

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY**DOKONČOVACÍ METODY OBRÁBĚNÍ A JEJICH
MÍSTO V MODERNÍ VÝROBĚ**

FINISHING METHODS OF MACHINING AND THEIR POSITION IN MODERN PRODUCTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS**AUTOR PRÁCE**
AUTHOR**VOJTĚCH BUĎA****VEDOUCÍ PRÁCE**
SUPERVISOR**prof. Ing. BOHUMIL BUMBÁLEK, CSc.**

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Vojtěch Buďa

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

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

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

Dokončovací metody obrábění a jejich místo v moderní výrobě

v anglickém jazyce:

Finishing methods of machining and their position in modern production

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Současné tendence v technologických oborech jsou zaměřeny na zmenšování rozměrů součástí a na zvyšování jejich jakosti. Tím nabývají na svém významu dokončovací operace obrábění jak nástroji s definovanou, tak i nedefinovanou geometrií.

Cíle bakalářské práce:

Počet materiálů, které jsou dokončovány přesnými metodami obrábění se zvětšuje. Velmi významný je vliv dokončovacích technologií na jakost obrobeneho povrchu

1. Rozbor mechanismů dokončovacích metod
2. Dokončovací metody nástroji s definovanou geometrií
3. Dokončovací metody nástroji s nedefinovanou geometrií
4. Hodnocení vlastností dokončených povrchů
5. Názor na využití dokončovacích metod v současné výrobě.

Seznam odborné literatury:

1. SEMINÁŘ: Vliv dokončovacích metod obrábění na jakost výrobku. Sylaby přednášek. Brno: Kongresové Centrum. 2001. 40 s. 24.9.2001
2. BATORA, B., VASILKO, K. Obrobené vrchy, technologická dědičnost, funkčnost. Trenčín: TU Trenčín, 2000. 184 s. ISBN 80-88914-19-1
3. WHITEHOUSE, D. Surfaces and their measurement. Londýn : Kogan Page Science Paper Edition. London, 2002. 389 s. ISBN 1-9039-9660-2
4. KOMADURI. R., LUCCA, D., TANY. A. Technological Advances in Fine Abrasive Processes. Annals of CIRP, Vol.46/2. 1997.

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Bohumil Bumbálek, CSc.

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

V Brně, dne 10.11.2008

L.S.

doc. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Dokončovací operace představují významnou část výrobních technologií. Mají totiž výrazný vliv na funkční vlastnosti součásti. Operace dokončování se dělí na operace nástroji s definovanou geometrií a na operace nástroji s nedefinovanou geometrií. Dřívější praxe je taková, že dokončovací operace byly realizovány převážně nástroji s nedefinovanou geometrií. V současné době, kdy se objevují dokonalé nástrojové materiály nabývají na velkém významu i operace dokončování nástroji s definovanou geometrií – soustružení, frézování. Přesto operace dokončování povrchů nástroji s nedefinovanou geometrií nejsou opomíjeny a je jim věnována náležitá pozornost. Směry rozvoje těchto technologických operací je možné vidět ve volbě brusiva, ve volbě brousicích kotoučů i ve vlastním procesu dokončování, především při dokončování křehkých materiálů.

V práci je provedena analýza a zhodnocení dokončovacích metod a hlavní pozornost je věnována pokrokovým metodám broušení tj. broušení tvárnému. Tento přístup totiž umožňuje dokončovat povrch součásti s vysokou jakostí, eventuálně umožňuje vynechat i některé konečné úpravy povrchu např. leštění. Zatím se řeší otázky volby podmínek broušení tj. rezných podmínek, nástrojů a strojů. Dá se předpokládat, že tato metoda najde své uplatnění při dokončování křehkých materiálů jako je keramika, optické sklo, křemík nebo germanium.

Klíčová slova

Broušení, dosažitelná přesnost, vlastnosti povrchové vrstvy

ABSTRACT

Finishing operations represent important part of manufacturing technologies. They have expressive influence on functional product properties. Finishing operations are classified as operations with the defined tool geometry and as operations with non defined tool geometry. In earlier time, the finishing operations were realised mostly by the tool with non defined geometry. At this time, in which appear perfect tool materials take the value between finishing operations the operations using the tools with defined geometry like turning, milling. Still the finishing operations by the tool with non defined geometry are not forgotten and it takes a proper care of them. The progress direction of these technological operations is in the choice of grinding materials, in the choice of grinding wheels and also in proper finishing process first of all when finishing the brittle materials.

In the report there is performed the analysis and evaluation of finishing methods and the main attention is focused on advanced grinding methods e.i. of ductile grinding. This access facilitates to achieve the surfaces with very high accuracy or to enables to omit some of final arrangement of the surface. Since there are solved the questions of cutting tools conditions selection and

machine tools. It can be assumed that this method will be applied when finishing brittle materials as ceramics, optical glasses, silicon or germanium.

Key words

Grinding, attainable accuracy, surface layer properties

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BUĎA, V. *Dokončovací metody obrábění a jejich místo v moderní výrobě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 27 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Bohumil Bumbálek, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Dokončovací metody obrábění a jejich místo v moderní výrobě vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

9. 5. 2009

.....
Vojtěch Buďa

Poděkování

Děkuji tímto prof. Ing. Bohumilu Bumbálkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	6
Poděkování.....	7
Obsah.....	8
1. Úvod.....	9
2. Problematika vysoce přesných výrobních metod.....	11
2.1 Historický vývoj.....	12
3. Proces broušení a jeho charakteristiky.....	15
3.1 Broušící kotouč.....	17
3.2 Materiály brusiva.....	18
3.3 Zrnitost brusiva.....	18
3.4 Tvrdost kotouče.....	19
3.5 Struktura kotouče.....	19
3.6 Pojivo.....	19
3.7 Vady při broušení a jejich příčiny.....	20
4. Vysoce přesné dokončovací operace a jejich význam.....	21
5. Materiály pro vysoce přesné obrábění.....	22
6. Proces vysoce přesného obrábění a jeho vliv na vlastnosti povrchové vrstvy.....	23
7. Závěr.....	25
Seznam použitých zdrojů.....	26

1. ÚVOD

Počet součástí, na které jsou kladeny vysoké funkční požadavky, vzrostl během několika posledních let. Tyto požadavky vycházejí z nároků na bezpečnost a spolehlivost provozu součástí i celých zařízení. Technologie musí proto hledat a hodnotit vlivy výrobních metod na fyzikálně chemické vlastnosti ploch dokončené různými technologickými způsoby a to z hlediska jejich funkce jako je např. tření, opotřebení, únavové vlastnosti, nebo z hlediska jakosti. Obrobená plocha, která je vytvořena jako výslednice geometrických a kinematických vztahů nástroje a obrobku je podmíněna řadou průvodních jevů, které je nutné znát pro jejich ovlivňování a řízení. Každý výrobek musí být vyroben v potřebné jakosti. Nepravidelnosti a poruchy, které vznikají na obrobené ploše jsou dnes vyjadřovány v kvantitativních jednotkách.

Konstrukce strojů a zařízení jsou ve velké míře namáhány dynamicky. Příklady z provozů a analýzy lomů dynamicky namáhaných součástí ukazují, že iniciace únavového lomu začíná obvykle na povrchu součásti nebo těsně pod povrchem. Povrch součásti, jeho stav a jakost povrchu jsou tudíž prvotními činiteli, kteří zásadně ovlivňují funkční vlastnosti povrchu i celé součásti.

Během dokončování funkčních ploch, které se provádí nejčastěji obráběním, mohou v povrchové vrstvě obrobku vzniknout následující změny:

- povrch je plasticky deformován
- dochází k fázovým transformacím
- mění se tvrdost povrchové vrstvy
- vznikají mikro a makro trhliny
- vznikají zbytková napětí
- vznikají změny v povrchové vrstvě v důsledku absorpce

Dokončovací technologické operace představují oblast, která se stává nezbytným předpokladem moderní výroby, protože vede ke zvyšování jakosti, spolehlivosti a životnosti součástí i celých zařízení. Rozhodující úlohu sehrávají ty technologie, které zabezpečují rozměrovou i tvarovou přesnost a odpovídající texturu povrchu. Technologické základy dokončovacích metod obrábění spočívají v odebrání malých přídavek materiálu v malých rozměrech třísek, které lze realizovat jak nástroji s definovanou, tak i nedefinovanou geometrií (broušením). Nově vytvořené povrchy mohou poté být hodnoceny různými metodami, mezi kterými zaujímá významné místo hodnocení zbytkových napětí. (1)

Technologie obrábění je multi-disciplinární vědní obor spojený s ekonomikou, která v těchto případech sehrává významnou úlohu. Poslední odborné práce ukazují, že je nutné a velice potřebné spojení technologie a managementu při využívání informačních technologií. Týká se to například spojení plánování výrobních procesů, simulace výrobních systémů, pružné výroby, rychlé konstrukce nových výrobků, modelování prvků výrobních zařízení včetně lidské obsluhy, funkční analýzy výrobků, virtuálního obrábění, kontroly a dalších. Důvody pro řešení těchto problémů technologie obrábění jsou ve zmenšování rozměrů součástí, v požadavcích na jakost, malých tolerancích a přesnosti vlastní výroby,

v požadavcích na snižování nákladů, zmenšování hmotnosti výrobků, na snižování počtu výrobků v sérii apod. Tyto důvody se promítají především do procesu řezání tj. do požadavků na nástroje, materiál nástroje, materiál obrobku a pracovní prostředí. Současně s těmito požadavky jsou formulovány i požadavky na obráběcí stroje. Ústředním bodem technologie obrábění je provozní schopnost a řízení výrobního systému, schopnost předvídat a vyhodnocovat proces řezání.

Fyzikální podstata dokončovacích metod obrábění musí vycházet z energetického působení na daný polotovár při jeho přetváření na hotový výrobek a využívané procesy je nutno nejen řídit, ale také je rozvíjet a získané poznatky dále zpracovávat. Jedná se o fyzikální veličiny jako jsou teplota řezání, řezná síla, deformační chování materiálu, opotřebení nástroje a tyto veličiny je nutno dále promítat do konečných vlastností obrobku. Všechny veličiny budou ale u dokončovacích metod obrábění o 2 až 3 řády menší než u obrábění běžného. Z hlediska praktických aplikací to znamená realizovat na výrobních strojích a zařízeních adaptivní systémy, tj. nainstalovat senzory, které budou snímat sledované veličiny a tím řídit celý proces obrábění, s cílem zvyšování požadované přesnosti. (2, str. 5)

2. PROBLEMATIKA VYSOCE PŘESNÝCH VÝROBNÍCH METOD

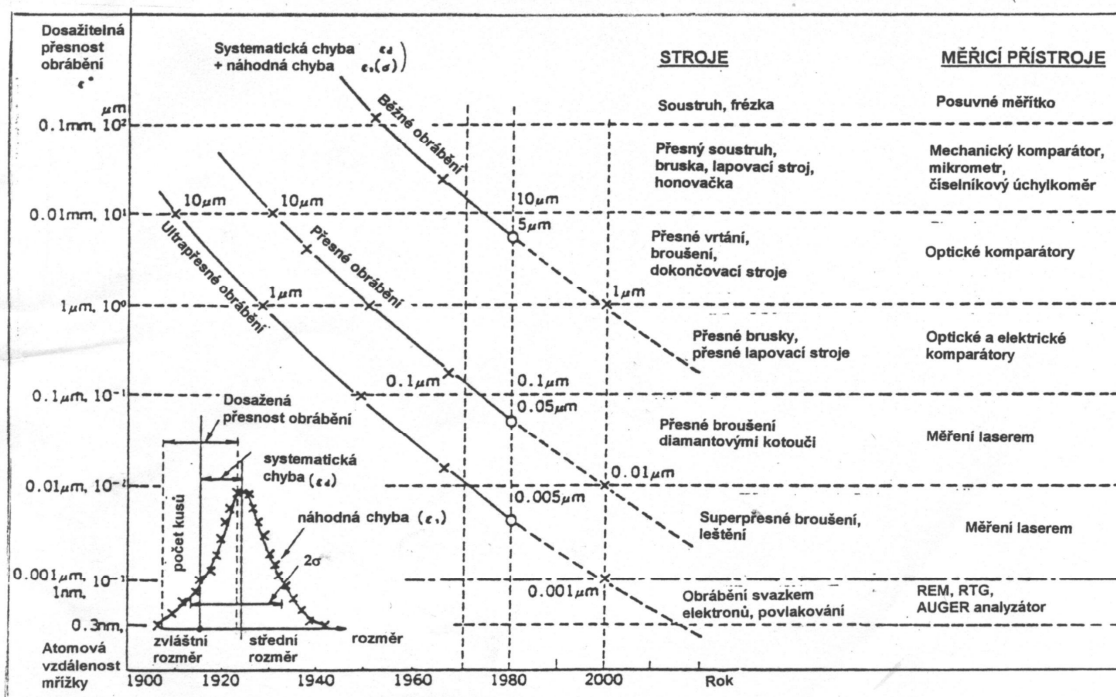
Vysoce přesné technologické procesy zajímají dnes konstruktéry, technology, metrology i pracovníky provozů. Konstruktéry proto, že tyto vysoce přesné technologické procesy jsou cestou k úspěšnému zavádění moderních konstrukcí, nebo se uplatňují při miniaturizaci výrobků. Technologům tyto procesy umožňují dokončovat součásti s tolerancemi v nanometrech a se zrcadlově lesklým povrchem. Takové povrchy se uplatní nejen ve strojírenství, ale i v oborech jako je opto-elektronika, optika, biomedicína apod. Metrologové mají možnost využívat nové kontrolní a měřicí metody, které zaručují vysokou jakost výrobků a tak přispívají k vyšší spolehlivosti a životnosti zařízení. Pracovníci provozů budou moci spoléhat na to, že výrobky, které budou využívat a obhospodařovat, budou funkčně velmi spolehlivé.

Podstatou těchto vysoce přesných technologických procesů je odebrání malých rozměrů přídavků, tj. malých třísek s malými posuvy a malými hloubkami řezu. Tím vznikají jisté problémy, které musí být řešeny správnou volbou geometrie nástroje a pracovními podmínkami. (2, str. 4)

Vysoce přesné technologie jsou předurčeny svými možnostmi jako „technologie 21. století“. To ale vyžaduje, aby byla stanovena strategie vysoce přesných technologií, aby se dále rozvíjely a aby se v široké míře uplatňovaly v hromadné a cenově dostupné výrobě. Již dnes se dá předpokládat, že řada technologických mikroprocesů a systémů bude mít hybridní formy, které budou směsí nano-, mikro- a makropřesných technologií. Cílem bude snaha dosáhnout vyšší spolehlivosti, miniaturizace, snazší výroba a cenová přístupnost. (2, str. 5)

2.1 HISTORICKÝ VÝVOJ

Množství odebíraného materiálu u dokončovacích metod obrábění je malé a pohybuje se řádově pod mikrometr nebo méně. Norio Tanaguchi (1974) (3) stanovil cíle vysoce přesných výrobních procesů. V roce 1983 (4) uvedl ve svém příspěvku historický přehled obráběcích procesů z hlediska dosažitelné přesnosti a doplnil jej i o přesnosti dosažitelné při přesném obrábění. Tyto údaje doplnil o zařízení pro kontrolu přesnosti opracovaných součástí (obr. 2.1).



Obr. 2.1 Dosažitelná přesnost při obrábění (podle Tanaguchi, 1983)

Křivky uvedené na obr.1 ukazují, že dosažitelná přesnost až 1 nm se dá dosáhnout jak reznými nástroji, tak i metodami abrazivními a procesy, které využívají svazek elektronů, laser a rastrovací metody pro hodnocení obrobené plochy. Tanaguchi předpověděl, že v roce 2000 bude dosažitelná přesnost při běžném obrábění 0,01 μm až 0,001 μm. V současné době se jeho předpovědi naplňují. (2, str. 6)

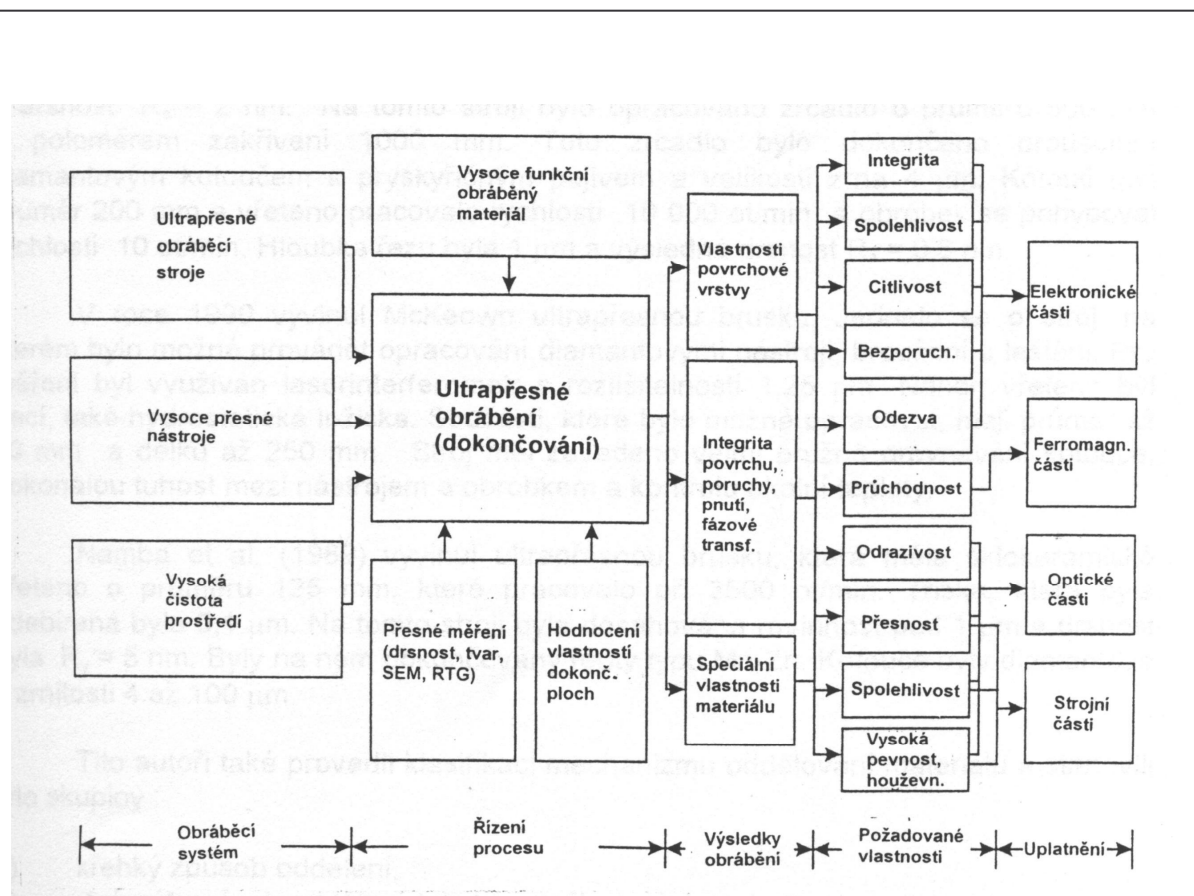
Nogawa, 1988 (5) provedl klasifikaci procesů oddělováním materiálů z hlediska energie nutné pro jejich realizaci (tab. 2.1). Při zpracování klasifikace bral v úvahu oddělování materiálu jak nástrojem s definovanou geometrií, tak i nástrojem s geometrií nedefinovanou.

<i>Mechanické procesy</i>	Abrazivní obrábění	Brousicí kotouč	Ultrapřesné broušení
			Honování
			Magnetické leštění
			Obráb.povl.brusivem
			Omilání
	Lapování		
	Obrábění volným brusivem	Ultrapřesné obrábění	
		Leštění	
		Hydrofínísování	
	Obráb. jednobř. nástrojem	Jednobřítý DIA-nástroj	KNB
<i>Chemické procesy</i>			Leptání
			Chemické leštění
<i>Fotochemické procesy</i>			Fotoleptání
<i>Elektro-chem.procesy</i>			Elektrolytické leštění
<i>Elektrické procesy</i>			Elektrojiskrové obrábění
			Svazek elektronů
			Obrábění svazkem iontů
			Plazma
<i>Optické procesy</i>			Laser

Tab. 2.1 Klasifikace obráběcích procesů podle energetického zdroje (Nogawa, 1988)

Technologie dokončovacích procesů využívají systémy mechanické, chemické, foto-chemické, elektro-chemické, elektrické a optické. Velkou skupinou pokrokových metod využívaných pro dokončování vysoce přesných součástí jsou metody abrazivní, kdy se nástroje ve tvaru kotoučů či volného brusiva s výhodou využívají pro dokončování tvrdých a křehkých materiálů, stejně jako metody chemické nebo elektro-chemické. (2, str. 7)

Blokové schéma takového systému je uvedeno na obr. 2.2. V tomto schématu jsou zvažovány i vlastnosti obrobené součásti, stejně jako hodnocení dosažené přesnosti a možnosti uplatnění dokončovacích metod v určitých výrobních procesech.



Obr. 2.2 Blokové schéma dokončovacích metod obrábění (Nogawa, 1988)

Důležitým výsledkem všech dokončovacích metod obrábění je nově vytvořený povrch, který tvoří vnější tvar předmětu a je možné jej označit jako jeho „makroskopický vzhled“. Tento povrch tvoří současně rozhraní mezi dvěma fázemi a toto rozhraní se stává určujícím při hodnocení předmětu, u něhož je velice významný poměr plochy povrchu A k jeho objemu V . Je-li tento poměr $A:V$ malý, jedná se o předmět velké hmotnosti, kde při jeho hodnocení jsou významné fyzikální a chemické vlastnosti základního materiálu. Je-li tento poměr $A:V$ naopak velký, jedná se o malé předměty, kde při jejich hodnocení jsou jejich vlastnosti ovlivněny povrchem. (2, str. 9)

Řada vlastností materiálu je odvislá od druhu a stavu povrchu. S povrchem jsou spojeny některé fyzikální a mechanické vlastnosti jako je odraz světla, koroze, tvorba trhlin při cyklickém zatěžování apod. Současné tendence směřující k miniaturizaci zařízení vedou také k tomu, že využívané materiály mají strukturu jinou než materiály klasické.

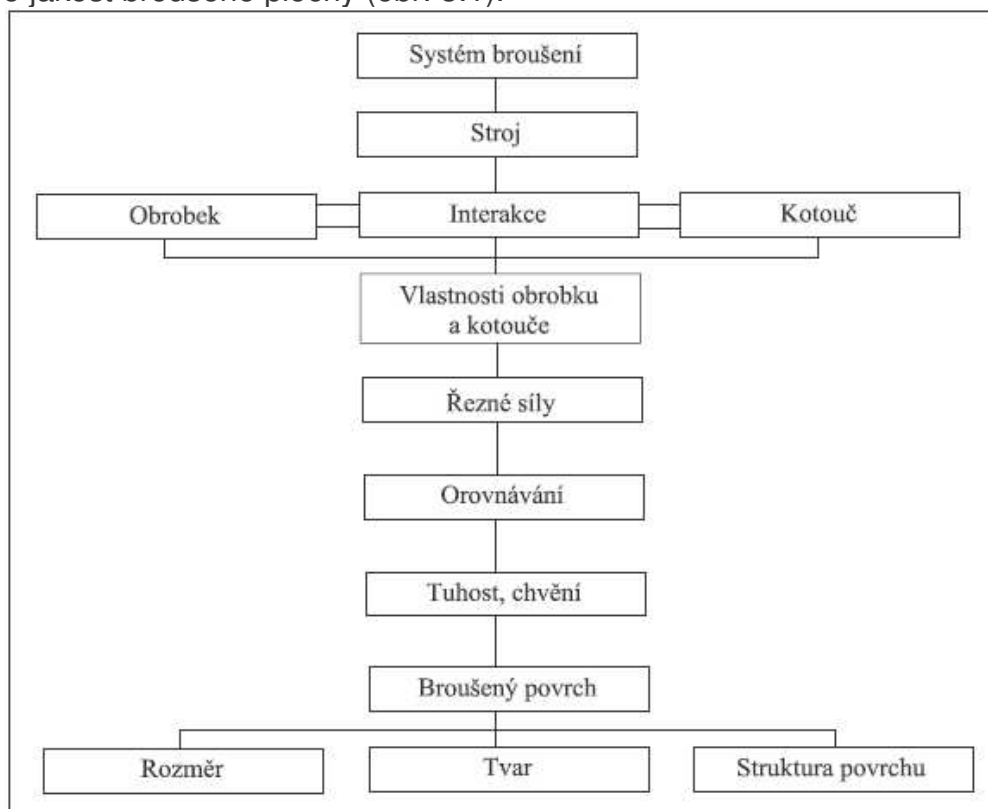
3. PROCES BROUŠENÍ A JEHO CHARAKTERISTIKY

Pro další analýzu dokončovacích metod obrábění bylo zvoleno broušení jako nejstarší metoda dokončování a možnosti jejího dalšího rozvoje.

Současné metody používané při výrobě jsou často založeny na zkušenostech pracovníků daných provozů. Tyto metody mohou být nemoderní a musí být nahrazovány metodami vycházejícími z vědeckých poznatků. Lepších výsledků je možné dosáhnout jen spoluprací pracovišť, která se touto problematikou zabývají.

Operace broušení se využívá při zajišťování vysokých požadavků na jakost výrobků tj. na jejich rozměrovou a geometrickou přesnost. Při sledování a identifikaci procesu broušení je třeba hlavní pozornost zaměřit na hodnocení průběhu jeho stability a na situace, kdy je tato stabilita narušena. Tento postup se stává významným při dokončování součástí jako jsou např. ložiska nebo hřídele. Pro úspěšné řešení těchto operací je nutné shromažďovat podrobnější informace o broušené ploše a o průběhu cyklu broušení.

Vady, které nastávají při broušení, se projeví na broušené ploše, a to v její struktuře profilu nerovnostmi a v úchylných geometrických tvarech, např. hrubovitostí. Konečný tvar obrobku je totiž ovlivněn celým systémem broušení tj. všemi díly stroje, které vstupují do procesu broušení, vlastnostmi materiálu obrobku a nástroje. Právě celý tento systém určuje chování procesu broušení tím, že probíhá za stabilních nebo nestabilních podmínek. Pro pochopení stavu tohoto procesu je nutné vyjít ze systémového postupu, kterým je interakce konstrukce stroje, nástroje a obrobku. Tyto složky totiž určují meze pro výsledek broušení a pro jakost broušené plochy (obr. 3.1).



Obr. 3.1 Schéma systému broušení

Řada autorů, kteří se zabývali těmito problémy, se zaměřila např. na stabilitu brusky tj. na tuhost stroje, tuhost brousícího kotouče a tuhost obrobku při zvolené hloubce řezu. Pro určitý proces broušení je možné experimentálně zjišťovat různé tuhosti a vyjádřit je v závislosti na změřených řezných silách, na hloubce řezu, na velikosti přísuvu, opotřebením brousícího kotouče nebo při jeho orovnávaní. Všechny tyto vlivy se ale projevují chováním a změnou struktury povrchu a broušené plochy. Práce, které byly zaměřeny např. jen na sledování řezných sil při broušení nedávají možnost získat dostatek informací o chování tohoto systému. Je tedy nutné sledovat a hodnotit i další podsystémy tj. brát v úvahu chování materiálu při probíhající plastické deformaci, postup orovnávaní brousícího kotouče a také chování celého technologického systému a zaměřit se na hodnocení výsledku broušení tj. na vlastnosti broušeného povrchu. Teoretické práce, které se zabývají problematikou broušení, hodnotí tento proces především z hlediska hoření a oddělování třísky. Má-li ale být věnována pozornost tomu, že se jedná o proces plastické deformace, která probíhá za extrémních podmínek zatěžování, za vysokých měrných tlaků, za vysokých teplot a za vysoké deformační rychlosti, pak všechny tyto vlivy se projeví především na změnách vlastností broušeného materiálu. A právě toto jsou skutečnosti, které se projevují tím, že proces plastické deformace se může měnit tj. tedy, že plastická deformace může proběhnout jako stabilní nebo může dojít k její nestabilitě. Tato nestabilita, které je ovlivněna především deformační rychlostí, se projeví v mechanice oddělování třísky a může i ve frekvenci její tvorby. To jsou skutečnosti, které je třeba pozorovat a odhalovat. Je to úkol velice obtížný především proto, že hodnocení plastické deformace a všech průvodních jevů je velmi různorodé. Proto je třeba zaměřit pozornost na broušenou plochu. Je totiž možné najít informace nejen o tom, jak broušená plocha vznikla, ale také to, zda se stroj v průběhu procesu broušení chvěl, jaké měl vlastnosti apod.

Druhou oblastí, která nám může poskytnout dobré informace o procesu broušení, je tedy chvění stroje. Samotná část o sobě nedokáže vypovědět všechno o procesu broušení, spojí-li se ale hodnocení chování celého technologického systému s hodnocením struktury nerovnosti povrchu po broušení, pak je to způsob, který může prospět k dalšímu objasnění podkladů o procesu broušení.

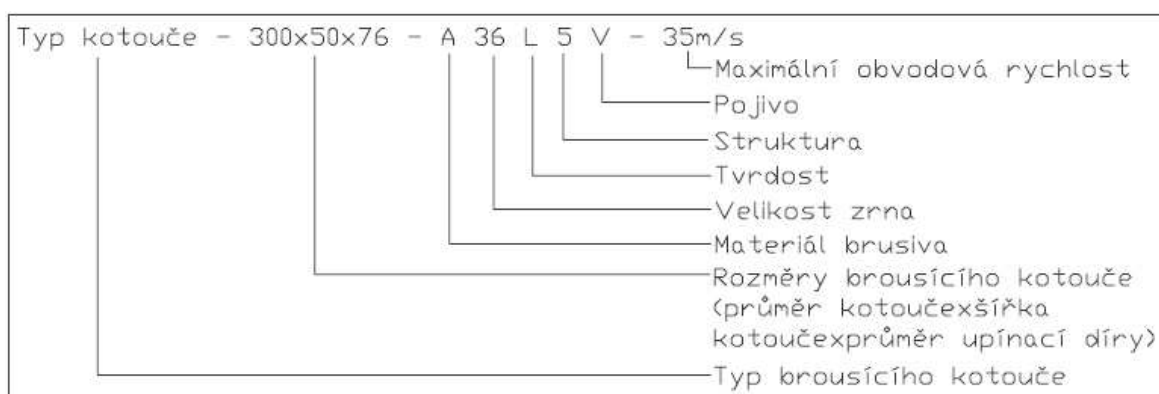
Při broušení válcových ploch vznikají dva typy vibrací: chvění kotouče a chvění obrobku. Oba tyto typy chvění se projeví na geometrické přesnosti obrobku. Tyto vibrace se postupně během broušení mohou měnit a to tak, že přecházejí ze stavu stabilního do stavu nestabilního. Při absenci chvění mohou být vlivy jako házení brousícího kotouče, házení vřetene, chvění vyvolané řemenicí, řemeny apod. Z těchto skutečností pochopitelně vycházejí i opatření, která mohou chvění kotouče předcházet. Jedná se o častější orovnávaní brousícího kotouče, snížení řezných sil, zvýšení tuhosti kotouče i uložení obrobku, použitím procesních kapalin, případně úpravou řezných podmínek.

Chvění obrobku se obvykle projevuje vlnou na obvodě obrobku. Tato vlna při otáčení způsobuje vibrace systému. Nestabilita je způsobena zvětšením této prvotní vlny a jejím rozšířením po celém obvodu. Pokusy bylo zjištěno, že chvění obrobku lze snížit tím, že styková délka kotouče s obrobkem je větší než polovina délky chvění. Z tohoto se dají sestavit podmínky pro omezení chvění obrobku. Jedná se o snížení pracovní rychlosti, použití měkčích kotoučů větší hodnoty ekvivalentního průměru či použití tlumičů. (15)

„Broušení je tedy dokončovací metoda obrábění rovinných, válcových nebo tvarových vnějších a vnitřních ploch nástrojem, jehož břity jsou tvořeny zrna tvrdých materiálů. Nástrojem jsou nejčastěji brousící kotouče, v nichž jsou brusná zrna spojená navzájem vhodným pojivem. Zrna jsou v brousícím kotouči rozmístěna náhodně a mají různé tvary. Kromě brousících nástrojů se používá také volné brusivo. Při broušení je současně v záběru velké množství zrn, která odebírají třísky velmi malých průřezů. Broušení se v současném strojírenství používá na dokončovací obrábění ploch s vysokou přesností a vysokou jakostí obrobeného povrchu a na opracování materiálu s vysokou pevností a tvrdostí, kde je obrábění jinými nástroji obtížné nebo nemožné (kalené oceli, keramické materiály apod.). Hlavní pohyb při broušení vykonává nástroj, posuv koná obrobek a přísuv do řezu může vykonávat buď obrobek nebo brousící kotouč. Kromě brousících kotoučů se pro broušení používají brousící segmenty, kameny a pásy, obsahující zrna brusiva ve vhodném pojivu. Nejčastěji se však používají brousící kotouče. Materiály brusiva jsou buď přírodní jako např. smírek, granát, diamant nebo umělá např. umělý korund, karbid křemíku, umělý diamant či kubický nitrid bóru (uvedeme si dále). Stroje na broušení se nazývají brusky. Dělí se podle prováděných operací na hrotové, na díry, bezhroté, rovinné, nástrojařské, pásové a speciální.“ (12)

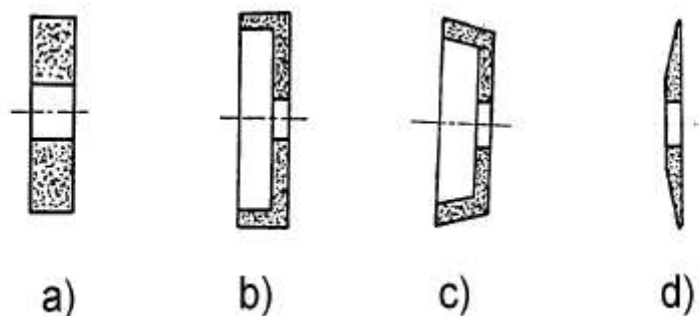
3.1 BROUSÍCÍ KOTOUČ

V dnešní době je celá řada výrobců, kteří se zabývají vývojem a výrobou brusných kotoučů. Je tedy na nás, který brusný kotouč si vybereme pro naši operaci broušení. Nesmíme však zapomenout na to, že je velice důležité uvážit, o jakou operaci broušení se jedná, neboť na každý druh broušení je možné užít jiný, avšak nejvíce vhodný brousící kotouč (daná struktura, tvrdost apod.). Volba brousícího kotouče tedy záleží na řadě faktorů např. na tvaru broušené plochy, materiálu obrobku apod. Příklad označení takového brousícího kotouče najdeme na obr. 3.2.



Obr. 3.2 Označení brousícího kotouče (16)

Na následujícím obr. 3.3 můžeme vidět základní tvary jednotlivých brousicích kotoučů.



Obr. 3.3 Brousicí kotouče – a) plochý, b) hrncový, c) miskový, d) talířový (12)

3.2 MATERIÁLY BRUSIVA

Brusiva a brusné prostředky jsou krystalické látky zrnitého někdy až mikrokrytalického složení, kterými dokážeme opracovat daný materiál na nejjemnější povrch. Brusiva dělíme podle původu na přírodní brusiva a syntetická brusiva. Jako přírodní se osvědčily nerosty – diamant, korund, břidlice, pazourek, pemza, pískovec, granát a smirek. Umělá brusiva se stále více rozšiřují a řadíme sem syntetický korund (tavený oxid hlinitý), syntetické diamanty, karbid křemíku (známý jako karborundum), karbid bóru či kubický nitrid bóru. V následujícím přehledu si uvedeme značení těch nejpoužívanějších z nich. (13)

umělý korund (oxid hlinitý Al_2O_3)	A	bílý	99A
		růžový	98A
		hnědý	96A
		černý	85A
karbid křemíku (SiC)	C	zelený	49C
		černý	48C
karbid bóru (B_4C)	B		
kubický nitrid bóru (N_2B_3)	BN		
diamant (přírodní i umělý)	D		

3.3 ZRNITOST BRUSIVA (VELIKOST ZRNA)

Brusná zrna mají různou velikost, a proto musí být označena, abychom je mohli správně použít. Zrnitost brusiva se udává v palcích (coulech) podle počtu ok v sítu na ploše jednoho coulu čtverečního, kterou musí dané zrno propadnout podle normy ČSN ISO 525. Podle tohoto kritéria dělíme zrna do následujících tříd:

hrubá	4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 22, 24
střední	30, 36, 40, 46, 54, 60
jemná	70, 80, 90, 100, 120, 150, 180
velmi jemná	220, 240, 280, 320, 360, 400, 500, 600, 800, 1000

Brousící zrna v kotouči mohou dobře ubírat materiál jen tenkrát, jsou-li ostrá a mají-li nezbytnou mezeru pro třísky. Během broušení se zrna otupí, mezery se zanesou, kotouč se uhladí a někdy se též deformuje jeho povrch. Kotouč pak pálí a nemá možnost řezat. Orovnáním se zanesený, zalepený a otupený kotouč zdrsní, otevře a poopraví tvar, případně se upraví nový profil. Pro orovnávaní, ostření a profilování brousících kotoučů se používá v zásadě tří druhů nástrojů: mechanických orovnávačů, keramických orovnávačů a diamantů.

3.4 TVRDOST KOTOUČE

Neméně důležitá vlastnost brusiv je jejich tvrdost. Značí se velkými písmeny řazenými podle abecedy od D do Z. V následující tab.3.1 je možno vidět značení zrn podle tvrdosti.

stupeň tvrdosti	písmenné označení
velmi měkké	D, E, F, G, H
měkké	I, J, K,
střední	L, M, N, O
tvrdé	P, Q, R, S
velmi tvrdé	T, U, V
mimořádně tvrdé	X, Y, Z

Tab. 3.1 Značení zrn podle tvrdosti (13)

3.5 STRUKTURA KOTOUČE

Strukturu kotouče nám udává číslo od 0 do 14. Čím vyšší je toto číslo, tím větší je vzdálenost mezi zrny a tím větší jsou póry. Rozlišujeme tyto struktury kotouče:

hutná (3, 4)	objem pórů kolem 15% (tvrdý a křehký materiál)
polohutná (5, 6)	objem pórů 25%
pórovitá (7, 8)	objem pórů 35% (pro houževnatý materiál)

3.6 POJIVO

Pojivo mimo jiné spojuje zrna brusiva, určuje tvrdost brousícího kotouče a zásadním způsobem ovlivňuje výkon broušení, životnost kotouče, tvarovou stálost, samoostřicí vlastnosti apod. Pro volbu pojiva je kromě broušeného materiálu a druhu brusiva nutné určit také druh operace a způsob broušení.

brusivo A, C	pojivo	keramické	V
		pryžové	R
		z umělé pryskyřice	B
		šelakové	E
		magnezitové	Mg
brusivo BN, D	pojivo	kovové (bronz)	
		keramické	
		z umělé pryskyřice	

3.7 VADY PŘI BROUŠENÍ A JEJICH PŘÍČINY

Všechny tyto části, které jsme si uvedli v předchozích bodech, mají zásadní vliv na konečnou kvalitu obrobené plochy, neboť spolu úzce souvisí. Je proto tedy nutné mít přehled, která nevhodně zvolená část či vlastnost broušícího kotouče může mít za následek velmi nízkou jakost nebo rozměrovou přesnost obrobku. V následující tabulce si tedy uvedeme chyby a příčiny, které mohou nastat při procesu broušení (tab. 3.2).

Chyba	Příčina
<i>Broušící kotouč se zamazává a pálí</i>	Broušící kotouč je příliš tvrdý Zrnitost kotouče je příliš jemná Obvodová rychlost je příliš velká Broušící kotouč je špatně ovrnán
<i>Broušící kotouč se příliš rychle opotřebovává</i>	Broušící kotouč je příliš měkký
<i>Broušící kotouč málo ubírá</i>	Broušící kotouč je příliš tvrdý Zrnitost je příliš jemná
<i>Broušící kotouč neudrží profil</i>	Broušící kotouč je příliš měkký Zrnitost je příliš hrubá Počet otáček je příliš malý
<i>Stopy po chvění na obroušené ploše</i>	Bruska nepracuje klidně Nevyváženost u velkých kotoučů Ložisko včetně brusky není v pořádku Broušící kotouč není správně vyvážen Broušící kotouč je příliš tvrdý
<i>Rysky na obroušené ploše</i>	Nečistota v chladicí kapalině
<i>Skvrny na ploše</i>	Broušící kotouč je příliš tvrdý nebo příliš jemný Posuv je příliš velký Rychlost obráběného kusu je příliš malá Chladicí kapalina není vhodná
<i>Broušící kotouč tluče</i>	Nesprávné uložení brusky Broušící kotouč je špatně ovrnán

Tab. 3.2 Vady při broušení a jejich příčiny (14)

4. VYSOCE PŘESNÉ DOKONČOVACÍ OPERACE A JEJICH VÝZNAM

Vysoce přesné dokončovací metody mají výrazný vliv na další vývoj nových výrobků. V současné době je možné zaznamenat různé stupně vývoje těchto systémů - od makrotechnologie přes mikrotechnologie, až k nanotechnologiím. V budoucnu bude výroba orientována na daleko širší využívání vysoce přesných součástí a zařízení. K tomu bude nutná predikce výsledků výrobních operací, především jejich jakosti.

Obráběcí systémy uplatňované ve vysoce přesné výrobě mohou být posuzovány ze dvou hledisek :

- technického, tj. z hlediska dosažitelné jakosti
- ekonomického, tj. z hlediska pracnosti, ceny a prodejnosti.

Vysoce přesné způsoby obrábění se využívají pro dokončování různých materiálů ze skupiny kovů, slitin, keramiky, skla nebo polovodičů. Tyto materiály mají různé chemické složení, strukturu, mechanické vlastnosti apod.

Z hlediska procesu obrábění je možné porovnávat dvě skupiny materiálů: materiály tvárné a materiály křehké. V každé skupině je nutné počítat s určitými zvláštnostmi při jejich opracování.

Z tohoto hlediska je možné procesy odebrání materiálu při obrábění rozdělit do těchto skupin (5, 6, 7):

- oddělování materiálu křehkým porušením
- oddělování materiálu tvárným porušením

Kvalitativní porovnávání tvárných materiálů a materiálů křehkých ukazuje nejen na jejich rozdílné vlastnosti, ale také na potíže při jejich dokončování.

Kovy mají kovovou vazbu, vysokou symetrii, krystalickou strukturu (mřížka BCC, FCC), mají vysokou tepelnou vodivost, malou hustotu, žádnou porezitu, vysokou čistotu, vysokou lomovou houževnatost, vysokou deformaci do porušení a vysokou rázovou energii.

Oproti tomu nekovové materiály jsou charakteristické vazbou kovalentní nebo iontovou, dále nízkou symetrií, pro plastickou deformaci nevhodným skluzovým systémem, nízkou tepelnou vodivostí, nízkou lomovou houževnatostí a nízkou lomovou energií. (2, str. 11)

5. MATERIÁLY PRO VYSOCE PŘESNÉ OBRÁBĚNÍ

Rozsah materiálů, které jsou využívány pro vysoce přesné metody dokončování, zahrnuje kovy a jejich slitiny, keramiku, skla, polovodiče a další. Všechny tyto materiály mohou být dokončeny s požadovanou rozměrovou, tvarovou přesností a integritou povrchu, jak to vyžadují funkční vlastnosti obrobené plochy.

Poněvadž ve vysoce přesné výrobě zaujímá významné místo mikroelektronika, dostávají se do popředí zájmu technologie materiály, které se v tomto odvětví hodně využívají. Jsou to materiály polovodičové a křemík. Na druhé straně i tradiční materiály, jako jsou kovy, polymery a keramika jsou velmi vhodné pro hromadnou výrobu a proto jsou využívány i pro výrobu vysoce přesnou.

Pokud jde o kovy, jejich množství je značné především s ohledem na strukturu, chemické složení, fyzikální a chemické vlastnosti. Kovové materiály, které budou dokončovány vysoce přesnými metodami obrábění, budou spíše oceli vysoce pevné, kalené a některé speciální materiály, materiály o vysoké tvrdosti, nanokompozitní slinuté karbidy a další.

Mezi nekovovými materiály to budou materiály křehké, především materiály keramické, optická skla, polovodičové materiály, které jsou dokončovány převážně abrazivními metodami obrábění. Významné místo mezi nekovovými materiály má keramika, která se v současné době využívá jako konstrukční materiál v aplikacích mechanických, elektromagnetických, optických, tepelných i biochemických. (2, str. 12)

V tab.5.1 jsou porovnány vlastnosti kovů a nekovů, které se mohou uplatňovat v oboru přesného obrábění. Množství materiálu pro přesnou výrobu je ale malé.

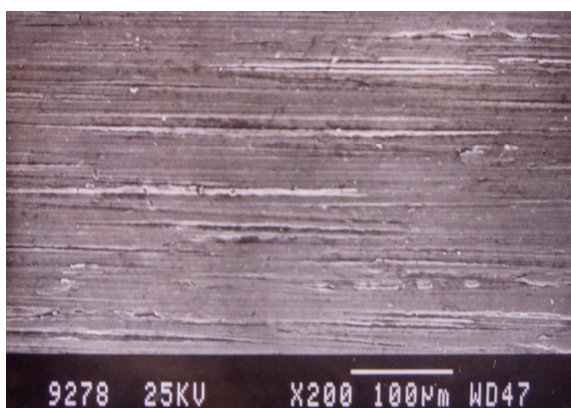
Vlastnosti	kovy	nekovy
Druh mřížky	kovová neusměrněná	iontová, kovalentní, usměrněná
Krystalická struktura	vysoká symetrie	nízká symetrie
Tepelná roztažnost	vysoká	nízká
Tepelná vodivost	vysoká	nízká
Hustota	vysoká	nízká
Způsob deformace	tvárný	křehký
Mikrostruktura		
Interkrystalická struktura	relativně jednoduchá	komplexní
Porozita	bez pórů	porézní
Čistota	vysoká	dosažení obtížné
Tepelná odolnost	nízká až mírná	mimořádně vysoká
Chemická odolnost	nízká	vysoká
Pevnostní charakteristiky		
Houževnatost [MN/m ²]	210 – ocel 34 – Al slitiny	5,3 Si ₃ N ₄
Deformace do lomu	5%	0,20%
Mechanismus lomu	plastická deformace	křehký lom
Lomová energie [J/cm ²]	10	10.11
Odolnost proti tepelným šokům	vysoká	nízká

Tab.5.1 Porovnání významných vlastností tvárných kovů a křehkých nekovů (2)

6. PROCES VYSOCE PŘESNÉHO OBRÁBĚNÍ A JEHO VLIV NA VLASTNOSTI POVRCHOVÉ VRSTVY

Základní problém vysoce přesných metod obrábění je v malém rozměru odebírané třísky a v množství poruch v povrchové vrstvě, které se projevují trhlinami. Počet trhlin se zmenšuje se zmenšováním nedeformované tloušťky třísky a to jako důsledek plastického chování materiálu. Proto se v poslední době objevují práce pojednávající o „tvárném procesu“ řezání křehkých materiálů.

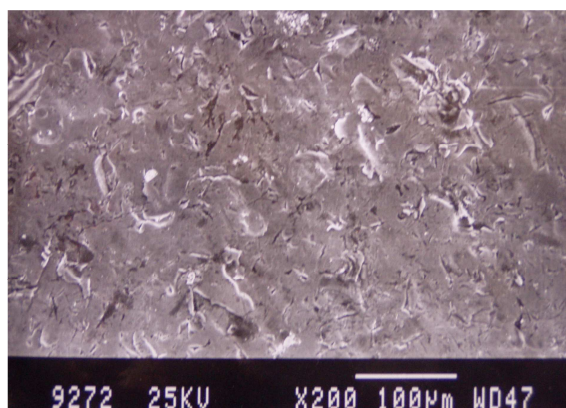
Drsnost povrchu a vlastnost povrchové vrstvy sehrávají významnou roli při hodnocení dokončovacích operací. Znalost vlastností povrchové vrstvy dává možnost jejich uplatnění při predikci funkčního chování obrobku.



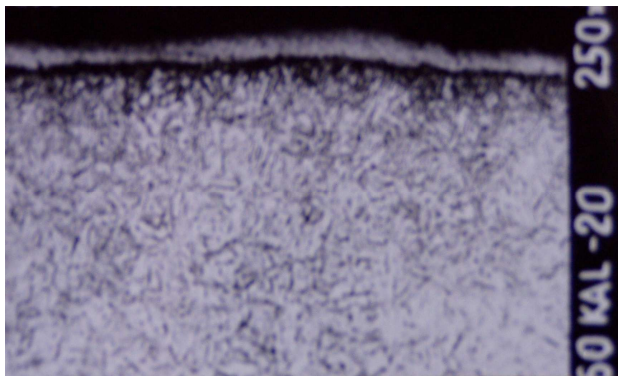
Povrch vzorku po leštění
Počet cyklů 9,858.600;
 $\sigma_0 = 475\text{MPa}$



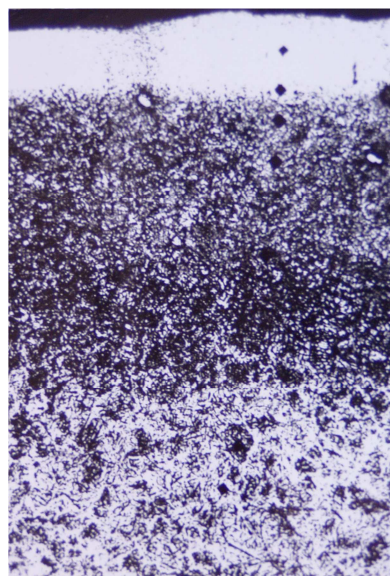
Povrch vzorku po leštění
Počet cyklů 2,174.800;
 $\sigma_0 = 475\text{MPa}$



Povrch vzorku po balotínování
Počet cyklů 588.900
 $\sigma_0 = 475\text{MPa}$



Mikrovýbrus povrchové vrstvy zakalené a broušené oceli 12050 (zvětšení 250x)



Mikrovýbrus bílé povrchové vrstvy zakalené oceli 14109 po hrubém broušení (zvětšení 200x)

7. ZÁVĚR

U dokončovacích metod obrábění je třeba zaměřit pozornost na degradaci vlastností povrchové vrstvy. Tento degradační proces vyvolává vznik zbytkových napětí, která mohou výrazně ovlivnit funkční vlastnosti součástí.

Hodnocení dokončovacího procesu lze provádět podle jakosti i podle produktivity práce. Právě proto se dnes často provádí srovnávání výsledků broušení s výsledky dosahovanými při dokončovacím obrábění nástroji s definovanou geometrií.

Tyto skutečnosti se dají využít i při obrábění součástí o malých rozměrech, s menšími tolerancemi, při odebírání malých hloubek třísky.

Velký vliv na dokončovací procesy obrábění má obráběcí systém a jeho stabilita. Ukazuje se, že vysoká tuhost obráběcího systému je nutnou podmínkou pro jeho úspěšnou realizaci a provoz. Současně je snaha uplatnit tyto zkušenosti nejen při dokončování kovových materiálů, ale také při dokončování nekovových materiálů, které se využívají jak ve strojírenství, tak i v jiných oborech např. elektronice, letectví a kosmonautice.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. DASHÖFER HOLDING, s.r.o, nakladatelství, Praha, *Komplexní charakteristika povrchové vrstvy – integrita povrchu* [online]. poslední aktualizace 28.4.2008, [cit. 2009-5-3]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.dashofer.cz/0/0/30/188836_komplexni-charakteristika-povrchove-vrstvy-integrita-povrchu/?wa=WWW08IX&>.
2. BUMBÁLEK, B., 2004, Brno, *Vysoce přesné metody obrábění a jejich fyzikální podstata*, s.63
3. TANAGUCHI, N., 1974, *On the basic concept of Nanotechnology*, Proc.ICPE Tokyo, 2, s.18-23
4. TANAGUCHI, N., 1983, *Current State in and Future Trends of Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing*. Annals of CIRP, Vol. 32/2, s.573-582
5. NOGAWA, H., 1988, *Ceramic Processing – State of the Art of R and D in Japan*. ASME INST. Metals Park, OH
6. NAMBA, Y. et al., 1989, *Ultra-Precision Surface Grinding Having a Glass-Ceramic Spindle of Zero-Thermal Expansion*. Annals of CIRP, Vol.38/1, s.331-334
7. NAMBA, Y. et al., 1987, *Ultra-Precision Float Polishing Machine*. Annals of CIRP, Vol.36/1, s.211-214
8. NAMBA, Y. et al., 1989, *Ultra-Precision Grinding of Optical Glasses to Product Super-Smooth Surfaces*. Annals of CIRP, Vol.42/1, s.417-420
9. SEMINÁŘ: *Vliv dokončovacích metod obrábění na jakost výrobku*. Sylaby přednášek. Brno: Kongresové Centrum. 2001. 40 s. 24.9.2001
10. WHITEHOUSE, D. *Surfaces and their measurement*. Londýn : Kogan Page Science Paper Edition. London, 2002. 389 s. ISBN 1-9039-9660-2
11. BATORA, B., VASILKO, K. *Obrobené vrchy, technologická dědičnost, funkčnost*. Trenčín: TU Trenčín, 2000. 184 s. ISBN 80-88914-19-1
12. Technická univerzita v Liberci, Kolektiv autorů, Liberec, 2001, [cit. 2009-4-18]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.fs.tul.cz/dokumenty/uvodstroj/kap4.pdf>>. ISBN 80-7083-538-9.
13. Integrovaná střední škola Cheb, Kolektiv autorů, *Pomocné materiály* [online]. Cheb, 2006, [cit. 2009-4-16]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.violinschool.eu/download/materialy/materialy.pdf>>

14. Brusiva SALDO, Louny, 2008, [online]. [cit. 2009-4-23]. Dostupné na World Wide Web: < http://www.saldoln.cz/page_5.html>.
15. BUMBÁLEK, B., *Broušení*, Brno, nezveřejněný článek, [cit. 2009-4-18].
16. Střední průmyslová škola strojírenská a jazyková škola, *Broušení* [online]. Kolín, [cit. 2009-4-10]. Dostupné na World Wide Web: < http://www.sps-ko.cz/documents/STT_obeslova/Broušení.pdf >.

