrstvý nanokrystalický povlak z CVD diamantu
 c) multivrstvý povlak z CVD diamantu (kombinace a) + b))

CVD DIAMANTOVÉ VRSTVY

Mezi polykrystalickým diamantem (PKD) a CVD diamantem ve formě tlusté vrstvy existuje určitá podobnost. Oba tyto nástrojové materiály jsou vyráběny na podkladovém materiálu ze slinutého karbidu (SK) ve tvaru disků (či jiných tvarech), které se následně řezou a pájí buď na vyměnitelné břitové destičky (VBD), nebo na monolitní nástroje ze SK. [12]

Hlavní rozdíl mezi PKD a CVD diamantem je ten, že CVD diamantové vrstvy (stejně tak jako povlaky) neobsahují žádné kovové pojivo a jejich struktura se tím pádem prakticky neliší od přírodních diamantů. Tento fakt dává CVD diamantům výjimečné vlastnosti (viz. tab. 2.2), ale zároveň přináší řadu nevýhod. [65]

Tab. 2.2 Porovnání vlastností CVD diamantových vrstev s PKD a jejich spojitost s obráběním [25]

Vlastnosti CVD diamantu (ve vztahu k PKD)	Výhody oproti PKD (* – nevýhody)
Vyšší tvrdost	Přesné obrábění, pomalejší opotřebení
Menší velikost zrn	Lepší kvalita povrchu
Vyšší odolnost proti abrazi	Prodloužená trvanlivost, přesnější obrábění
Nižší koeficient tření	Nižší síly, nižší vývin tepla, vyšší rezné rychlosti
Větší stabilita	Přesnější obrábění
Vyšší chemická netečnost	Obrábění korozivních materiálů, jako např. plastů
Vyšší tepelná vodivost	Vyšší rezné rychlosti
Nižší lomová houževnatost (*)	Omezené použití pro frézovací operace (*)

Výroba CVD diamantových vrstev probíhá depozicí z plynné fáze, při níž je podkladový substrát umístěn do povlakovací komory, do které jsou přivedeny pracovní plyny (metan a vodík). Na tomto substrátu postupně roste vrstva diamantu, která obsahuje krystaly diamantu o velikosti od 2 μm (u podkladového substrátu) do 25 μm (na povrchu vrstvy tlusté 500 μm). Dalším krokem při výrobě CVD diamantových vrstev je odleptání podkladového substrátu, což vede k tomu, že vznikne samostatná vrstva CVD diamantu. Tato vrstva se poté otočí (jemnými

zrny nahoru) a připájí k destičce z broušeného karbidu wolframu. Posledním krokem je leštění povrchu CVD diamantové vrstvy. [71]

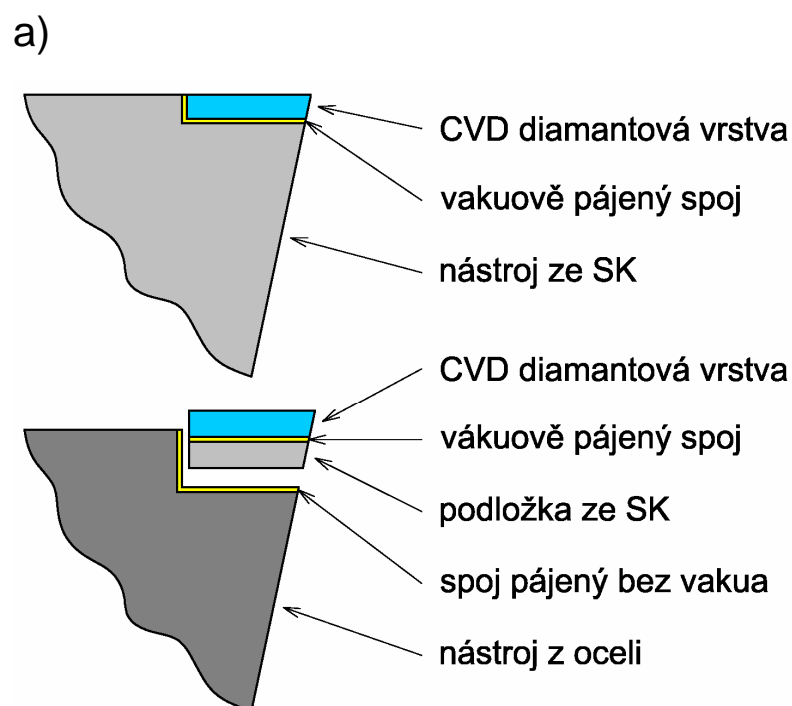
Jednou z nevýhod je, že CVD diamantové vrstvy jsou poměrně křehké a nejsou proto vhodné pro hrubovací a přerušované řezy (frézování). Lze je však s výhodou použít pro dokončovací obrábění. Stejně jako u PKD nelze ani u CVD diamantových vrstev vytvářet složité geometrie utvařečů třísek, což je jejich další nevýhoda. [37]

Mezi další významnou nevýhodu patří fakt, že většina CVD diamantů je stejně jako přírodní diamanty elektricky nevodivá, tzn. nelze je dělit pomocí elektroerozivního drátového řezání (WEDM). K řezání CVD diamantových vrstev je proto nutno použít technologii laserového paprsku, která ovšem oproti WEDM vykazuje nižší přesnost a horší kvalitu řezu. [12], [37]

Firma Element Six je však schopna vyrobit elektricky vodivý CVD diamant (označení CVDITE CDE), který je možno dělit pomocí elektroerozivního drátového řezání. Takovýto elektricky vodivý CVD diamant lze vyrobit přidáním vhodného legujícího prvku (bóru) v průběhu syntézy. [20], [65]

Mezi významné výrobce CVD diamantových vrstev patří firmy: Ceratonia, Element Six, sp3 Diamond Technologies a další. V příloze č. 3 je uveden přehled sortimentu vybraných světových výrobců CVD diamantových vrstev vhodných pro řezné nástroje.

Jak již bylo uvedeno, podobně jako PKD se CVD diamantové vrstvy dělí na požadované tvary a posléze pájí k VBD nebo k monolitním nástrojům (SK, ocel) viz. obr. 2.9. Aby však bylo dosaženo kvalitního spoje, je nutno CVD diamantové vrstvy (na rozdíl od PKD) pájet ve vakuu. [37]



b)



Obr. 2.9 Vyměnitelné břitové destičky s připájeným rožkem z CVD diamantu
 a) způsoby připevnění CVD diamantové vrstvy k VBD [61], [62]
 b) VBD s CVD diamantovou vrstvou firmy sp3 Cutting Tools [60]

CVD diamantové vrstvy se používají hlavně pro obrábění vysoce abrazivních materiálů, jako např.: grafit, předlisovaná keramika, slitiny hliníku s vysokým obsahem křemíku, MMC materiály, různé druhy kompozitů atd. [59]

2.3 Zhodnocení kapitoly

V dnešní době jsou známy 3 druhy diamantu jako materiálu pro řezné nástroje, a to: přírodní diamant, polykrystalický diamant (PKD) a CVD diamant. Od používání přírodního diamantu se dnes již upouští, neboť jeho cena je díky omezeným přírodním zdrojům a nesnadné těžbě vysoká. Navíc velikost přírodního diamantu je malá (s velikostí roste cena), čímž je limitována šířka záběru ostří nástroje, který takovýto přírodní diamant obsahuje. Problém u přírodních diamantů je také v tom, že jejich obrobiteľnosť je silně závislá na orientaci diamantových zrn vůči působícím silám. Diamanty se totiž vyznačují tím, že mají anizotropické vlastnosti, což v podstatě znamená, že jejich vlastnosti nejsou ve všech směrech stejné.

PKD a CVD diamant patří mezi nejnovější řezné materiály, i když od výroby prvního polykrystalického diamantu (PKD) uběhlo již více než 50 let a od první úspěšné syntézy CVD diamantu uběhlo již více jak 30 let. I když se jedná o špičkové řezné materiály, které lze používat za vysokých řezných rychlostí, nejsou tolik rozšířené jako slinuté karbidy. Jedním z důvodů je fakt, že tyto řezné materiály nejsou vhodné pro obrábění železných kovů a slitin, kterých je mezi konstrukčními materiály stále nejvíce.

CVD diamanty lze podle tloušťky filmu rozdělit na CVD diamantové povlaky (do 30 μm) a CVD diamantové vrstvy (do 0,5 mm). CVD diamantové povlaky přinášejí oproti PKD a CVD diamantovým vrstvám výhodu v tom, že mohou být nanášeny na velmi tvarově složitý povrch (např. utvařeče třísek), což u ostatních diamantových materiálů nelze.

CVD diamanty se svými vlastnostmi a strukturou prakticky neliší od přírodního diamantu a proto disponují oproti PKD větší tvrdostí a tím pádem i větší odolností proti abrazivnímu opotřebení. Měly by proto také dosahovat větší trvanlivosti. I přes tyto fakty je v dnešní době nejrozšířenější diamantový řezný materiál PKD (co do objemu spotřeby). Jedním z důvodů může být fakt, že PKD má oproti CVD diamantu větší houževnatost (vlivem přítomnosti pojiva) a lze ho tedy použít i pro přerušované řezy.

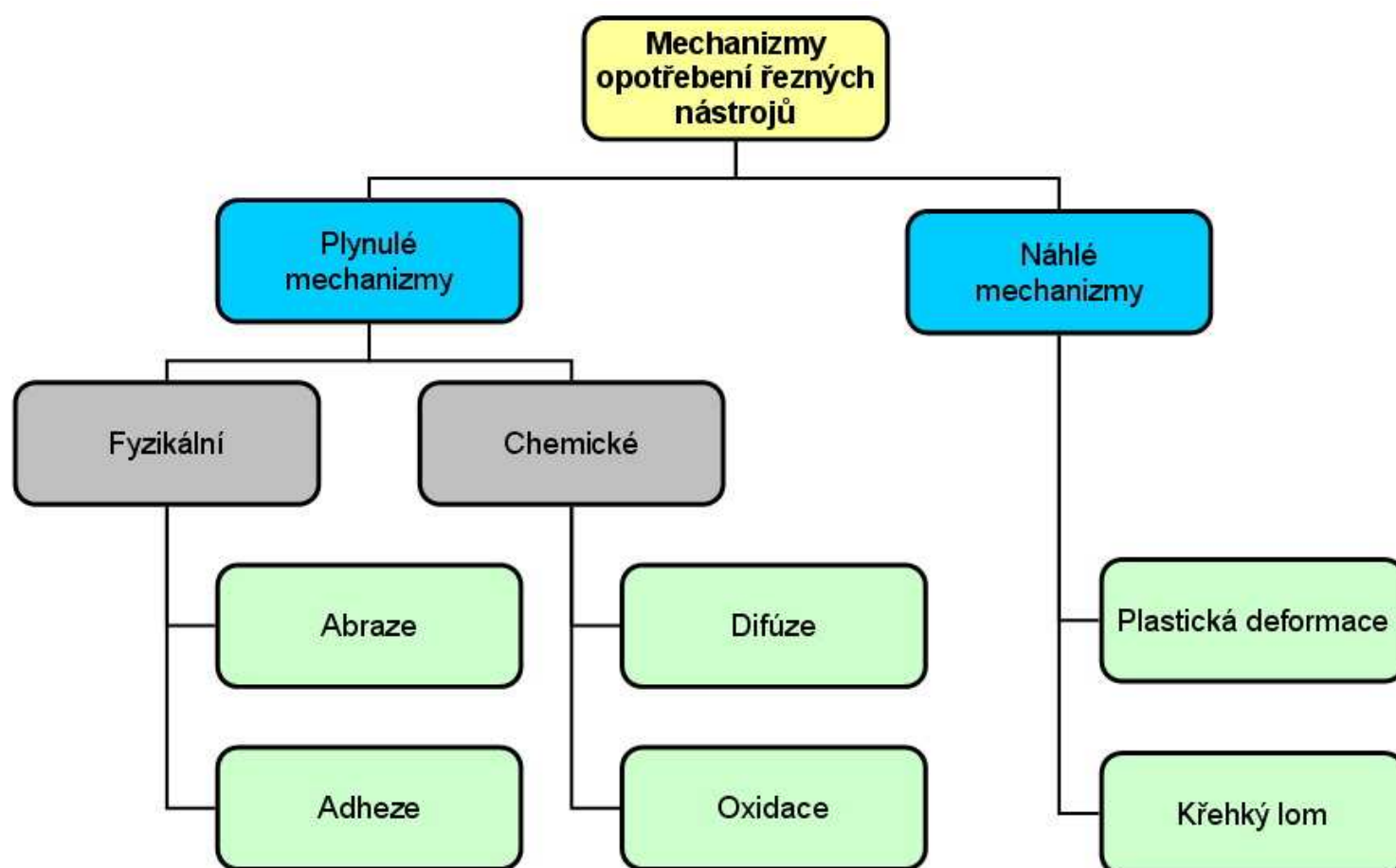
Hlavní využití CVD diamantu jako materiálu řezných nástrojů je ve speciálních aplikacích, kde je požadována vysoká přesnost obrobených ploch, velká produktivita a dlouhá životnost nástroje.

3 OPOTŘEBENÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

Při obrábění dochází mezi nástrojem a obrobkem k relativnímu pohybu a ke kontaktu (na hlavním a vedlejším hřbetě a špičce nástroje). Dále také dochází k relativnímu pohybu a ke kontaktu mezi nástrojem a třískou (na čele nástroje). Z těchto důvodů je patrné, že musí docházet k opotřebení nástroje. [24]

3.1 Mechanizmy opotřebení

Proces opotřebení nástroje je velmi složitý děj, který závisí na mnoha faktorech, jako např. fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného a nástrojového materiálu, druh obráběcí operace, geometrie nástroje, pracovní podmínky, rezné prostředí, atd. V průběhu procesu opotřebení působí mnoho odlišných fyzikálně – chemických jevů (mechanizmů opotřebení), k nimž zejména patří (obr. 3.1): abraze, adheze, difúze, oxidace, plastická deformace a křehký lom. [23]



Obr. 3.1 Rozdělení mechanismů opotřebení rezných nástrojů [23]

Abraze (obr. 3.2 – 1) je brusný otěr způsobený vlivem tvrdých mikročástic obráběného materiálu i mikročástic uvolněných z materiálu nástroje (břítu).

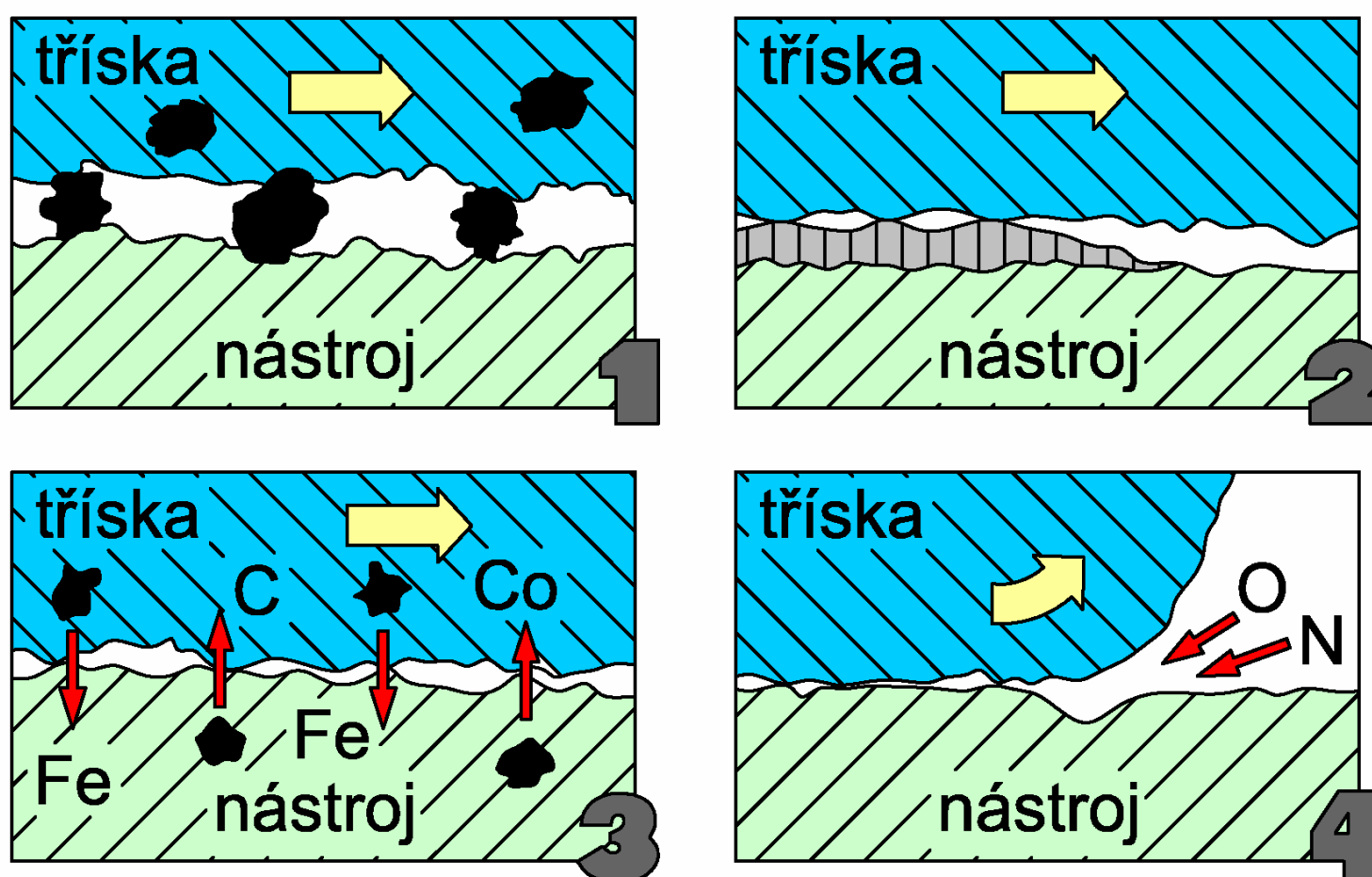
Adheze (obr. 3.2 – 2) je vytváření a následné okamžité porušování mikrosvarových spojů na stýkajících se vrcholcích nerovností čela a třísky, aby nastala, je zapotřebí vysokých tlaků a teplot, chemické příbuznosti materiálů a kovově čistých styčných povrchů.

Difúze (obr. 3.2 – 3) je vytváření nežádoucích chemických sloučenin ve struktuře nástroje, které vznikají migrací atomů z obráběného do nástrojového materiálu a naopak.

Oxidace (obr. 3.2 – 4) je vznik chemických sloučenin na povrchu nástroje v důsledku přítomnosti kyslíku v okolním prostředí.

Plastická deformace je důsledek vysokého tepelného a mechanického zatížení kumulovaného v čase. V nejhorším důsledku se může projevit ve formě tzv. lavinového opotřebení.

Křehký lom je důsledek vysokého mechanického zatížení nebo krátkodobého přetížení břitu, mezi něž například patří: přerušovaný řez, nehomogenita a vměstky v obráběném materiálu, atd. [34]

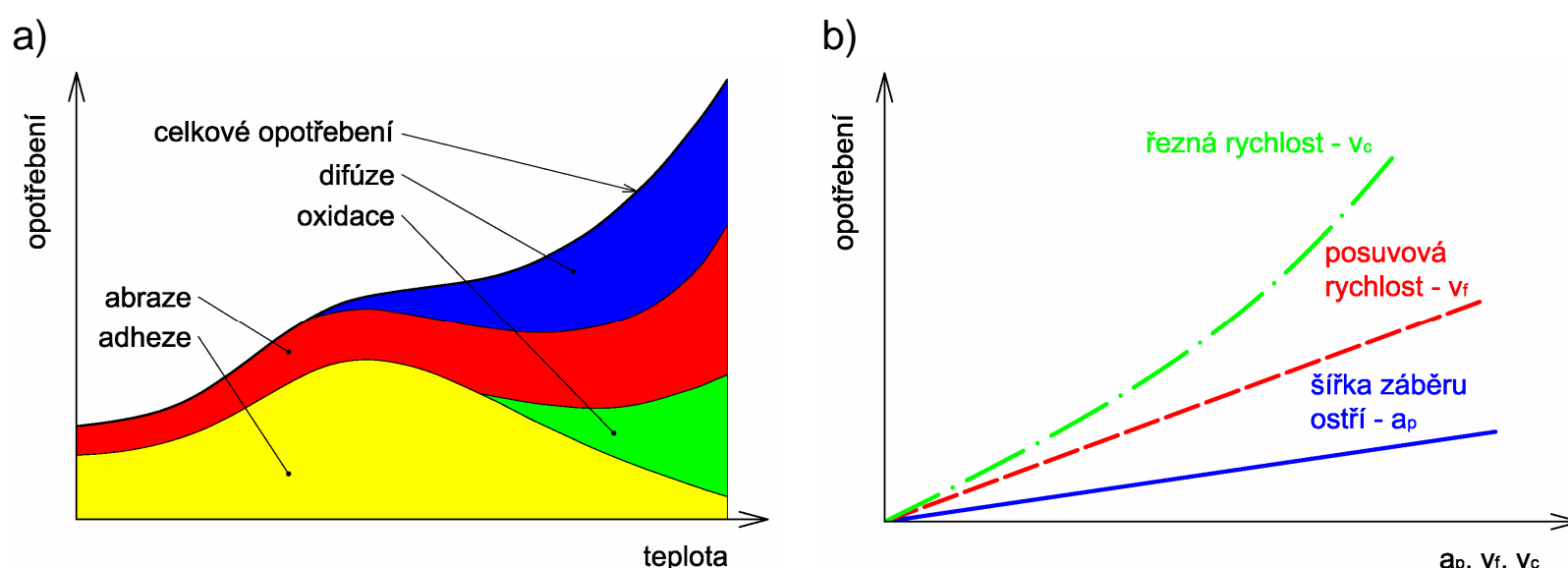


Obr. 3.2 Mechanizmy opotřebení řezných nástrojů [1]
1 – abraze, 2 – adheze, 3 – difúze, 4 – oxidace

Z obr. 3.1 je patrné, že abraze, adheze, difúze a oxidace patří do tzv. plynulých mechanismů opotřebení. To znamená, že působí v průběhu času plynule, i když jejich časový okamžik začátku působení nemusí být vždy shodný. Oproti tomu plastická deformace a křehký lom patří mezi tzv. náhlé mechanismy opotřebení, protože působí v daném okamžiku a obvykle způsobí okamžité ukončení činnosti nástroje (náhlá změna tvaru břitu nástroje, lavinové opotřebení, ulomení špičky). [23]

Hřbet nástroje se opotřebovává především v důsledku abraze a oxidace, čelo nástroje pak v důsledku adheze, difúze, abraze a oxidace. Na to, zda se nástroj bude více opotřebovávat na hřbetě či na čele mají výrazný vliv i další faktory, jako např. geometrie nástroje, druh operace (hrubování, dokončování) a také řezné podmínky. Z řezných podmínek má pak největší vliv na opotřebení nástroje řezná rychlost, nejmenší vliv má šířka záběru ostří (obr. 3.3b). [24]

Celkové opotřebení nástroje se pak skládá z kombinace výše uvedených mechanismů opotřebení působících současně (obr. 3.3a).

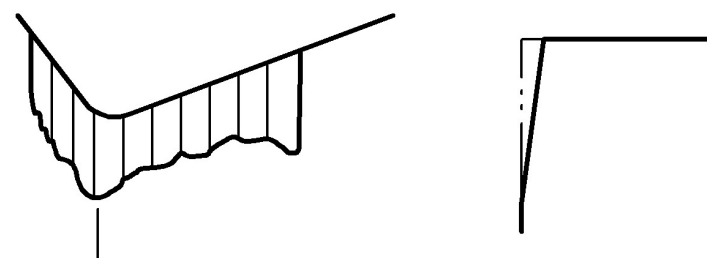


Obr. 3.3 Opotřebení řezných nástrojů v závislosti na:
a) teplotě, b) řezných podmínkách [34]

3.2 Formy opotřebení

Opotřebení hřbetu břitu (obr. 3.4)

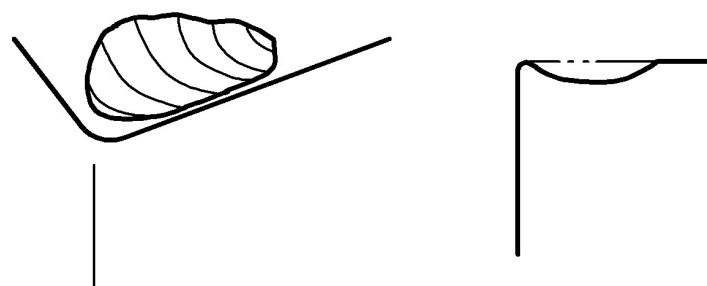
Je důsledkem abrazivních forem opotřebení. Vyskytuje se na ploše hřbetu hlavního a vedlejšího ostří a také na ploše hřbetu u poloměru špičky. Obecně je opotřebení hřbetu obvyklým typem opotřebení a je jedním z hlavních kritérií charakterizujících trvanlivost VBD. [1], [58]



Obr. 3.4 Fazetka (ploška) opotřebení na hřbetě [1]

Výmol na čele (obr. 3.5)

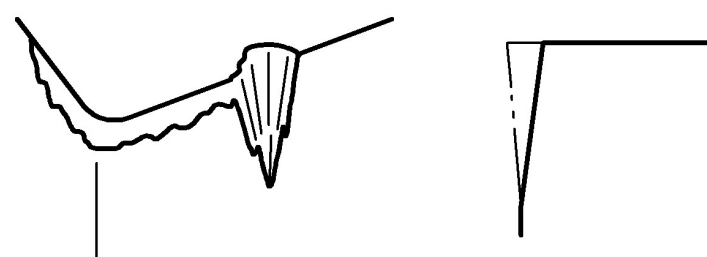
Vzniká v důsledku difúzního a abrazivního opotřebení. Výmol je tedy jednak vytvořen vlivem brusného otěru tvrdých částic obsažených v materiálu obrobku a jednak difúzí, která probíhá v místě břitu s největší teplotou (místo kontaktu třísky a čela nástroje). [41]



Obr. 3.5 Výmol na čele [1]

Primární hřbetní rýha (obr. 3.6)

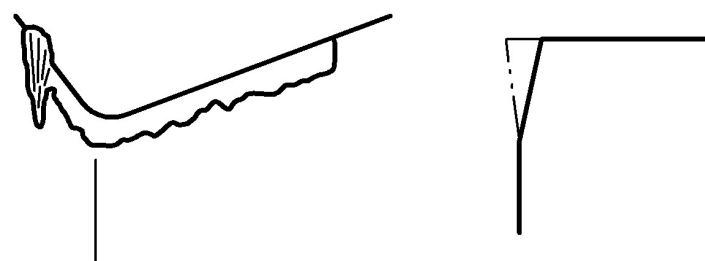
Jedná se o vrub, který vzniká na hlavním hřbetě nástroje. Patří mezi typické adhezní opotřebení, může ale být způsobena také oxidačním opotřebením. Nejčastěji vzniká v místě kontaktu břitu s bokem třísky. [1]



Obr. 3.6 Primární hřbetní rýha [1]

Sekundární (oxidační) hřbetní rýha (obr. 3.7)

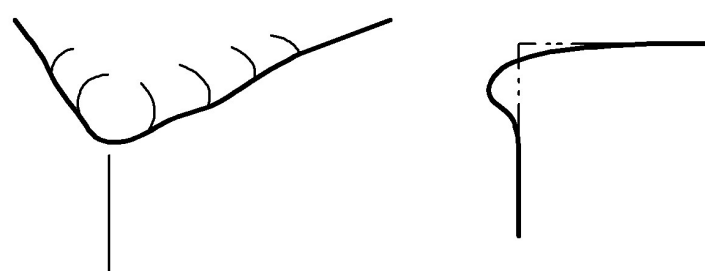
Tato rýha vzniká na vedlejším hřbetě nástroje. Má jednak mechanické příčiny (tvrdé částice materiálu obrobku) a jednak je podobně jako primární hřbetní rýha tvořena v důsledku oxidačního opotřebení v místě, kde vzduch proniká do oblasti řezání. [1]



Obr. 3.7 Sekundární (oxidační) hřbetní rýha [1]

Plastická deformace břitu (obr. 3.8)

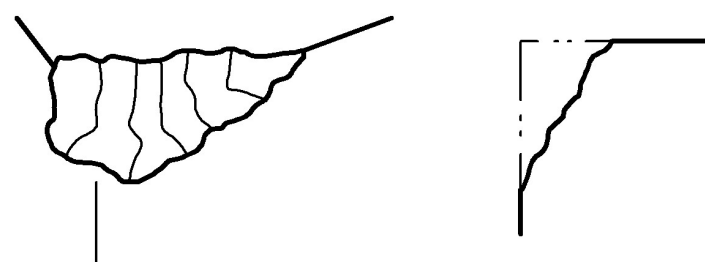
Tato forma opotřebení vzniká působením vysokých teplot a řezných tlaků na břitu, které vznikají v důsledku vysokých řezných rychlostí a posuvů. Plastická deformace břitu se vyskytuje při obrábění všemi nástrojovými materiály po dosažení určité teploty v některém místě stykových ploch mezi nástrojem a obrobkem. [41]



Obr. 3.8 Plastická deformace břitu [1]

Lom břitu (obr. 3.9)

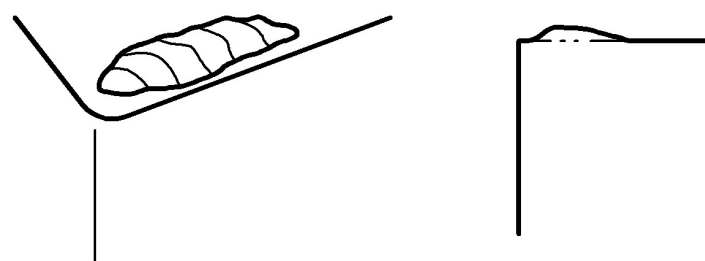
Představuje náhlou poruchu a okamžitý konec technického života břitu. Křehký lom může být způsoben např. nevhodnou volbou materiálu břitu, kdy je tento materiál málo houževnatý aby mohl zvládnout všechny požadavky na obrábění. [41]



Obr. 3.9 Lom břitu [1]

Tvorba nárůstku (obr. 3.10)

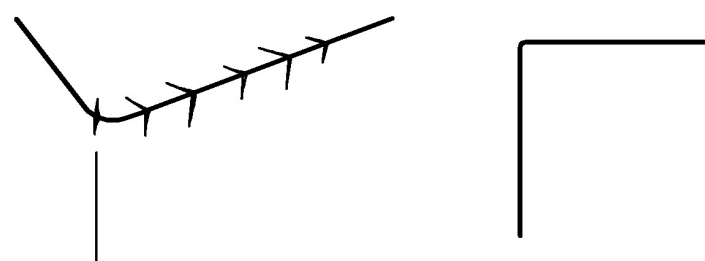
Nárůstek vzniká v důsledku „navařování“ částic materiálu obrobku na čele. Takto navařené částice materiálu obrobku se pak často odlamují i s materiálem břitu. Velkou roli ve skutečnosti, zda se nárůstek bude tvořit či ne, hraje afinita materiálu obrobku a břitu. Zvýšením řezné rychlosti se dá tvorbě nárůstků zabránit. [1]



Obr. 3.10 Nárůstek na čele [1]

Vznik hřebenových trhlin na ostří (obr. 3.11)

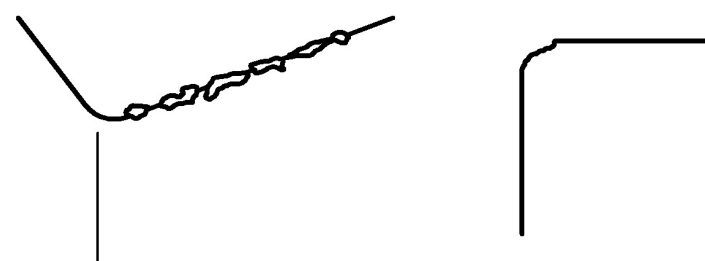
Jedná se o formu únavového opotřebení, které vzniká tepelnými šoky. Zvláště při frézování z důvodu změny teplot dochází k tomuto druhu opotřebení. Trhliny se tvoří kolmo k ostří, kde může docházet k tomu, že se jednotlivé segmenty materiálu nástroje vylamují a mohou tak vyvolat náhlý lom břitu. [1]



Obr. 3.11 Hřebenové trhliny na ostří [1]

Vydrolování ostří (obr. 3.12)

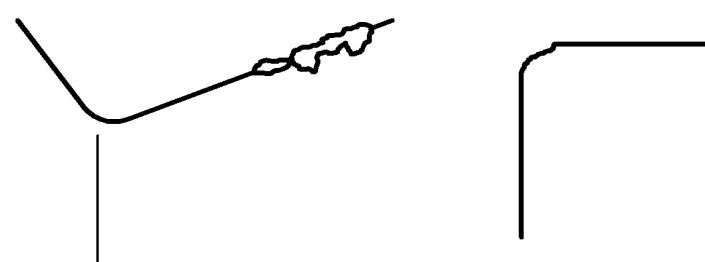
Toto opotřebení je způsobeno špičkami zatížení a vede k tomu, že se břit místo rovnoměrného opotřebovávání vydroluje (drobné částičky materiálu nástroje se začnou oddělovat z povrchu břitu). Nejčastější příčinou tohoto typu opotřebení jsou přerušované řezy. [41]



Obr. 3.12 Vydrolování ostří [1]

Vydrolování ostří mimo záběr (obr. 3.13)

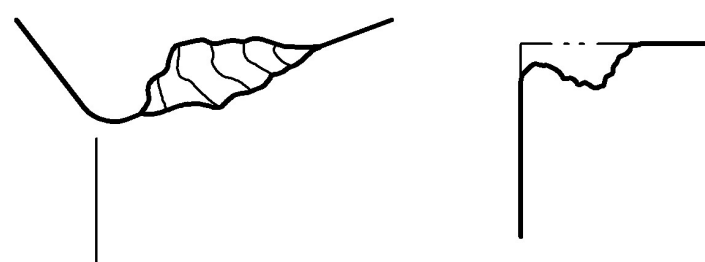
Je způsobeno nevhodným utvářením třísek, které při svém odchodu z místa řezu naráží na břit a ten pak mechanicky poškozují. [58]



Obr. 3.13 Vydrolování ostří mimo záběr [1]

Únavový lom (obr. 3.14)

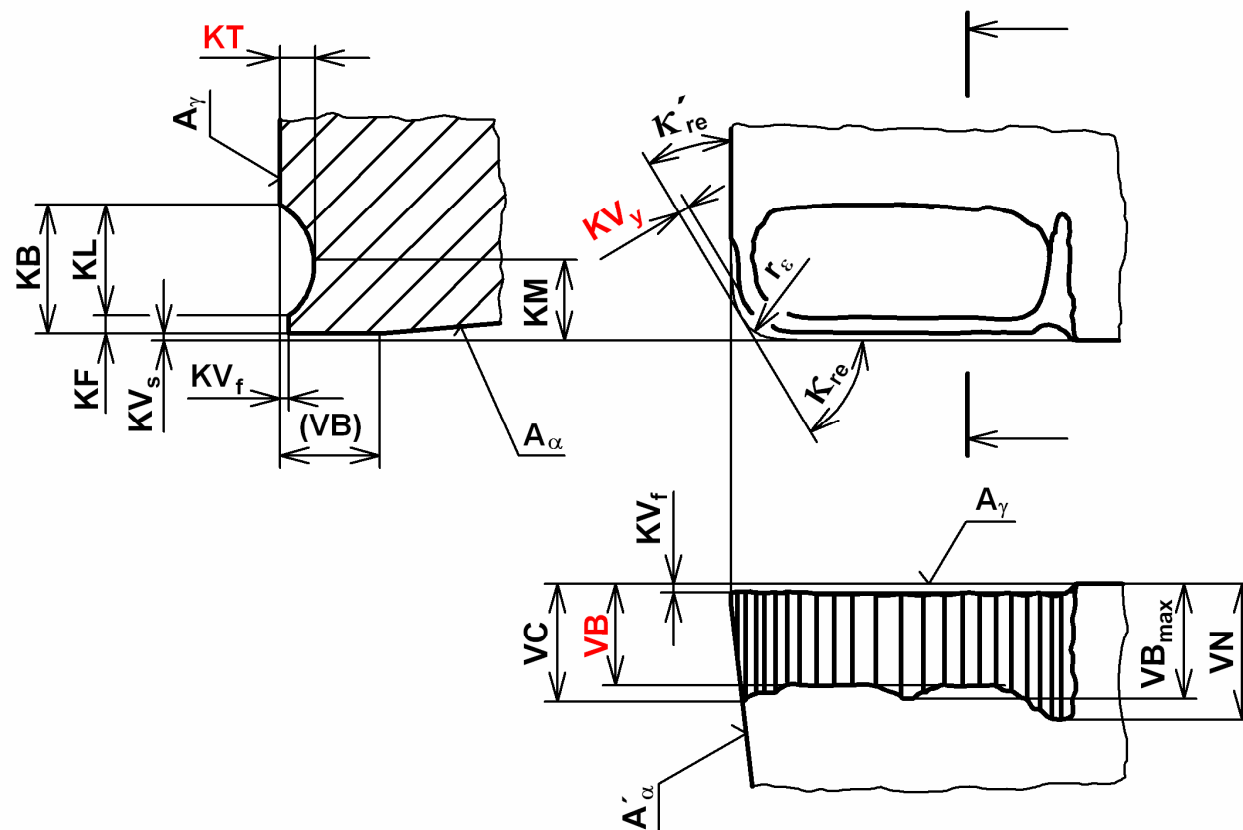
Únavový lom nastává při mimořádně velkých změnách velikosti řezných sil vlivem součtu neustále se měnících různých zatížení, kdy působení jednotlivých druhů zatížení není samo o sobě dost velké, aby mělo za následek lom. [1]



Obr. 3.14 Únavový lom [1]

3.3 Kritéria opotřebení

Opotřebení rezných nástrojů je kvantifikováno pomocí tzv. kritérií opotřebení (obr. 3.15). Mezi nejčastěji užívaná kritéria opotřebení patří (v obrázku označena červenou barvou): **VB** – šířka fazetky opotřebení na hřbetě, **KT** – hloubka výmolu na čele, **KV_y** – radiální opotřebení špičky. U dokončovacích operací je významné především kritérium **KV_y**, protože způsobuje změnu rozměru obrobenej plochy. [23]



Obr. 3.15 Kritéria opotřebení [34]

Doporučené hodnoty kritéria VB (šířka fazetky opotřebení na hřbetě) leží v rozsahu (0,2 až 0,8) mm a kritéria KT (hloubka výmolu na čele) leží v rozsahu (0,2 až 0,3) mm. [34]

Konkrétní hodnoty kritéria VB či KT pak vycházejí z toho, zda se jedná o hrubovací, či dokončovací obrábění. Při dokončovacím obrábění se volí hodnoty těchto kritérií nižší, aby vlivem zvýšeného opotřebení nástroje nedocházelo ke zhoršování parametrů struktury povrchu a aby byly dodrženy tolerance rozměru obrobenej plochy (u rozměrových nástrojů).

3.4 Měření opotřebení

Metody měření opotřebení rezných nástrojů [23]:

⇒ **přímé metody:**

- měření vybraného kritéria opotřebení (VB pomocí dílenského mikroskopu, KT pomocí profiloměru, KV_y délkovým měřidlem),
- vážení břitové destičky,
- optické sledování funkční plochy nástroje,

- *elektrické metody:*
 - odporové (vyhodnocování změn odporu v místě kontaktu nástroje s obrobkem),
 - indukční,
 - sledování vzájemné polohy nástroje a obrobku,
- *ultrazvukové metody,*
- *pneumatické metody,*
- *radioaktivní metody:*
 - ozářený nástroj,
 - mikroizotopový snímač,

⇒ **nepřímé metody:**

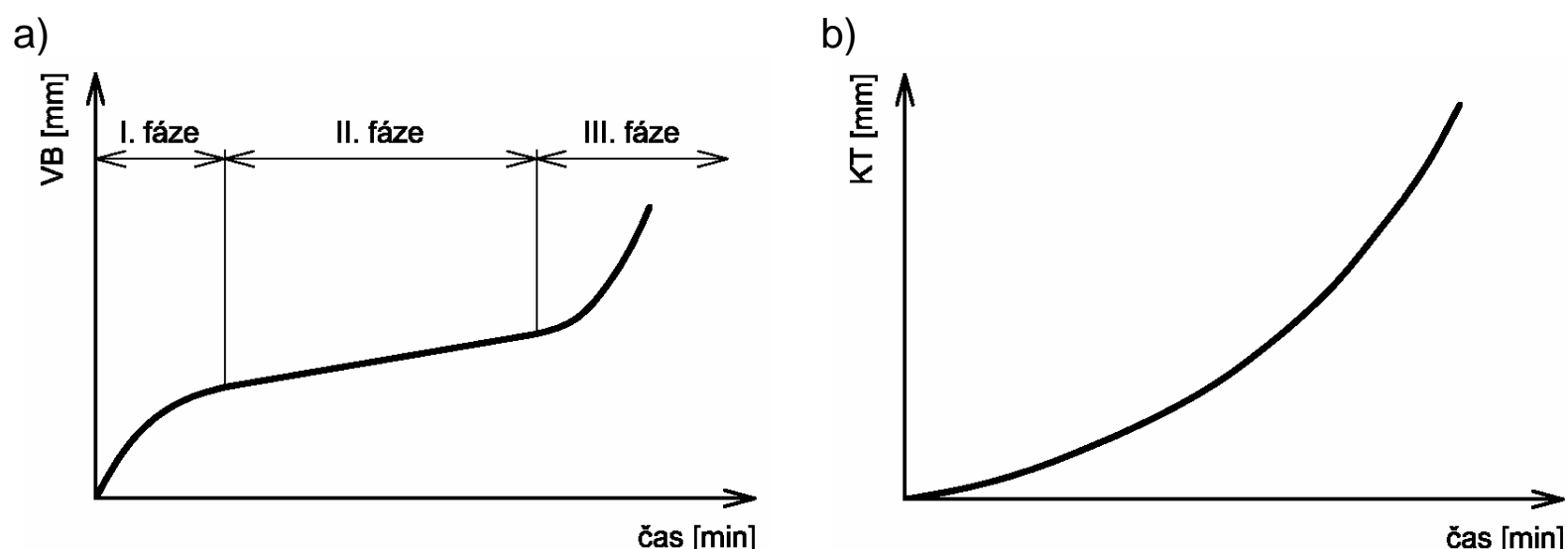
- *měření rozměrů obrobku,*
- *měření a vyhodnocování jednotlivých složek řezné síly,*
- *měření a vyhodnocování elektrického příkonu obráběcího stroje,*
- *měření kmitání (amplituda kmitů, zrychlení, parametry akustické emise),*
- *měření teploty řezání,*
- *měření struktury povrchu obrobené plochy (parametry Ra, Rz apod.),*
- *sledování druhotných projevů opotřebení (subjektivní metody):*
 - lesklé proužky na obrobené ploše,
 - charakteristický zvuk,
 - změna tvaru a barvy třísky.

3.5 Časový průběh opotřebení

Na obr. 3.16a je zobrazen průběh opotřebení na hřbetě (VB) jako funkce času. Z grafické závislosti je vidět, že daná křivka opotřebení má tři charakteristické fáze (oblasti, pásma):

- **I. fáze (oblast zrychleného záběrového opotřebení)** – je způsobena vysokým měrným tlakem na vrcholcích mikronerovností povrchu hřbetu a určitou defektností povrchové vrstvy.
- **II. fáze (oblast lineárního opotřebení s konstantní intenzitou)** – v této oblasti dochází k lineárnímu nárůstu opotřebení, tzn. intenzita opotřebení je konstantní.
- **III. fáze (oblast zrychleného nadměrného opotřebení)** – je způsobena nakumulovaným tepelným zatížením nástroje (výrazný pokles tvrdosti řezného materiálu). Nastává zrychlené opotřebení – lavinové opotřebení. [34], [41]

Časový průběh hloubky výmolu na čele (KT) má charakter exponenciální křivky (obr. 3.16b). Tento progresivní nárůst opotřebení je způsoben přestupem tepla do nástroje při zvětšování plochy styku mezi třískou (ta kopíruje výmol) a výmolem. [41]



Obr. 3.16 Časový průběh opotřebení [41]
a) šířka opotřebení na hřbetě (VB), b) hloubka výmolu na čele (KT)

3.6 Opotřebení řezných nástrojů z PKD a CVD diamantu

Opotřebení diamantových řezných nástrojů je svým způsobem specifické. Diamant má totiž velmi výjimečné fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti (jako např. největší tvrdost, nízký koeficient tření, vysokou tepelnou vodivost, vysokou chemickou stabilitu apod.), které ho činí velmi odolným proti opotřebení. Nicméně i u diamantových řezných nástrojů dochází k opotřebení břitu.

Obecně při použití diamantových řezných materiálů pro obrábění materiálů na bázi železa (ocel, litina) dochází k silné difúzi mezi nástrojem a obráběným materiálem a tím také k velmi rychlému opotřebení v důsledku probíhajících chemických reakcí (hlavně na čele nástroje). Proto nesmí být diamantové nástroje používány pro obrábění těchto železných materiálů. [33]

K opotřebení řezných nástrojů z **polykrystalického diamantu (PKD)** prakticky dochází tak, že se jednotlivá zrna z kobaltové matrice vylamují. Navíc vysoké teploty (cca 600 °C) při obrábění způsobují, že se diamantová zrna na hranicích rozpouštějí (v důsledku rozpustnosti diamantu v kobaltu), kde při následném ochlazení dochází ke grafitizaci diamantu, což také velmi oslabuje vazby diamantových zrn. Rozdílné součinitele tepelné roztažnosti kobaltu a diamantu vedou k vytváření trhlin, které řezný materiál rovněž oslabují. [68]

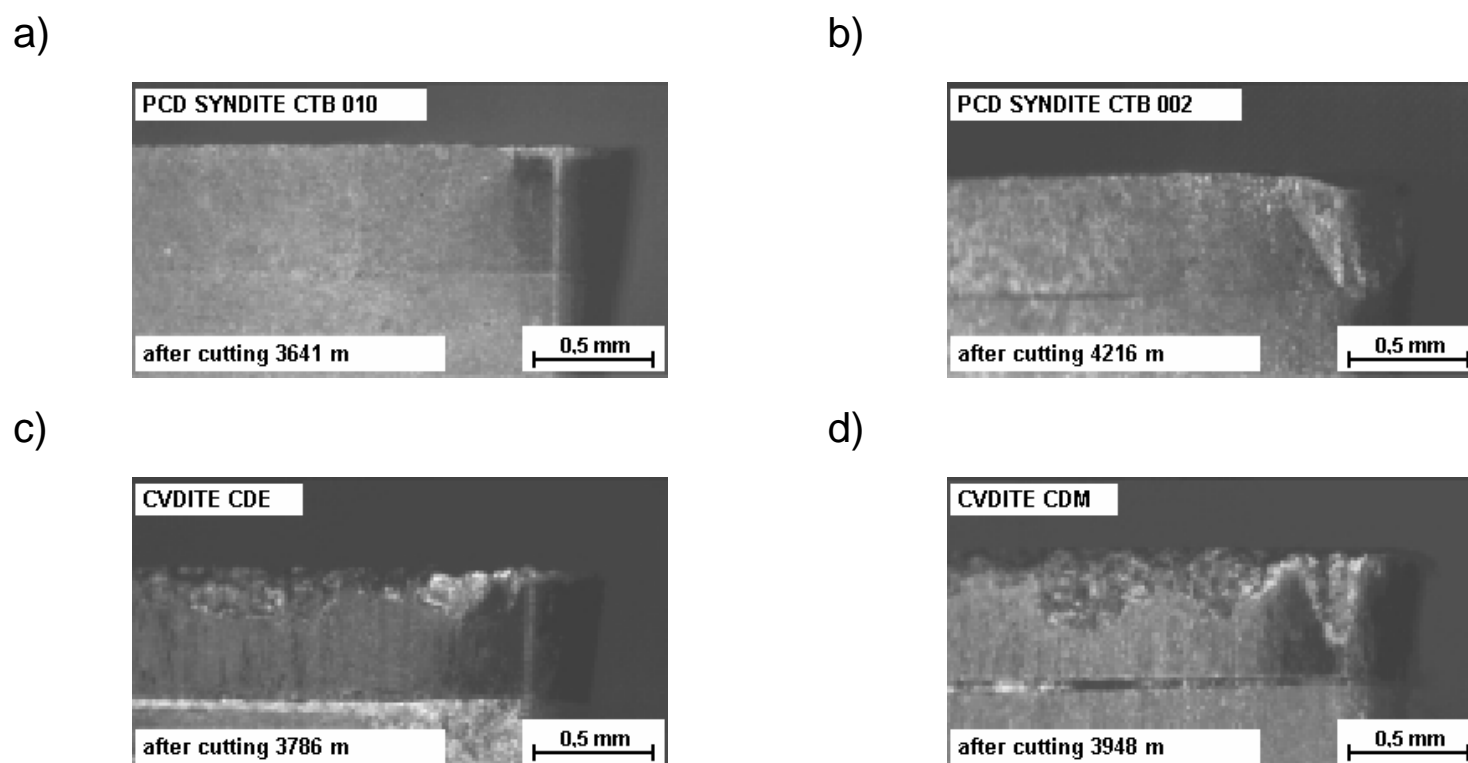
Uhlmann a kol. v [71] uvádí, že problémem u **CVD diamantových povlaků** nanesených na substrátech ze slinutých karbidů, může být jeho delaminace. Tato delaminace je způsobena nízkou adhezí diamantového povlaku k podkladovému substrátu, rozdílnými součiniteli tepelné roztažnosti diamantu a karbidu wolframu a vysokými napětími vyskytujícími se na rozhraní substrátu a diamantového povlaku. Po nanesení diamantového povlaku na řezný nástroj se již nepoužívá žádné další dokončovací obrábění povrchu, takže vytvořený povrch povlaku je

poměrně hrubý, což vede k adheznímu ulpívání materiálu obrobku na povrchu čela a hřbetu nástroje.

Trvanlivost CVD diamantového povlaku na substrátech ze slinutých karbidů závisí kromě obsahu kobaltu v substrátu také na velikosti zrn karbidů wolframu a na tloušťce diamantového povlaku. [70]

CVD diamantové vrstvy se svou strukturou prakticky neliší od přírodních diamantů. To jim dává řadu výhod, ale i nevýhod. Mezi jednu z nevýhod patří křehkost, díky níž je diamantová vrstva náchylná k vyštípávání. Při obrábění vysoce abrazivních slitin hliníku s křemíkem dochází vlivem tvrdých částic křemíku k zaoblování rezné hrany a ke zdrsňování a vroubkování plochy hřbetu a čela nástroje. [71]

Na obr. 3.17 jsou vidět typické opotřebení hřbetu VBD z různých rezných materiálů vzniklé při podélném soustružení titanové slitiny TiAl6V4. Řezné podmínky byly nastaveny takto: rezná rychlost $v_c = 200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, posuv $f = 0,05 \text{ mm}$, šířka záběru ostří $a_p = 0,5 \text{ mm}$. [31]



Obr. 3.17 Opotřebení VBD při soustružení titanové slitiny TiAl6V4 [31]

a) PKD s označením SYNDITE CTB 010 po 3641 m řezu

b) PKD s označením SYNDITE CTB 002 po 4216 m řezu

c) CVD diamantová vrstva s označením CVDITE CDE (el. vodivá) po 3786 m řezu

d) CVD diamantová vrstva s označením CVDITE CDM (el. nevodivá) po 3948 m řezu

3.7 Zhodnocení kapitoly

Diamant je nejtvrďší přírodní materiál na Zemi. Přesto při použití diamantu jako materiálu rezných nástrojů dochází k jeho opotřebení. Děje se tak z důvodu vysokých tlaků a teplot, které při obrábění vznikají. Znalost závislosti průběhu opotřebení nástroje v čase je velmi důležitá, zvláště pak u přesného obrábění, kde se tolerance rozměrů pohybují řádově v mikrometrech.

Odolnost PKD i CVD diamantů proti abrazivnímu opotřebení je dána zejména velikostí diamantových zrn, kde u menších zrn je dosahováno lepší kvality

obrobeného povrchu, ale odolnost proti opotřebení je menší, kdežto u větších zrn je tomu naopak. Odolnost PKD proti abrazivnímu opotřebení také ovlivňuje druh a obsah pojiva.

Nízký koeficient tření u diamantových řezných nástrojů způsobuje jejich nižší náchylnost k vytváření nárůstků na břitu nástroje. Tím se také zlepšují parametry struktury povrchu, protože obrobená plocha neobsahuje nárůstky, které se z břitu řezného nástroje v průběhu obrábění vylamují a ulpívají na obrobené ploše.

Diamant je také známý svou vysokou chemickou stabilitou, takže dobře odolává difúznímu opotřebení, výjimku tvoří obrábění železných kovů a slitin, při kterém dochází k nadměrnému difúznímu opotřebení diamantu (zvláště pak na čele nástroje), které je způsobeno afinitou uhlíku k železu. Z tohoto důvodu nejsou nástroje s břity z diamantu vhodné k obrábění těchto kovů a slitin.

Tepelná stabilita nástrojů s břitem z diamantu není příliš vysoká (600 až 700 °C), kde po překročení této teploty dochází u nástrojů s břity z diamantu ke grafitizaci diamantu na povrchu nástroje a jeho následné degradaci.

4 POŽADAVKY KLADENÉ NA PŘESNÉ DÍRY

Pojem „přesná díra“ v literatuře není nijak přesně definován. Nicméně za přesné díry lze považovat ty, které mají toleranční stupeň do IT8 a drsnost povrchu Ra nižší než 0,8 μm .

Obrobené díry jsou pro konkrétní technologické podmínky obrábění identifikovány souborem parametrů, mezi něž zejména patří:

- » úchylka rozměru,
- » geometrické úchyly (úchylka tvaru a polohy),
- » parametry struktury povrchu,
- » vlastnosti povrchové vrstvy. [40]

4.1 Úchylka rozměru

Úchylka rozměru je dána rozdílem mezi skutečným (naměřeným) rozměrem díry a jmenovitým (požadovaným) rozměrem díry. Jelikož žádný rozměr nelze vyrobit s absolutní přesností, jsou délkové a úhlové rozměry strojních součástí tolerovány. Právě velikost tolerance rozměru udává, jak je daná strojní součást „přesná“.

Tolerance rozměru je tvořena tolerančním stupněm (IT) a jeho polohou vzhledem k jmenovitému rozměru (např. H6, h6). Tolerance rozměru také může být určena mezními úchyly od jmenovitého rozměru (např. $32 \pm 0,025$).

Toleranční stupeň určuje velikost tolerance a norma ISO zavádí pro rozměry do 500 mm 20 tolerančních stupňů, které se označují: IT01, IT0, IT1, IT2 až IT18, přičemž toleranční stupně IT 01 až IT4 patří mezi výjimečně přesné stupně (pro výrobu kalibrů a měřidel). Poloha tolerance se označuje písmeny velké abecedy pro díry (A...ZC) nebo písmeny malé abecedy pro hřídele (a...zc). [66]

4.2 Geometrické úchyly

Mezi geometrické úchyly patří: úchylka tvaru, směru, polohy a házení. Významné z hlediska přesných děl jsou pak zejména úchyly tvaru a polohy. [40], [66]

4.2.1 Úchylka tvaru

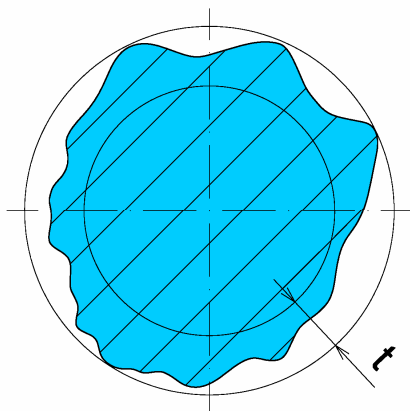
Geometrická úchylka tvaru zahrnuje: úchylku přímosti, rovinnosti, kruhovitosti, válcovitosti, tvaru čáry a tvaru plochy. [66]

U obráběných děl se sleduje zpravidla úchylka kruhovitosti (obr. 4.1a) a válcovitosti (obr. 4.1b). [57]

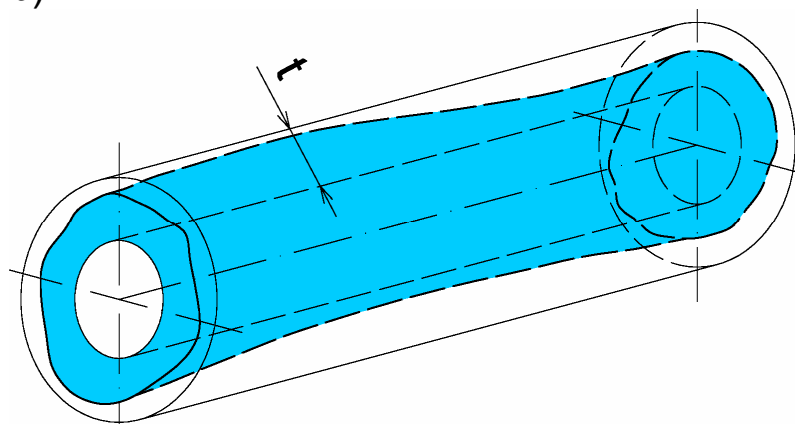
Dobrou kruhovitost díry a vysokou kvalitu jejího povrchu lze dosáhnout výstružníky se zuby ve šroubovici, nebo výstružníky s přímými zuby

s nerovnoměrnou roztečí zubů, která zabraňuje kopírování nerovností vzniklých předcházejícím obrobením díry. [35], [74]

a)



b)



Obr. 4.1 Toleranční pole kruhovitosti (a) a toleranční prostor válcovitosti (b) [66]

4.2.2 Úchylka polohy

Z geometrických úchylek polohy jsou z hlediska přesných děr významné zejména úchylky rovnoběžnosti, kolmosti a sousostí. [40]

Tyto úchylky však již dokončovacím obráběním – vystružováním lze ovlivnit jen málo, protože rovnoběžnost, kolmost či sousost díry vůči výchozím základnám je dána předchozím obráběním (vrtáním, vyhrubováním, vyvrtáváním apod.). Výstružníkem se zabezpečuje hlavně rozměrová přesnost díry, geometrická úchylka tvaru (kruhovitost, válcovitost) a parametry struktury povrchu. [74]

Pro zlepšení geometrických tolerancí polohy nabízí zajímavé řešení brněnská firma HAM-FINAL, která má ve svém sortimentu výrobků nástrojový systém s označením HAM-FINAL RC. Jedná se o „čelní výstružníky“, které odebírají obráběný materiál pouze břity na čele řezné části nástroje, takže mají z části povahu čelní frézy a z části povahu výstružníku. [27]

4.3 Parametry struktury povrchu

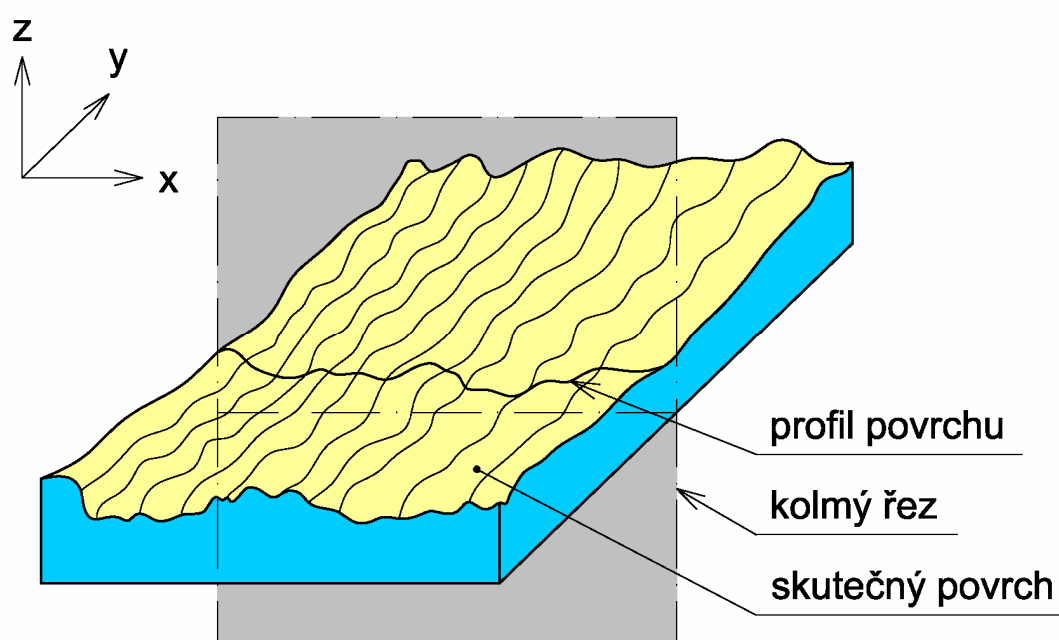
Každá technologická metoda po sobě zanechává na povrchu nerovnosti. V případě obrábění se jedná o stopy na obrobeném povrchu, které po sobě zanechává řezný nástroj.

Pro posuzování nerovností povrchu součástí jsou důležité dva pojmy:

- **nedokonalosti povrchu** – rýhy, trhliny, póry, koroze, mikrotrhliny apod. Tyto nedokonalosti povrchu jsou náhodně způsobené během výroby, skladování nebo funkce povrchu a nezahrnují se do hodnocení struktury povrchu.
- **struktura povrchu** – opakované nebo náhodné úchylky od geometrického povrchu, které tvoří trojrozměrnou topografii povrchu (obr. 4.2). [66]

Struktura povrchu se podle velikosti rozteče příslušných nerovností člení na tyto složky:

- drsnost povrchu (složka s nejmenší roztečí nerovností),
- vlnitost povrchu,
- základní profil (složka s největší roztečí nerovností). [66]



Obr. 4.2 Profil povrchu [66]

Pro měření a vyhodnocování struktury povrchu se používá profilová metoda hodnocení, kdy profil povrchu vzniká jako průsečnice nerovností skutečného povrchu s rovinou vedenou kolmo k tomuto povrchu. Profil povrchu pak je základním zdrojem informací pro posuzování struktury povrchu.

Z profilu povrchu se pomocí dotykových měřících přístrojů (profiloměrů) odvodí profil drsnosti (R – profil), profil vlnitosti (W – profil) a profil základního profilu (P – profil), kde profil drsnosti je základem pro hodnocení parametrů profilu drsnosti povrchu, tzv. R – parametrů. [66]



Obr. 4.3 Parametry drsnosti R_a a R_z [66]

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a (obr. 4.3) – je jedním z nejvíce používaných parametrů drsnosti. Jedná se o aritmetický průměr

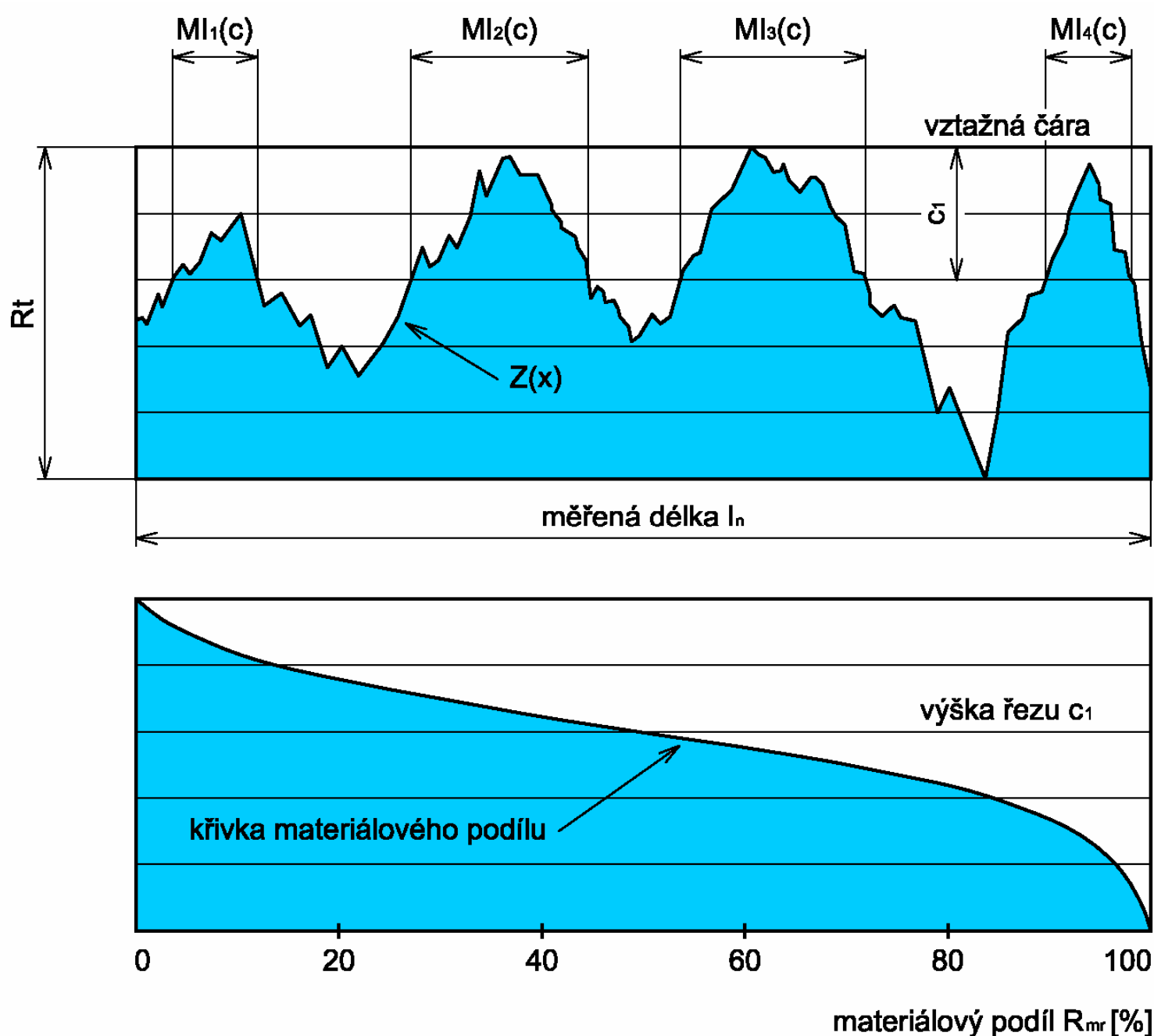
absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r , definici je možné vyjádřit vztahem 4.1 [66]:

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (4.1)$$

Charakteristika R_a je „pouze“ střední hodnotou a nemůže tedy umožnit představu o tom, jak vlastně povrch vypadá, obzvláště při posuzování povrchů členitých, pórovitých nebo porušených hlubokými trhlinami nemusí být hodnota R_a efektivní, protože nereaguje citlivě na extrémní výšky výstupků a hloubky rýh profilu. [38]

Největší výška profilu R_z (obr. 4.3) – je součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky l_r . [14]

Další významné parametry profilu povrchu jsou materiálový poměr profilu (nosný podíl) R_{mr} a křivka materiálového poměru profilu (nosná křivka – viz. obr. 4.4).



Obr. 4.4 Křivka materiálového podílu drsnosti povrchu [42]

Materiálový poměr profilu (nosný podíl) R_{mr} vyjadřuje procentuální podíl součtu délek materiálových přímek $MI(c)$ v dané výšce profilu k měřené délce l_n a je dán vztahem 4.2 [42]:

$$R_{mr}(c) = \frac{100}{l_n} \sum_{i=1}^n MI_i(c) = \frac{MI(c)}{l_n} \quad (4.2)$$

Křivka materiálového poměru profilu (nosná křivka) udává materiálový poměr profilu jako funkci hladiny (výšky) řezu a její tvar je závislý na metodě dokončování povrchu. Malý sklon střední části nosné křivky odpovídá jemným dokončovacím operacím (např. lapování). [42], [53]

4.4 Vlastnosti povrchové vrstvy

4.4.1 Zbytková napětí

Silovým působením rezného nástroje se tenká povrchová vrstva pod obrobenu plochou deformuje. V důsledku této deformace a ohřívání povrchové vrstvy teplem, které při obrábění vždy vzniká, dochází v této vrstvě ke vzniku napětí a mění se i jeho fyzikálně-mechanické vlastnosti. [52]

K přestavbě zbytkovým napětí může dojít jen v takovém objemu materiálu, v jakém je daná technologická operace schopna vyvolat plastickou deformaci a tepelně jej ovlivnit. [6]

Podle objemu, ve kterém napětí dosahují rovnováhy je lze rozdělit na:

- **Zbytková napětí I. druhu** – zasahují celý objem součástky, nebo její podstatnou část (tzn. mají makroskopický charakter), k těmto zbytkovým napětím patří i napětí v nekonečně tenké, ale rozsáhlé oblasti. Porušením kompaktnosti součásti (např. jejím rozdělením) dojde ke změně jejího tvaru (makrogeometrie).
- **Zbytková napětí II. druhu** – zasahují objem několika krystalových zrn. Porušením kompaktnosti součásti nemusí dojít ke změně její makrogeometrie.
- **Zbytková napětí III. druhu** – projevují se v objemu několika atomových vzdáleností a dosahují rovnováhy jen v dostatečně velké části zrna. Porušením kompaktnosti součásti nikdy nedojde ke změně její makrogeometrie. [52]

Rozlišujeme zbytková napětí tahová a tlaková. Tahová napětí vznikají při současném tepelném a mechanickém zatěžování povrchu a jsou z hlediska funkčních vlastností povrchu nevýhodné, protože může dojít k únavovým lomům a vzniku trhlin. Tlaková napětí vznikají, jestliže při obrábění převažuje plastická deformace bez výrazného tepelného účinku. Jejich přítomnost je z hlediska funkce povrchu součásti výhodná, protože tyto napětí zavírají případné zárodky trhlin. [41]

Hlavní příčinou vzniku zbytkových napětí jsou:

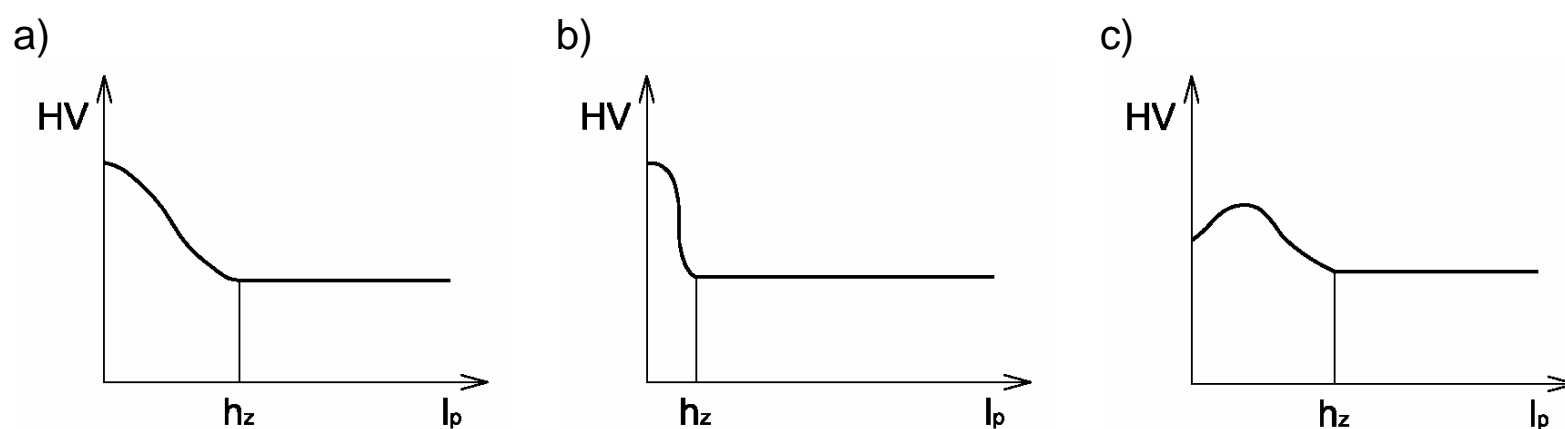
- nerovnoměrná plastická deformace v obrobeném povrchu,
- nerovnoměrný ohřev a ochlazování materiálu, které vyvolávají jeho roztahování a smršťování,
- nerovnoměrné změny struktury vyvolané působením tepla a mechanických sil,
- chemické procesy spojené s reakcí částic pronikajících do povrchové vrstvy. [6]

Zbytková napětí mají vliv na statickou a dynamickou pevnost a dále také na odolnost povrchu proti korozi. U zbytkových napětí sledujeme tyto údaje: znaménko napětí (tah nebo tlak), hloubku, do které napětí pronikají a maximální hodnoty (velikosti) zbytkových napětí. [7]

4.4.2 Zpevnění povrchu

Zpevnění povrchové vrstvy je způsobeno zejména tím, že oblast primárních plastických deformací často zasahuje pod úroveň budoucího povrchu a také tím, že reálné ostří není tvořeno přímkou, nýbrž částí válcové plochy o poloměru 5 až 20 μm . V bezprostřední interakci břitu s materiálem obrobku se realizuje negativní úhel čela (i řezu) a budoucí povrch obrobené plochy tak nevzniká pouze řezáním, ale také tvářením. [34]

Zpevnění povrchové vrstvy obrobené plochy lze kvantifikovat hodnotou mikrotvrdomosti, která se měří v jednotlivých vrstvách pod povrchem obrobené plochy. Zpevnění je pak charakterizováno stupněm zpevnění a hloubkou vrstvy, která má oproti základnímu materiálu vyšší tvrdost (obr. 4.5). [41], [52]



Obr. 4.5 Charakteristické průběhy zpevnění v povrchové vrstvě [41]
 HV – mikrotvrdomost, l_p – vzdálenost od povrchu, h_z – hloubka zpevněné vrstvy

Na obr. 4.5a je vidět poměrně velká hloubka zpevněné vrstvy h_z , která je největší na povrchu a pak pozvolna klesá, což je výhodné, protože mezi zpevněnou vrstvou a základním materiálem je pevné spojení. Obr. 4.5b také zobrazuje vysokou tvrdost na povrchu, ale s prudkým poklesem tvrdosti (hloubka zpevněné vrstvy je malá), což má za následek slabé spojení mezi zpevněnou vrstvou a základní materiálem (nebezpečí odlupování povrchové vrstvy). Na obr. 4.5c je vidět průběh zpevnění u povrchu, u kterého proběhla plastická

deformace, přičemž plasticita materiálu byla plně vyčerpána. Další silové působení způsobilo vznik trhlin na povrchu, což se promítá do poklesu tvrdosti. [41], [52]

4.4.3 Trhliny v povrchové vrstvě

Vznik trhlin v povrchové vrstvě je tepelně indukovaný proces spojený s tepelným poškozením obrobeného povrchu. Trhliny v povrchu vznikají v důsledku relaxace tahových zbytkových napětí v případě, že jejich velikost překročí mez pevnosti materiálu. Ne vždy, když zbytkové napětí překročí mez pevnosti obráběného materiálu, však dochází ke vzniku trhlin.

Trhliny na povrchu obrobené součásti jsou z hlediska její funkčnosti nežádoucí. Jsou výsledkem nevhodně zvolené technologie obrábění, funkcí opotřebení nástroje apod. [52]

4.5 Zhodnocení kapitoly

Požadavky na přesnost strojních součástí jsou stále vyšší. Tyto rostoucí požadavky na přesnost se také týkají děr, kterých je na strojních součástech obecně nemalé množství.

Na výkresech strojních součástí se běžně setkáváme s těmito požadavky na obrobení děr: přesnost rozměru, geometrická přesnost (úchylka tvaru a polohy), drsnost povrchu (R_a , R_z). Do požadavků na výrobu přesných děr však také patří požadavky na vlastnosti povrchové vrstvy, jako jsou: zbytková napětí, zpevnění povrchu či výskyt trhlin v povrchové vrstvě. I když tyto vlastnosti povrchové vrstvy mohou značně ovlivnit spolehlivost, bezpečnost a trvanlivost strojních součástí nebo celků, příliš často se s nimi na výkresech strojních součástí nesetkáme, protože kontrola těchto parametrů není jednoduchá a prodražuje tak výrobu.

Výskyt zbytkových napětí v povrchové vrstvě je obecně nežádoucí jev. Pokud se však zbytková napětí v povrchové vrstvě vyskytnou, měly by být tlaková, protože tato zavírají případné zárodky trhlin na povrchu.

Po obrábění strojních součástí může někdy dojít ke zpevnění jejich povrchu. Vhodnost tohoto zpevnění je nutno posuzovat případ od případu, neboť ne vždy se jedná o příznivý efekt. Pokud dojde ke zpevnění povrchu a daná strojní součást se již nebude obrábět, jedná se o žádoucí efekt, protože zpevněný povrch je odolný proti opotřebení, čímž může dojít k prodloužení životnosti součásti. Pokud však dochází k odlupování vzniklé zpevněné vrstvy povrchu, jedná se o nežádoucí efekt, kterému je nutno se vyhnout.

Na povrchu strojních součástí se také mohou vyskytnout trhliny, které jsou nežádoucí a jejichž vzniku je třeba zabránit. Jednou z možností je zajistit, aby nástroj používaný při obrábění nedosáhl takového stavu opotřebení, při kterém trhliny na povrchu vznikají. Dále se lze vzniku trhlin vyhnout také tím, že obráběnou součást intenzivně chladíme, aby nedošlo k příliš velkému tepelnému ovlivnění povrchu součásti, které vznik trhlin také podporuje.

5 NÁSTROJE PRO VÝROBU PŘESNÝCH DĚR

Technologie obrábění přesných děr se řadí mezi dokončovací metody obrábění, která se často realizuje na konci výrobního procesu dané součásti, do které již bylo vloženo mnoho finančních prostředků a pracovního úsilí. Z těchto důvodů plyne, že je této technologii třeba věnovat velkou pozornost. [46]

5.1 Rozdělení nástrojů pro výrobu přesných děr

Nástroje pro výrobu přesných děr lze obecně rozdělit takto:

- ⇒ **nástroje s definovanou geometrií břitu** – vnitřní soustružnické nože, výstružníky, vyvrtávací tyče a hlavy
- ⇒ **nástroje s nedefinovanou geometrií břitu** – brousící kotouče, honovací hlavy apod. [41]

5.2 Technologie vystružování

Výroba přesných děr třískovým obráběním nástroji s definovanou geometrií břitu se realizuje při technologické operaci nazývané vystružování, což je výrobní metoda, při níž hlavní pohyb je rotační a vedlejší pohyb je posuvový. Hlavní pohyb rotační nejčastěji vykonává nástroj – výstružník (obr. 5.1), i když hlavní pohyb rotační může vykonávat také obrobek (např. při vystružování na soustruzích). Vedlejší pohyb posuvový vykonává nástroj. [40]

Technologie vystružování je dokončovací metoda obrábění, která navazuje na předchozí hrubovací operace, jako např. vrtání, vyhrubování, vyvrtávání apod. Tyto předchozí operace dávají obráběné díře požadované geometrické tolerance polohy (rovnoběžnost, kolmost, sousost), které vystružováním lze ovlivnit jen málo. [35], [40]



Obr. 5.1 Výstružníky firmy HAM-FINAL s břity z cermetu [46]

5.2.1 Příklad pro vystružování

Hodnota přídávku na vystružování nesmí být příliš malá, aby při samotném vystružování nedocházelo místo odřezávání pouze k tváření, čímž by docházelo k nadměrnému opotřebování nástroje a vytvořená díra by neměla požadovaný kruhový průřez ani požadovanou kvalitu povrchu. [35]

Příklad na díru, která má být vystružována se v praxi proto obvykle vypočítá ze vztahu 5.1 [35]:

$$p = 0,1 + 0,005 \cdot D \quad [\text{mm}] \quad (5.1)$$

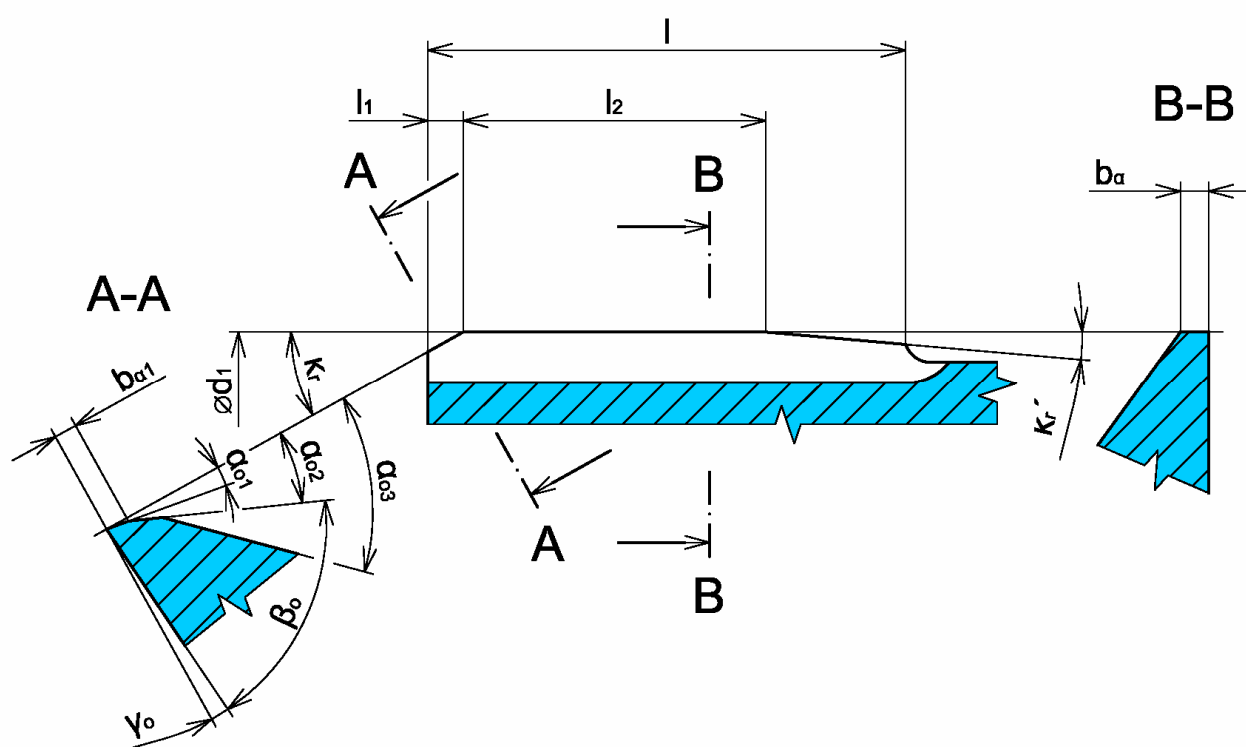
5.3 Výstružníky

Výstružníky jsou rozměrové vícebřité nástroje s přímými zuby nebo se zuby ve šroubovici. Počet zubů výstružníku je závislý na jeho průměru a může se pohybovat od 2 do 18 (i více). Existují však také jednobřité výstružníky, které jsou opatřeny vodícími ploškami. Tyto výstružníky se používají pro obrábění velmi přesných děr. [74]

Mezi světové výrobce výstružníků patří firmy: Beck, Dihart, Gühring, Kennametal, Mapal, Seco, Walter a další. U nás se výrobou výstružníků zabývá firma HAM-FINAL, která disponuje vlastním vývojem a také nabízí výstružníky s břity z PKD a KNB. V příloze č. 4 je uveden přehled sortimentu vybraných světových výrobců výstružníků s břity z PKD.

5.3.1 Geometrie a tvar zubu strojního výstružníku

Geometrie a tvar zubu strojního výstružníku je zobrazena na obr. 5.2.



Obr. 5.2 Geometrie a tvar zubu strojního výstružníku [35]
 d_1 – jmenovitý průměr výstružníku, l – délka zubu výstružníku,
 l_1 – délka rezného kužele, l_2 – délka vodící části

Jelikož výstružníky patří mezi řezné nástroje s definovanou geometrií břitu, jsou popsány souborem parametrů, které definují řezný břit. Mezi tyto parametry zejména patří: nástrojový ortogonální úhel hřbetu α_o , nástrojový ortogonální úhel břitu β_o , nástrojový ortogonální úhel čela γ_o , nástrojový úhel nastavení hlavního ostří κ_r , nástrojový úhel nastavení vedlejšího ostří κ_r' , nástrojový úhel špičky ϵ_r a nástrojový úhel sklonu hlavního ostří λ_s . [35]

Je třeba dodat, že produktivní řezný nástroj je tvořen spojením optimální volby geometrie, řezného materiálu a v dnešní době téměř vždy také povlaku. [45]

5.3.2 Rozdělení výstružníků

Výstružníky lze rozdělit podle různých hledisek takto [35], [74]:

a) podle způsobu práce:

- *ruční,*
- *strojní,*

b) podle způsobu upínání:

- *stopkové:*
 - s válcovou stopkou,
 - s kuželovou stopkou,
- *nástrčné,*

c) podle tvaru řezné části:

- *válcové,*
- *kuželové,*
- *tvarové,*

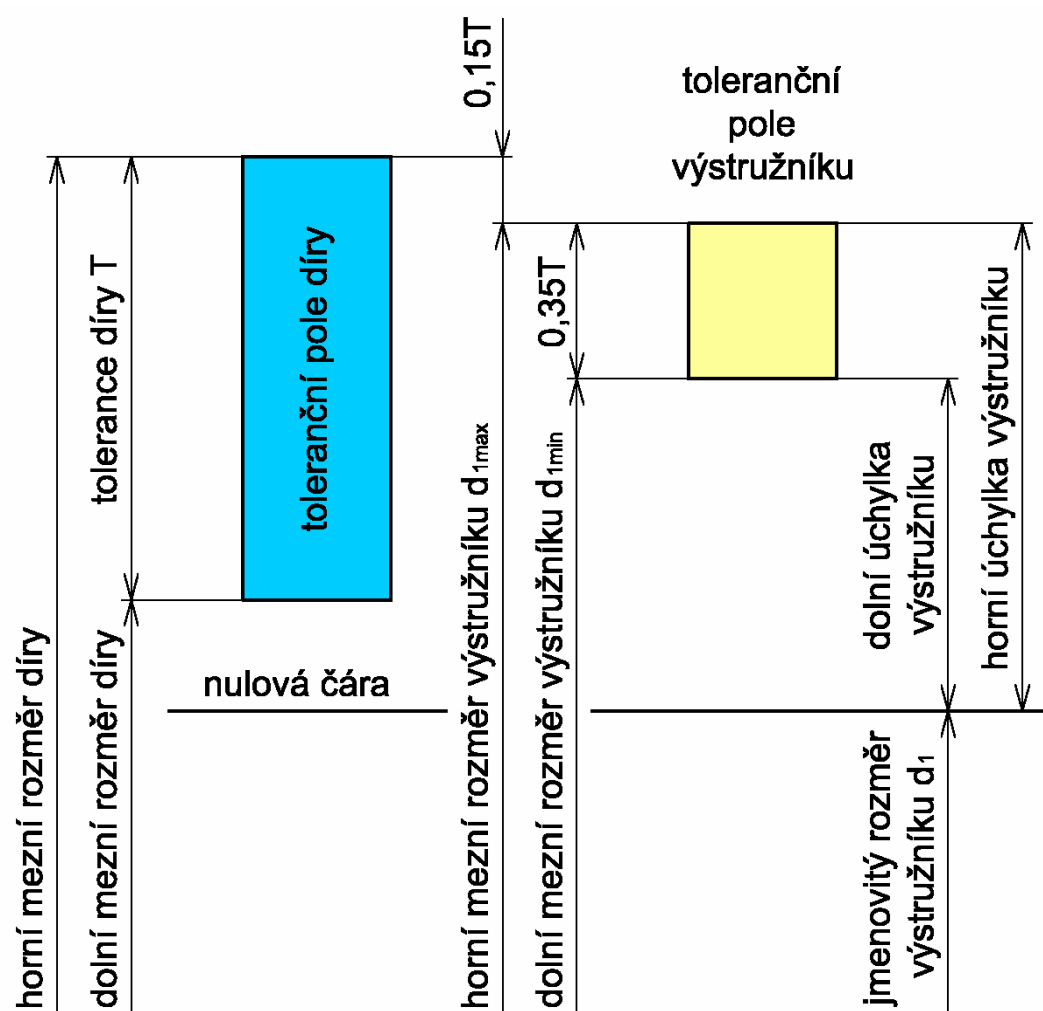
d) podle konstrukce:

- *pevné:*
 - monolitní,
 - s pájenými zuby,
 - se zuby upínanými mechanicky,
- *rozpínací,*
- *stavitelné.*

5.3.3 Toleranční pole výstružníku

Při konstrukci výstružníků je důležitým úkolem konstruktéra stanovení skutečného rozměru nového výstružníku (obr. 5.3) a správná volba počtu zubů výstružníku. [74]

V průběhu obrábění se břity výstružníku opotřebovávají a dochází tak ke zmenšování rozměru obrobené díry. Výstružníky se proto vyrábějí na rozměr blížíící se hornímu meznímu rozměru díry, aby jejich trvanlivost byla co největší. Z důvodu házivosti výstružníku leží jeho horní mezní rozměr d_{1max} ve vzdálenosti $0,15 \cdot T$ pod horním mezním rozměrem díry, kde T je velikost tolerance vystružované díry. Šířka tolerančního pole výstružníku pak odpovídá hodnotě $0,35 \cdot T$, kde T je opět velikost tolerance vystružované díry. [2], [41], [45]



Obr. 5.3 Toleranční pole výstružníku [2]

5.4 Zhodnocení kapitoly

Snahou výrobců vystružovacích nástrojů je vyvíjet takové nástroje, které splňují požadavky zákazníků na přesnost obrobené díry, takže tyto díry není nutno nijak dále dokončovat.

Vhodným řešením zde může být aplikace jednobřítých nástrojů s vodícími ploškami, při jejichž aplikaci dosahujeme vysoké přesnosti rozměru i kvality obrobeného povrchu. Výhodou těchto jednobřítých nástrojů je, že i když přídavek daný předchozím opracováním je nerovnoměrný, dochází k stejnoměrnému rozložení výslednice rezného odporu do opěrných vodítek a nedochází tím pádem k vychylování nástroje z řezu, což má příznivý vliv na tvarovou přesnost díry (kruhovitost, válcovitost).

Vícebřité nástroje sice nedosahují takových přesností obrobené díry jako nástroje jednobřité, jejich aplikací však lze zvýšit produktivitu výroby (umožňují větší posuv), nebo při stejné hodnotě posuvu lze zvýšit trvanlivost nástroje.

6 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ UŽITNÝCH VLASTNOSTÍ VÝSTRUŽNÍKŮ FIRMY HAM-FINAL S BŘITY Z PKD A CVD DIAMANTU

6.1 Cíl experimentu

Cílem experimentu bylo ověření užitných vlastností nově vyvinutých vystružovacích nástrojů firmy HAM-FINAL s břity z polykrystalického diamantu (PKD) a CVD diamantu. Důraz pak byl zejména kladen na nástroje s břity z CVD diamantu, které se firma HAM-FINAL snaží zařadit do svého výrobního sortimentu jako alternativu k nástrojům s břity z PKD.

Experiment se realizoval ve firmě HAM-FINAL. Jednalo se o obrábění děr vodítek ventilů z bronzu. Tato bronzová pouzdra byla zalisována ve válečku z duralu, čímž se simulovaly reálné podmínky obrábění, při nichž jsou bronzová pouzdra zalisována v hlavě motoru.

Firma HAM-FINAL, s.r.o. je česko-německá firma zabývající se vývojem, výrobou a prodejem moderních nástrojů pro vystružování, vyvrtávání a obrábění velmi přesných děr. Firma HAM-FINAL, s.r.o. vznikla v roce 1997 spojením původní firmy FINAL (založena v roce 1991) a koncernu HAM, GmbH (Hartmetall-Werkzeugfabrick Andreas Maier, GmbH). [26]

6.2 Popis vystružovacích nástrojů použitých při testech

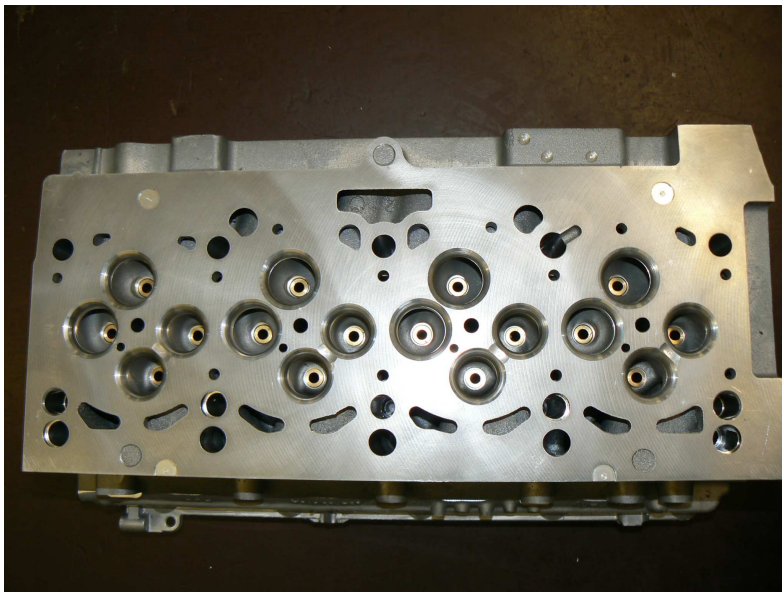
Výstružník (obr. 6.9d) se skládá z vystružovací hlavice, spojovací trubky a z upínací části. Vystružovací hlavice (obr. 6.9c) je vyrobena ze slinutého karbidu a je tepelně upnuta do trubky z oceli, čímž je zajištěno pevné a přesné spojení.

Břity výstružníku, ať už se jedná o jednobřitý (obr. 6.9a) nebo dvoubřitý výstružník (obr. 6.9b) s břitem z PKD či CVD diamantu, jsou k vystružovací hlavici pájeny a následně broušeny na předepsanou geometrii. Vystružovací hlavice dále obsahuje vodítka řezné části (2 vodítka u jednobřitého výstružníku, 3 vodítka u dvoubřitého výstružníku), kterými se při obrábění opírá o obrobenou plochu. Součástí vystružovací hlavice jsou také vodítka zadního vedení výstružníku, díky kterým nástroj nevybočuje z řezu.

Procesní kapalina je k břitům, vodítkům řezné části i k vodítkům zadního vedení výstružníku přiváděna středem nástroje.

6.3 Obrábění děr vodítek ventilů na „TRANSFER LINKÁCH“

Jak již bylo uvedeno, nově vyvinuté nástroje firmy HAM-FINAL slouží k obrábění děr vodítek ventilů, které jsou zalisovány v hlavě motoru (obr. 6.1). Tyto hlavy motoru jsou obráběny na tzv. transfer linkách (obr. 6.2). Na těchto linkách jsou vystružovací nástroje vedeny ve vodítkách (pro větší přesnost vystružovaných děr).

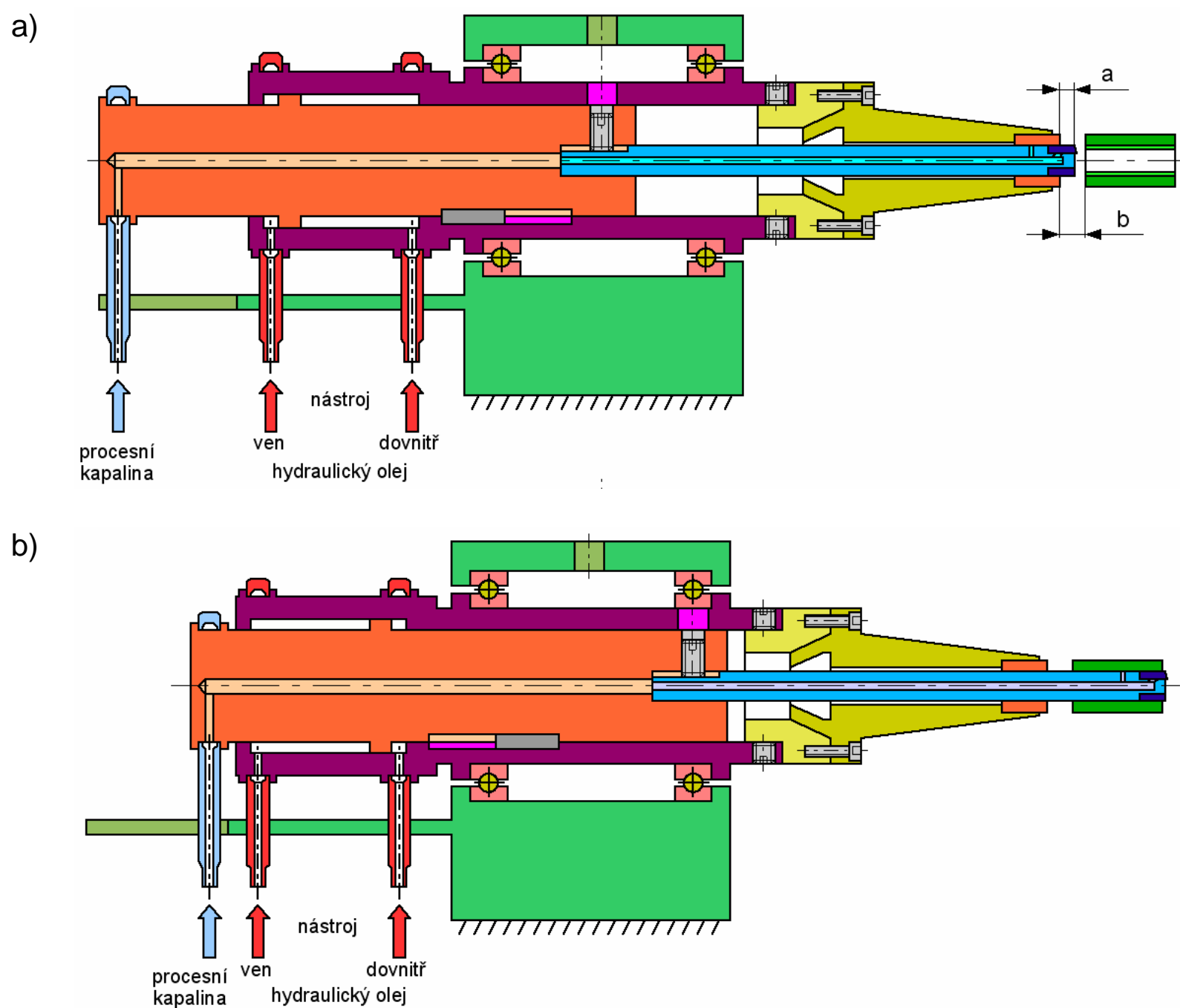


Obr. 6.1 Hlava motoru s vodítky ventilů



Obr. 6.2 Transfer linka

Schématické zobrazení vřetena stroje transfer linky před (6.3a) a po obrobení vodítka ventilu (obr. 6.3b) znázorňuje obrázek 6.3. Ve firmě HAM-FINAL se experiment realizoval na CNC obráběcím centru, které vedení nástroje neobsahovalo. K simulaci vedení nástroje se proto do vodítka ventilu nejprve předvrtal tzv. pilotní otvor (obr. 6.4).



Obr. 6.3 Schéma vřetena stroje transfer linky:
a) před obrobením vodítka ventilu
b) po obrobení vodítka ventilu

6.4 Návrh experimentu

V průběhu experimentu byly zkoušeny celkem 4 druhy výstružníků:

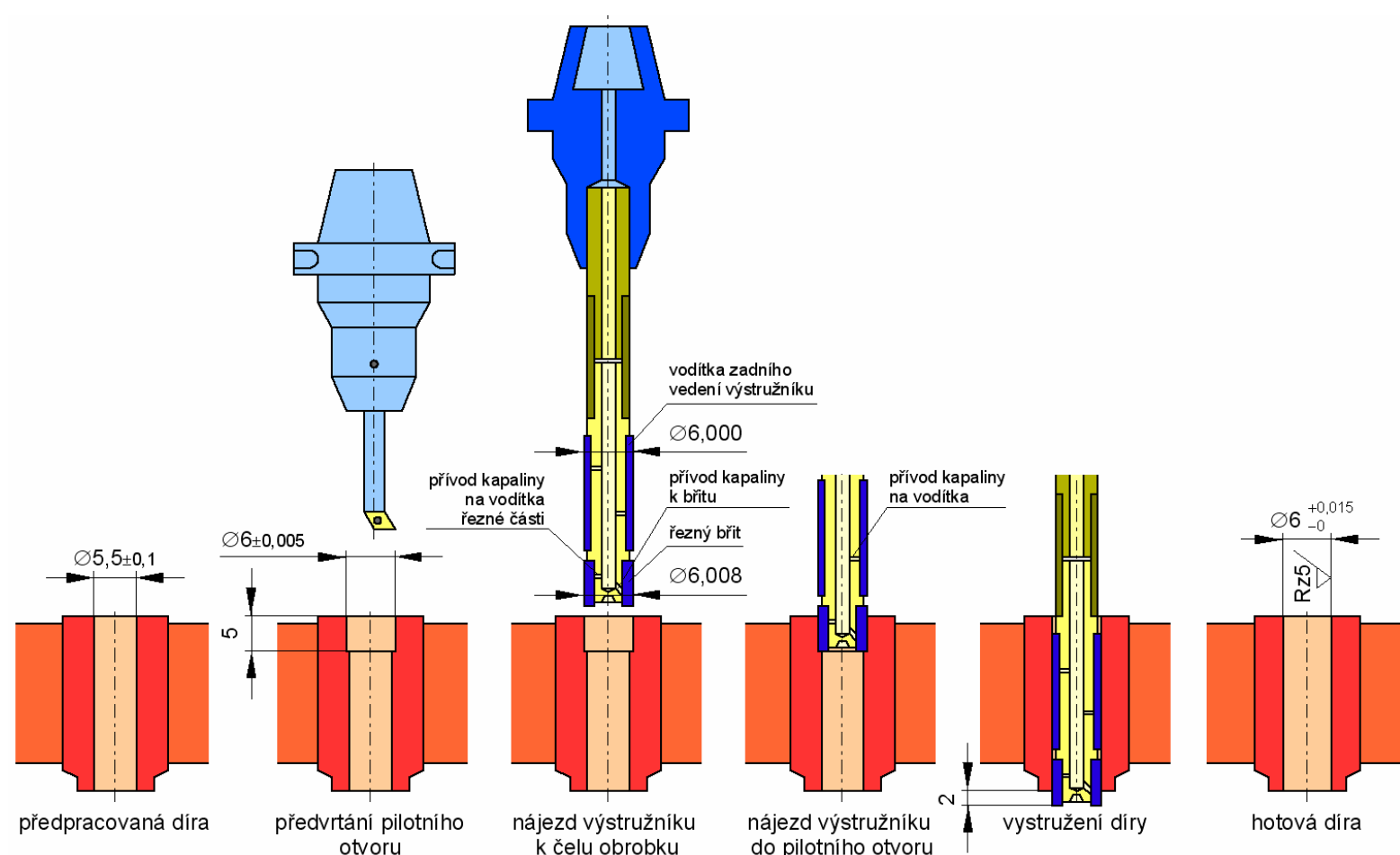
- jednobřítý výstružník s břitem z PKD (MT1–PKD),
- dvoubřítý výstružník s břity z PKD (MT2–PKD),
- jednobřítý výstružník s břitem z CVD diamantu (MT1–CVDdia),
- dvoubřítý výstružník s břity z CVD diamantu (MT2–CVDdia).

Všechny testované nástroje byly nasazeny na obrábění bronzových pouzder (vodítka ventilů), které byly zalisovány ve válečku z duralu. Zalisování bronzových pouzder do válečku z duralu simulovalo reálné podmínky, kdy v materiálu vodítka ventilu vzniká vnitřní napětí, podobně jak je tomu při obrábění na transfer linkách, kde je pouzdro zalisováno v hlavě motoru.

6.4.1 Metodika provedení zkoušek vystružovacích nástrojů

Postup při obrábění vodítek ventilů ve firmě HAM-FINAL (obr. 6.4):

- výroba pilotního otvoru jednobřítým vyvrtávacím nástrojem HAM-FINAL NGV, $\varnothing 6 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$, hloubka 5 mm,
- nájezd výstružníku k čelu obrobku,
- nájezd výstružníku do pilotního otvoru,
- vystružení díry.



Obr. 6.4 Schématické znázornění postupu při vystružování vodítek ventilů

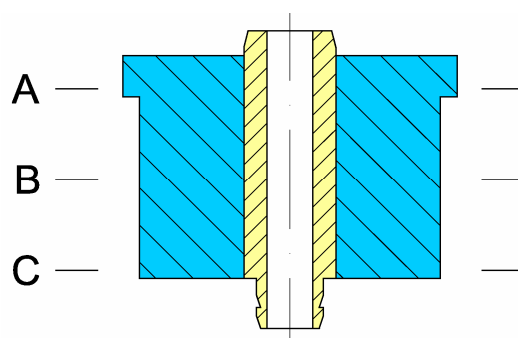
6.4.2 Sledované parametry přesnosti obrobené díry

V průběhu experimentu ve firmě HAM-FINAL byly sledovány tyto parametry přesnosti obrobené díry:

- **průměr vystružené díry** – měřil se pomocí pneumatického měřicího zařízení AEROPAN. Jedná se o komparační (porovnávací) měřicí zařízení založené na převodu tlaku vzduchu na délkovou veličinu;
- **úchylnka tvaru (válcovitost)** – vyhodnotila se ze tří naměřených rozměrů na daném zkušebním obrobku, jako rozdíl mezi největším a nejmenším rozměrem dané díry;
- **průměrná aritmetická úchylnka profilu Ra** – měřila se pomocí přenosného drsnoměru Mahr Pocket Surf III.

6.4.3 Metodika měření parametrů přesnosti

Rozměr i drsnost povrchu vystružené díry se měřily na začátku (A), uprostřed (B) a na konci (C) každé vystružené díry (obr. 6.5).



Obr. 6.5 Místa měření parametrů přesnosti vystružené díry

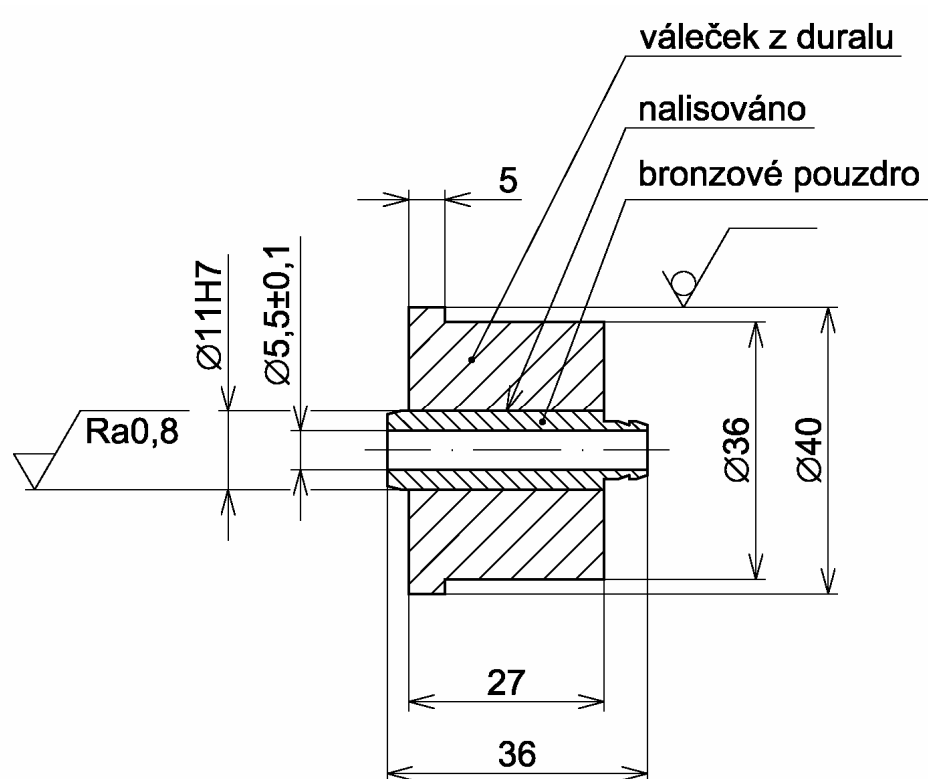
6.5 Podmínky experimentu

6.5.1 Zkušební obrobek

Zkušebním obrobkem (obr. 6.6) bylo bronzové pouzdro, které bylo zalisováno ve válečku z duralu. Toto pouzdro se vyrábí práškovou metalurgií (slinováním) a samotnému vystružování nepředcházelo žádné předhotovení. Pomocí jednobřitého vyvrtávacího nástroje HAM-FINAL NGV se pouze vyhotovil pilotní otvor pro vedení nástroje před prvním záběrem. Zkušební obrobek byl upínán do tříčelistového univerzálního sklíčidla, které ke stolu stroje bylo upnuto pomocí plochých upínek (obr. 6.7).

Požadavky na přesnost vystružené díry:

- | | |
|----------------------|----------------------------------|
| – tolerance rozměru: | $\varnothing 6^{+0,015}_{-0}$ mm |
| – drsnost povrchu: | $Ra_{max} = 0,4$ μ m |
| – kruhovitost: | 0,005 mm |
| – válcovitost: | 0,005 mm |



Obr. 6.6 Zkušební obrobek a jeho rozměry



6.7 Upnutí zkušebního obrobku

6.5.2 Obráběcí stroj

Zkoušky vystružovacích nástrojů byly realizovány na CNC obráběcím centru **DECKEL MAHO DMU 60T** (obr. 6.8).



Obr. 6.8 Obráběcí centrum DECKEL MAHO DMU 60T

Parametry stroje:

rozsah os X / Y / Z:	630 / 560 / 560 mm
výkon:	20 kW při 18000 ot.
rozsah otáček:	20 – 18000 min ⁻¹
řídící systém:	Heidenhain iTNC 530

6.5.3 Nástroj

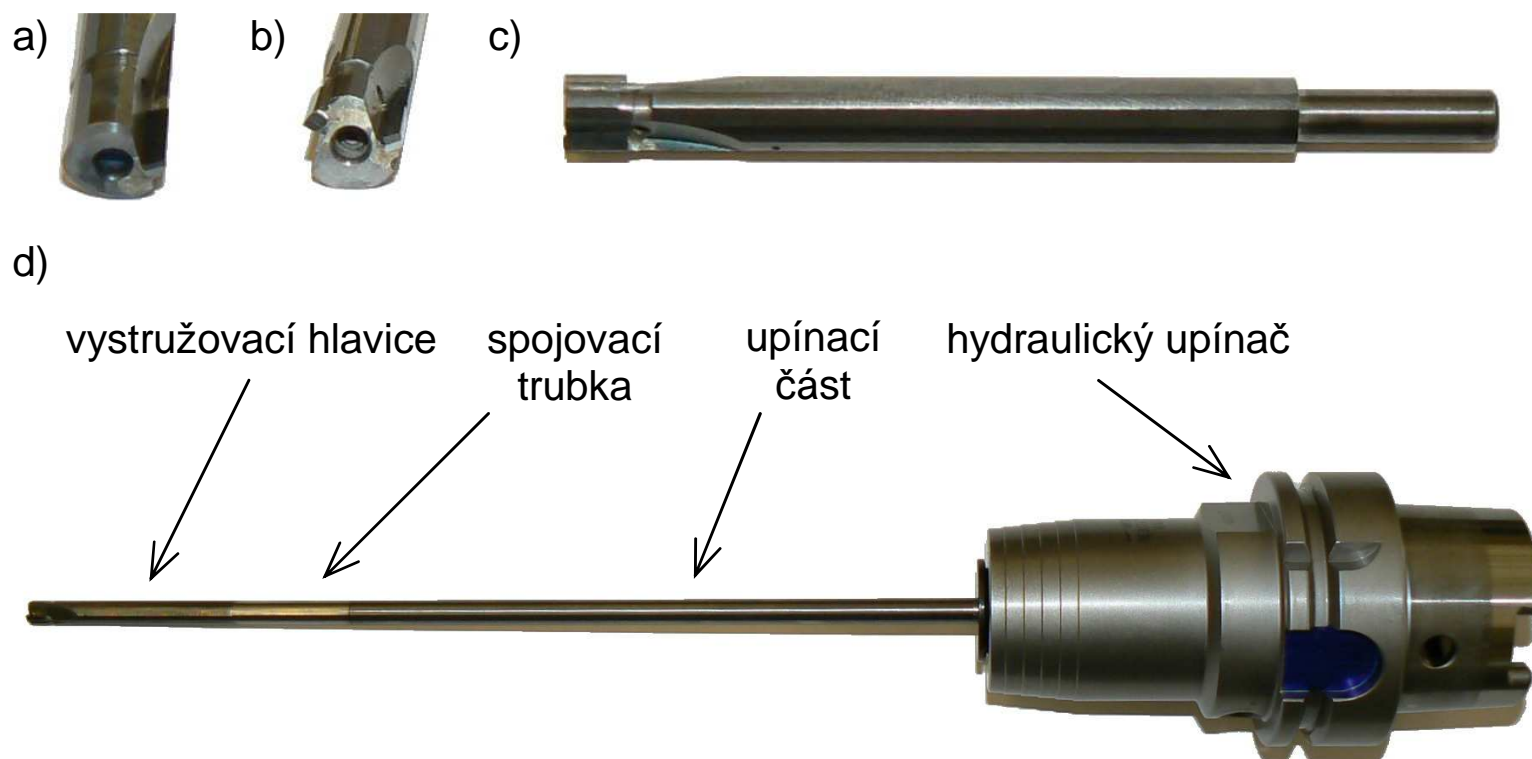
Při experimentu byly použity celkem 4 druhy výstružníků. Jednotlivé výstružníky se lišily materiálem břitu (PKD nebo CVD diamant) a počtem břitů (jeden nebo dva břity).

V tab. 6.1 je přehled parametrů nástrojů, které při testech byly použity.

Tab. 6.1 Porovnání parametrů výstružníků použitých při experimentu

NÁSTROJ:	MT1-PKD	MT2-PKD	MT1- CVDdia	MT2-CVDdia
Řezný materiál	PKD		CVD diamantová vrstva	
Výrobce řezného materiálu	Element Six		Ceratonía	
Počet břitů	1	2	1	2
Průměr nástroje [mm]	$6,011^{+0}_{-0,002}$	$6,010^{+0}_{-0,002}$	$6,011^{+0}_{-0,002}$	$6,010^{+0}_{-0,002}$
Vyložení nástroje [mm]	235			
Tloušťka diamantové vrstvy [mm]	0,5			
Cena nástroje [Kč]	9 180	12 420	11 475	14 904

Na obr. 6.9d je kompletní sestava vystružovacího nástroje. Tato sestava se skládá z tepelně upínané vystružovací hlavice (obr. 6.9c), spojovací trubky, upínací části a hydraulického upínače.



Obr. 6.9 Testovaný výstružník:
 a) detail pracovní části jednobřitého výstružníku
 b) detail pracovní části dvoubřitého výstružníku
 c) detail vystružovací hlavice
 d) celková dispozice výstružníku

6.5.4 Řezné podmínky při vystružování

Řezná rychlost:	$v_c = 56,55 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
Otáčky vřetena:	$n = 3000 \text{ min}^{-1}$
Posuv:	$f_{ot} = 0,2 \text{ mm} / f_{ot} = 0,4 \text{ mm}$
Šířka záběru ostří:	$a_p = 0,25 \text{ mm}$
Procesní kapalina:	emulze (tlak $p_{pk} = 4 \text{ MPa}$)

6.5.5 Měřicí přístroje, pomůcky a zařízení

- **Pneumatické měřicí zařízení AEROPAN (obr. 6.10a)**

Měření se provádělo pomocí měřícího trnu (obr. 6.10c), jehož průměr byl o několik mikrometrů menší, než jmenovitý průměr měřené díry. Úchylka rozměru od jmenovité hodnoty se pak zobrazila na číselníku indikační jednotky (obr. 6.10a). Před samotným měřením se provedla kalibrace měřícího zařízení pomocí dvou kalibrovacích kroužků (obr. 6.10b).

Parametry měřícího zařízení:

rozsah stupnice:	– 30 až +70 μm
přesnost:	1 μm



Obr. 6.10 Pneumatické měřicí zařízení AEROPAN

- a) indikační jednotka
b) kalibrovací kroužky
c) měřicí trn

- **Měřicí trn HAM-FINAL (obr. 6.10c)**

označení:	6809 – 1242
průměr:	$d_k = 5,985 \text{ mm}$

- **Kalibrovací kroužky HAM-FINAL (obr. 6.10b)**

Kroužek 1: označení: 6809 – 1242 – K1
průměr: $D_{K1} = 5,999 \text{ mm}$

Kroužek 2: označení: 6809 – 1242 – K2
průměr: $D_{K2} = 6,029 \text{ mm}$

- **Přenosný drsnoměr MAHR POCKET SURF III (obr. 6.11)**

Přenosný drsnoměr byl použit k měření průměrné aritmetické úchytky profilu (R_a). K ustavení zkušebního obrobku při měření byla použita prizmatická podložka (obr. 6.11).

Celková délka měření průměrné aritmetické úchytky profilu byla nastavena na $L_c = 5 \text{ mm}$.

Parametry přenosného drsnoměru:

měřitelné parametry drsnosti:	$R_a, R_z, R_{\max}/R_y$
přesnost:	$0,01 \mu\text{m}$
celková délka měření:	(2; 3,5 nebo 5) mm
vyhodnocovaná délka:	(1; 3 nebo 5) $\times 0,8 \text{ mm}$



Obr. 6.11 Přenosný drsnoměr MAHR POCKET SURF III

6.6 Naměřené hodnoty

Naměřené hodnoty pro vybrané nástroje a řezné podmínky jsou uvedeny v tab. 6.2 – 6.3. Výsledky statistického zpracování naměřených hodnot pro vybrané nástroje a řezné podmínky jsou uvedeny v tab. 6.4 – 6.5. Pro větší přehlednost jsou ostatní naměřené hodnoty a výsledky statistického zpracování naměřených hodnot uvedeny v příloze č. 5 a 6.

6.6.1 Jednobřítý výstružník s břitem z PKD (MT1-PKD)

Tab. 6.2 Naměřené hodnoty pro nástroj MT1-PKD (posuv $f_{ot} = 0,2$ mm)

Jednobřítý výstružník s břitem z PKD (MT1-PKD)						
Řezné podmínky:	otáčky $n = 3000 \text{ min}^{-1}$		posuv $f_{ot} = 0,2 \text{ mm}$		řezná rychlost $v_c = 56,55 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	
číslo obrobku	průměr díry D [mm]			drsnost povrchu Ra [μm]		
	A	B	C	A	B	C
1	6,009	6,009	6,009	0,21	0,21	0,23
2	6,009	6,008	6,009	0,19	0,21	0,22
3	6,009	6,009	6,009	0,20	0,21	0,23
4	6,009	6,009	6,009	0,20	0,21	0,21
5	6,009	6,009	6,008	0,18	0,21	0,21
6	6,009	6,009	6,009	0,19	0,20	0,21
7	6,009	6,009	6,009	0,20	0,19	0,20
8	6,008	6,008	6,009	0,21	0,20	0,21
9	6,009	6,008	6,008	0,22	0,21	0,23
10	6,009	6,008	6,008	0,23	0,23	0,23
11	6,008	6,008	6,008	0,21	0,23	0,25
12	6,009	6,008	6,008	0,21	0,23	0,26
13	6,009	6,009	6,008	0,22	0,24	0,26
14	6,009	6,009	6,008	0,24	0,25	0,28
15	6,010	6,009	6,009	0,23	0,24	0,26
16	6,010	6,009	6,009	0,24	0,24	0,26

6.6.2 Jednobřítý výstružník s břitem z CVD diamantu (MT1-CVDdia)

Tab. 6.3 Naměřené hodnoty pro nástroj MT1-CVDdia (posuv $f_{ot} = 0,2$ mm)

Jednobřítý výstružník s břitem z CVD diamantu (MT1-CVDdia)						
Řezné podmínky:	otáčky $n = 3000 \text{ min}^{-1}$		posuv $f_{ot} = 0,2 \text{ mm}$		řezná rychlost $v_c = 56,55 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	
číslo obrobku	průměr díry D [mm]			drsnost povrchu Ra [μm]		
	A	B	C	A	B	C
1	6,009	6,011	6,011	0,20	0,21	0,21
2	6,009	6,011	6,012	0,22	0,24	0,24
3	6,010	6,010	6,012	0,21	0,22	0,25
4	6,013	6,012	6,013	0,25	0,24	0,22
5	6,011	6,011	6,010	0,21	0,25	0,24
6	6,009	6,012	6,012	0,25	0,21	0,23
7	6,011	6,012	6,011	0,19	0,19	0,21
8	6,008	6,010	6,009	0,22	0,21	0,22
9	6,010	6,012	6,013	0,23	0,25	0,25
10	6,010	6,011	6,010	0,22	0,23	0,24
11	6,011	6,012	6,011	0,19	0,20	0,21
12	6,009	6,013	6,012	0,20	0,21	0,23
13	6,008	6,010	6,010	0,21	0,22	0,24
14	6,012	6,012	6,011	0,18	0,19	0,20
15	6,011	6,011	6,012	0,21	0,23	0,24

6.7 Statistické zpracování naměřených dat

V tab. 6.4 a v tab. 6.5 jsou výsledky statisticky zpracovaných naměřených hodnot pro jednobřítý výstružník s břitem z PKD, resp. s břitem z CVD diamantu.

Válcovitost díry V se pro každý zkušební obrobek vypočítá dle vztahu 6.1, jako rozdíl mezi největším a nejmenším naměřeným průměrem díry (z míst měření A, B, C).

$$V = D_{\max} - D_{\min} \quad (6.1)$$

Pro každý zkušební obrobek se také dle vztahů 6.2 a 6.3 vypočítá průměrná hodnota průměru díry \bar{D}_{ABC} a drsnosti povrchu \bar{Ra}_{ABC} .

$$\bar{D}_{ABC} = \frac{1}{3} \cdot (D_A + D_B + D_C) \quad (6.2)$$

$$\bar{Ra}_{ABC} = \frac{1}{3} \cdot (Ra_A + Ra_B + Ra_C) \quad (6.3)$$

Ze všech naměřených hodnot pro daný nástroj a daný posuv se pak dle příslušných vztahů vypočítá aritmetický průměr \bar{x} (6.4), rozptyl s^2 (6.5) a směrodatná odchylka s (6.6). Výpočet se provede pro hodnoty průměru díry, hodnoty drsnosti povrchu a pro hodnoty válcovitosti díry.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (6.4)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (6.5)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.6)$$

V tabulkách naměřených hodnot a statisticky zpracovaných hodnot jsou hodnoty průměru díry, drsnosti povrchu či válcovitosti díry, které jsou na hranici tolerance označeny žlutě, červeně jsou označeny hodnoty, které leží mimo toleranci.

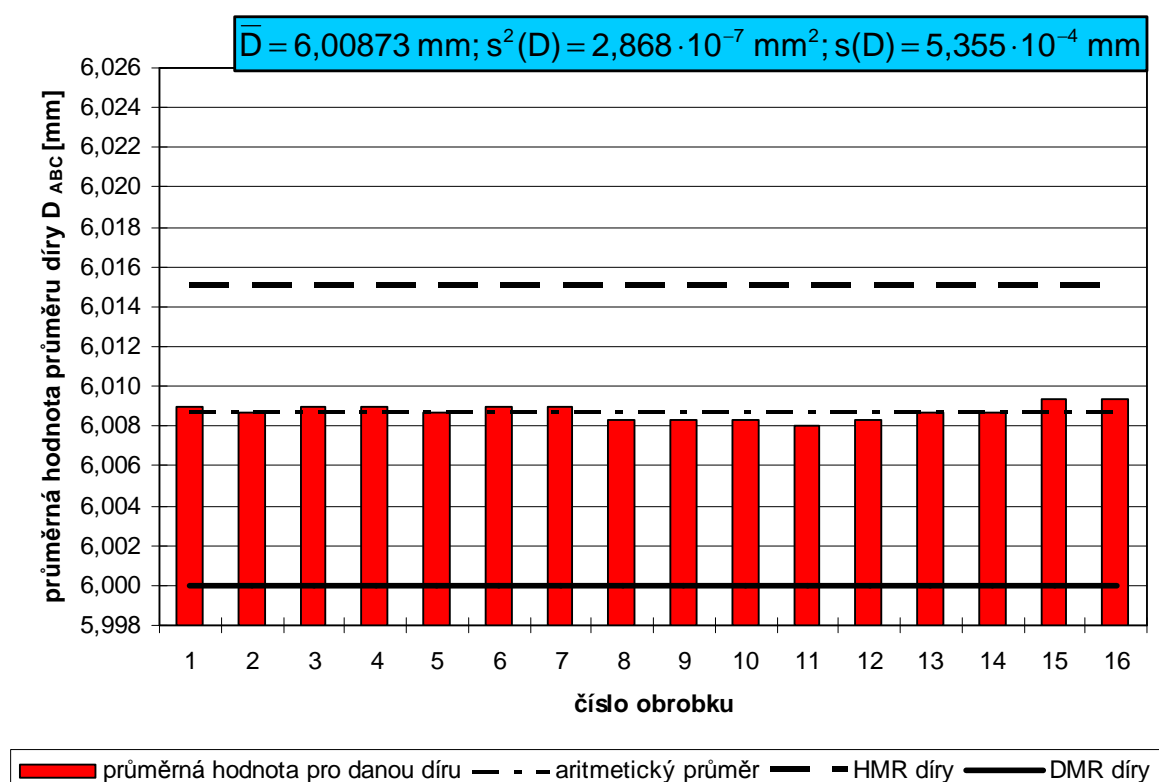
Obr. 6.12 a obr. 6.13 zobrazuje grafickou závislost průměrné hodnoty průměru díry \bar{D}_{ABC} na číslu obrobku pro jednobřítý výstružník ($f_{ot} = 0,2 \text{ mm}$) s břitem z PKD, resp. s břitem z CVD diamantu. Tato grafická závislost koresponduje s hodnotami aritmetického průměru vypočítanými pro průměr díry, které jsou uvedeny v tab. 6.4, resp. v tab. 6.5.

Grafické závislosti pro ostatní použité nástroje a řezné podmínky jsou uvedeny v příloze č. 7.

6.7.1 Jednobřítý výstružník s břitem z PKD (MT1-PKD)

Tab. 6.4 Statisticky zpracované hodnoty pro nástroj MT1-PKD (posuv $f_{ot} = 0,2$ mm)

Jednobřítý výstružník s břitem z PKD (MT1-PKD)			
Řezné podmínky:	otáčky $n = 3000 \text{ min}^{-1}$	posuv $f_{ot} = 0,2 \text{ mm}$	řezná rychlost $v_c = 56,55 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
číslo obrobku	válcovitost V [mm]	Aritmetický průměr	
		průměru díry \bar{D}_{ABC} [mm]	drsnoti povrchu \bar{Ra}_{ABC} [μm]
1	0,000	6,00900	0,21667
2	0,001	6,00867	0,20667
3	0,000	6,00900	0,21333
4	0,000	6,00900	0,20667
5	0,001	6,00867	0,20000
6	0,000	6,00900	0,20000
7	0,000	6,00900	0,19667
8	0,001	6,00833	0,20667
9	0,001	6,00833	0,22000
10	0,001	6,00833	0,23000
11	0,000	6,00800	0,23000
12	0,001	6,00833	0,23333
13	0,001	6,00867	0,24000
14	0,001	6,00867	0,25667
15	0,001	6,00933	0,24333
16	0,001	6,00933	0,24667
aritmetický průměr \bar{x}	0,00063 [mm]	6,00873 [mm]	0,22167 [μm]
rozptyl s^2	$2,5 \cdot 10^{-7}$ [mm²]	$2,868 \cdot 10^{-7}$ [mm²]	$4,823 \cdot 10^{-4}$ [μm^2]
směrodatná odchylka s	$5,0 \cdot 10^{-4}$ [mm]	$5,355 \cdot 10^{-4}$ [mm]	$2,196 \cdot 10^{-2}$ [μm]

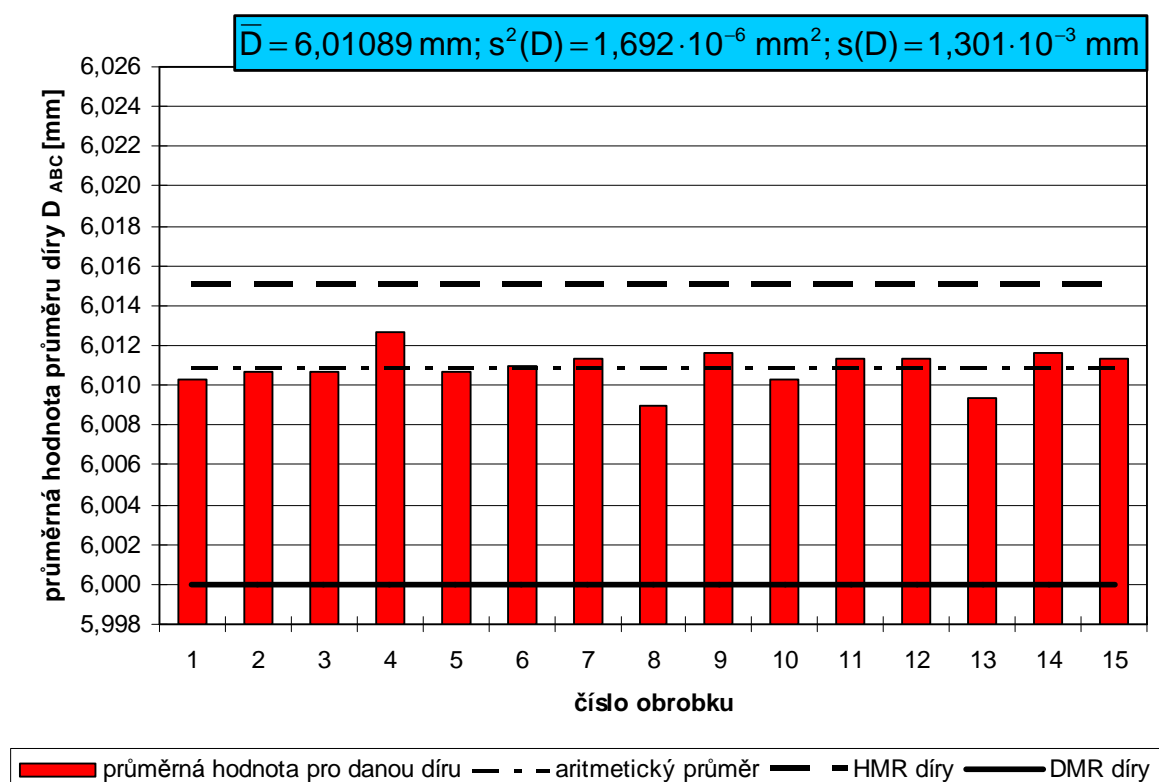


Obr. 6.12 Grafická závislost průměrné hodnoty průměru díry \bar{D}_{ABC} na číslu obrobku (nástroj MT1-PKD, $f_{ot} = 0,2$ mm)

6.7.2 Jednobřítý výstružník s břitem z CVD diamantu (MT1–CVDdia)

Tab. 6.5 Statisticky zpracované hodnoty pro nástroj MT1–CVDdia (posuv $f_{ot} = 0,2 \text{ mm}$)

Jednobřítý výstružník s břitem z CVD diamantu (MT1–CVDdia)			
Řezné podmínky:	otáčky $n = 3000 \text{ min}^{-1}$	posuv $f_{ot} = 0,2 \text{ mm}$	řezná rychlost $v_c = 56,55 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
číslo obrobku	válcovitost $V \text{ [mm]}$	Aritmetický průměr	
		průměru díry $\bar{D}_{ABC} \text{ [mm]}$	drsnosti povrchu $\bar{R}_{aABC} \text{ [}\mu\text{m]}$
1	0,002	6,01033	0,20667
2	0,003	6,01067	0,23333
3	0,002	6,01067	0,22667
4	0,001	6,01267	0,23667
5	0,001	6,01067	0,23333
6	0,003	6,01100	0,23000
7	0,001	6,01133	0,19667
8	0,002	6,00900	0,21667
9	0,003	6,01167	0,24333
10	0,001	6,01033	0,23000
11	0,001	6,01133	0,20000
12	0,004	6,01133	0,21333
13	0,002	6,00933	0,22333
14	0,001	6,01167	0,19000
15	0,001	6,01133	0,22667
aritmetický průměr \bar{x}	0,00187 [mm]	6,01089 [mm]	0,22044 [μm]
rozptyl s^2	$9,81 \cdot 10^{-7} \text{ [mm}^2\text{]}$	$1,692 \cdot 10^{-6} \text{ [mm}^2\text{]}$	$3,771 \cdot 10^{-4} \text{ [}\mu\text{m}^2\text{]}$
směrodatná odchylka s	$9,904 \cdot 10^{-4} \text{ [mm]}$	$1,301 \cdot 10^{-3} \text{ [mm]}$	$1,942 \cdot 10^{-2} \text{ [}\mu\text{m]}$



Obr. 6.13 Grafická závislost průměrné hodnoty průměru díry \bar{D}_{ABC} na číslu obrobku (nástroj MT1–CVDdia, $f_{ot} = 0,2 \text{ mm}$)

Tab. 6.6 obsahuje vypočítané statistické charakteristiky válcovitosti díry, průměru díry a drsnosti povrchu. Jedná se o souhrn posledních 3 řádků tabulky statisticky zpracovaných hodnot (tab. 6.4) pro všechny nástroje a posuvy použité při experimentu.

Tab. 6.6 Srovnání statistických charakteristik pro všechny použité nástroje a posuvy

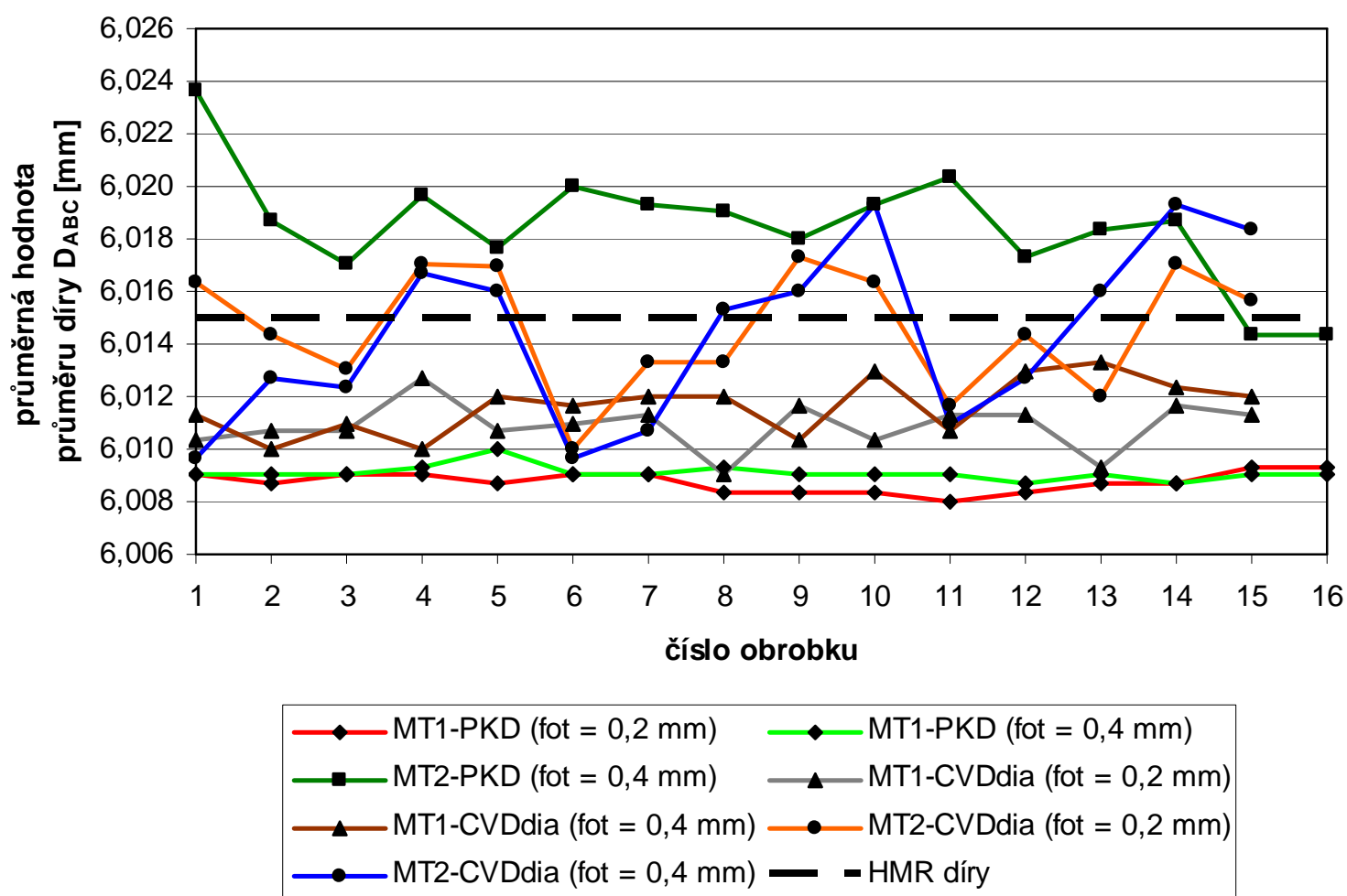
Nástroj	Posuv f_{ot} [mm]	Statistická charakteristika	Válcovitost díry	Průměr díry	Drsnost povrchu
MT1-PKD	0,2	aritmetický průměr \bar{x}	0,00063	6,00873	0,22167
		rozptyl s^2	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$2,868 \cdot 10^{-7}$	$4,823 \cdot 10^{-4}$
		směrodatná odchylka s	$5 \cdot 10^{-4}$	$5,355 \cdot 10^{-4}$	$2,196 \cdot 10^{-2}$
	0,4	aritmetický průměr \bar{x}	0,00025	6,00906	0,24079
		rozptyl s^2	$2 \cdot 10^{-7}$	$1,449 \cdot 10^{-7}$	$4,914 \cdot 10^{-4}$
		směrodatná odchylka s	$4,472 \cdot 10^{-4}$	$3,807 \cdot 10^{-4}$	$2,217 \cdot 10^{-2}$
MT2-PKD	0,4	aritmetický průměr \bar{x}	0,00225	6,01848	0,32913
		rozptyl s^2	$1,267 \cdot 10^{-6}$	$5,957 \cdot 10^{-6}$	$6,75 \cdot 10^{-4}$
		směrodatná odchylka s	$1,125 \cdot 10^{-3}$	$2,441 \cdot 10^{-3}$	$2,598 \cdot 10^{-2}$
MT1-CVDdia	0,2	aritmetický průměr \bar{x}	0,00187	6,01089	0,22044
		rozptyl s^2	$9,81 \cdot 10^{-7}$	$1,692 \cdot 10^{-6}$	$3,771 \cdot 10^{-4}$
		směrodatná odchylka s	$9,904 \cdot 10^{-4}$	$1,301 \cdot 10^{-3}$	$1,942 \cdot 10^{-2}$
	0,4	aritmetický průměr \bar{x}	0,00213	6,01164	0,21467
		rozptyl s^2	$1,552 \cdot 10^{-6}$	$2,234 \cdot 10^{-6}$	$4,573 \cdot 10^{-4}$
		směrodatná odchylka s	$1,246 \cdot 10^{-3}$	$1,495 \cdot 10^{-3}$	$2,138 \cdot 10^{-2}$
MT2-CVDdia	0,2	aritmetický průměr \bar{x}	0,00447	6,01458	0,30556
		rozptyl s^2	$3,124 \cdot 10^{-6}$	$9,249 \cdot 10^{-6}$	$6,48 \cdot 10^{-4}$
		směrodatná odchylka s	$1,767 \cdot 10^{-3}$	$3,041 \cdot 10^{-3}$	$2,546 \cdot 10^{-2}$
	0,4	aritmetický průměr \bar{x}	0,00427	6,01438	0,30844
		rozptyl s^2	$3,638 \cdot 10^{-6}$	$1,465 \cdot 10^{-5}$	$6,089 \cdot 10^{-4}$
		směrodatná odchylka s	$1,907 \cdot 10^{-3}$	$3,827 \cdot 10^{-3}$	$2,468 \cdot 10^{-2}$

V tab. 6.6 mají válcovitost a průměr díry jednotky [mm], drsnost povrchu má jednotky [μm]. Aritmetický průměr a směrodatná odchylka mají jednotky stejné jako parametr, ze kterého se počítají [mm, μm]. Rozptyl má jednotky odpovídající kvadrátu jednotek, ze kterého se počítá [mm^2 , μm^2].

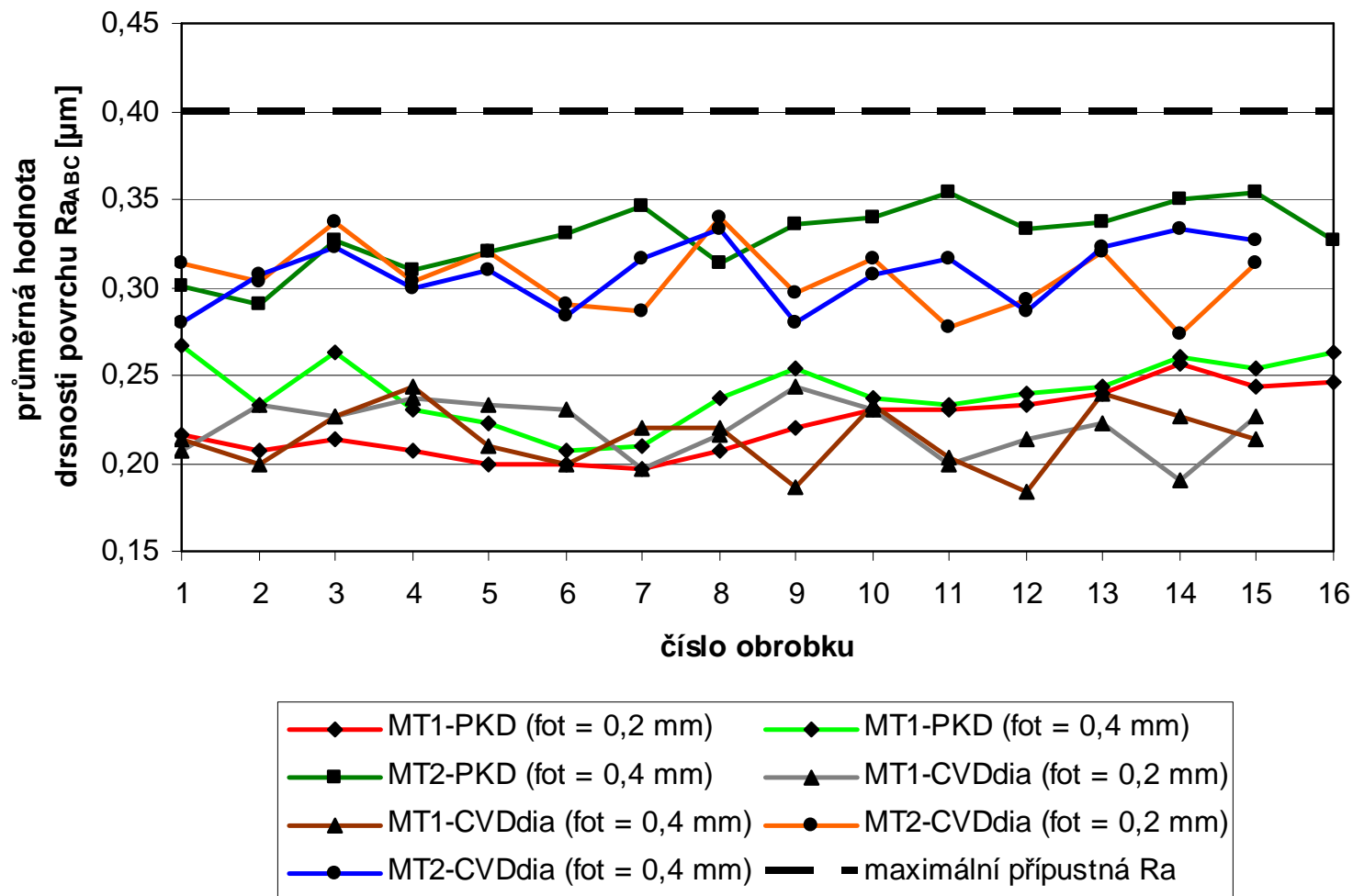
6.8 Vyhodnocení experimentu

Následující grafické závislosti (obr. 6.14 až 6.16) zobrazují závislost průměrné hodnoty průměru díry, drsnosti povrchu a válcovitosti díry na číslu obrobku pro všechny testované nástroje a posuvy. Z důvodu větší přehlednosti protíná osa x osu y v hodnotě 6,006 mm (obr. 6.14), resp. v hodnotě 0,15 μm (obr. 6.15). Jelikož ani u jednoho zkoušeného nástroje a posuvu nedošlo k naměření hodnot blízkých dolnímu meznímu rozměru díry, není tato mez v grafu na obr. 6.14 vyznačena.

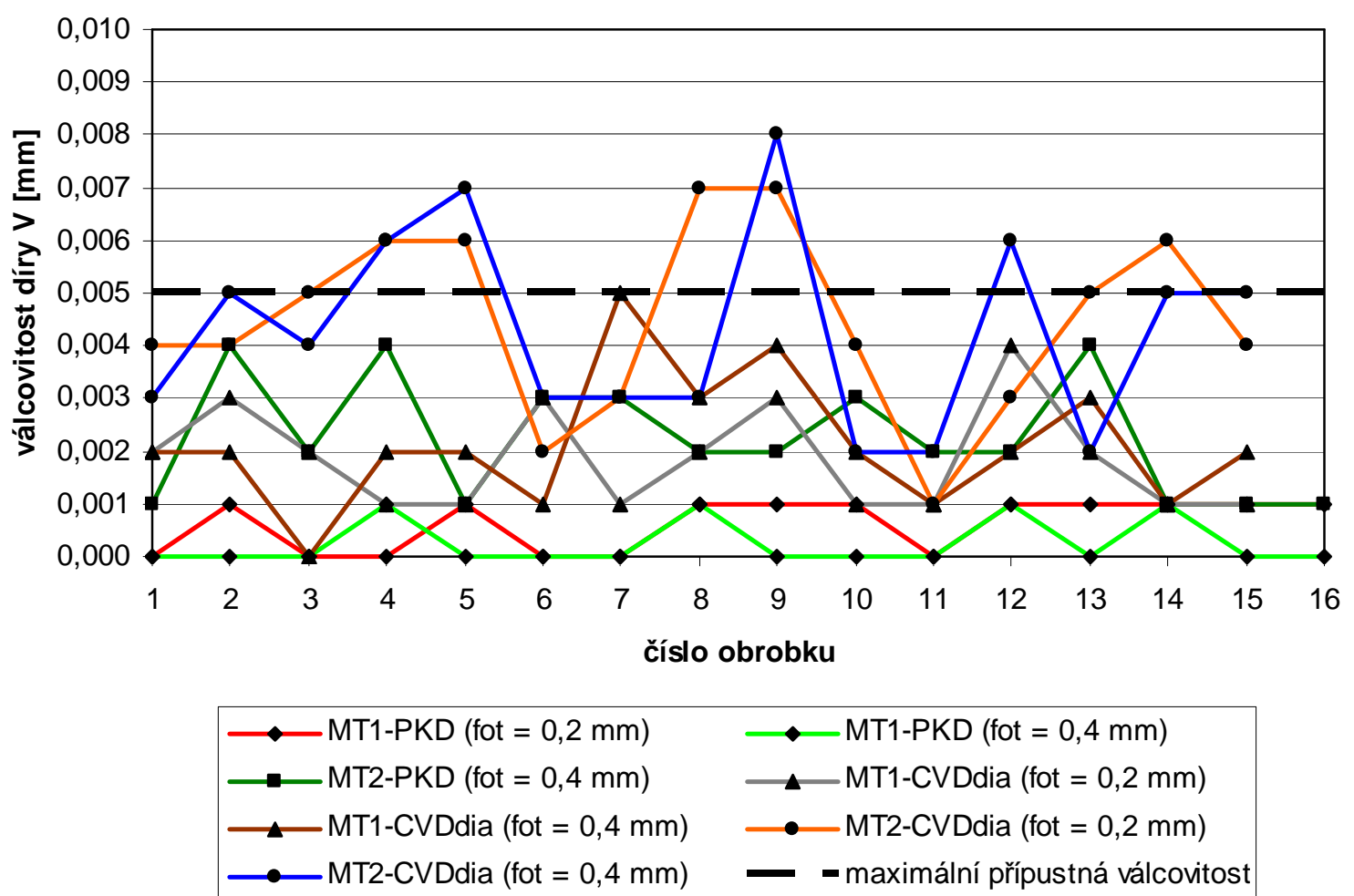
Slovní zhodnocení jednotlivých testovaných nástrojů a posuvů je uvedeno v kapitole 6.8.1 až 6.8.4. Celkové zhodnocení experimentu je uvedeno v kapitole 6.8.5.



Obr. 6.14 Grafická závislost průměrné hodnoty průměru díry \bar{D}_{ABC} na číslu obrobku pro všechny testované nástroje a posuvy



Obr. 6.15 Grafická závislost průměrné hodnoty drsnosti povrchu \overline{Ra}_{ABC} na číslu obrobku pro všechny testované nástroje a posuvy



Obr. 6.16 Grafická závislost válcovitosti díry V na číslu obrobku pro všechny testované nástroje a posuvy

6.8.1 Jednobřítý výstružník s břitem z PKD (MT1–PKD)

Tento nástroj vykazoval při obou velikostech posuvů nejlepší výsledky. Rozdíl mezi největším a nejmenším naměřeným průměrem byl pouze 0,002 mm. Průměrná velikost průměru díry je pro tento nástroj 6,00873 mm ($f_{ot} = 0,2$ mm), resp. 6,00906 mm při posuvu $f_{ot} = 0,4$ mm, přičemž rozptyl a směrodatná odchylka nabývají nejmenších hodnot ze všech testovaných nástrojů a posuvů.

Při menším z testovaných posuvů ($f_{ot} = 0,2$ mm) se tímto nástrojem dosáhla třetí nejmenší drsnost povrchu, konkrétně 0,22167 μm . Při posuvu $f_{ot} = 0,4$ mm je průměrná velikost drsnosti povrchu nepatrně větší (0,24079 μm), což se ale při větší hodnotě posuvu dalo předpokládat.

Válcovitost vystružené díry také dosahuje nejmenší průměrnou velikost ze všech testovaných nástrojů a posuvů (0,63 μm pro posuv $f_{ot} = 0,2$ mm; 0,25 μm pro posuv $f_{ot} = 0,4$ mm).

6.8.2 Dvoubřítý výstružník s břity z PKD (MT2–PKD)

Při použití tohoto nástroje byla pouze u dvou zkušebních obrobků dodržela tolerance průměru díry. Také drsnost povrchu naměřená na zkušebních obrocích byla nejhorší ze všech testovaných nástrojů a posuvů.

Tento výstružník tedy vykazuje nejhorší výsledky ze všech a při testech se neosvědčil.

6.8.3 Jednobřítý výstružník s břitem z CVD diamantu (MT1–CVDdia)

Tento výstružník dosahoval při testech druhých nejlepších výsledků. Ze všech naměřených hodnot průměru díry došlo pouze v jednom případě k dosažení horního mezního rozměru díry (při posuvu $f_{ot} = 0,4$ mm). Průměrná velikost vystružené díry je u tohoto nástroje 6,01089 mm (posuv $f_{ot} = 0,2$ mm), resp. 6,01164 mm při posuvu $f_{ot} = 0,4$ mm.

Vystružená díra vykazovala při použití tohoto nástroje nejlepší drsnost povrchu. Průměrná velikost drsnosti povrchu je při posuvu $f_{ot} = 0,2$ mm rovna 0,22044 μm (s nejmenším rozptylem), při posuvu $f_{ot} = 0,4$ mm je drsnost povrchu rovna 0,21467 μm (nejlepší dosažená drsnost povrchu ze všech testovaných nástrojů a posuvů).

Při posuvu $f_{ot} = 0,4$ mm dosáhla válcovitost vystružené díry u jednoho zkušebního obrobku limitní hodnoty.

6.8.4 Dvoubřítý výstružník s břity z CVD diamantu (MT2–CVDdia)

Podobně jako dvoubřítý výstružník s břity z PKD, ani tento dvoubřítý nástroj při testech nesplnil dané požadavky na přesnost. Při posuvu $f_{ot} = 0,2$ mm byl u 10 zkušebních obrobků překročen horní mezní rozměr díry, při posuvu $f_{ot} = 0,4$ mm

byl horní mezní rozměr díry překročen u 8 zkušebních obrobků. Navíc průměrná velikost průměru díry je u obou použitých posuvů velmi blízko hornímu meznímu rozměru, konkrétně pro posuv $f_{ot} = 0,2$ mm je 6,01458 mm, pro posuv $f_{ot} = 0,4$ mm je 6,01438 mm (s největším rozptylem).

Obrobené díry tímto nástrojem rovněž vykazovaly vysoké hodnoty drsnosti povrchu, kde průměrná velikost drsnosti povrchu byla druhá největší ze všech testovaných nástrojů (při posuvu $f_{ot} = 0,2$ mm je průměrná hodnota 0,30556 μm ; při posuvu $f_{ot} = 0,4$ mm je průměrná hodnota 0,30844 μm).

Při posuvu $f_{ot} = 0,2$ mm byla mezní hodnota válcovitosti díry překročena u 5 zkušebních obrobků, při posuvu $f_{ot} = 0,4$ mm byla válcovitost díry překročena 4krát.

Po celkovém zhodnocení tohoto nástroje lze konstatovat, že se při testech také neosvědčil.

6.8.5 Celkové zhodnocení testovaných nástrojů

Z výše uvedených grafických závislostí (obr. 6.14 až 6.16) a ze zhodnocení jednotlivých testovaných nástrojů vyplývá, že nejlepších parametrů přesnosti dosáhl nástroj MT1–PKD, tedy jednobřítý výstružník s břitem z PKD. Druhých nejlepších výsledků dosáhl nástroj MT1–CVDdia (jednobřítý výstružník s břitem z CVD diamantu). Oba dvoubřité nástroje (s břity z PKD a CVD diamantu) použité při testech nevyhověly požadavkům na přesnost. Potvrdil se tak předpoklad, že jednobřité výstružníky jsou přesnější než dvoubřité.

Při porovnání testovaných výstružníků podle materiálu břitu lze dojít k závěru, že nástroje s břitem z PKD dosahují větší přesnosti rozměru a nižších hodnot válcovitosti díry. Nástroje s břitem z CVD diamantu zase dosahují nepatrně lepších drsností povrchu.

Z porovnání testovaných nástrojů podle kritéria použité velikosti posuvu ($f_{ot} = 0,2$ mm, nebo $f_{ot} = 0,4$ mm) vyplývá, že větších přesností rozměru, lepších drsností povrchu a menších válcovitostí díry bylo dosahováno při menší velikosti posuvu na otáčku.

7 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Při experimentu ve firmě HAM-FINAL se z hlediska přesnosti rozměru a drsnosti povrchu neosvědčily dvoubřité nástroje (ať už šlo o výstružníky s břity z PKD nebo CVD diamantu). Tento fakt se dal předpokládat, neboť při použití dvoubřitých výstružníků při obrábění nerovnoměrných přídavků dochází vlivem rozdílných rezných odporů na jednotlivých břitech k nerovnoměrnému přenášení sil na vodítka. Tím dochází k vychylování výstružníku, čímž se zhoršuje tvarová přesnost díry (kruhovitost, válcovitost).

Naopak jednobřité výstružníky dosahovaly velmi dobrých výsledků, kde nástroj s břitem z PKD byl jednoznačně nejlepší, co se týče rozměrové a tvarové přesnosti vystružené díry. Jednobřitý výstružník s břitem z CVD diamantu vykazoval nejlepší drsnost povrchu obrobených děr.

Výhoda dvoubřitých nástrojů oproti jednobřitým je v tom, že je lze použít při větších posuvech na otáčku (dvojnásobných oproti jednobřitým nástrojům). Produktivita se tím pádem dvakrát zvýší. Při použití stejných posuvů na otáčku jako u jednobřitých nástrojů pak budou dvoubřité výstružníky teoreticky dosahovat větších trvanlivostí.

Všechny čtyři druhy výstružníků, které byly testovány ve firmě HAM-FINAL na zkušebních obrocích jsou nyní testovány ve firmě Volkswagen (SRN). Jelikož se jedná o nástroje osazené břity z diamantu (PKD nebo CVD diamant), které se vyznačují vysokou životností, nejsou zatím známy výsledky trvanlivosti jednotlivých nástrojů. Nelze tedy zatím porovnat, který nástroj bude lepší z hlediska nákladů.

CVD diamant se svou strukturou prakticky neliší od přírodního diamantu. Není tedy oslabován pojivou, má vysokou tvrdost a odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Z těchto důvodů se dá předpokládat, že trvanlivost nástrojů s břity z CVD diamantu bude oproti nástrojům s břity z PKD vyšší.

Řezné podmínky byly pro všechny druhy nástrojů nastaveny stejně, takže jednotkové strojní časy (t_{AS}) jsou shodné. Konstrukce nástrojů jsou totožné, tedy jednotkové vedlejší časy (t_{AV}) jsou rovněž shodné. Jelikož jsou časy t_{AS} a t_{AV} pro jednotlivé nástroje shodné, nejsou z hlediska porovnání významné.

Ceny testovaných nástrojů jsou známy (viz. tab. 6.1). Jednobřitý výstružník s břitem z PKD dosahoval při testech nejlepších výsledků. Jeho cena je zároveň nejnižší (9 180 Kč), a proto se tento nástroj jeví jako nejvýhodnější i z ekonomického hlediska. Toto však může být zavádějící, neboť nejsou známy výsledky trvanlivosti. Pokud z výsledků trvanlivosti vzejde nejlépe jednobřitý nástroj s břitem z CVD diamantu, jehož cena je druhá nejnižší (11 475 Kč), může být právě tento nástroj ekonomicky nejvýhodnější.

Postup při známých výsledcích trvanlivosti je tedy takový, že se cena daného nástroje podělí počtem obrobených děr (resp. celkově dosaženou délkou vystružené díry), kterých tento nástroj dosáhl, čímž se získají náklady na obrobění jedné díry (resp. náklady na 1 metr vystružené díry). Tyto náklady se poté porovnají pro všechny nástroje, kde nástroj s nejnižšími náklady na obrobění jedné díry (resp. 1 metr vystružené díry) je ekonomicky nejvýhodnější.

ZÁVĚR

Teoretická část této práce se zabývá přehledem materiálů pro řezné nástroje se zaměřením na diamantové materiály, opotřebením řezných nástrojů, požadavky kladenými na přesnost vystružených děr a nástroji pro výrobu přesných děr.

Úkolem praktické části práce pak bylo navrhnout, provést a vyhodnotit experiment, jehož cílem bylo ověřit užité vlastnosti nově vyvinutých nástrojů pro dokončování děr s břity z polykrystalického diamantu (PKD) a CVD diamantu.

Celkem byly zkoušeny 4 druhy výstružníků, které se lišily materiálem břitu (PKD nebo CVD diamant) a počtem břitů (jednobřité nebo dvoubřité). Při testech nástrojů se také zkoušely různé řezné podmínky (posuv $f_{ot} = 0,2$ mm, nebo $f_{ot} = 0,4$ mm). Výsledky provedených testů:

- Jednobřitý výstružník s břitem z PKD dosáhl při testech nejlepších výsledků. Rozdíl mezi největším a nejmenším naměřeným průměrem byl pouze 2 μm , válcovitost díry byla rovněž nejlepší z testovaných nástrojů. Tento nástroj zároveň dosahoval druhé nejlepší drsnosti povrchu vystružené díry.
- Dvoubřitý výstružník s břity z PKD se při provedených testech neosvědčil a vykazoval nejhorší výsledky ze všech nástrojů. Pouze u 2 zkušebních obrobků byla dodržena tolerance průměru díry. Drsnost povrchu vystružených děr byla nejhorší ze všech zkoušených nástrojů.
- Jednobřitý výstružník s břitem z CVD diamantu v testech dosáhl druhých nejlepších výsledků. V jednom případě však bylo dosaženo horního mezního rozměru díry. Válcovitost díry v jednom případě také dosáhla limitní hodnoty. Drsnost povrchu vystružených děr dosažená tímto nástrojem byla nejlepší ze všech.
- Dvoubřitý výstružník s břity z CVD diamantu podobně jako dvoubřitý výstružník s břity z PKD v testech nesplnil požadavky na přesnost. Vypočítaná průměrná hodnota průměru díry byla příliš blízko hornímu meznímu rozměru, který byl během testů několikrát překročen. Rovněž limitní hodnota válcovitosti díry byla několikrát překročena. Drsnost povrchu vystružených děr byla druhá nejhorší ze všech testovaných nástrojů.

Z výše uvedených výsledků lze konstatovat závěr, že dvoubřité výstružníky se při dokončování děr neosvědčily, čímž se potvrdil předpoklad, že jednobřité výstružníky dosahují větší rozměrové a tvarové přesnosti obrobeků.

Při porovnání nástrojů podle použitého materiálu břitu lze dojít závěru, že nástroje s břity z PKD dosahují větších přesností rozměru a válcovitosti díry, kdežto nástroje s břity z CVD diamantu vykazují lepší drsnost povrchu vystružených děr. Toto může být způsobeno tím, že CVD diamant se svou strukturou prakticky neliší od přírodního diamantu, takže má velmi ostré břity, kterými lze dosáhnout velmi dobré kvality struktury povrchu.

Třetím kritériem pro porovnání zkoušených nástrojů může být velikost použitého posuvu na otáčku. Při menších hodnotách posuvu ($f_{ot} = 0,2$ mm) bylo dosaženo větších přesností rozměru, nižší válcovitosti i lepší drsnosti povrchu vystružených děr.

Výhoda dvoubřitých výstružníků pak spočívá zejména v tom, že lze použít při větších hodnotách posuvů na otáčku (dvojnásobných oproti jednobřitým nástrojům), čímž se dvakrát zvýší produktivita. Pokud jsou dvoubřité výstružníky použity při stejných hodnotách posuvu na otáčku jako jednobřité, měly by pak teoreticky dosahovat větších trvanlivostí.

Všechny nástroje zkoušené ve firmě HAM-FINAL jsou nyní testovány ve firmě Volkswagen (SRN), kde se ověřuje jejich trvanlivost. Tyto výsledky trvanlivosti nejsou zatím z důvodu vysokých životností diamantových nástrojů známy. Teprve až budou tyto výsledky trvanlivosti k dispozici, bude možno nástroje kompletně zhodnotit a vyslovit závěr, který nástroj poskytuje nejlepší užité vlastnosti.

Je třeba dodat, že součástí experimentu také měly být vystružovací nástroje ze slinutých karbidů opatřené CVD diamantovým povlakem. Od této varianty nástrojů se však upustilo, protože při detailnějším rozboru problematiky CVD diamantových povlaků s odborníky z firmy CemeCon se došlo k závěru, že je velmi obtížné vyrábět tyto vysoce přesné rozměrové nástroje s opakovatelnou přesností. Samotnému povlakování CVD diamantem totiž předchází leptání povrchu nástroje (tento je již vybroušen na požadovanou geometrii), které v dnešní době lze řídit s nižší přesností, než je požadovaná přesnost při výrobě přesných vystružovacích nástrojů. CVD diamantové povlaky tak zatím najdou širší uplatnění u jiných, než přesných rozměrových nástrojů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ, s.r.o. *Příručka obrábění : Kniha pro praktiky*. Přel. Miroslav Kundera. 1. české vyd. Praha : Scientia, 1997. 857 s. ISBN 91-972299-4-6.
2. AUGUST BECK GmbH & Co. KG. Winterlingen, Germany. *Beck Main Catalogue Edition 2008*. [online]. [cit. 2009-03-09]. Dostupný z WWW: <http://www.august-beck.de/files/veroeff/beck-katalog_2008.pdf>.
3. AUGUST BECK GmbH & Co. KG. Winterlingen, Germany. *Beck pricelist 2009*. [online]. [cit. 2009-03-09]. Dostupný z WWW: <<http://www.august-beck.de/files/veroeff/Beck%20Preisliste%202009.pdf>>.
4. AUGUST BECK GmbH & Co. KG. Winterlingen, Germany. *High performance reamers RR01 made from carbide, Cermet and PCD-tipped*. [online]. [cit. 2009-03-09]. Dostupný z WWW: <http://www.august-beck.de/site_en/produkte/reiben.einzelprod1.php>.
5. BUMBÁLEK, Bohumil. *Fyzikální podstata řezání* [online]. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005 [cit. 2009-02-10], 125 s. Dostupný z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/fyz_pods_rez/Opora_05_Fyzikalni_podstata_rezani.pdf>.
6. BUMBÁLEK, Bohumil. Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci. In *Frézování III*. Brno : VUT FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie, 2003. s. 95-102. ISBN 80-214-2436-2.
7. BUMBÁLEK, Bohumil. *Vysoce přesné metody obrábění a jejich fyzikální podstata* [online]. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2004 [cit. 2009-03-05], 63 s. Dostupný z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/fyz_pods_rez/Opory04.pdf>.
8. CEMECON AG. Würselen, Germany. *Coating materials*. [online]. [cit. 2009-02-18]. Dostupný z WWW: <http://www.cemecon.com/coating_competence/2_construction_of_your_individual_coating/22_design_of_the_coating/ii_coating_materials/index_eng.html>.
9. CEMECON AG. Würselen, Germany. *CVD coating*. [online]. [cit. 2009-02-18]. Dostupný z WWW: <http://www.cemecon.com/coating_competence/3_manufacturing_of_the_coating/32_cvd_coating/index_eng.html>.
10. CEMECON AG. Würselen, Germany. *Pre-treatment*. [online]. [cit. 2009-02-18]. Dostupný z WWW: <http://www.cemecon.com/coating_competence/2_construction_of_your_individual_coating/22_design_of_the_coating/i_pre_treatment/index_eng.html>.
11. CERATONIA REINER DÜMPERT e.K. Eltmann, Germany. *CERATON Type VD and M+*. [online]. [cit. 2009-03-07]. Dostupný z WWW: <<http://www.ceratonia.de/en>>.
12. CLARK, I.E., SEN, P.K. Advances in the development of ultrahard cutting tool materials. *Industrial Diamond Review* [online]. 1998, vol. 58, no. 577 [cit. 2009-02-20], s. 40-44. Dostupný z WWW: <http://www.idr-online.com/SearchResults/tabid/37/language/en-US/Default.aspx?Command=Core_Download&EntryId=500>.

13. COOPER, J., et al. Machining of metal matrix composites using PCD, natural diamond, single crystal CVD and polycrystalline CVD diamond. *Industrial Diamond Review* [online]. 2007, vol. 67, no. 614 [cit. 2009-02-11], s. 34-38. Dostupný z WWW: <http://www.idr-online.com/SearchResults/tabid/37/language/en-US/Default.aspx?Command=Core_Download&EntryId=938>.
14. ČECH, Jaroslav, PERNIKÁŘ, Jiří, PODANÝ, Kamil. *Strojírenská metrologie*. 4. přeprac. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2005. 176 s. ISBN 80-214-3070-2.
15. DIAMOND INNOVATIONS. Worthington, USA. *Compax* Diamond Tool Blanks for Machining Nonferrous and Nonmetallic Materials*. [online]. [cit. 2009-03-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.abrasivesnet.com/en/product/mbs/compax/down/DI%20Compax.pdf>>.
16. DIAMOND TOOL COATING. North Tonawanda, USA. *About DiaTiger® Diamond*. [online]. [cit. 2009-02-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.diamondtc.com/diatiger/about.html>>.
17. DIAMOND TOOL COATING. North Tonawanda, USA. *FAQ's*. [online]. [cit. 2009-02-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.diamondtc.com/diatiger/faq.html>>.
18. DIAMOND TOOL COATING. North Tonawanda, USA. *How DTC Produces DiaTiger® Diamond*. [online]. [cit. 2009-02-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.diamondtc.com/diatiger/production.html>>.
19. DILLINGER, Josef, et al. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. 1. vyd. Praha : Europa-Sobotáles, 2007. 612 s. ISBN 978-80-86706-19-1.
20. ELEMENT SIX LTD. Shannon, Ireland. *An Introduction To Cutting Tool Materials*. [online]. [cit. 2009-02-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.e6.com/en/businessareas/e6advancedmaterials/literature/INTRODUCTION%20TO%20CUTTING%20TOOL%20MATERIALS.pdf>>.
21. ELEMENT SIX LTD. Shannon, Ireland. *CVD Diamond Synthesis*. [online]. [cit. 2009-02-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.e6cvd.com/cvd/page.jsp?pageid=335>>.
22. *Firemní materiály a prezentace*. CEMECON s.r.o. Česká republika. Červenec 2008.
23. FOREJT, Milan, HUMÁR, Anton, PÍŠKA, Miroslav, JANÍČEK, Libor. *Experimentální metody* [online]. Syllabus pro magisterský studijní program 23-01-T Strojní inženýrství. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003 [cit. 2009-02-23], 83 s. Dostupný z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Exp_metody_he2.pdf>.
24. FOREJT, Milan, PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
25. GAT, Roy , SWIDER, Stacy , KELLY, Edward . CVD Diamond for Everyone. *CUTTING TOOL ENGINEERING Magazine* [online]. 1995, vol. 47, no. 2 [cit. 2009-02-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.ctemag.com/dynamic.articles.php?id=214>>.

26. HAM-FINAL s.r.o. Brno, Česká republika. *O firmě*. [online]. [cit. 2009-03-30]. Dostupný z WWW: <http://www.ham-final.cz/?page=o_firme>.
27. HAM-FINAL s.r.o., Brno, Česká republika. *Katalog výrobků, Výstružníky*. [CD disk]. Květen 2007. Version: 05/2007.
28. HAVLÍČEK, Jiří. Aplikace polykrystalického diamantu. In *Supertvrdé materiály*. Ostrava : Dům techniky ČSVTS, 1989. s. 87-96. ISBN 80-02-99754-9.
29. HAVLÍČEK, Jiří. Polykrystalické materiály na bázi diamantu. In *Supertvrdé materiály : sborník přednášek*. Ostrava : Dům techniky ČSVTS, 1985. s. 23-35.
30. HLUCHÝ, Miroslav, HANĚK, Václav. *Strojírenská technologie 2 - 2. díl : Koroze, základy obrábění, výrobní postupy*. 2. upr. vyd. Praha : Scientia, 2001. 176 s. ISBN 80-7183-245-6.
31. HOFFMEISTER, H.-W., WESSELS, T. Superabrasive machining of TiAl6V4. *Industrial Diamond Review* [online]. 2001, vol. 61, no. 591 [cit. 2009-02-24], s. 241-246. Dostupný z WWW: <http://www.idr-online.com/SearchResults/tabid/37/language/en-US/Default.aspx?Command=Core_Download&EntryId=1269>.
32. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje* [online]. Interaktivní multimediální text pro všechny studijní programy FSI. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006 [cit. 2009-02-08], 192 s. Dostupný z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf>.
33. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha : MM publishing, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
34. HUMÁR, Anton. *Technologie I : Technologie obrábění - 1. část* [online]. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003 [cit. 2009-02-08], 138 s. Dostupný z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf>.
35. HUMÁR, Anton. *Technologie I : Technologie obrábění - 2. část* [online]. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2004 [cit. 2009-03-03], 95 s. Dostupný z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf>.
36. ISCAR LTD. Tefen, Israel. *PCD for Machining Nonferrous Materials and CBN Inserts for Machining Hard Materials, Dry Cutting, and High Speed Machining*. [online]. [cit. 2009-02-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.iscar.com/PressReleases/PressRelease.asp/CountryID/1/PressReleaseID/17/MenuItemID2/484>>.
37. JOHNSON, Andrew . CVD Diamond Inserts Stick. *CUTTING TOOL ENGINEERING Magazine* [online]. 1996, vol. 48, no. 1 [cit. 2009-02-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.ctemag.com/dynamic.articles.php?id=179>>.
38. KARÁSEK, Jiří. *Metrologie a montáž : Drsnost povrchu* [online]. Studijní podklady. Technická univerzita v Liberci, Katedra obrábění a montáže, 2004 [cit. 2009-03-03], 23 s. Dostupný z WWW: <http://www.kom.tul.cz/soubory/mm_pod.zip>.

39. KENNAMETAL EUROPE GmbH. Neuhausen am Rheinfl, Switzerland. *Holemaking 8070 catalog*. [online]. [cit. 2009-03-10]. Dostupný z WWW: <http://www.kennametal.com/images/repositories/PDFs/Holemaking8070_Cat_inch_secured.pdf>.
40. KOČMAN, Karel, PROKOP, Jaroslav. Technologické parametry vystružovacích nástrojů. *Strojírenská technologie : Časopis pro vědu, výzkum a výrobu*. 2001, roč. VI, č. 1, s. 5-10. ISSN 1211-4162.
41. KOČMAN, Karel, PROKOP, Jaroslav. *Technologie obrábění*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
42. KOLNEROVÁ, Michaela. *Mikrogeometrie povrchu povlaků plechu* [online]. Studijní materiály. Technická univerzita v Liberci, Katedra strojírenské technologie, Oddělení tváření kovů a plastů, 2008 [cit. 2009-03-03], 9 s. Dostupný z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/povrchy%20povlaku.pdf>.
43. KOMET DIHART AG PRECISION TOOLS. Dulliken, Switzerland. *Reaming tools*. [online]. [cit. 2009-03-09]. Dostupný z WWW: <http://www.kometgroup.com/pdf/download.php?name=Dihart_Katalog_05_d_e.pdf>.
44. KOMET GROUP GmbH. Besigheim, Germany. *PCD reamers*. [online]. [cit. 2009-03-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.kometgroup.com/kometgroup/EN/pkd.html>>.
45. KOUŘIL , Karel, FIALA, Stanislav. Moderní nástroje pro dokončování děr. *MM Průmyslové spektrum*. 2007, č. 4, s. 42. ISSN 1212-2572.
46. KOUŘIL , Karel, VANĚK, Vladimír. Dokončovací operace vystružování. *MM Průmyslové spektrum*. 2006, č. 6, s. 32. ISSN 1212-2572.
47. MAJER, Josef. Syntetické polykrystalické řezné materiály a zkušenosti z jejich používání. In *Supertvrdé materiály : sborník přednášek*. Ostrava : Dům techniky ČSVTS, 1985. s. 75-86.
48. MAPAL Dr. Kress KG. Aalen, Germany. *MAPAL Competence – Reaming and Fine Boring*. [online]. [cit. 2009-03-10]. Dostupný z WWW: <http://www.stockfer.pt/Catalogos_PDF/Mapal/Mapal_geral.pdf>.
49. MAPAL Dr. Kress KG. Aalen, Germany. *Reaming and Fineboring*. [online]. [cit. 2009-03-10]. Dostupný z WWW: <http://www.mapal.com/englisch/produkte_anwendung.php?kat=reibenundfeinbohren>.
50. MAY, P.W. *Diamond thin films: a 21st-century material* [online]. School of Chemistry, University of Bristol, 2000 [cit. 2009-02-19], 23 s. Dostupný z WWW: <<http://www.chm.bris.ac.uk/pt/diamond/pdf/rscreview.pdf>>.
51. MIČULEK, Jiří, NEUSTUPA, Zdeněk. Vývoj supertvrdých materiálů v ČSSR. In *Supertvrdé materiály : sborník přednášek*. Ostrava : Dům techniky ČSVTS, 1985. s. 2-22.
52. NESLUŠAN, Miroslav, et al. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
53. NOVÁK, Zdeněk. Zvyšování kvality hodnocení struktury povrchu. *MM Průmyslové spektrum*. 2004, č. 12, s. 84. ISSN 1212-2572.

54. OC OERLIKON BALZERS AG. Balzers, Liechtenstein. *BALINIT® DIAMOND CLASSIC*. [online]. [cit. 2009-02-20]. Dostupný z WWW: <http://www.oerlikon.com/ecomaXL/index.php?site=BALZERS_EN_balinit_diamond_classic>.
55. OC OERLIKON BALZERS AG. Balzers, Liechtenstein. *Balinit® Diamond Classic, Balinit® Diamond Plus – The ideal solution for every material*. [online]. [cit. 2009-03-05]. Dostupný z WWW: <http://www.oerlikonbalzerscoating.com/global/pdf_brochures/english/HQ038EN.pdf>.
56. OC OERLIKON BALZERS AG. Balzers, Liechtenstein. *BALINIT® DIAMOND PLUS*. [online]. [cit. 2009-02-20]. Dostupný z WWW: <http://www.oerlikon.com/ecomaXL/index.php?site=BALZERS_EN_balinit_diamond_plus>.
57. PLÁNIČKA, František, BOSMAN, Oldřich. Nové celotvrdokovové HPC výstružníky. *MM Průmyslové spektrum*. 2007, č. 12, s. 42. ISSN 1212-2572.
58. PRAMET TOOLS s.r.o. Šumperk, Česká republika. *Příručka obrábění*. [online]. [cit. 2009-02-23]. Dostupný z WWW: <http://www.pramet.com/download/katalog/pdf/prirucka_cz.pdf>.
59. PRECISION DIAMOND Co., Ltd. Asan, Korea. *Product Information*. [online]. [cit. 2009-02-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.precisiondiamond.co.kr/ehome.html>>.
60. sp3 CUTTING TOOLS. Decatur, USA. *TFd Thick-Film Diamond Cutting Tools*. [online]. [cit. 2009-02-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.sp3cuttingtools.com/thckfilm.htm>>.
61. sp3 DIAMOND TECHNOLOGIES. Santa Clara, USA. *DiaPak™ – Carbide-backed thick-film CVD Diamond Tool Tips*. [online]. [cit. 2009-03-07]. Dostupný z WWW: <<http://sp3diamondtech.com/pdf/diapak.pdf>>.
62. sp3 DIAMOND TECHNOLOGIES. Santa Clara, USA. *DiaTip™ – Freestanding thick-film CVD Diamond Tool Tips*. [online]. [cit. 2009-03-07]. Dostupný z WWW: <<http://sp3diamondtech.com/pdf/diatip4.pdf>>.
63. SUMITOMO ELECTRIC CARBIDE, INC. Mount Prospect, USA. *SumiDia PCD Diamond Insert*. [online]. [cit. 2009-03-05]. Dostupný z WWW: <http://www.sumicarbide.com/pdf/cbnpd/PCD_grade.pdf>.
64. SUMITOMO ELECTRIC CARBIDE, INC. Mount Prospect, USA. *Sumitomo Electric's BN700 PcBN Insert Boasts High Wear-Resistance for the Machining of Cast Iron and Powdered Metal*. [online]. [cit. 2009-02-09]. Dostupný z WWW: <<http://www.sumicarbide.com/images/pr/BN700.jpg>>.
65. SUSSMANN, R.S., et al. A review of the industrial applications of CVD diamond. *Industrial Diamond Review* [online]. 2001, vol. 61, no. 591 [cit. 2009-02-16], s. 271-280. Dostupný z WWW: <http://www.idr-online.com/SearchResults/tabid/37/language/en-US/Default.aspx?Command=Core_Download&EntryId=1259>.
66. SVOBODA, Pavel, et al. *Základy konstruování*. 2. přeprac. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2003. 200 s. ISBN 80-7204-306-4.
67. ŠVARAL, Štefan. *Obrábanie nástrojmi z diamantu a kubického nitridu bóru*. 1. vyd. Bratislava : Alfa, 1977. 240 s.

68. UHLMANN, E., BRÜCHER, M. Wear behaviour of CVD diamond tools. *Industrial Diamond Review* [online]. 2002, vol. 62, no. 592 [cit. 2009-02-24], s. 17-23. Dostupný z WWW: <http://www.idr-online.com/SearchResults/tabid/37/language/en-US/Default.aspx?Command=Core_Download&EntryId=664>.
69. UHLMANN, E., et al. Adhesive wear on CVD diamond. *Industrial Diamond Review* [online]. 2002, vol. 62, no. 595 [cit. 2009-02-16], s. 236-241. Dostupný z WWW: <http://www.idr-online.com/SearchResults/tabid/37/language/en-US/Default.aspx?Command=Core_Download&EntryId=690>.
70. UHLMANN, E., et al. Performance of diamond coated cutting tools as a function of material properties. *Industrial Diamond Review* [online]. 2008, vol. 68, no. 617 [cit. 2009-02-24], s. 51-55. Dostupný z WWW: <http://www.idr-online.com/SearchResults/tabid/37/language/en-US/Default.aspx?Command=Core_Download&EntryId=979>.
71. UHLMANN, E., FRIEMEL, J., BRÜCHER, M. Machining of a hypereutectic aluminium-silicon alloy. *Industrial Diamond Review* [online]. 2001, vol. 61, no. 591 [cit. 2009-02-24], s. 260-265. Dostupný z WWW: <http://www.idr-online.com/SearchResults/tabid/37/language/en-US/Default.aspx?Command=Core_Download&EntryId=1263>.
72. WIEMANN, E., et al. Superhard coatings for cutting tools. *Industrial Diamond Review* [online]. 2007, vol. 67, no. 612 [cit. 2009-02-12], s. 19-22. Dostupný z WWW: <http://www.idr-online.com/SearchResults/tabid/37/language/en-US/Default.aspx?Command=Core_Download&EntryId=920>.
73. WIKIPEDIE - otevřená encyklopedie. *Diamant*. [online]. [cit. 2009-02-12]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Diamant>>.
74. ZEMČÍK, Oskar. *Nástroje a přípravky pro obrábění*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2003. 193 s. ISBN 80-214-2336-6.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/ Symbol	Jednotka	Popis
A, B, C		místo měření průměru díry a průměrné aritmetické úchyly profilu na začátku (A), uprostřed (B) a na konci (C) vystružené díry
ASP		anti-segregation process
BN		nitrid bóru
CMC		ceramic matrix composites (kompozity s keramickou maticí)
CNC		computer numerical control (počítačové číslicové řízení)
CRP		carbon fiber reinforced plastic (plasty vyztužené karbonovými vlákny)
CVD		chemical vapour deposition (chemické napařování)
D	mm	průměr díry
D _A , D _B , D _C	mm	průměr díry v místě měření A (B, C) pro daný zkušební obrobek
D _{K1} , D _{K2}	mm	průměr kalibrovacího kroužku 1 (2)
D _{max}	mm	největší naměřený průměr díry pro daný zkušební obrobek
D _{min}	mm	nejmenší naměřený průměr díry pro daný zkušební obrobek
\bar{D}	mm	průměrná hodnota průměru díry pro daný nástroj a posuv
\bar{D}_{ABC}	mm	průměrná hodnota průměru díry pro daný zkušební obrobek
DMR		dolní mezní rozměr
GRP		glass fiber reinforced plastic (plasty vyztužené skleněnými vlákny)
HFCVD		hot filament chemical vapour deposition (metoda chemického napařování se žhavicím vláknem)
HIP		hot isostatic pressing (vysokoteplotní izostatické lisování)
HMR		horní mezní rozměr
HPHT		high pressure high temperature process (vysokotlaký a vysokoteplotní proces)
HRC		tvrdost podle Rockwella
HSS		high speed steel (rychlořezná ocel)
HV		tvrdost podle Vickerse
IT		toleranční stupeň
KNB		kubický nitrid bóru
KT	mm	hloubka výmolu na čele
KVy	mm	radiální opotřebení špičky
L _c	mm	celková délka měření průměrné aritmetické úchyly profilu

MMC		metal matrix composites (kompozity s kovovou matricí)
MPCVD		microwave plasma chemical vapour deposition (metoda chemického napařování s využitím mikrovlnné plazmy)
MT1–CVDdia		jednobřítý výstružník s břitem z CVD diamantu (CVDdia)
MT1–PKD		jednobřítý výstružník s břitem z polykrystalického diamantu (PKD)
MT2–CVDdia		dvoubřítý výstružník s břity z CVD diamantu (CVDdia)
MT2–PKD		dvoubřítý výstružník s břity z polykrystalického diamantu (PKD)
MTCVD		middle temperature chemical vapour deposition
NO		nástrojová ocel
PACVD		plasma chemical vapour deposition
PCD		polycrystalline diamond (polykrystalický diamant)
PKD		polykrystalický diamant
PKNB		polykrystalický kubický nitrid bóru
PVD		physical vapour deposition (fyzikální napařování)
Ra	μm	průměrná aritmetická úchylka profilu
Ra _A , Ra _B , Ra _C	μm	průměrná aritmetická úchylka profilu v místě měření A (B, C) pro daný zkušební obrobek
Ra _{max}	μm	maximální přípustná průměrná aritmetická úchylka profilu
\overline{Ra}	μm	průměrná hodnota průměrné aritmetické úchylky profilu pro daný nástroj a posuv
\overline{Ra}_{ABC}	μm	průměrná hodnota průměrné aritmetické úchylky profilu pro daný zkušební obrobek
R _{mr}	%	materiálový poměr profilu (nosný podíl)
RO		rychlořezná ocel
Rz	μm	největší výška profilu
ŘK		řezná keramika
SK		slinutý karbid
SRN		Spolková republika Německo
STM		supertvrdé materiály
T	μm	velikost tolerance vystružované díry
V	mm	válcovitost díry
\overline{V}	mm	průměrná hodnota válcovitosti díry pro daný nástroj a posuv
VB	mm	šířka fazetky opotřebení na hřbetě
VBD		vyměnitelná břitová destička
VÚPM		výzkumný ústav práškové metalurgie
WEDM		wire electro discharge machining (elektroerozivní drátové řezání)
Zp	μm	výška největšího výstupku profilu
Zv	μm	hloubka nejnižší prohlubně profilu
a _p	mm	šířka záběru ostří
d ₁	mm	jmenovitý průměr výstružníku

d_{1max}	mm	horní mezní rozměr výstružníku
d_{1min}	mm	dolní mezní rozměr výstružníku
d_k	mm	průměr měřicího trnu
f	mm	posuv
f_{ot}	mm	posuv na otáčku
h_z	mm	hloubka zpevněné vrstvy
l	mm	délka zubu výstružníku
l_1	mm	délka řezného kužele
l_2	mm	délka vodící části
l_n	mm	měřená délka
l_p	mm	vzdálenost od povrchu
l_r	mm	základní délka
n	min^{-1}	otáčky vřetena
p	mm	přídavek na díru, která má být vystružována
p_{pk}	MPa	tlak procesní kapaliny
s	mm, μm	směrodatná odchylka
$s(D)$	mm	směrodatná odchylka průměru díry pro daný nástroj a posuv
$s(Ra)$	μm	směrodatná odchylka průměrné aritmetické úchyly profilu pro daný nástroj a posuv
$s(V)$	mm	směrodatná odchylka válcovitosti díry pro daný nástroj a posuv
s^2	$\text{mm}^2, \mu\text{m}^2$	rozptyl
$s^2(D)$	mm^2	rozptyl průměru díry pro daný nástroj a posuv
$s^2(Ra)$	μm^2	rozptyl průměrné aritmetické úchyly profilu pro daný nástroj a posuv
$s^2(V)$	mm^2	rozptyl válcovitosti díry pro daný nástroj a posuv
t_{AS}	min	jednotkový strojní čas
t_{AV}	min	jednotkový vedlejší čas
v_c	$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	řezná rychlost
\bar{x}	mm, μm	aritmetický průměr
α_o	$^\circ$	nástrojový ortogonální úhel h řbetu
β_o	$^\circ$	nástrojový ortogonální úhel b řitu
γ_o	$^\circ$	nástrojový ortogonální úhel čela
ϵ_r	$^\circ$	nástrojový úhel špičky
K_r	$^\circ$	nástrojový úhel nastavení hlavního ostří
K_r'	$^\circ$	nástrojový úhel nastavení vedlejšího ostří
λ_s	$^\circ$	nástrojový úhel sklonu hlavního ostří

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1** Sortiment vybraných světových výrobců PKD polotovarů pro výrobu řezných nástrojů
- Příloha 2** Sortiment vybraných světových výrobců CVD diamantových povlaků
- Příloha 3** Sortiment vybraných světových výrobců CVD diamantových vrstev
- Příloha 4** Sortiment vybraných světových výrobců výstružníků s břity z PKD
- Příloha 5** Tabulky naměřených hodnot zkoušených nástrojů
- Příloha 6** Tabulky se statisticky zpracovanými naměřenými hodnotami zkoušených nástrojů
- Příloha 7** Grafické znázornění naměřených a statisticky zpracovaných hodnot testovaných nástrojů

Příloha 1: Sortiment vybraných světových výrobců PKD polotovarů pro výrobu řezných nástrojů

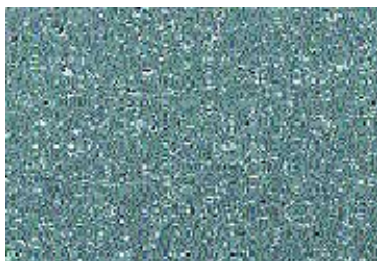
DIAMOND INNOVATIONS  **Diamond Innovations**

Diamond Innovations, 6325 Huntley Road, Worthington, OH 43085, USA

Compax

Nástrojové materiály Compax firmy Diamond Innovations z polykrystalického slinovaného diamantu se skládají z vysoce kvalitních mikroskopických částic umělého diamantu spojených s podkladovým materiálem z karbidu wolframu za vysokých teplot a tlaků.

Grade 1300



Tento řezný materiál obsahuje až 92 % objemu diamantových částic o průměrné velikosti zrn 5 μm . Vyrábí se v leštěné a neleštěné povrchové úpravě a je elektricky vodivý. Tento materiál má vysokou odolnost proti abrazi a používá se pro obrábění slitin hliníku (s obsahem křemíku menším než 14 %), slitin mědi, grafitu a grafitových kompozitů, kompozitů ze dřeva, keramiky a karbidů. Výhody tohoto řezného materiálu jsou: dobrá kvalita ostří, výborná odolnost proti abrazi, dostatečná vrubová houževnatost a dobrá jakost povrchu.

Grade 1500



Objem diamantových částic o průměrné velikosti 25 μm je u tohoto elektricky vodivého řezného materiálu 94 %. Vyrábí se s leštěnou povrchovou úpravou, nebo bez ní. Tento materiál je vhodný pro přerušované řezy a hrubovací operace. Používá se pro obrábění hliníkových slitin s obsahem křemíku více jak 14 %, kompozitů s kovovou maticí, bimetalových kovů (hliník/litina), slinované keramiky či karbidů a ostatních vysoce abrazivních materiálů. Výhody tohoto materiálu jsou: výjimečná trvanlivost ostří, extrémní abrazivzdornost, vysoká vrubová houževnatost a přijatelná kvalita povrchu (v závislosti na aplikaci).

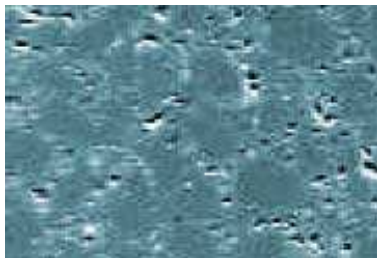
Grade 1600



Tento řezný materiál obsahuje 90 % diamantových částic o průměrné velikosti 4 μm . Je elektricky vodivý a vyrábí se s leštěnou a neleštěnou povrchovou úpravou. Tento materiál dosahuje dobrou kvalitu obroběných ploch při obrábění hliníku, mědi, drahých kovů, dřevěných kompozitů a plastů. Mezi výhody tohoto materiálu patří: výborná kvalita ostří, vysoká

odolnost proti abrazi, dostatečná vrubová houževnatost, výborná kvalita povrchu a dobrá obrobiteľnosť.

Grade 1800



Tento elektricky vodivý rezný materiál obsahuje diamantové zrna dvoch veľkostí a to 25 μm a 4 μm . Obsah diamantových častíc v tomto reznom materiáli je 95 %. Vyrábí sa v leštené povrchové úprave alebo bez povrchové úpravy. Tento materiál je vhodný pre obrábění slitin hliníku s obsahom kremíku viac ako 14 %, skelných vlákien, dřevěných laminátů a jiných materiálů. K výhodám tohoto rezného materiálu patří: vysoká abrazivzdornost, výjimečná vrubová houževnatost, veľmi dobrá kvalita povrchu a dlhá trvanlivosť brity. [15]

ELEMENT SIX



Element Six Ltd., Shannon, Co. Clare, Ireland

Syndite

Syndite je kompozitní materiál, který kombinuje tvrdost, odolnost proti abrazi a tepelnou vodivost diamantu s houževnatostí karbidu wolframu. Tyto vlastnosti se nejvíce využívají u rezných nástrojů určených pro obrábění abrazivních materiálů a také u nástrojů odolných proti opotřebení, kde diamant výrazně přispívá k prodloužení životnosti nástroje a nabízí další technologické výhody, jako například spolehlivost a nízký koeficient tření. S materiály Syndite lze obrábět jak s procesní kapalinou, tak bez ní.

Syndite CTC 002

Tento rezný materiál obsahuje diamantové částice o průměrné velikosti 2 μm s upravenou mikrostrukturou, kde ostří je méně citlivé na vylamování, proto je tento materiál vhodný pro obrábění dřevěných kompozitů.

Syndite CTB 002

Tento rezný materiál obsahuje částice diamantu o velikosti zrn 2 μm a je vhodný pro výrobu přesných nástrojů. S použitím tohoto rezného materiálu lze dosáhnout velmi kvalitních obrobených ploch. CTB 002 je vyráběn jako disk o průměru 74 mm s lapovaným nebo leštěným povrchem.

Syndite CTB 010

Průměrná velikost diamantových zrn materiálu Syndite CTB 010 je 10 μm . Tento materiál je dostupný v mnoha tloušťkách, proto je možné použít tento materiál ve velkém rozsahu, od hrubovacích až po velmi přesné nástroje.

Syndite CTB 025

Velikost diamantových částic v tomto řezném materiálu je 25 µm. Tento hrubozrnný polykrystalický diamant je vysoce otěruvzdorný a je zvláště vhodný pro obrábění abrazivních materiálů, kde životnost nástroje je na prvním místě. Syndite CTB 025 je velmi vhodný pro vysoce rychlostní obrábění a pro obrábění bez procesní kapaliny.

Syndite CTH 025

Syndite CTH 025 obsahuje diamantová zrna o průměrné velikosti 25 µm. Tento materiál je vyráběn pomocí syntézy diamantu za podmínek speciálně vyvinutých pro optimální otěruvzdornost při obrábění abrazivních materiálů.

Syndite CTM 302

Jedná se o řezný materiál, který je vhodný pro obrábění šedé litiny, kompozitů s kovovou maticí, bimetálů a hliníkových slitin s velkým obsahem křemíku. Tento materiál obsahuje pečlivě vybranou směs diamantových částic o velikosti od 2 do 30 µm, která mu dává extrémně velkou odolnost proti abrazi, houževnatost a dobrou kvalitu ostří. CTM 302 se vyrábí jako disk o průměru 74 mm s leštěným nebo lapovaným povrchem.

Syndite CMX 850

Jedná se o polykrystalický diamant o velikosti částic 1 µm s homogenní strukturou. Tento materiál je vhodný pro frézování a hrubovací obrábění hliníkových slitin, obrábění titanových a měděných slitin, keramiky a plastů. CMX 850 lze rovněž použít pro dokončovací řezy. Tento řezný materiál se vyrábí jako disk o poloměru 60 mm nebo ho lze rozřezat na segmenty pomocí elektroerozivního obrábění. [20]

**SUMITOMO
ELECTRIC CARBIDE**



*Sumitomo Electric Carbide, Inc., 1001 Business Center Drive,
Mount Prospect, IL 60056-2181, P.O. Box 545, Mt. Prospect, IL 60056-0545, USA*

SumiDia

Firma Sumitomo uvedla na trh první polotovar z polykrystalického diamantu v roce 1978 pod názvem SumiDia DA. Od té doby nepřetržitě vyvíjí a rozšiřuje nabídku svých produktů. Své vyměnitelné břitové destičky (VBD) přitom nabízí v širokém rozmezí struktur, tvarů a rozměrů. Vyměnitelné břitové destičky SumiDia se skládají z vrstvy polykrystalického diamantu (jemná zrna umělého diamantu spojená se substrátem z karbidu wolframu), které jsou bezpečně připájené na destičku o standardních rozměrech. Vysoký stupeň spojení diamantu k diamantu je dosaženo pomocí procesu, který probíhá za vysokých

tlaků a teplot. Toto spojení krystalu ke krystalu poskytuje výjimečnou tvrdost a abrazivzdornost. SumiDia DA vyměnitelné břitové destičky nahrazují řezné nástroje z karbidu wolframu a přírodního diamantu. Použitím řezného materiálu SumiDia DA se výrazně zvýší životnost nástroje, schopnost dodržovat úzké tolerance součástí a zlepší se jakost povrchu.

Grade DA90

Velikost diamantových zrn tohoto materiálu je 50 μm a tvrdost dosahuje hodnot 10000 až 12000 HV. Extra vysoká odolnost proti abrazi tohoto řezného materiálu ho předurčuje pro obrábění slitin hliníku s vysokým obsahem křemíku, grafitu, bimetalových materiálů (hliník/šedá litina), keramiky, karbidu wolframu a kevlaru.

Grade DA150

Tento polykrystalický diamant obsahuje jemná zrna diamantu o průměrné velikosti 5 μm . Je vysoce abrazivzdorný a jeho tvrdost je 10000 až 12000 HV. Tento řezný materiál se doporučuje pro obrábění slitin hliníku s vysokým obsahem křemíku, mědi, skleněného vlákna, tvrzené pryže, grafitu, dřeva a karbonu.

Grade DA200

Tento PKD materiál má extrémně jemnou diamantovou strukturu s průměrnou velikostí diamantových částic 0,5 μm . Velmi ostré břity s dostatečnou houževnatostí předurčují tento materiál pro obrábění plastů, dřeva a hliníku. Tvrdost tohoto materiálu je 8000 až 10000 HV.

Grade DA2200

Průměrná velikost diamantových zrn tohoto řezného materiálu je 0,5 μm . Jedná se tudíž o materiál vyrobený z extrémně malých diamantových částic, což mu poskytuje velmi ostrý břit, vyšší tvrdost a odolnost proti opotřebení. Tvrdost tohoto materiálu je 9000 až 10000 HV. Doporučuje se pro obrábění těchto materiálů: slitiny hliníku s vysokým obsahem křemíku, měď, skelné vlákna, tvrzená pryž, grafit, dřevo, slitiny hliníku (dokončování, hrubování a přerušované řezy). [63]

Příloha 2: Sortiment vybraných světových výrobců CVD diamantových povlaků

CEMECON



CemeCon AG, Adenauerstr. 20 A41, D-52146 Würselen, Germany

Firma CemeCon nabízí několik druhů CVD diamantových povlaků, které nesou označení: **CCDia[®]08**, **CCDia[®]HiCo**, **CCDia[®]MultiSpeed**, **CCDia[®]FiberSpeed** a **CCDia[®]TopSharp**. Ve své podstatě však firma CemeCon nabízí dva druhy diamantových povlaků a to krystalický diamantový povlak a nanokrystalický diamantový povlak plus jejich kombinace.

CCDia[®]08

Jedná se o krystalický diamantový povlak určený pro obrábění grafitu, karbidů a předslinované keramiky. Tento povlak má extrémní odolnost proti abrazi. Přílnavost k podkladovému substrátu je garantována až do obsahu kobaltu 6 % (u podkladových materiálů schválených výrobcem povlaků). U tohoto povlaku si břit udržuje svou ostrost bez typického zaoblování ostří. Výrobce dále doporučuje používat tento povlak pouze pro obrábění materiálů s nízkou náchylností k vytváření svarů za studena.

CCDia[®]HiCo

Tento diamantový povlak má krystalickou strukturu a je vhodný pro povlakování nástrojů s velkým obsahem kobaltu (přílnavost zaručena až do obsahu kobaltu 12 %). Dále je tento povlak vhodný pro obrábění grafitu, karbidů a keramiky v předslinovaném stavu. Stejně jako povlak CCDia[®]08 si i tento udržuje ostrost břitu bez typického zaoblování a je vhodný pouze pro obrábění materiálů s nízkým sklonem ke svaření za studena.

CCDia[®]MultiSpeed

Vhodnost tohoto vícevrstvého povlaku je zejména pro obrábění slitin hliníku s křemíkem (AlSi) a slitin titanu s hliníkem (TiAl), dále pak pro obrábění MMC materiálů (Metal Matrix Composites – kompozity s kovovou maticí) a plastů vyplněných nerosty. Mezi výhody tohoto povlaku patří extrémní abrazivzdornost s vysokou houževnatostí. Povlak MultiSpeed lze použít až do obsahu kobaltu 10 % u osvědčených podkladových materiálů. Velmi vysoká odolnost proti opotřebení a vhodnost pro obrábění materiálů se sklonem ke svaření za studena patří mezi další výhody tohoto diamantového povlaku.

CCDia[®]FiberSpeed

Jedná se o vícevrstvý diamantový povlak pro obrábění plastů vyztužených vlákny, kompozitů a sendvičových materiálů (Al-Ti) a Ti-CFC. Mezi vlastnosti tohoto materiálu patří mimořádná odolnost proti abrazi s vysokou houževnatostí.

Přilnavost povlaku je zaručena u podkladových substrátů s obsahem kobaltu až 10 %. Tento diamantový povlak snese vysokou míru opotřebení a nanokrystalická struktura ho předurčuje pro obrábění materiálů s velkým sklonem k vytváření svarů ze studena.

CCDia[®]TopSharp

Tento povlak je určen pro jemné obrábění hliníku, dřeva, slitin hliníku s křemíkem, slitin titanu s hliníkem a plastových kompozitů. CCDia[®]TopSharp obsahuje nanokrystalickou strukturu a díky zaoblení ostří, které je menší než 1 µm má extrémně ostrý břit. Jedná se o 100 % čistý diamant bez žádné pojivové složky. Tento povlak je dále vhodný pro všechny rovinné geometrie. [8], [22]

OERLIKON BALZERS



OC Oerlikon Balzers AG, Iramali 18, 9496 Balzers, Liechtenstein

BALINIT[®] DIAMOND CLASSIC

BALINIT DIAMOND CLASSIC je diamantový povlak s krystalickou strukturou, který perfektně chrání nástroje proti abrazivnímu opotřebení a je nepřekonatelný při obrábění grafitu. Nástroje ze slinutých karbidů povlakované diamantovým povlakem BALINIT DIAMOND CLASSIC umožňují obrábět součásti z grafitu s podstatně většími rychlostmi a významně lepší kvalitou obrobeného povrchu. Díky prodloužení životnosti nástroje mohou být i složité obrobky a jemné struktury obráběny jedním nástrojem při jediném upnutí. Mikrotvrдость diamantového povlaku je 10000 HV a maximální provozní teplota je 600 °C. Použití tohoto povlaku je pro obrábění grafitu.

BALINIT[®] DIAMOND PLUS

Tento diamantový povlak je tvořen speciální jemnou nanokrystalickou strukturou, která usnadňuje odvod třísek a zabraňuje tvoření nárůstků na řezné hraně. Řezné síly jsou významně sníženy. Díky vynikající jakosti obrobeného povrchu není nutné žádné další dokončovací obrábění. Povlak BALINIT DIAMOND PLUS je vhodný pro obrábění kompozitních materiálů, jako např. plasty vyztužené skleněnými (GRP) nebo karbonovými vlákny (CRP), kompozity s keramickou (CMC) nebo kovovou maticí (MMC). Dále je tento diamantový povlak vhodný pro obrábění hliníkových slitin. Diamantový povlak BALINIT DIAMOND PLUS dosahuje mikrotvrđosti 10000 HV a je schopen pracovat až do teploty 600 °C. [54], [55], [56]

Příloha 3: Sortiment vybraných světových výrobců CVD diamantových vrstev

CERATONIA



CERATONIA Reiner Dümpert e.K., Johannes-Schilling-Str. 3, 97483 Eltmann, Germany

Firma Ceratonia nabízí tři druhy CVD diamantových vrstev určených pro řezné nástroje. Jedná se o materiály s označením **CERATON VD**, **CERATON M+** a **CERADRILL**. Výrobce uvádí, že velikost zrn těchto diamantových materiálů se pohybuje od 1 μm (na straně podkladového substrátu) až do 20 μm (na odvrácené straně diamantové vrstvy). Povrch diamantové vrstvy je následně leštěn. Materiály Ceraton VD a M+ jsou vhodné pro přerušované řezy pro soustružení i frézování. Tyto materiály nejsou elektricky vodivé a proto je nelze dělit pomocí elektroerozivního drátového řezání. Firma Ceratonia nabízí CVD diamantové vrstvy o tloušťce 0,5 mm ve tvaru trojúhelníku (vrcholový úhel 35, 55, 60, 80 a 90° a délka řezné hrany od 3 do 7,5 mm) a obdélníku (rozměry od 3 x 2,5 mm do 15 x 5 mm). Materiál Ceraton M+ je zvláště vhodný pro obrábění grafitu. [11]

ELEMENT SIX



Element Six Ltd., Shannon, Co. Clare, Ireland

Firma Element Six nabízí dva druhy CVD diamantových vrstev: **Cvdite** a **Cvdress**. Cvdite je speciálně navržen pro řezné nástroje, aby doplňoval polykrystalické diamanty a monokrystalické diamanty. Cvdress je CVD diamant speciálně navržený pro nástroje na orovnávaní brousících kotoučů.

Cvdite

Jedná se o CVD diamant, který byl speciálně navržen pro řezné nástroje a pro součásti vystavené nadměrnému opotřebení. Cvdite se dále dělí na dva typy CVD diamantu a to: CDM a CDE. Oba typy materiálů mají dobrou lomovou houževnatost a pevnost. Tyto materiály se používají hlavně pro obrábění vysoce abrazivních neželezných materiálů, plastů, dřevěných kompozitů atd. Tyto materiály neobsahují kovové pojivo, a proto mají extrémně vysokou tepelnou stabilitu. Cvdite CDE je speciálně syntetizován, aby byl elektricky vodivý, proto lze obrábět pomocí elektroerozivního drátového řezání. Cvdite CDM je téměř elektricky nevodivý a nelze ho proto obrábět elektroerozivními metodami. Elektrická vodivost materiálu Cvdite CDE umožňuje výrobcům diamantových nástrojů používat stejné vybavení jako u materiálů z polykrystalického diamantu

(PKD). Materiály Cvdite CDE jsou standardně dodávány s leštěným povrchem. Cvdite je doporučován pro obrábění neželezných materiálů a není vhodný pro přerušované řezy. [20]

sp³ DIAMOND TECHNOLOGIES



sp³ Diamond Technologies, 2220 Martin Avenue, Santa Clara, CA 95050, USA

Firma sp³ Diamond Technologies nabízí CVD diamantové vrstvy ve dvou provedeních. První z nich je samostatná CVD diamantová vrstva pod označením **DiaTip™**, druhá nese označení **DiaPak™**.

DiaTip™

Jedná se o vrstvu CVD diamantu o tloušťce 0,5 mm (výrobce však uvádí, že dokáže vyrobit vrstvu diamantu tlustou až 1 mm). Tato vrstva není elektricky vodivá, proto je nutné ji dělit za pomoci laserového paprsku. Výhoda tohoto materiálu je, že oproti polykrystalickému diamantu (PKD) neobsahuje pojivo a jedná se tak o čistý diamant, což vylučuje chemickou interakci mezi řezným materiálem a materiálem obrobku (či procesní kapalinou). Mezi výhody materiálu DiaTip patří: vyšší odolnost proti opotřebení než u PKD, delší uchování ostrosti řezné hrany (lepší kvalita obrobeného povrchu), vyšší tepelná vodivost (nižší teploty řezání), nižší řezné síly (redukce výkonu na vřetení). Tento řezný materiál je vhodný pro obrábění slitin hliníku s křemíkem, MMC materiálů, plastů vyztužených uhlíkovými vlákny, karbidu wolframu, platiny, skla vyztuženého epoxidovou pryskyřicí atd. Firma sp³ Diamond Technologies vyrábí materiál DiaTip ve tvarech trojúhelníků s vrcholovým úhlem 35, 55, 60, 80 a 90° a délkou řezné hrany od 2,5 do 8 mm (po 0,5 mm).

DiaPak™

Jedná se o CVD diamantovou vrstvu z materiálu DiaTip vakuově připájenou k podkladovému substrátu ze slinutého karbidu, kterou je dále možno připájet bez nutnosti vakua k vyměnitelné břitové destičce, nebo k tělu nástroje ze slinutého karbidu či rychlořezné oceli. CVD diamantová vrstva DiaPak se stejně jako DiaTip vyrábí s leštěnou povrchovou úpravou a to ve tvaru trojúhelníků s vrcholovým úhlem 35, 55, 60, 80 a 90° a délkou řezné hrany od 3 do 7,5 mm. [61], [62]

Příloha 4: Sortiment vybraných světových výrobců výstružníků s břity z PKD

BECK



August Beck GmbH & Co. KG, Ebinger Str. 115, D-72471 Winterlingen, Germany

RR[®]-PKD01

Výstružníky s břity z polykrystalického diamantu (PKD) firmy Beck jsou vyráběny pomocí nové technologie výroby. Tato technologie výroby používá místo pájení břitů z PKD k tělu nástroje jejich slinování přímo k polotovaru nástroje. Toto konstrukční provedení nástroje je patentováno a nabízí tyto výhody:

- břity zabírají mnohem méně prostoru a nástroj proto může být vyroben více robustní;
- spojení břitů s tělem nástroje pomocí slinování je mnohem pevnější než spojení pomocí pájení;
- řezná geometrie nástroje již není ovlivněna chybami nastavení břitu vzniklými při jeho pájení.



Další výhodou těchto nástrojů je možnost jejich několikanásobného přeastření (zpravidla 3 až 5krát), čímž se sníží náklady na nástroj.

Výstružníky RR-PKD01 jsou vyráběny v provedení pro slepé i průchozí díry a to jako čtyřbřité pravořezné nástroje. Nástroje pro slepé díry mají přívod procesní kapaliny v ose nástroje, nástroje pro průchozí díry mají přívod procesní kapaliny umístěn v drážkách mezi jednotlivými zuby. Výrobce nabízí tyto nástroje standardně ve velikostech od Ø6 do Ø16 mm. Pro upínání těchto výstružníků výrobce doporučuje hydraulické nebo tepelné upínání.

Použití výstružníků firmy Beck s břity z PKD je pro obrábění slitin mědi, zinku, hořčíku a pro obrábění hliníkových slitin s vysokým obsahem křemíku. Výrobce uvádí, že výstružníky RR-PKD01 lze použít pro řezné rychlosti až 400 m·min⁻¹ s posuvem na otáčku až 1,8 mm. Výrobce dále uvádí, že s těmito nástroji lze dosahovat přesnosti rozměru až IT5.

Cena těchto výstružníků se pohybuje od 540 euro (Ø6 mm) do 810 euro (Ø16 mm) za kus. [2], [3], [4]

PCD Reamers

Firma Dihart nabízí dvoubřité a čtyřbřité výstružníky s břity z polykrystalického diamantu (PKD) v provedení pro průchozí díry (procesní kapalina je přiváděna v mezerách mezi jednotlivými zuby) a pro slepé díry (procesní kapalina je přiváděna otvorem v ose nástroje). Dvoubřité výstružníky jsou vhodné tam, kde požadujeme velkou hloubku řezu, čtyřbřité výstružníky dosahují nejlepší tvarovou přesnost a lze je použít pro nejvyšší posuvové rychlosti.

Výhody výstružníků firmy Dihart:

- maximální stabilita díky tuhému tělu ze slinutého karbidu;
- maximální hospodárnost díky dlouhé životnosti;
- maximální posuvová rychlost v důsledku mnohabřitého provedení výstružníků;
- jsou vhodné pro dokončování děr pro kolíky a vodících děr;
- mají nejmodernější geometrii ostří;
- jsou optimalizovány pro dokončování předlitých děr.



Výstružníky s břity z PKD jsou vhodné pro obrábění slitin mědi (bronz, mosaz), hliníkových slitin s vysokým obsahem křemíku a neželezných kovů.

Výrobce uvádí, že se čtyřbřítými výstružníky lze dosáhnout rozměrové přesnosti IT5 až IT7, s dvoubřítými výstružníky maximálně IT7. Výrobce doporučuje řezné parametry jsou: řezná rychlost 150 až 500 m·min⁻¹, posuv na zub 0,05 až 0,2 mm.

Dvoubřité výstružníky jsou standardně vyráběny v rozměrech od Ø4 do Ø20,4 mm, čtyřbřité výstružníky v rozměrech od Ø9,6 do Ø20,1 mm. Aby firma Dihart dodržela dodací lhůty a výrobní náklady na minimum, skladuje pájené polotovary ve specifických rozměrech. Tyto polotovary jsou poté jednoduše obrobena na požadované rozměry, tolerance a řezné geometrie dle objednávky zákazníka. [43], [44]



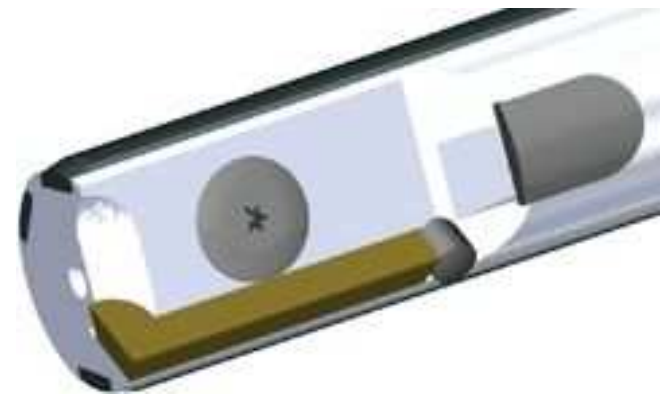
RMA™ – rozpínací výstružník s břity z PKD

Tento výstružník firmy Kennametal obsahuje 4 až 6 břitů (v závislosti na průměru nástroje) a vyrábí se v krátkém a dlouhém provedení. Rozměr těchto výstružníků je možno zvětšit v rozmezí 20 až 40 μm (v závislosti na průměru nástroje). Zvětšení průměru výstružníku se používá ke kompenzaci počátečního opotřebení nástroje a umožňuje tím dosáhnout konstantní velikosti průměru výstružníku po celou dobu trvanlivosti. Rozpínání výstružníku se provádí pomocí seřizovacího šroubu, který může být buď v provedení s axiálním přívodem procesní kapaliny, nebo v provedení s radiálním přívodem procesní kapaliny. Výrobce nabízí standardní rozměry výstružníků od $\text{Ø}5,6$ do $\text{Ø}45,59$ mm. Firma Kennametal uvádí, že výstružníky RMA™ jsou schopny dodržovat tolerance až IT5. Aby bylo dosaženo největší možné přímosti díry a kvality povrchu, používá se pro upínání SIF hydraulický upínač, kterým lze jednoduše kompenzovat radiální házení a uhlové nepřesnosti.



RIR™ – jednobřítý výstružník s vodícími lištami

Jedná se o mimořádně přesný jednobřítý výstružník s vodícími lištami, které jsou k tělu nástroje uchyceny lepením. Výstružníky RIR™ se vyrábí v rozsahu od $\text{Ø}6$ do $\text{Ø}350$ mm a obsahují vyměnitelnou břitovou destičku (VBD). Pokud je tato VBD vyrobena z PKD, obsahuje jeden břit s broušeným utvařečem třísek pro optimální tvorbu třísek. Tyto výstružníky jsou vhodné pro obrábění děr s vysokým poměrem délky díry k jejímu průměru. Pro přesné nastavení se používá centrální upínací šroub. Výrobce uvádí, že tento typ výstružníku je schopen dodržovat tolerance až IT5. Aby bylo dosaženo největší možné přímosti díry a kvality povrchu, používá se pro upínání SIF hydraulický upínač, kterým lze jednoduše kompenzovat radiální házení a uhlové nepřesnosti.



RIQ™ – jednobřítý výstružník s vodícími lištami

Výstružníky RIQ™ jsou vysoce přesné jednobřité nástroje s lepenými vodícími lištami vhodné pro obrábění kratších děr. Jejich výhodou je jednoduché seřízení. Vyrábí se v rozměrech od $\text{Ø}16$ do $\text{Ø}350$ mm s vnitřním chlazením. Tyto výstružníky jsou osazeny



speciálními čtyřbřitými VBD s patentovaným vroubkováním, díky nimž lze snadno a rychle seřídit výstružník na požadovaný rozměr. Výrobce uvádí, že nástroje RIQ™ jsou schopny dodržovat tolerance až IT5. Aby bylo dosaženo největší možné přímosti díry a kvality povrchu, používá se pro upínání SIF hydraulický upínač, kterým lze jednoduše kompenzovat radiální házení a uhlové nepřesnosti. [39]

MAPAL



MAPAL Dr. Kress KG, Obere Bahnstr. 13, D-73431 Aalen, Germany

Německá firma Mapal disponuje širokou nabídkou výstružníků s břity z PKD. Do této nabídky patří nástroje s označením: MAPAL Single-Blade Reamers, MAPAL Twin-Blade Reamers, MAPAL HPR Replaceable Head Reamers a MAPAL Adjustable Monoblock Reamers.

MAPAL Single-Blade Reamers

Jedná se o jednobřité výstružníky, které mohou být v provedení s vyměnitelnou břitovou destičkou WP (obdélníkový tvar) nebo s břitovou destičkou označenou HX (šestihran). Řezné destičky WP mají dvě řezné hrany, destičky HX disponují šesti řeznými hranami. Obě konstrukční provedení jednobřítých výstružníků mají dvě broušené vodící lišty pro přesné vedení nástroje v díře.



Jednobřítý výstružník MAPAL WP



Jednobřítý výstružník MAPAL HX

MAPAL Twin-Blade Reamers

Tyto výstružníky firmy Mapal mají dva břity a podobně jako u jednobřítých výstružníků mohou být v provedení s obdélníkovou vyměnitelnou břitovou destičkou (WP), nebo v provedení se šestihrannou vyměnitelnou břitovou destičkou (HX). Tyto destičky jsou v držáku nástroje upnuty tak, že jsou vůči sobě navzájem radiálně a axiálně vychýleny. Díky tomu každý břit odebírá pouze velmi malou hloubku třísky, čímž dochází k mikrořezání, které zajišťuje vynikající kvalitu povrchu a výjimečnou trvanlivost nástroje.



Dvoubřítý výstružník MAPAL WP



Dvoubřítý výstružník MAPAL HX

MAPAL HPR Replaceable Head Reamers

Výstružníky HPR jsou založeny na novém systému uložení vystružovacích hlav, které nese označení HFS (Head Fitting System – systém pro uchycení hlaviček). Díky přesné výměně nástroje, opakovatelné souososti, bezpečnosti a jednoduché manipulaci je systém HFS velmi efektivní. Díky dokonalé přesnosti a těsnosti dosedacích ploch čela držáku a hlavy nástroje je možno přivádět procesní kapalinu vnitřkem nástroje přímo k ostří.



Výstružník MAPAL HPR s vyměnitelnou vystružovací hlavičkou

MAPAL Adjustable Monoblock Reamers

Rozpínací výstružníky firmy Mapal umožňují nastavování jejich rozměru v malém rozmezí, čímž se dá částečně kompenzovat vzniklé opotřebení. Jsou zvláště vhodné pro malé otvory a vyrábí se v rozmezí od $\varnothing 5,6$ do $\varnothing 32$ mm. Tyto výstružníky mají vnitřní přívod procesní kapaliny a výrobce dále uvádí, že s těmito nástroji lze dosáhnout tolerance rozměru IT4. [48], [49]



Rozpínací výstružníky s pájenými břity

Příloha 5: Tabulky naměřených hodnot zkoušených nástrojů

Jednobřítý výstružník s břitem z PKD (MT1-PKD)						
Řezné podmínky:	otáčky $n = 3000 \text{ min}^{-1}$		posuv $f_{ot} = 0,4 \text{ mm}$		řezná rychlost $v_c = 56,55 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	
číslo obrobku	průměr díry D [mm]			drsnost povrchu Ra [μm]		
	A	B	C	A	B	C
1	6,009	6,009	6,009	0,25	0,27	0,28
2	6,009	6,009	6,009	0,22	0,23	0,25
3	6,009	6,009	6,009	0,25	0,26	0,28
4	6,010	6,009	6,009	0,21	0,23	0,25
5	6,010	6,010	6,010	0,21	0,22	0,24
6	6,009	6,009	6,009	0,20	0,20	0,22
7	6,009	6,009	6,009	0,21	0,19	0,23
8	6,009	6,009	6,010	0,23	0,23	0,25
9	6,009	6,009	6,009	0,24	0,25	0,27
10	6,009	6,009	6,009	0,23	0,23	0,25
11	6,009	6,009	6,009	0,21	0,24	0,25
12	6,009	6,009	6,008	0,23	0,23	0,26
13	6,009	6,009	6,009	0,23	0,24	0,26
14	6,009	6,009	6,008	0,25	0,25	0,28
15	6,009	6,009	6,009	0,26	0,24	0,26
16	6,009	6,009	6,009	0,26	0,25	0,28

Dvoubřítý výstružník s břity z PKD (MT2-PKD)						
Řezné podmínky:	otáčky $n = 3000 \text{ min}^{-1}$		posuv $f_{ot} = 0,4 \text{ mm}$		řezná rychlost $v_c = 56,55 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	
číslo obrobku	průměr díry D [mm]			drsnost povrchu Ra [μm]		
	A	B	C	A	B	C
1	6,023	6,024	6,024	0,28	0,30	0,32
2	6,017	6,018	6,021	0,29	0,28	0,30
3	6,016	6,017	6,018	0,31	0,32	0,35
4	6,018	6,019	6,022	0,30	0,31	0,32
5	6,017	6,018	6,018	0,29	0,32	0,35
6	6,019	6,019	6,022	0,31	0,33	0,35
7	6,018	6,019	6,021	0,32	0,35	0,37
8	6,018	6,020	6,019	0,31	0,30	0,33
9	6,017	6,018	6,019	0,32	0,35	0,34
10	6,018	6,019	6,021	0,33	0,34	0,35
11	6,019	6,021	6,021	0,34	0,35	0,37
12	6,016	6,018	6,018	0,31	0,32	0,37
13	6,016	6,019	6,020	0,32	0,33	0,36
14	6,019	6,018	6,019	0,34	0,35	0,36
15	6,015	6,014	6,014	0,32	0,36	0,38
16	6,014	6,015	6,014	0,28	0,34	0,36

Jednobřítý výstružník s břitem z CVD diamantu (MT1–CVDdia)						
Řezné podmínky:	otáčky $n = 3000 \text{ min}^{-1}$		posuv $f_{ot} = 0,4 \text{ mm}$		řezná rychlost $v_c = 56,55 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$	
číslo obrobku	průměr díry D [mm]			drsnost povrchu Ra [μm]		
	A	B	C	A	B	C
1	6,012	6,012	6,010	0,21	0,21	0,22
2	6,010	6,011	6,009	0,20	0,19	0,21
3	6,011	6,011	6,011	0,22	0,24	0,22
4	6,009	6,010	6,011	0,22	0,25	0,26
5	6,011	6,013	6,012	0,20	0,22	0,21
6	6,012	6,012	6,011	0,18	0,21	0,21
7	6,009	6,013	6,014	0,21	0,21	0,24
8	6,011	6,011	6,014	0,23	0,22	0,21
9	6,008	6,012	6,011	0,17	0,18	0,21
10	6,013	6,012	6,014	0,24	0,22	0,24
11	6,011	6,011	6,010	0,21	0,21	0,19
12	6,013	6,012	6,014	0,19	0,19	0,17
13	6,015	6,013	6,012	0,25	0,25	0,22
14	6,012	6,012	6,013	0,21	0,25	0,22
15	6,012	6,013	6,011	0,20	0,21	0,23

Dvoubřítý výstružník s břity z CVD diamantu (MT2–CVDdia)						
Řezné podmínky:	otáčky $n = 3000 \text{ min}^{-1}$		posuv $f_{ot} = 0,2 \text{ mm}$		řezná rychlost $v_c = 56,55 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$	
číslo obrobku	průměr díry D [mm]			drsnost povrchu Ra [μm]		
	A	B	C	A	B	C
1	6,018	6,014	6,017	0,34	0,28	0,32
2	6,012	6,015	6,016	0,28	0,29	0,34
3	6,010	6,014	6,015	0,34	0,32	0,35
4	6,014	6,017	6,020	0,29	0,30	0,32
5	6,015	6,021	6,015	0,32	0,31	0,33
6	6,009	6,010	6,011	0,29	0,27	0,31
7	6,012	6,013	6,015	0,26	0,28	0,32
8	6,010	6,013	6,017	0,33	0,34	0,35
9	6,014	6,017	6,021	0,29	0,29	0,31
10	6,014	6,018	6,017	0,32	0,31	0,32
11	6,012	6,011	6,012	0,26	0,27	0,30
12	6,013	6,014	6,016	0,27	0,30	0,31
13	6,010	6,011	6,015	0,31	0,31	0,34
14	6,014	6,017	6,020	0,29	0,26	0,27
15	6,014	6,018	6,015	0,29	0,33	0,32

Dvoubřítý výstružník s břity z CVD diamantu (MT2–CVDdia)						
Řezné podmínky:	otáčky $n = 3000 \text{ min}^{-1}$		posuv $f_{ot} = 0,4 \text{ mm}$		řezná rychlost $v_c = 56,55 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	
Číslo obrobku	průměr díry D [mm]			drsnost povrchu Ra [μm]		
	A	B	C	A	B	C
1	6,008	6,010	6,011	0,25	0,27	0,32
2	6,010	6,013	6,015	0,32	0,28	0,32
3	6,010	6,013	6,014	0,31	0,32	0,34
4	6,014	6,016	6,020	0,30	0,29	0,31
5	6,015	6,020	6,013	0,31	0,30	0,32
6	6,010	6,008	6,011	0,30	0,25	0,30
7	6,009	6,011	6,012	0,32	0,29	0,34
8	6,014	6,015	6,017	0,34	0,31	0,35
9	6,012	6,016	6,020	0,27	0,26	0,31
10	6,018	6,020	6,020	0,31	0,30	0,31
11	6,012	6,010	6,011	0,32	0,30	0,33
12	6,009	6,014	6,015	0,27	0,28	0,31
13	6,016	6,015	6,017	0,31	0,32	0,34
14	6,017	6,019	6,022	0,33	0,33	0,34
15	6,016	6,021	6,018	0,32	0,34	0,32

rozměr na hranici tolerance

rozměr mimo toleranci

Příloha 6: Tabulky se statisticky zpracovanými naměřenými hodnotami zkoušených nástrojů


Jednobřítý výstružník s břitem z PKD (MT1–PKD)			
Řezné podmínky:	otáčky $n = 3000 \text{ min}^{-1}$	posuv $f_{ot} = 0,4 \text{ mm}$	řezná rychlost $v_c = 56,55 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
číslo obrobku	válcovitost $V \text{ [mm]}$	Aritmetický průměr	
		průměru díry $\bar{D}_{ABC} \text{ [mm]}$	drsnosti povrchu $\bar{Ra}_{ABC} \text{ [}\mu\text{m]}$
1	0,000	6,00900	0,26667
2	0,000	6,00900	0,23333
3	0,000	6,00900	0,26333
4	0,001	6,00933	0,23000
5	0,000	6,01000	0,22333
6	0,000	6,00900	0,20667
7	0,000	6,00900	0,21000
8	0,001	6,00933	0,23667
9	0,000	6,00900	0,25333
10	0,000	6,00900	0,23667
11	0,000	6,00900	0,23333
12	0,001	6,00867	0,24000
13	0,000	6,00900	0,24333
14	0,001	6,00867	0,26000
15	0,000	6,00900	0,25333
16	0,000	6,00900	0,26267
aritmetický průměr \bar{x}	0,00025 [mm]	6,00906 [mm]	0,24079 [μm]
rozptyl s^2	$2 \cdot 10^{-7} \text{ [mm}^2\text{]}$	$1,449 \cdot 10^{-7} \text{ [mm}^2\text{]}$	$4,914 \cdot 10^{-4} \text{ [}\mu\text{m}^2\text{]}$
směrodatná odchylka s	$4,472 \cdot 10^{-4} \text{ [mm]}$	$3,807 \cdot 10^{-4} \text{ [mm]}$	$2,217 \cdot 10^{-2} \text{ [}\mu\text{m]}$

Dvoubřítý výstružník s břity z PKD (MT2-PKD)			
Řezné podmínky:	otáčky $n = 3000 \text{ min}^{-1}$	posuv $f_{ot} = 0,4 \text{ mm}$	řezná rychlost $v_c = 56,55 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
číslo obrobku	válcovitost $V \text{ [mm]}$	Aritmetický průměr	
		průměru díry $\bar{D}_{ABC} \text{ [mm]}$	drsnosti povrchu $\bar{Ra}_{ABC} \text{ [}\mu\text{m]}$
1	0,001	6,02367	0,30000
2	0,004	6,01867	0,29000
3	0,002	6,01700	0,32667
4	0,004	6,01967	0,31000
5	0,001	6,01767	0,32000
6	0,003	6,02000	0,33000
7	0,003	6,01933	0,34667
8	0,002	6,01900	0,31333
9	0,002	6,01800	0,33600
10	0,003	6,01933	0,34000
11	0,002	6,02033	0,35333
12	0,002	6,01733	0,33333
13	0,004	6,01833	0,33667
14	0,001	6,01867	0,35000
15	0,001	6,01433	0,35333
16	0,001	6,01433	0,32667
aritmetický průměr \bar{x}	0,00225 [mm]	6,01848 [mm]	0,32913 [μm]
rozptyl s^2	$1,267 \cdot 10^{-6} \text{ [mm}^2\text{]}$	$5,957 \cdot 10^{-6} \text{ [mm}^2\text{]}$	$6,75 \cdot 10^{-4} \text{ [}\mu\text{m}^2\text{]}$
směrodatná odchylka s	$1,125 \cdot 10^{-3} \text{ [mm]}$	$2,441 \cdot 10^{-3} \text{ [mm]}$	$2,598 \cdot 10^{-2} \text{ [}\mu\text{m]}$

Jednobřítý výstružník s břitem z CVD diamantu (MT1–CVDdia)			
Řezné podmínky:	otáčky $n = 3000 \text{ min}^{-1}$	posuv $f_{ot} = 0,4 \text{ mm}$	řezná rychlost $v_c = 56,55 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
číslo obrobku	válcovitost $V \text{ [mm]}$	Aritmetický průměr	
		průměru díry $\bar{D}_{ABC} \text{ [mm]}$	drsnoti povrchu $\bar{Ra}_{ABC} \text{ [}\mu\text{m]}$
1	0,002	6,01133	0,21333
2	0,002	6,01000	0,20000
3	0,000	6,01100	0,22667
4	0,002	6,01000	0,24333
5	0,002	6,01200	0,21000
6	0,001	6,01167	0,20000
7	0,005	6,01200	0,22000
8	0,003	6,01200	0,22000
9	0,004	6,01033	0,18667
10	0,002	6,01300	0,23333
11	0,001	6,01067	0,20333
12	0,002	6,01300	0,18333
13	0,003	6,01333	0,24000
14	0,001	6,01233	0,22667
15	0,002	6,01200	0,21333
aritmetický průměr \bar{x}	0,00213 [mm]	6,01164 [mm]	0,21467 [μm]
rozptyl s^2	$1,552 \cdot 10^{-6} \text{ [mm}^2\text{]}$	$2,234 \cdot 10^{-6} \text{ [mm}^2\text{]}$	$4,573 \cdot 10^{-4} \text{ [}\mu\text{m}^2\text{]}$
směrodatná odchylka s	$1,246 \cdot 10^{-3} \text{ [mm]}$	$1,495 \cdot 10^{-3} \text{ [mm]}$	$2,138 \cdot 10^{-2} \text{ [}\mu\text{m]}$

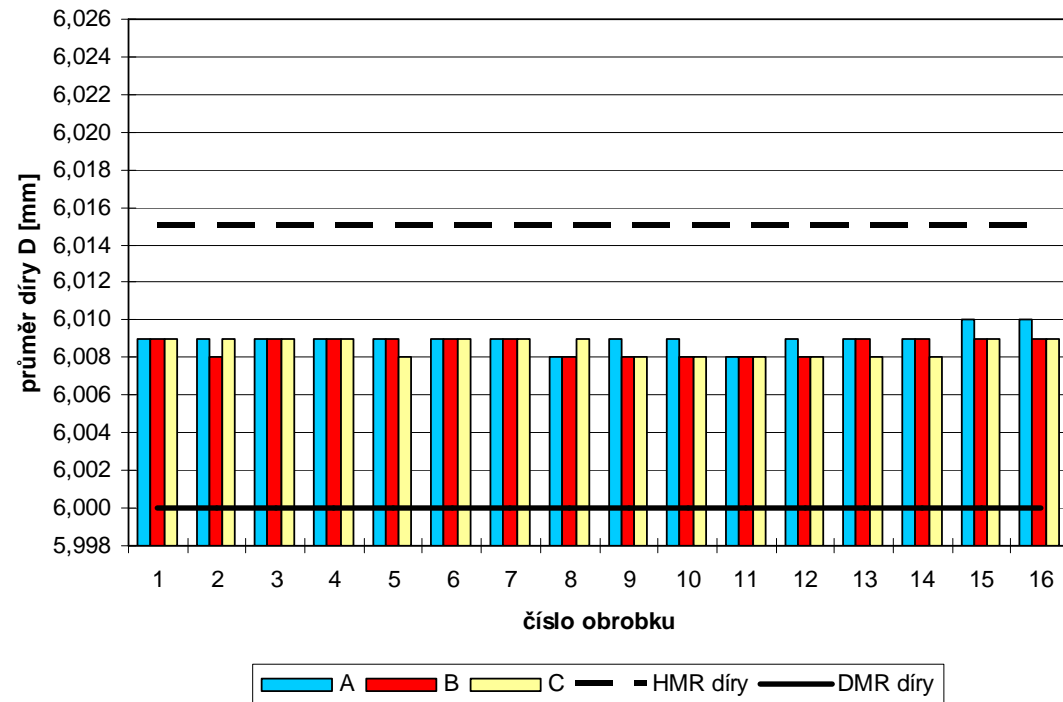
Dvoubřítý výstružník s břity z CVD diamantu (MT2–CVDdia)			
Řezné podmínky:	otáčky $n = 3000 \text{ min}^{-1}$	posuv $f_{ot} = 0,2 \text{ mm}$	řezná rychlost $v_c = 56,55 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
číslo obrobku	válcovitost $V \text{ [mm]}$	Aritmetický průměr	
		průměru díry $\bar{D}_{ABC} \text{ [mm]}$	drsnosti povrchu $\bar{Ra}_{ABC} \text{ [}\mu\text{m]}$
1	0,004	6,01633	0,31333
2	0,004	6,01433	0,30333
3	0,005	6,01300	0,33667
4	0,006	6,01700	0,30333
5	0,006	6,01700	0,32000
6	0,002	6,01000	0,29000
7	0,003	6,01333	0,28667
8	0,007	6,01333	0,34000
9	0,007	6,01733	0,29667
10	0,004	6,01633	0,31667
11	0,001	6,01167	0,27667
12	0,003	6,01433	0,29333
13	0,005	6,01200	0,32000
14	0,006	6,01700	0,27333
15	0,004	6,01567	0,31333
aritmetický průměr \bar{x}	0,00447 [mm]	6,01458 [mm]	0,30556 [μm]
rozptyl s^2	$3,124 \cdot 10^{-6} \text{ [mm}^2\text{]}$	$9,249 \cdot 10^{-6} \text{ [mm}^2\text{]}$	$6,48 \cdot 10^{-4} \text{ [}\mu\text{m}^2\text{]}$
směrodatná odchylka s	$1,767 \cdot 10^{-3} \text{ [mm]}$	$3,041 \cdot 10^{-3} \text{ [mm]}$	$2,546 \cdot 10^{-2} \text{ [}\mu\text{m]}$

Dvoubřítý výstružník s břity z CVD diamantu (MT2–CVDdia)			
Řezné podmínky:	otáčky $n = 3000 \text{ min}^{-1}$	posuv $f_{ot} = 0,4 \text{ mm}$	řezná rychlost $v_c = 56,55 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
číslo obrobku	válcovitost $V \text{ [mm]}$	Aritmetický průměr	
		průměru díry $\bar{D}_{ABC} \text{ [mm]}$	drsnosti povrchu $\bar{Ra}_{ABC} \text{ [}\mu\text{m]}$
1	0,003	6,00967	0,28000
2	0,005	6,01267	0,30667
3	0,004	6,01233	0,32333
4	0,006	6,01667	0,30000
5	0,007	6,01600	0,31000
6	0,003	6,00967	0,28333
7	0,003	6,01067	0,31667
8	0,003	6,01533	0,33333
9	0,008	6,01600	0,28000
10	0,002	6,01933	0,30667
11	0,002	6,01100	0,31667
12	0,006	6,01267	0,28667
13	0,002	6,01600	0,32333
14	0,005	6,01933	0,33333
15	0,005	6,01833	0,32667
aritmetický průměr \bar{x}	0,00427 [mm]	6,01438 [mm]	0,30844 [μm]
rozptyl s^2	$3,638 \cdot 10^{-6} \text{ [mm}^2\text{]}$	$1,465 \cdot 10^{-5} \text{ [mm}^2\text{]}$	$6,089 \cdot 10^{-4} \text{ [}\mu\text{m}^2\text{]}$
směrodatná odchylka s	$1,907 \cdot 10^{-3} \text{ [mm]}$	$3,827 \cdot 10^{-3} \text{ [mm]}$	$2,468 \cdot 10^{-2} \text{ [}\mu\text{m]}$

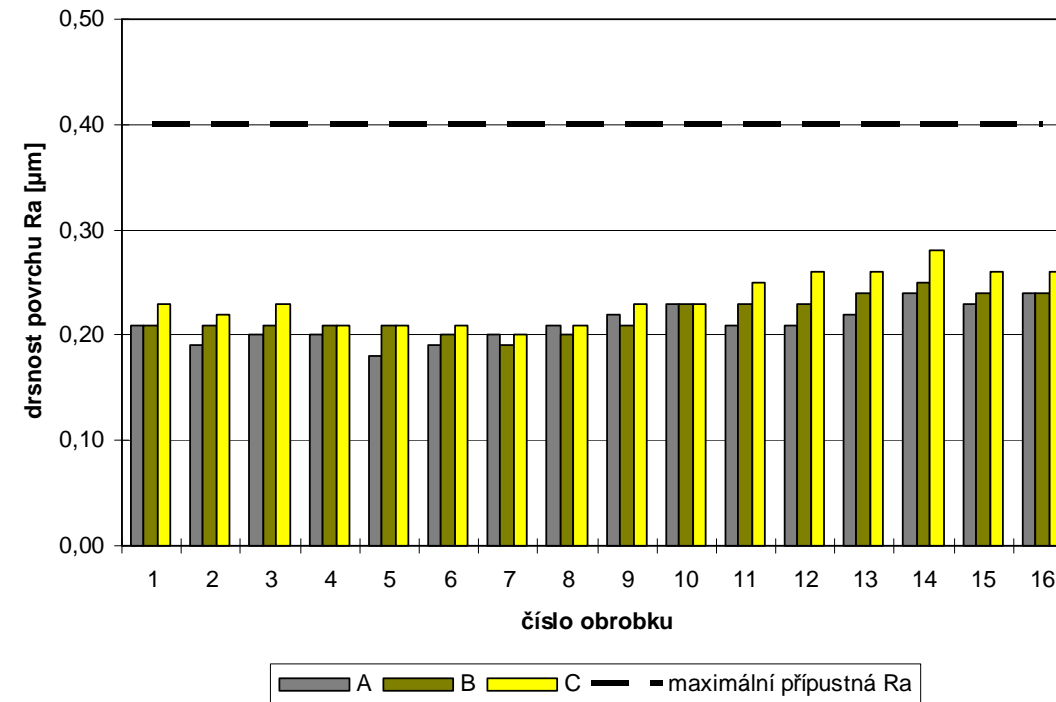
 rozměr na hranici tolerance

 rozměr mimo toleranci

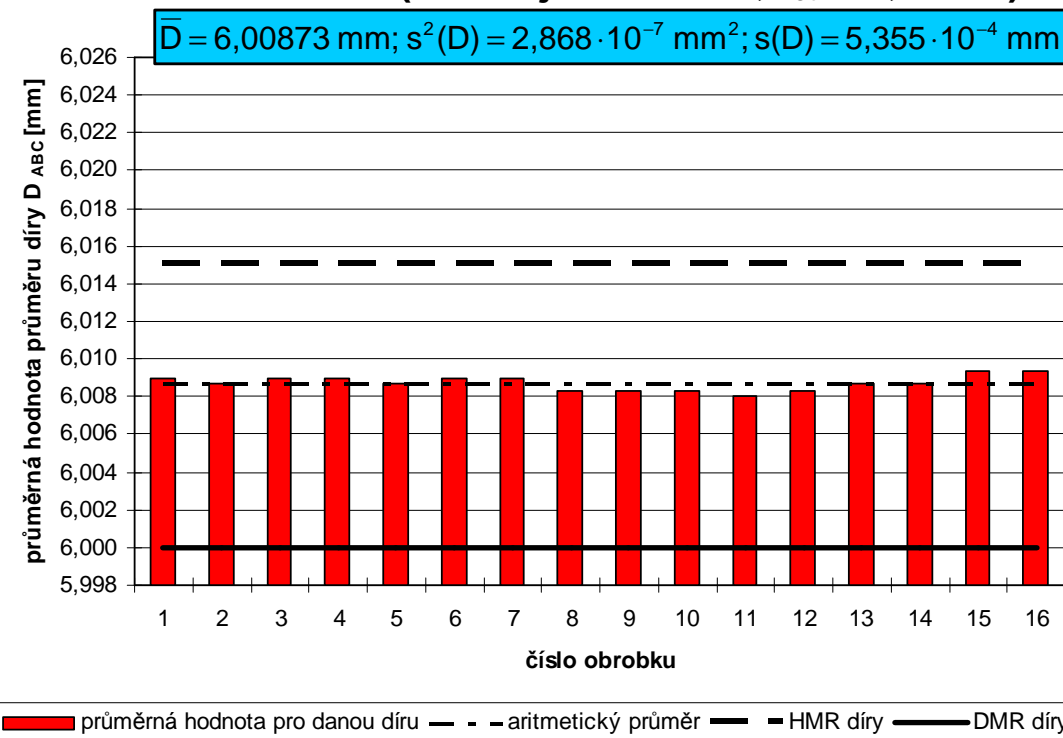
Grafická závislost průměru díry D na číslu obrobku (nástroj MT1-PKD, $f_{ot} = 0,2$ mm)



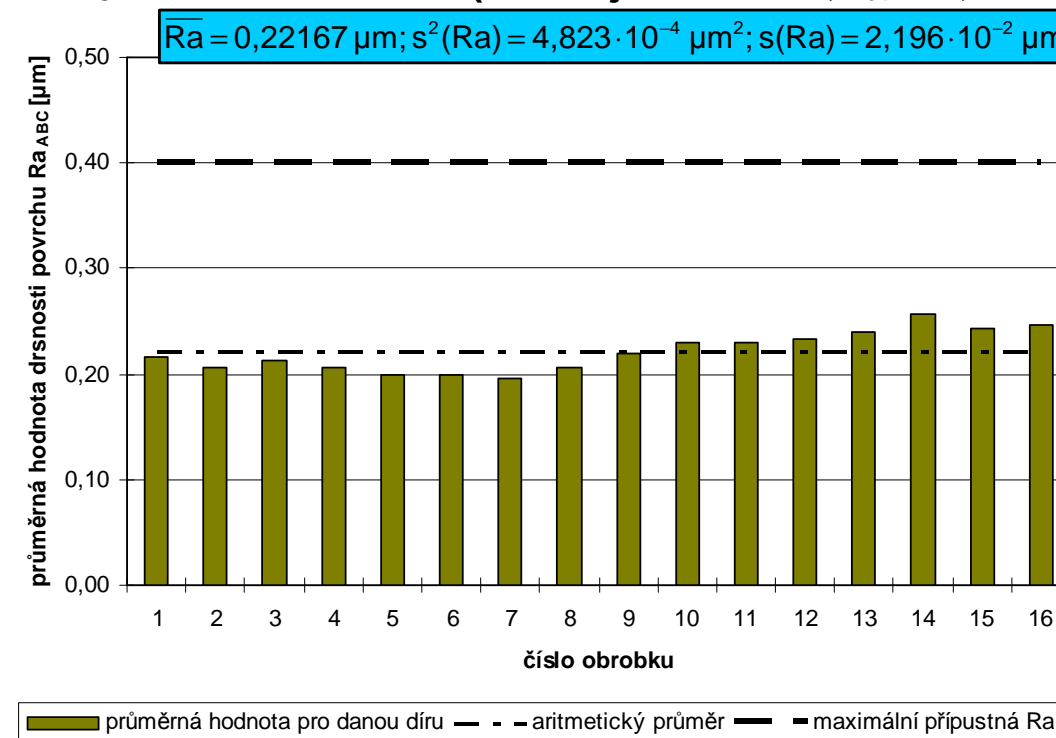
Grafická závislost drsnosti povrchu Ra na číslu obrobku (nástroj MT1-PKD, $f_{ot} = 0,2$ mm)



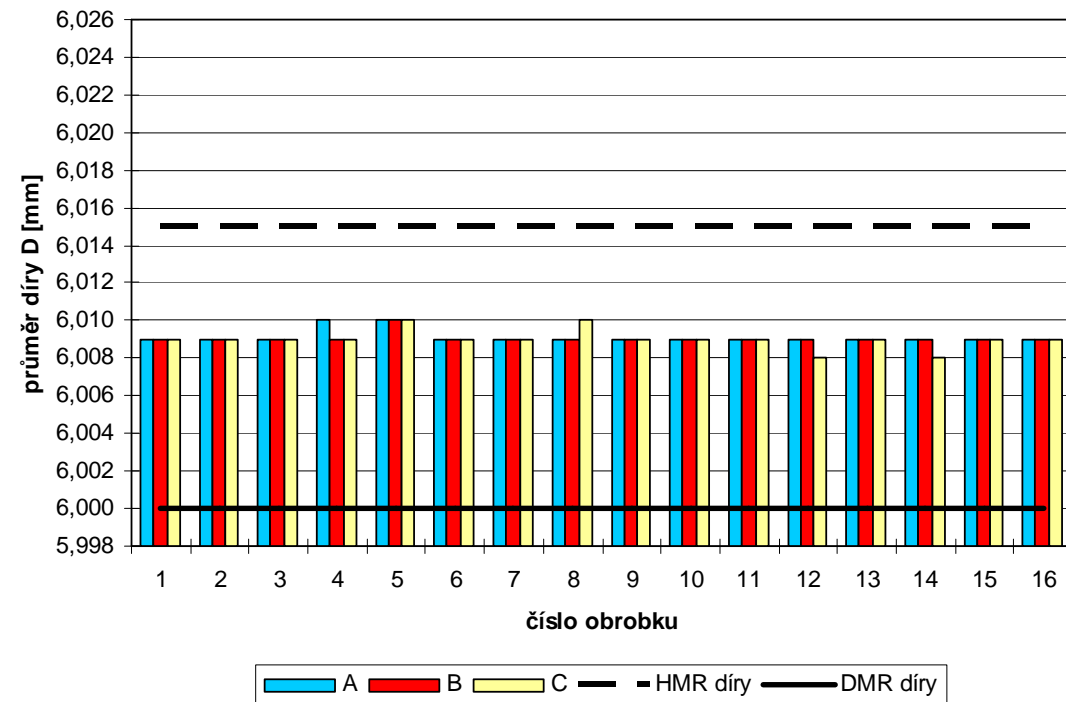
Grafická závislost průměrné hodnoty průměru díry \bar{D}_{ABC} na číslu obrobku (nástroj MT1-PKD, $f_{ot} = 0,2$ mm)



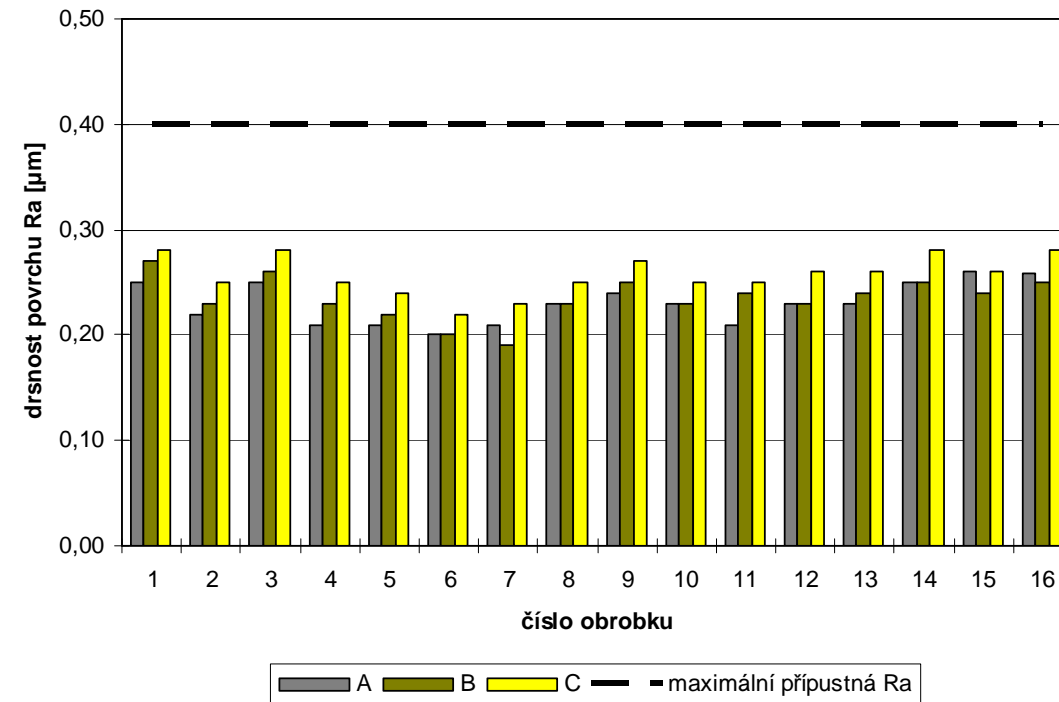
Grafická závislost průměrné hodnoty drsnosti povrchu Ra_{ABC} na číslu obrobku (nástroj MT1-PKD, $f_{ot} = 0,2$ mm)



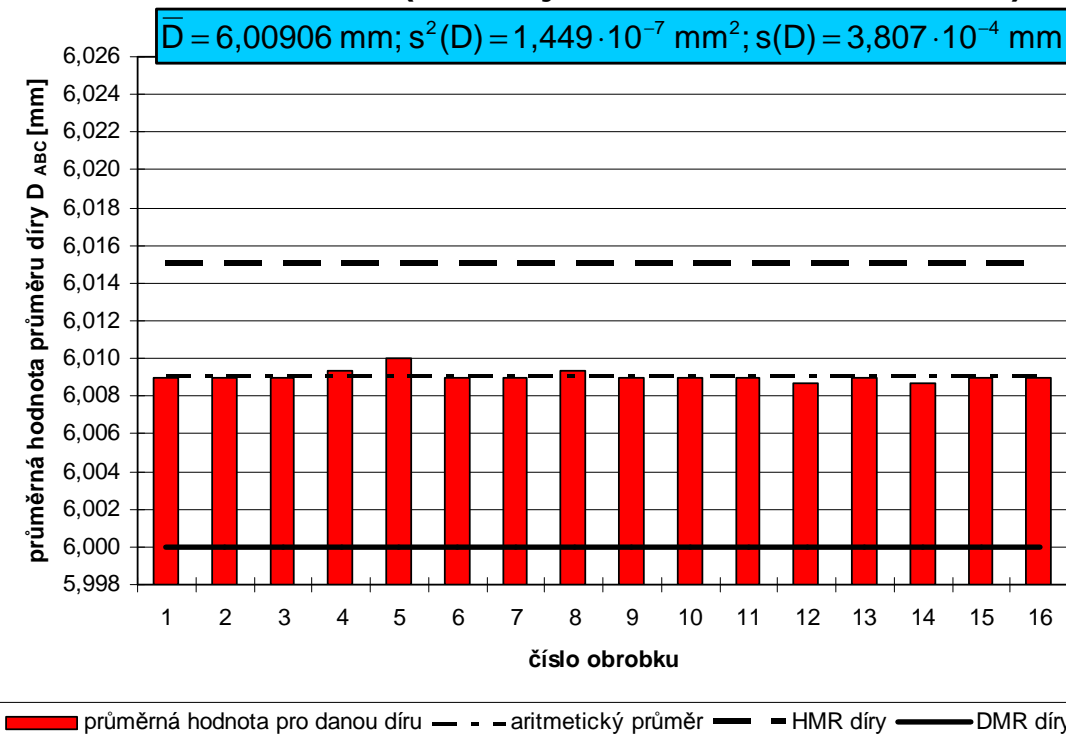
Grafická závislost průměru díry D na číslu obrobku (nástroj MT1-PKD, $f_{ot} = 0,4$ mm)



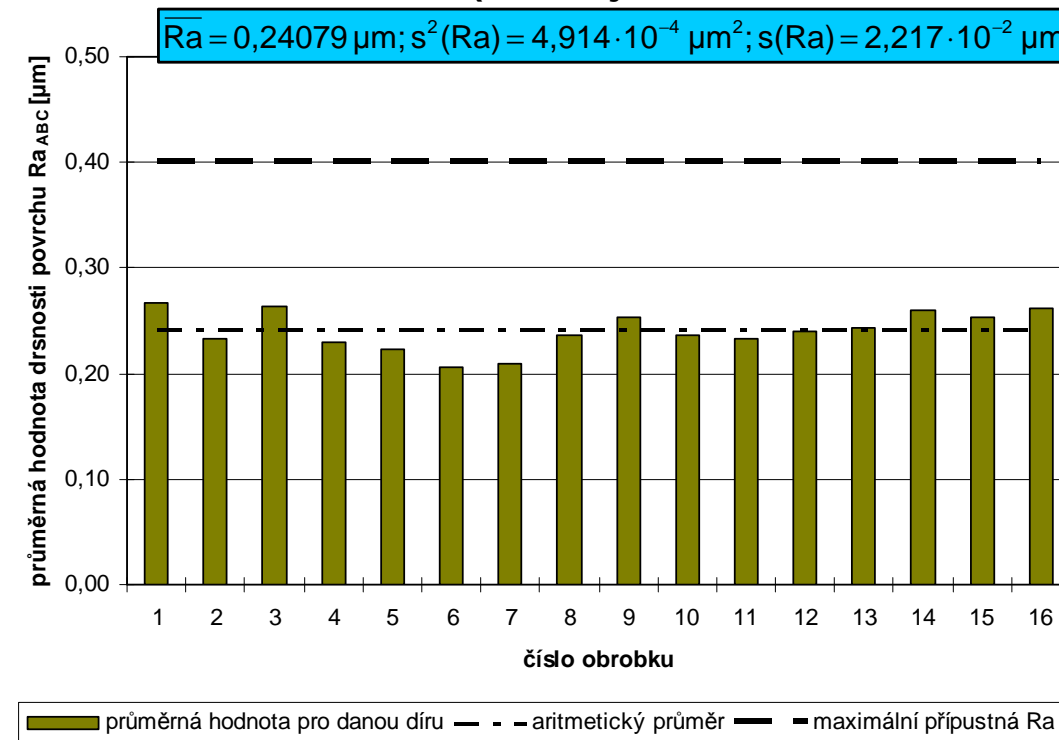
Grafická závislost drsnosti povrchu Ra na číslu obrobku (nástroj MT1-PKD, $f_{ot} = 0,4$ mm)



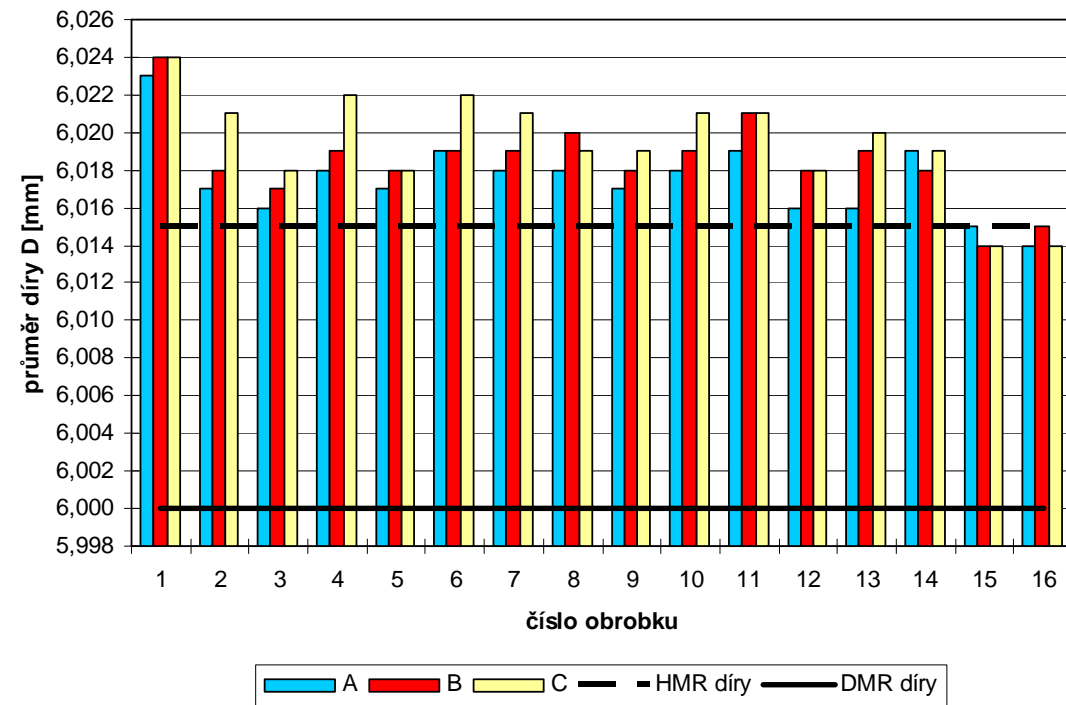
Grafická závislost průměrné hodnoty průměru díry \bar{D}_{ABC} na číslu obrobku (nástroj MT1-PKD, $f_{ot} = 0,4$ mm)



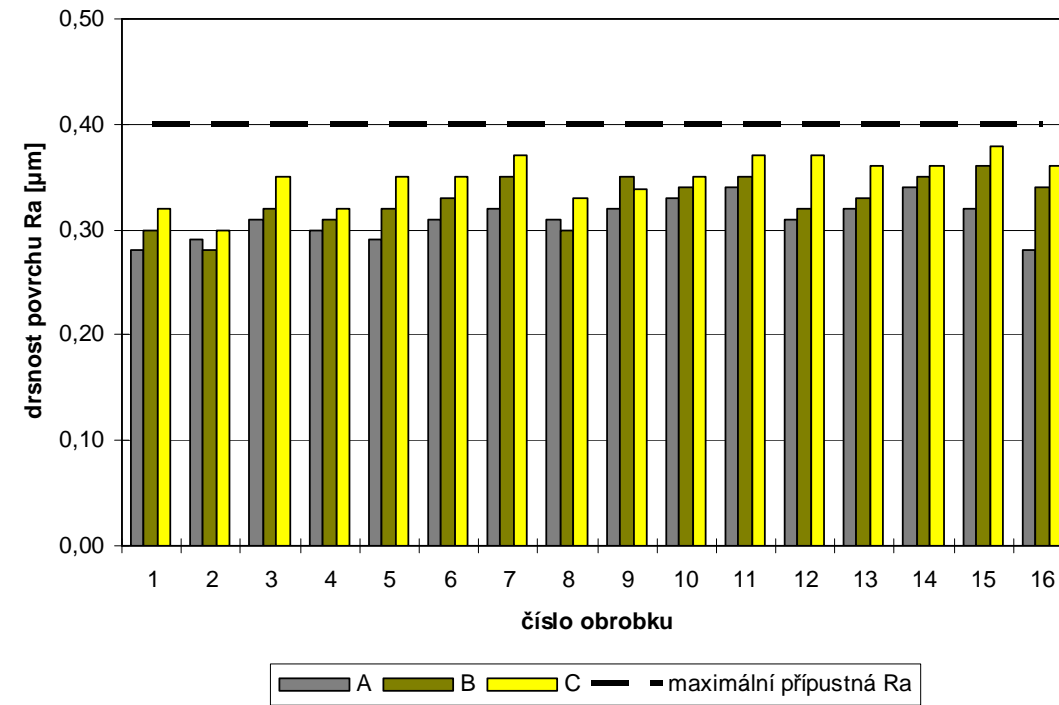
Grafická závislost průměrné hodnoty drsnosti povrchu \bar{Ra}_{ABC} na číslu obrobku (nástroj MT1-PKD, $f_{ot} = 0,4$ mm)



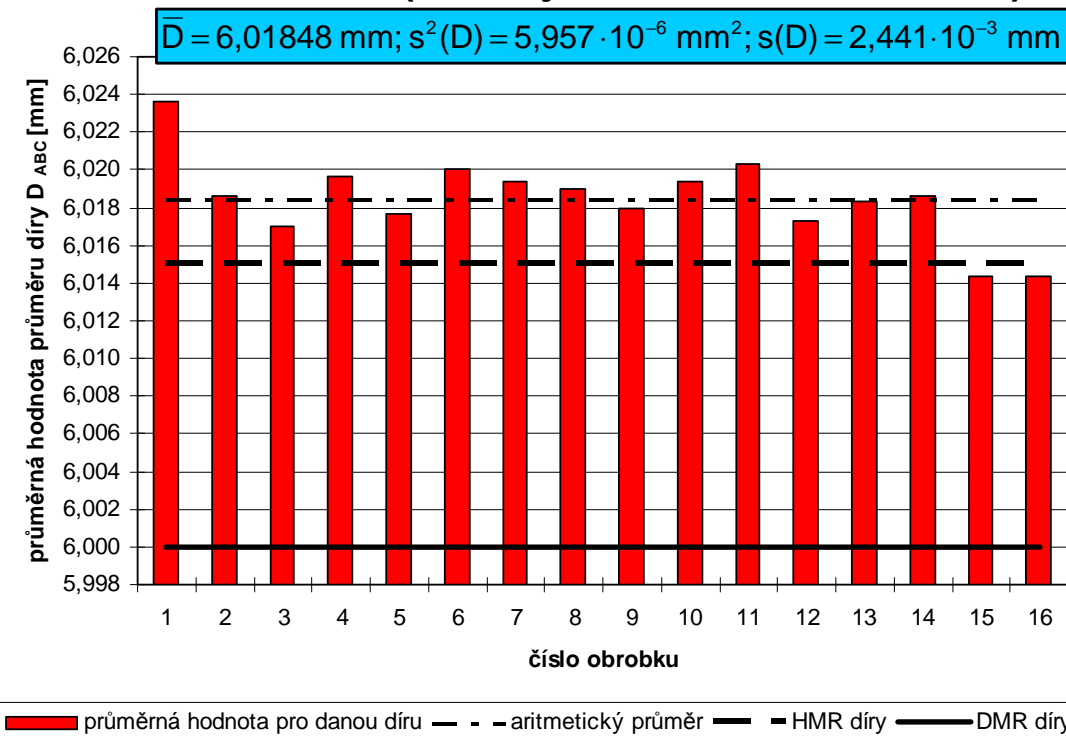
Grafická závislost průměru díry D na číslu obrobku (nástroj MT2-PKD, $f_{ot} = 0,4$ mm)



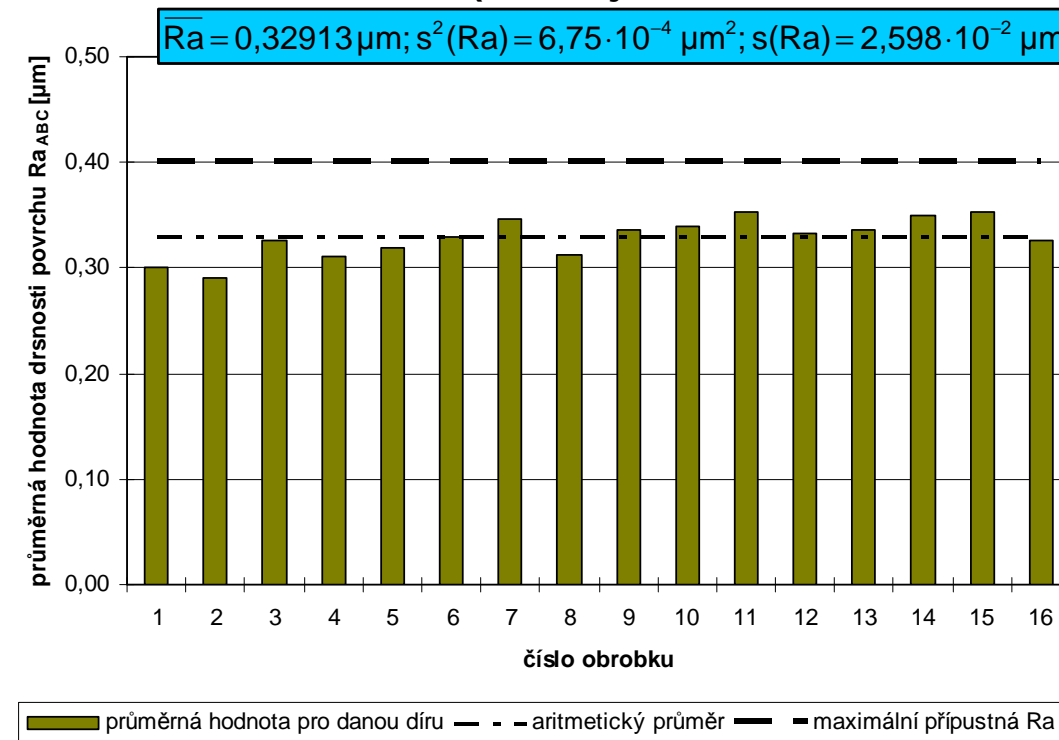
Grafická závislost drsnosti povrchu Ra na číslu obrobku (nástroj MT2-PKD, $f_{ot} = 0,4$ mm)



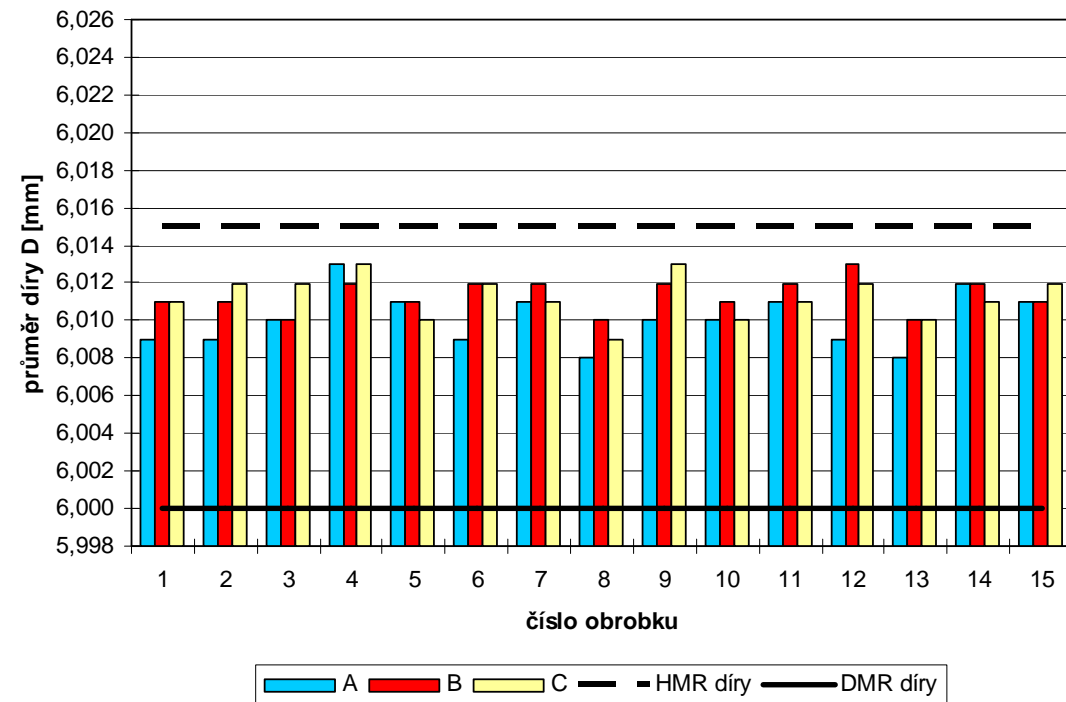
Grafická závislost průměrné hodnoty průměru díry \bar{D}_{ABC} na číslu obrobku (nástroj MT2-PKD, $f_{ot} = 0,4$ mm)



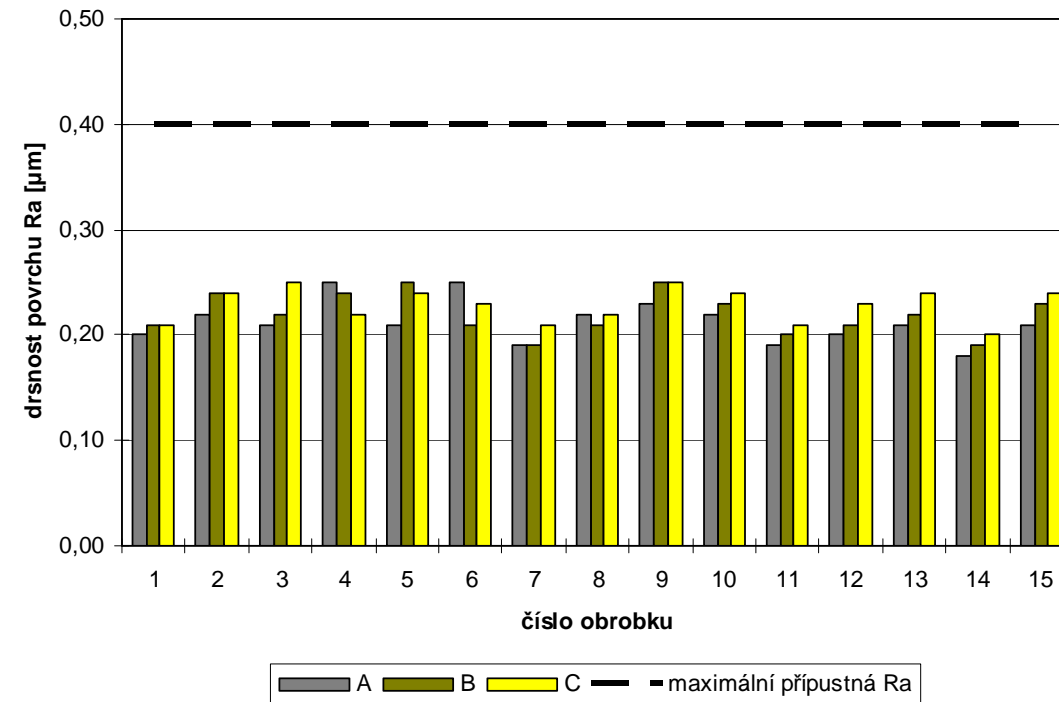
Grafická závislost průměrné hodnoty drsnosti povrchu \bar{Ra}_{ABC} na číslu obrobku (nástroj MT2-PKD, $f_{ot} = 0,4$ mm)



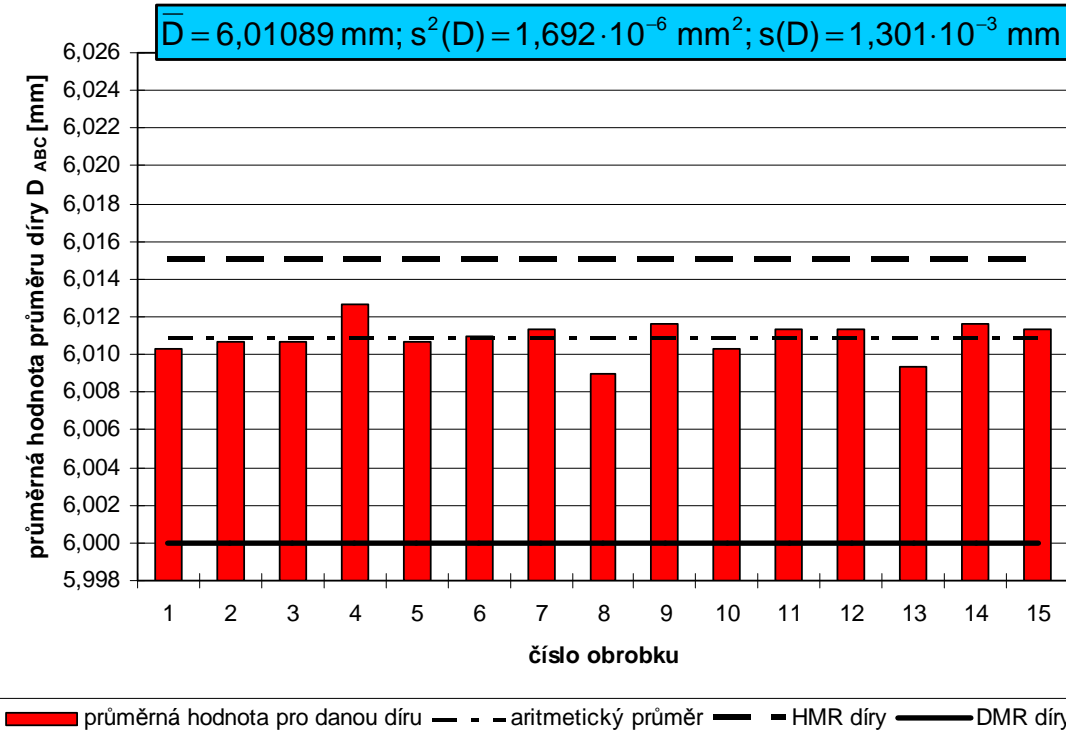
Grafická závislost průměru díry D na číslu obrobku (nástroj MT1–CVDdia, $f_{ot} = 0,2$ mm)



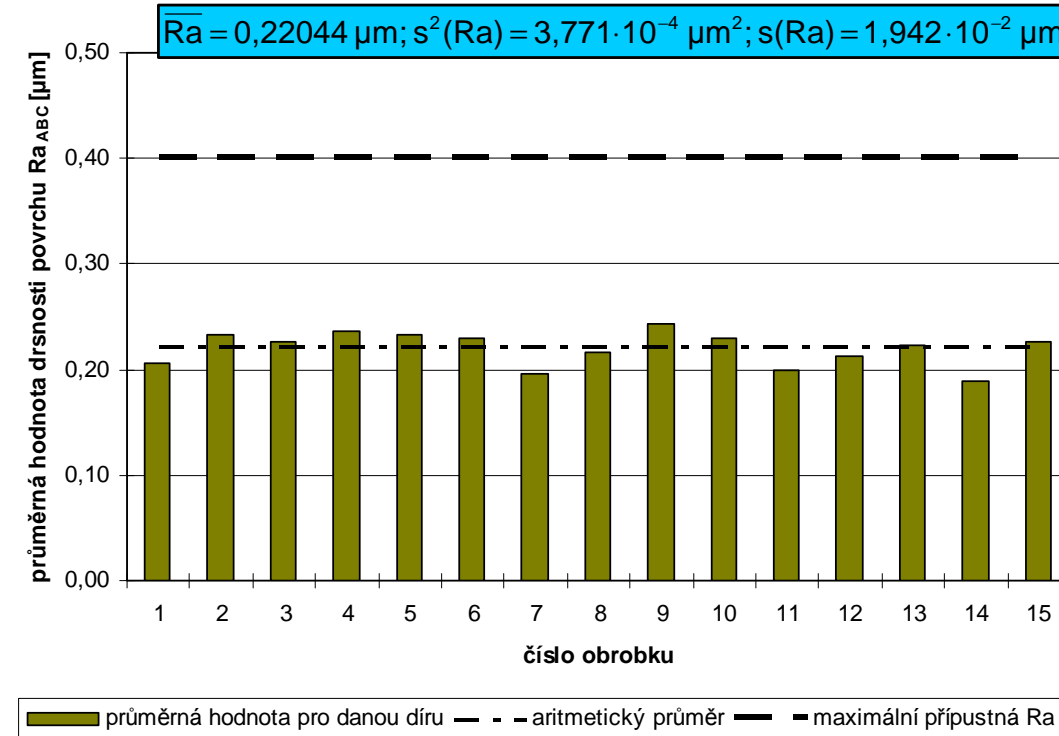
Grafická závislost drsnosti povrchu Ra na číslu obrobku (nástroj MT1–CVDdia, $f_{ot} = 0,2$ mm)



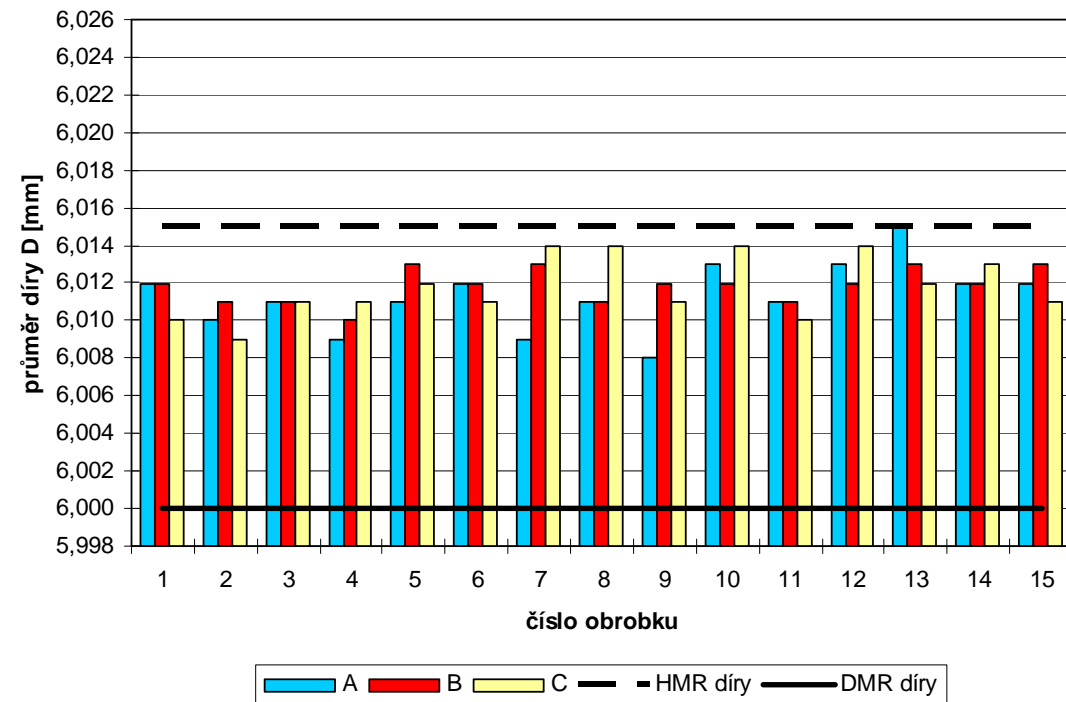
Grafická závislost průměrné hodnoty průměru díry \bar{D}_{ABC} na číslu obrobku (nástroj MT1–CVDdia, $f_{ot} = 0,2$ mm)



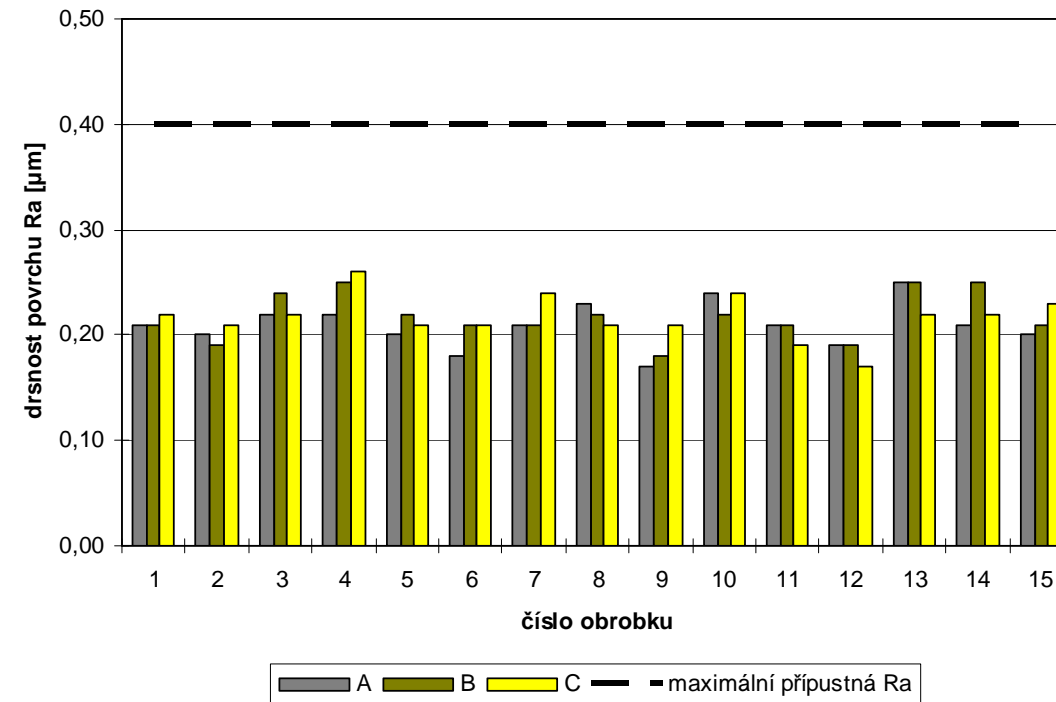
Grafická závislost průměrné hodnoty drsnosti povrchu \bar{Ra}_{ABC} na číslu obrobku (nástroj MT1–CVDdia, $f_{ot} = 0,2$ mm)



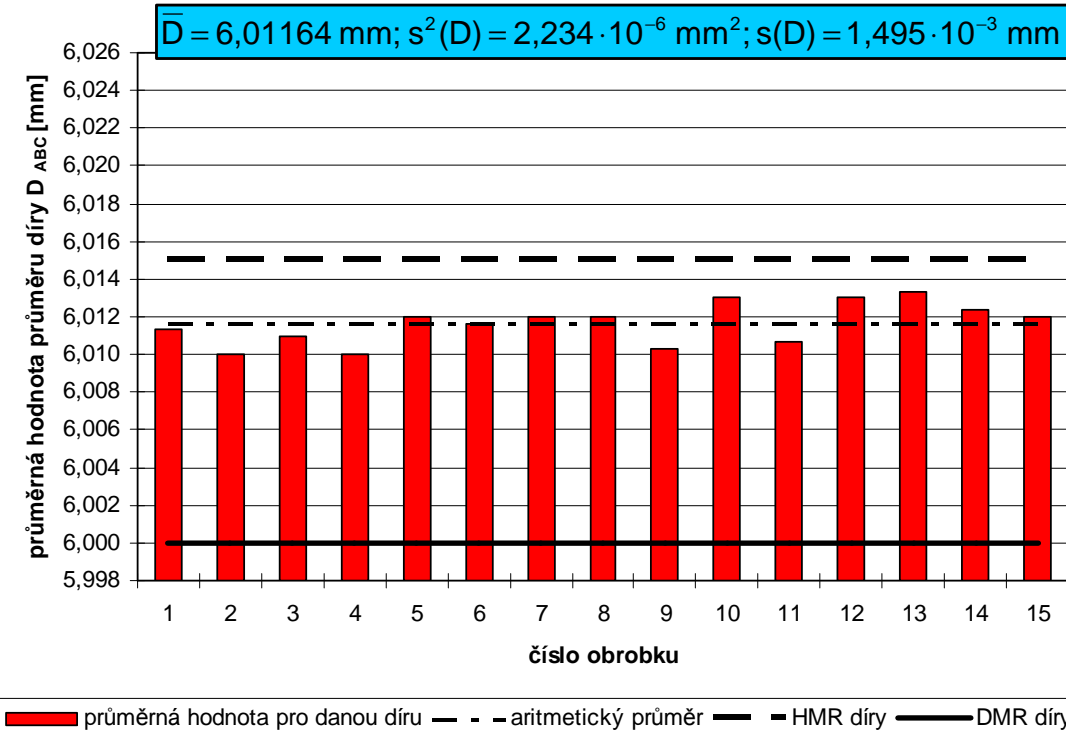
Grafická závislost průměru díry D na číslu obrobku (nástroj MT1–CVDdia, $f_{ot} = 0,4$ mm)



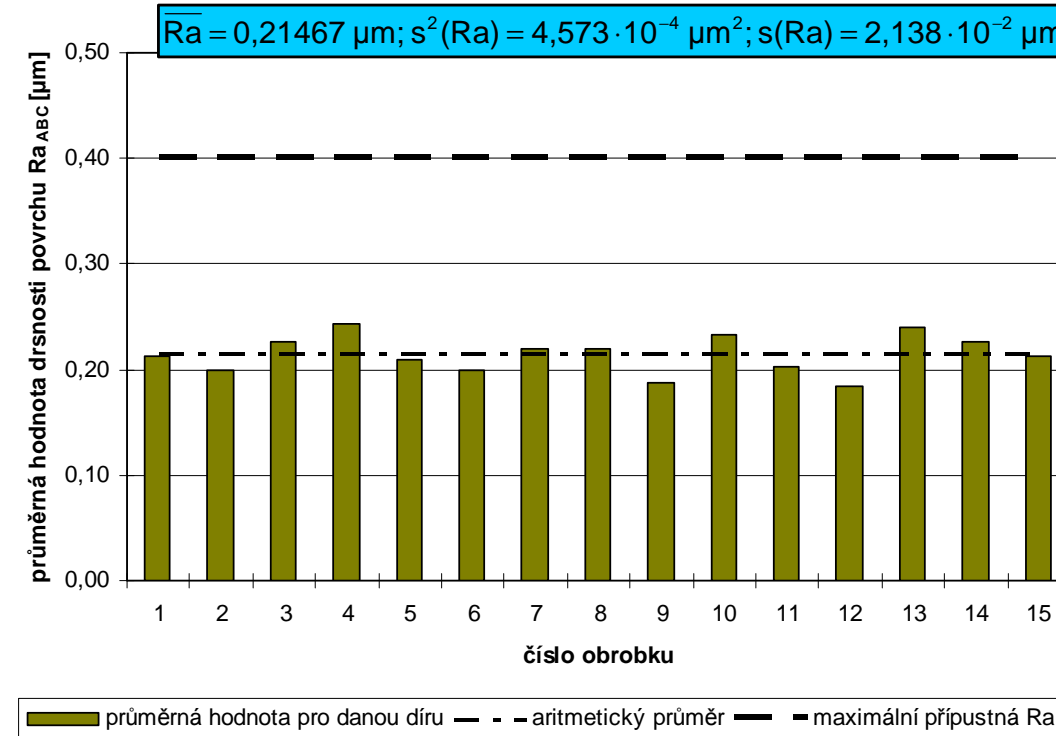
Grafická závislost drsnosti povrchu Ra na číslu obrobku (nástroj MT1–CVDdia, $f_{ot} = 0,4$ mm)



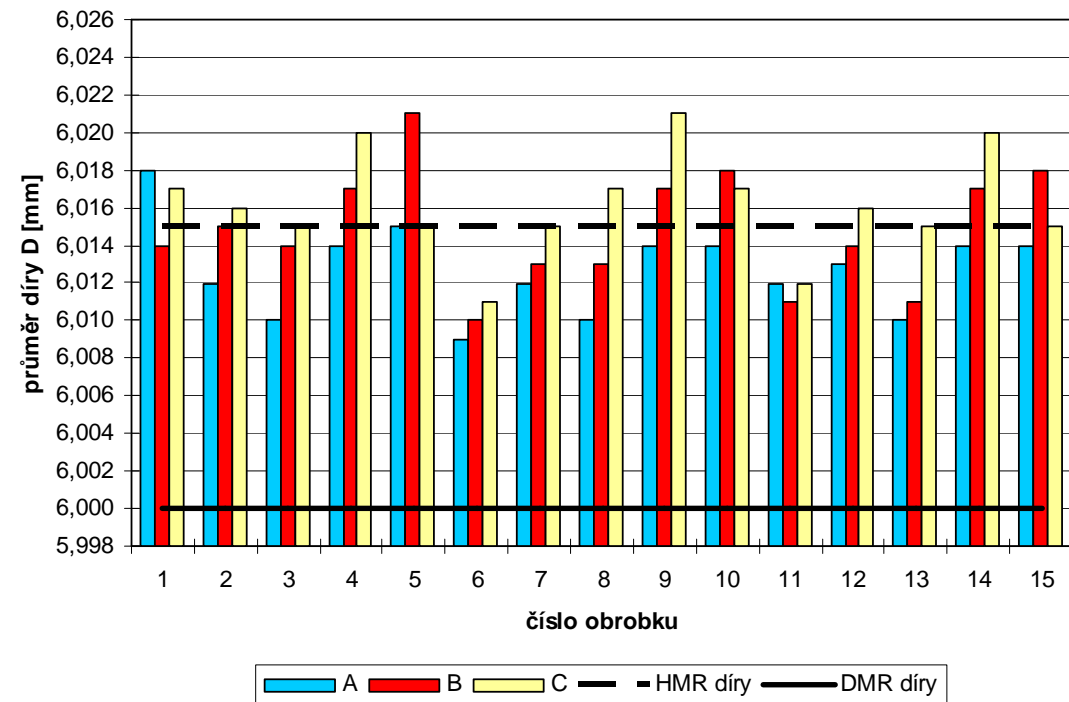
Grafická závislost průměrné hodnoty průměru díry \bar{D}_{ABC} na číslu obrobku (nástroj MT1–CVDdia, $f_{ot} = 0,4$ mm)



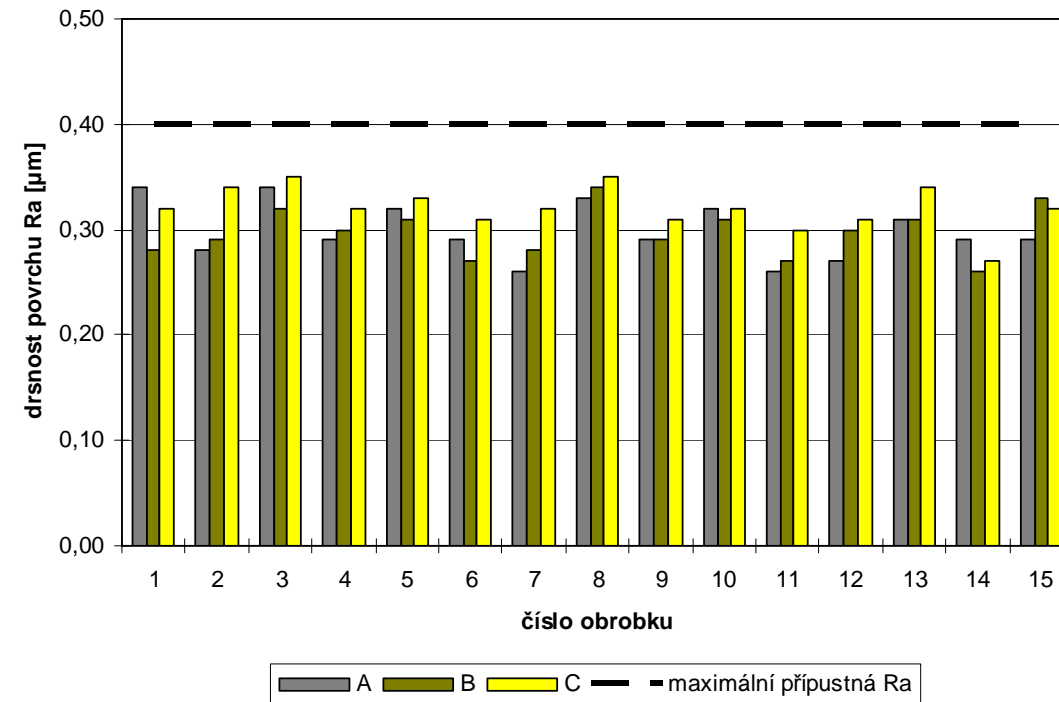
Grafická závislost průměrné hodnoty drsnosti povrchu \bar{Ra}_{ABC} na číslu obrobku (nástroj MT1–CVDdia, $f_{ot} = 0,4$ mm)



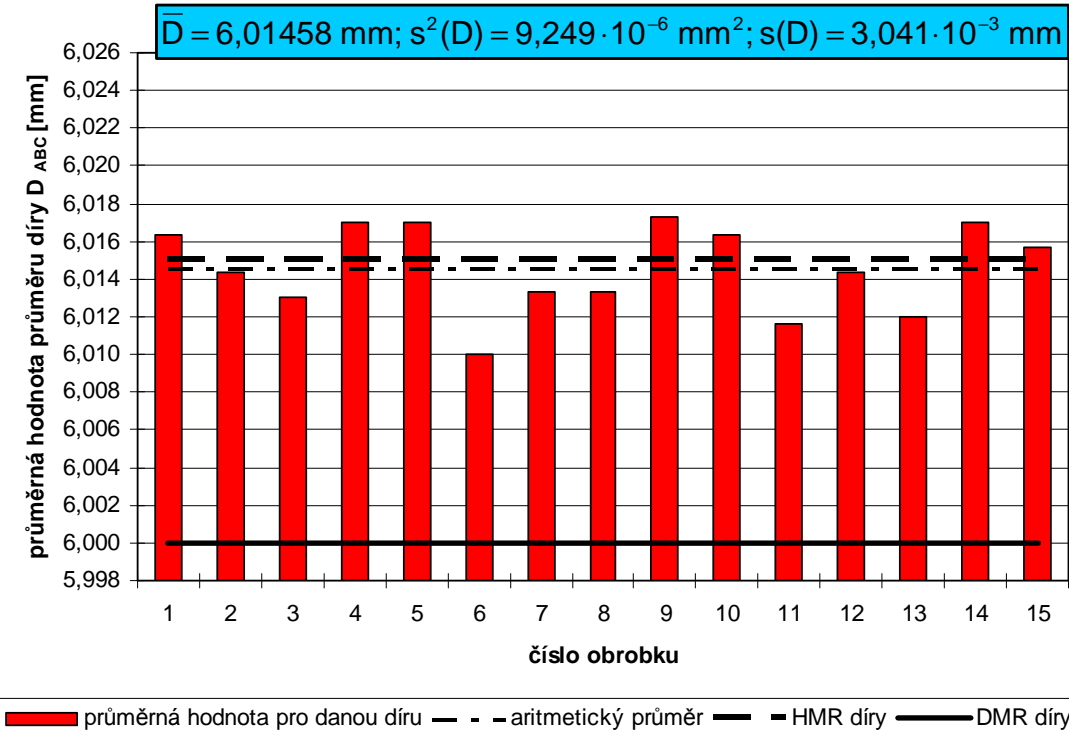
Grafická závislost průměru díry D na číslu obrobku (nástroj MT2–CVDdia, $f_{ot} = 0,2$ mm)



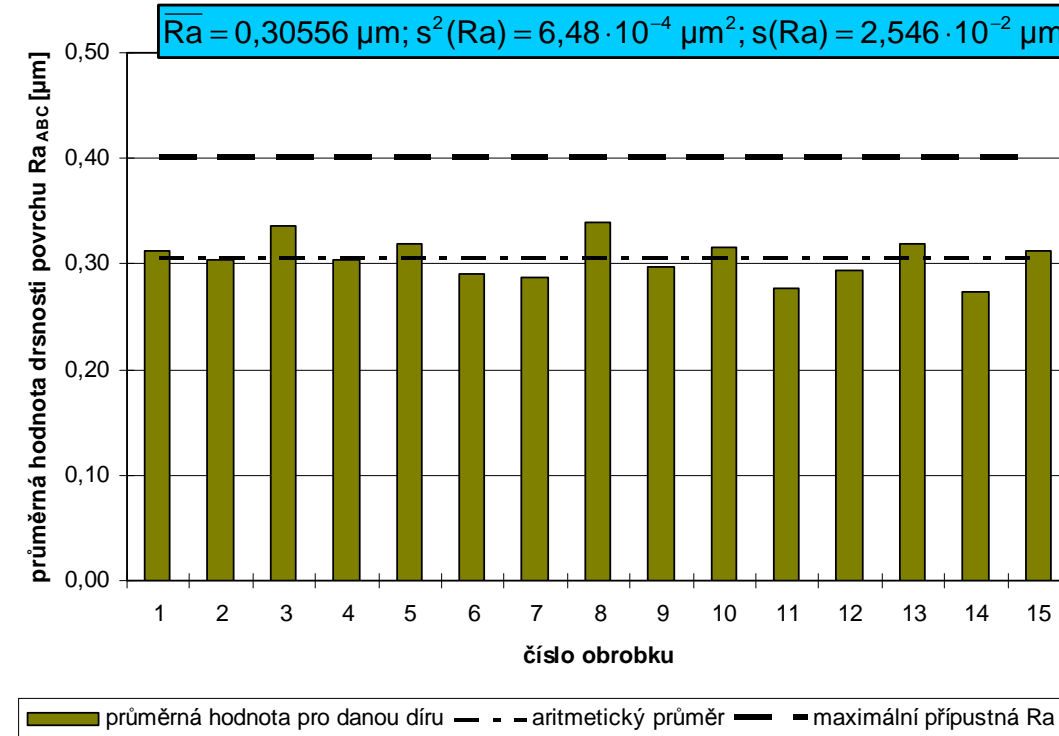
Grafická závislost drsnosti povrchu Ra na číslu obrobku (nástroj MT2–CVDdia, $f_{ot} = 0,2$ mm)



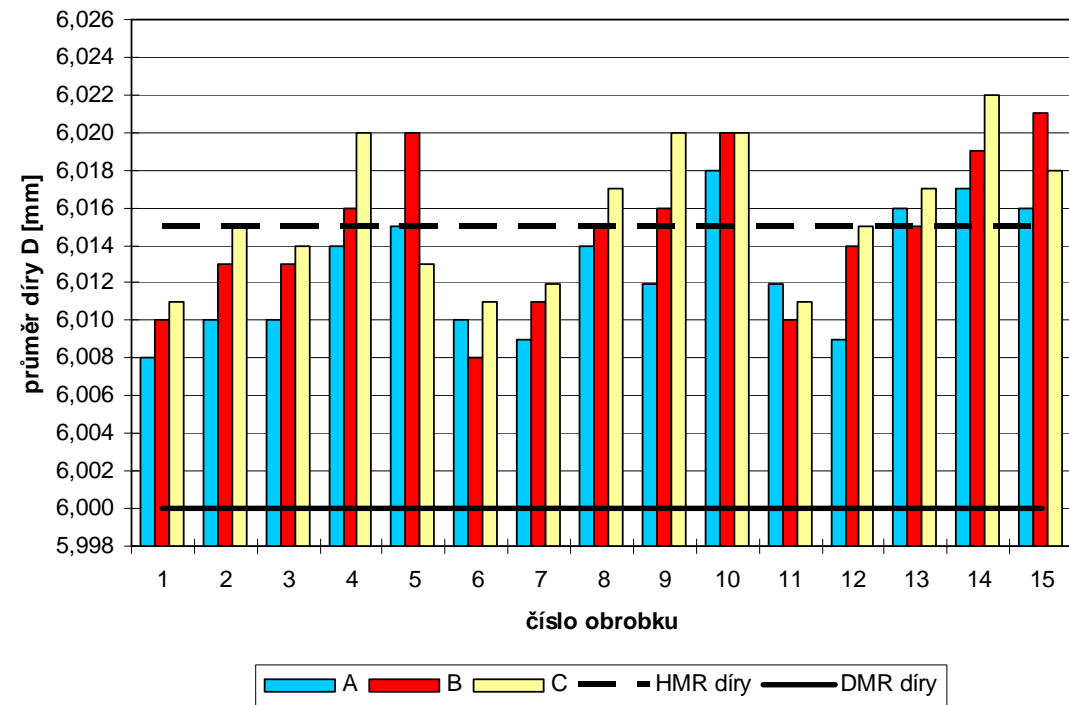
Grafická závislost průměrné hodnoty průměru díry \bar{D}_{ABC} na číslu obrobku (nástroj MT2–CVDdia, $f_{ot} = 0,2$ mm)



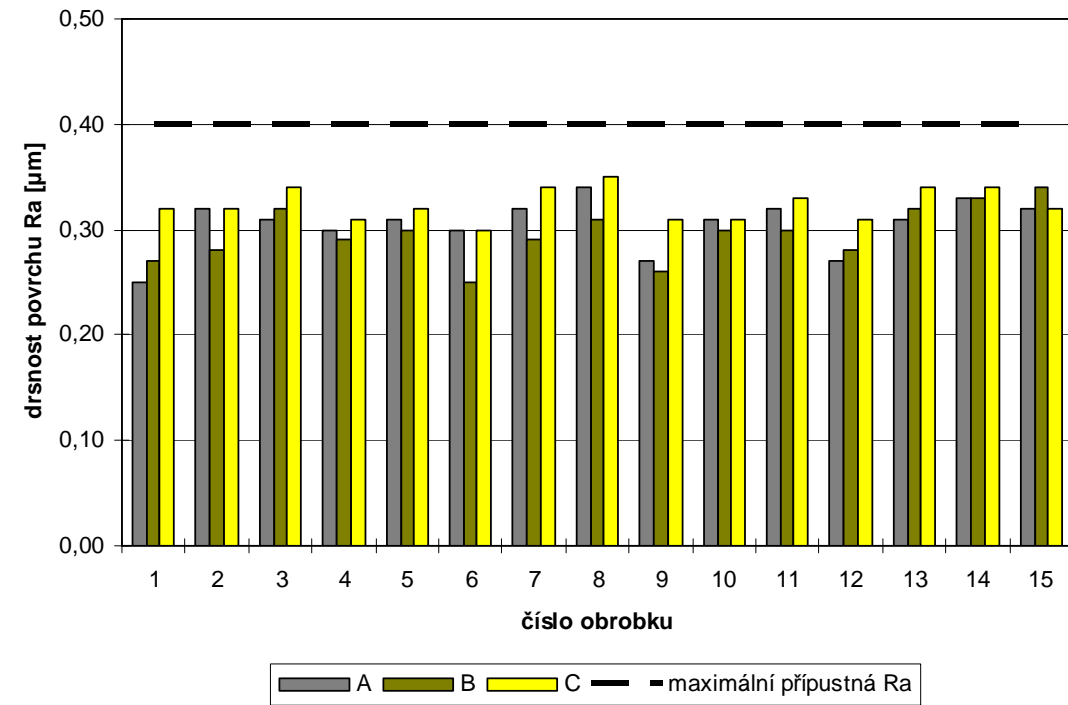
Grafická závislost průměrné hodnoty drsnosti povrchu \bar{Ra}_{ABC} na číslu obrobku (nástroj MT2–CVDdia, $f_{ot} = 0,2$ mm)



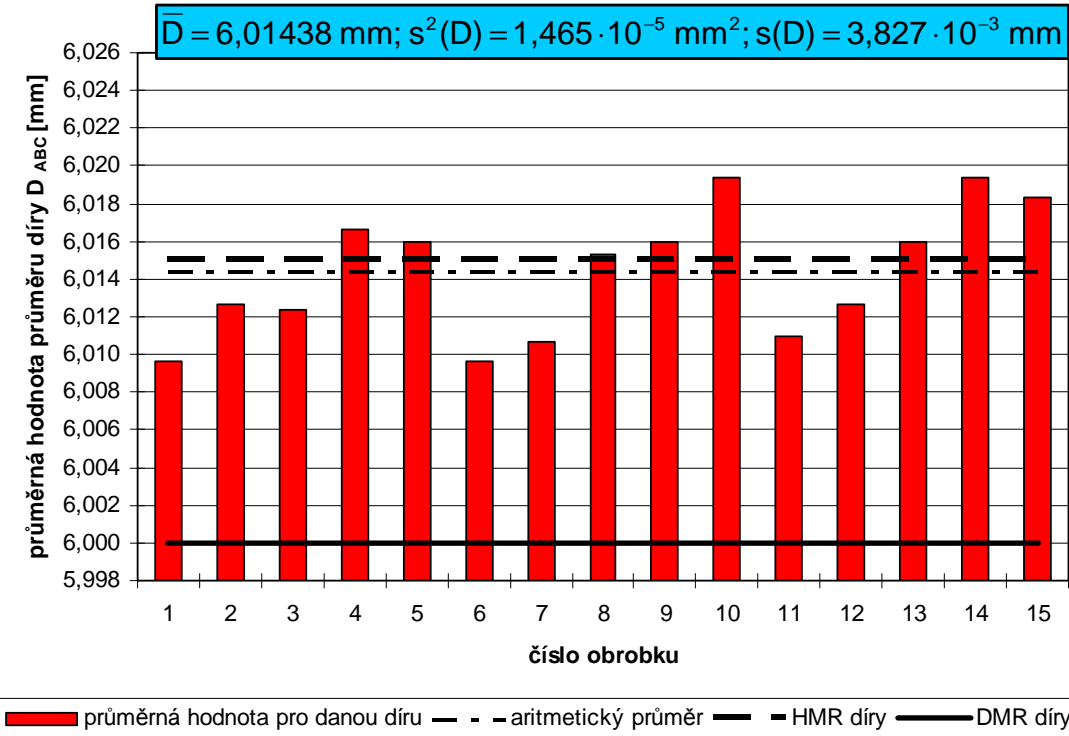
Grafická závislost průměru díry D na číslu obrobku (nástroj MT2–CVDdia, $f_{ot} = 0,4$ mm)



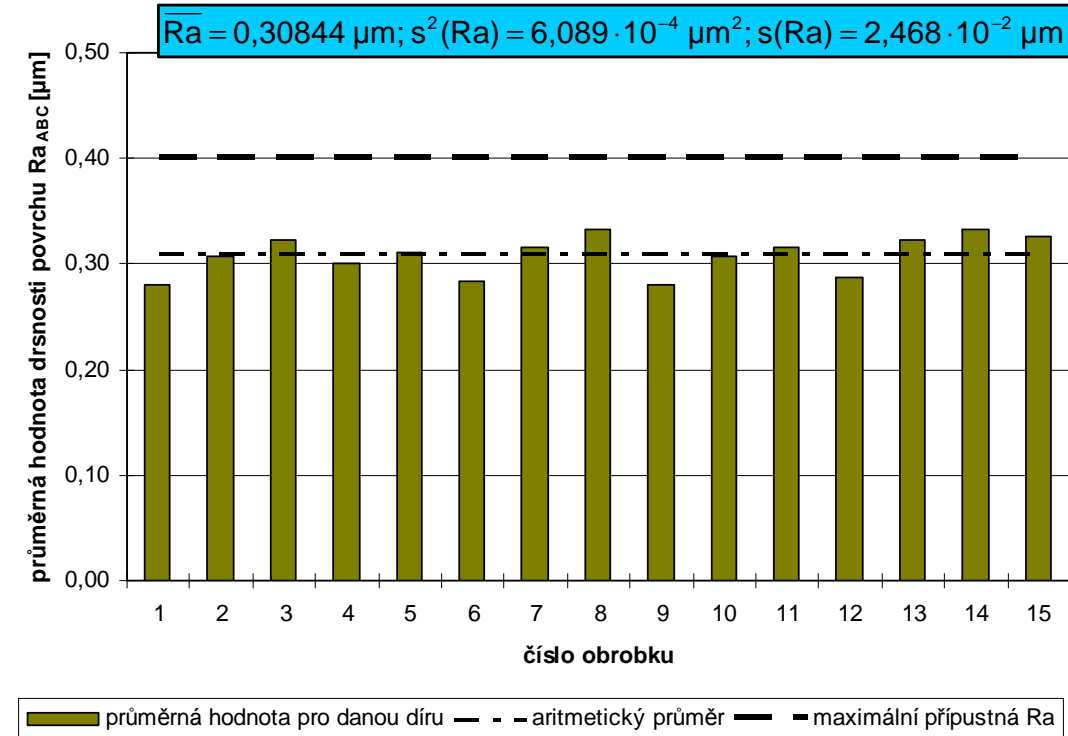
Grafická závislost drsnosti povrchu Ra na číslu obrobku (nástroj MT2–CVDdia, $f_{ot} = 0,4$ mm)



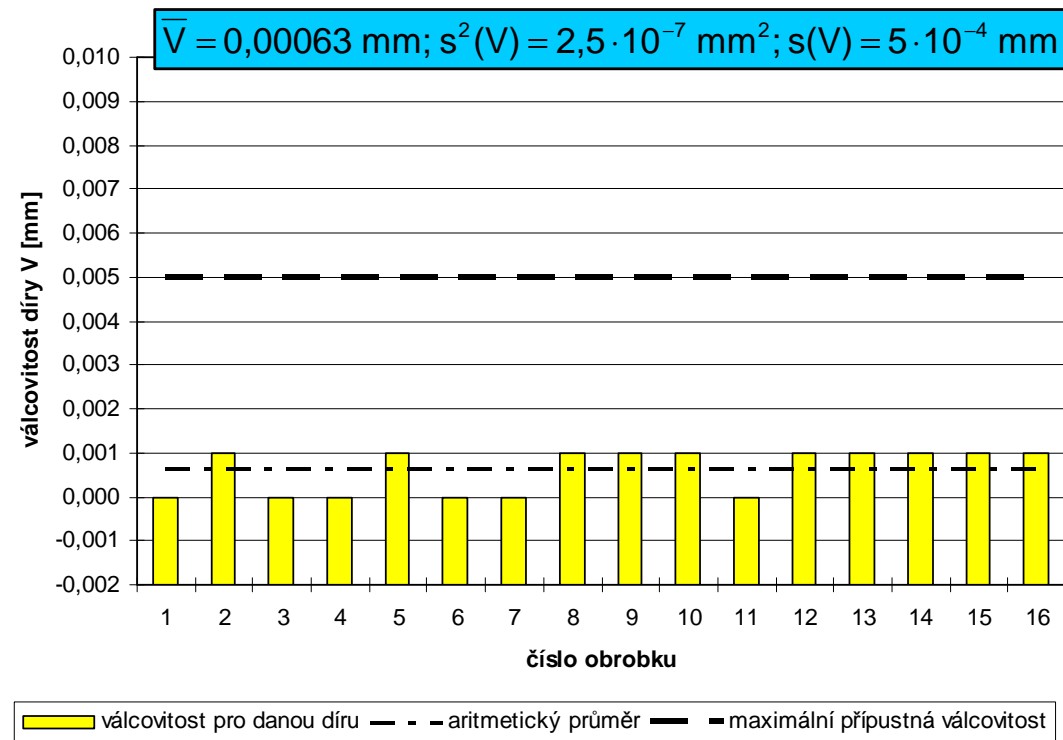
Grafická závislost průměrné hodnoty průměru díry \bar{D}_{ABC} na číslu obrobku (nástroj MT2–CVDdia, $f_{ot} = 0,4$ mm)



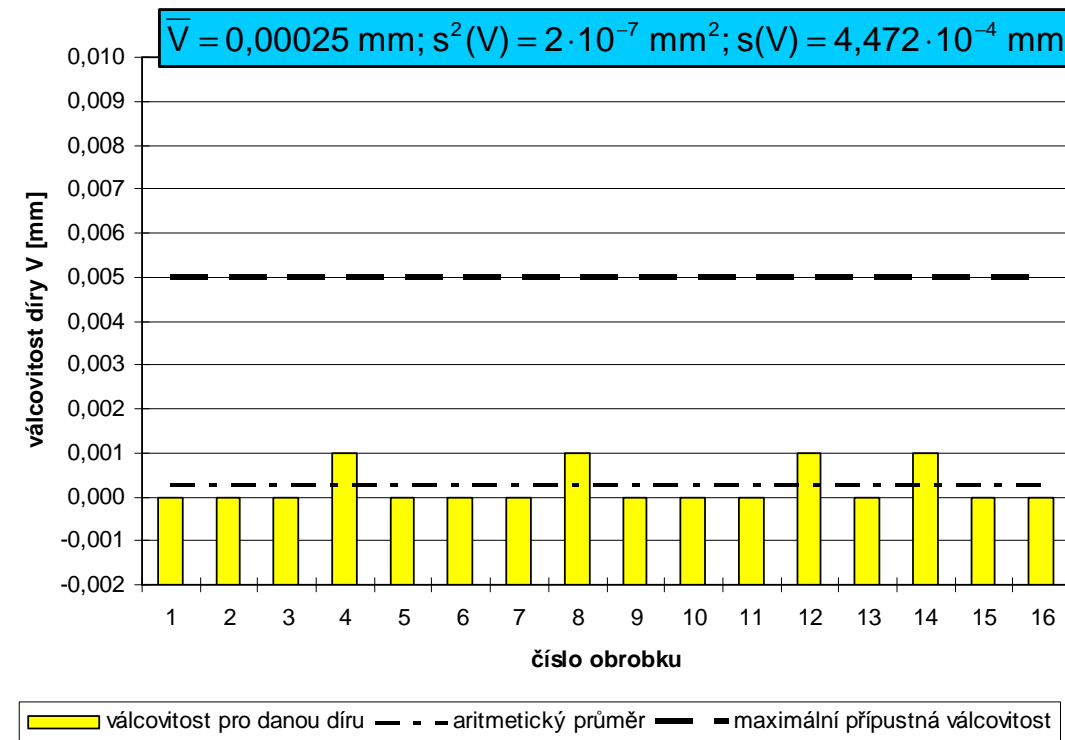
Grafická závislost průměrné hodnoty drsnosti povrchu \bar{Ra}_{ABC} na číslu obrobku (nástroj MT2–CVDdia, $f_{ot} = 0,4$ mm)



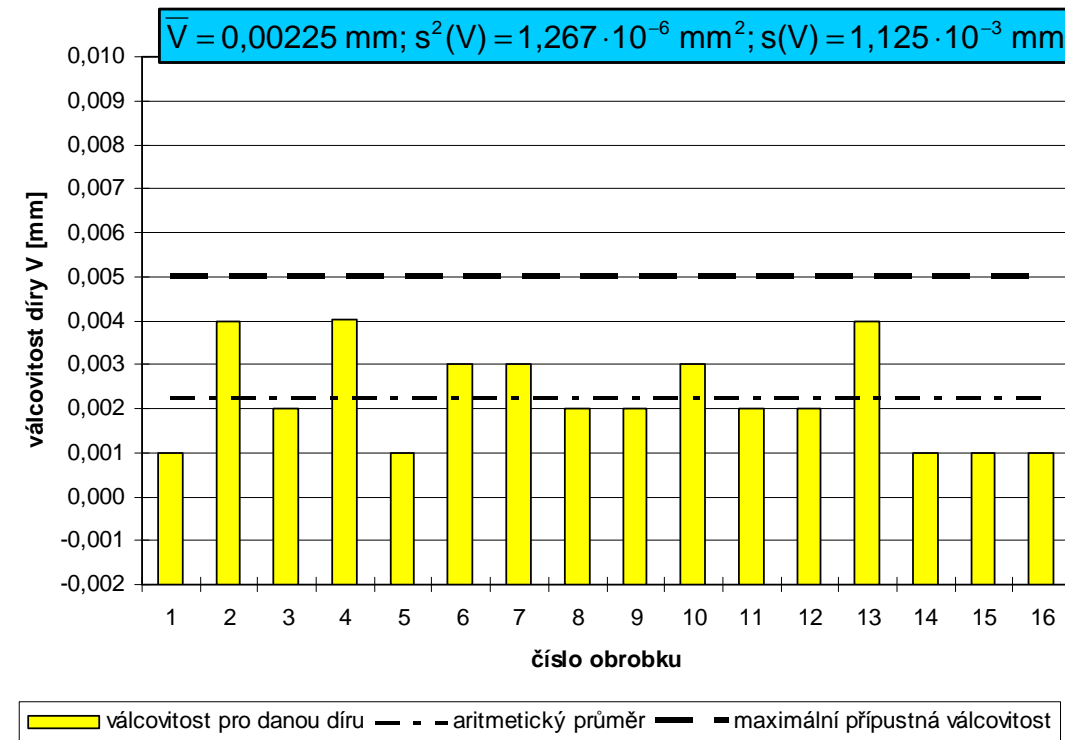
**Grafická závislost válcovitosti díry V na číslu obrobku
(nástroj MT1-PKD, $f_{ot} = 0,2$ mm)**



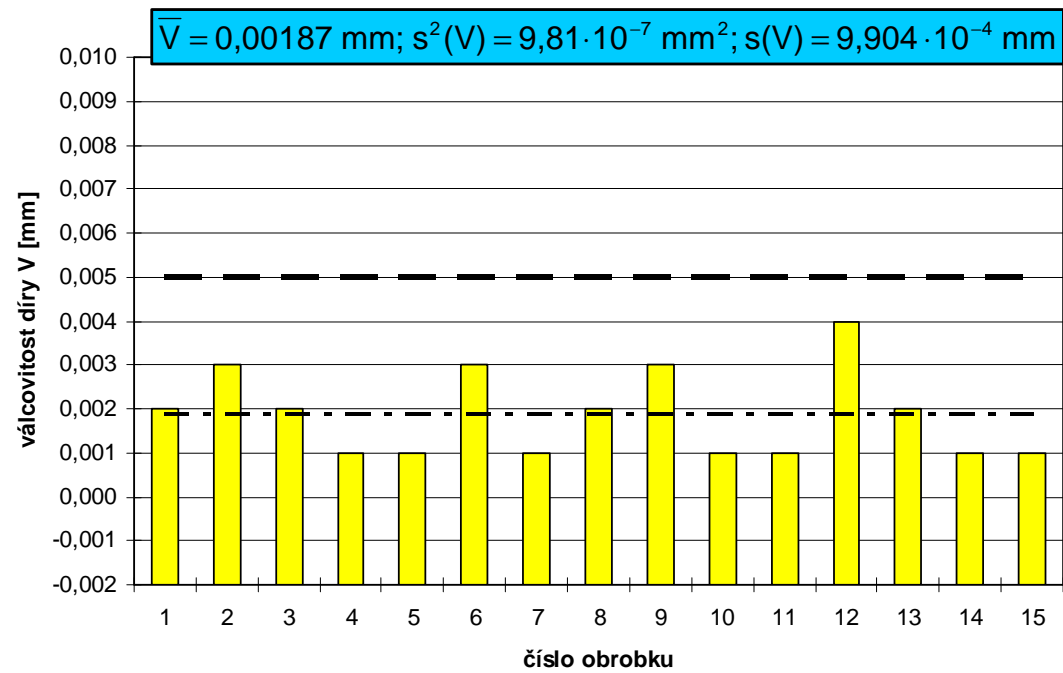
**Grafická závislost válcovitosti díry V na číslu obrobku
(nástroj MT1-PKD, $f_{ot} = 0,4$ mm)**



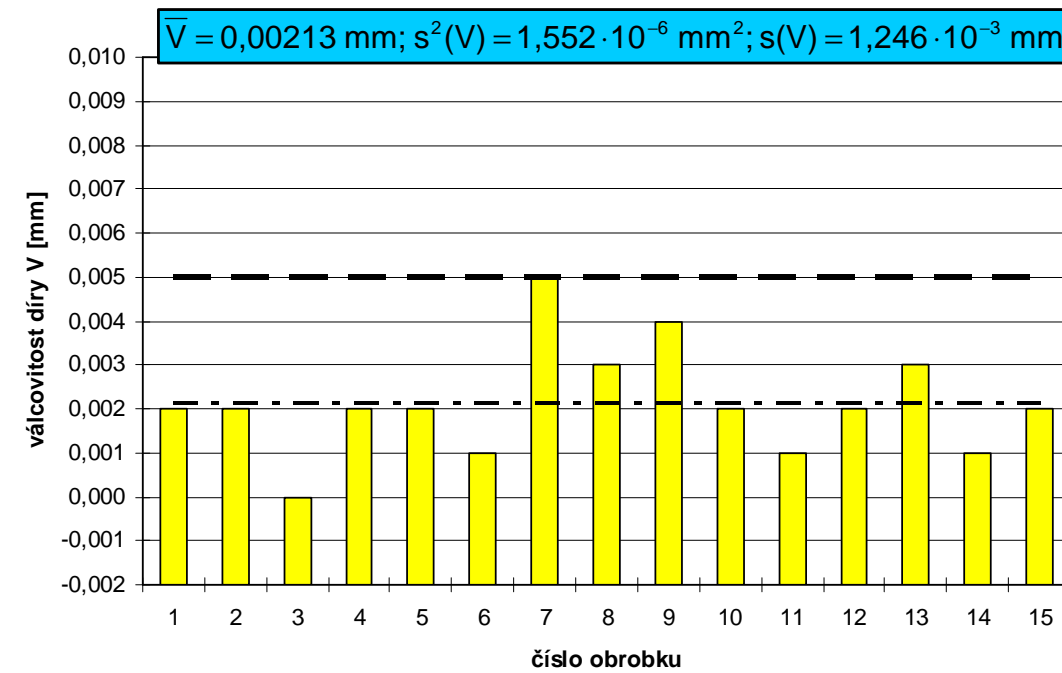
**Grafická závislost válcovitosti díry V na číslu obrobku
(nástroj MT2-PKD, $f_{ot} = 0,4$ mm)**



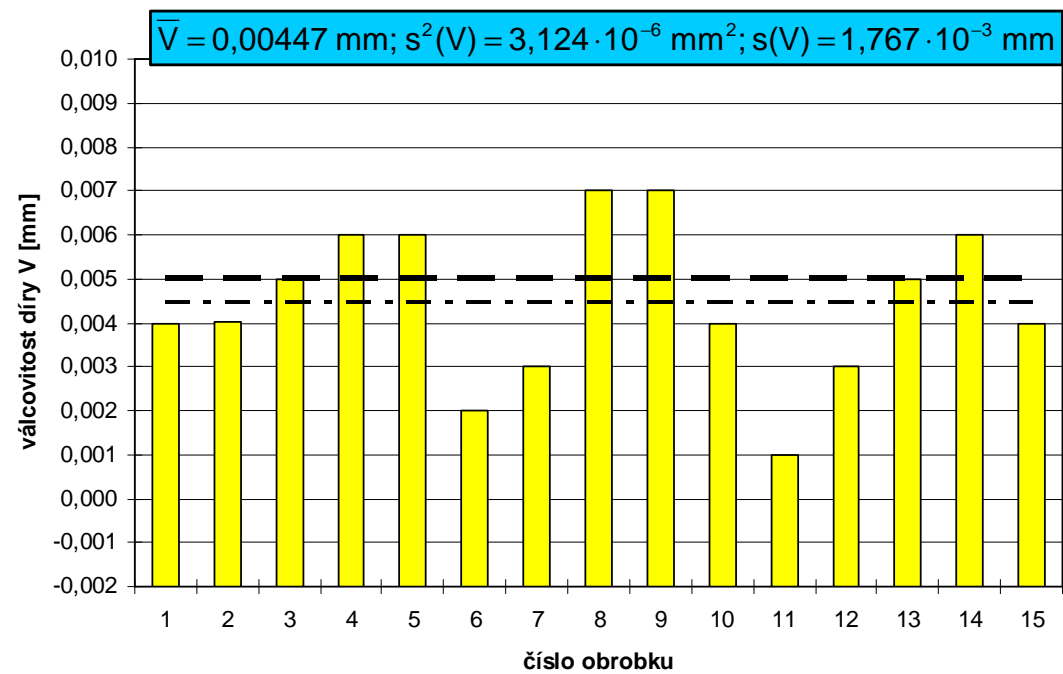
Grafická závislost válcovitosti díry V na číslu obrobku (nástroj MT1–CVDdia, $f_{ot} = 0,2$ mm)



Grafická závislost válcovitosti díry V na číslu obrobku (nástroj MT1–CVDdia, $f_{ot} = 0,4$ mm)



Grafická závislost válcovitosti díry V na číslu obrobku (nástroj MT2–CVDdia, $f_{ot} = 0,2$ mm)



Grafická závislost válcovitosti díry V na číslu obrobku (nástroj MT2–CVDdia, $f_{ot} = 0,4$ mm)

