

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

**Ing. Viktor Bělák**

**URČOVÁNÍ TRVANLIVOSTI NÁŘADÍ  
PŘI ZPRACOVÁNÍ KERAMIKY**

**DETERMINATION OF A LIFETIME OF A TOOL'S  
DURABILITY BY PROCESSING OF CERAMICS**

ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

Obor: Strojírenská technologie

Školitel: Doc. Ing. Imrich Lukovics, CSc.

Oponenti: Ing. Vladislav Sudnik, CSc.  
Prof. Ing.. Jaroslav Buchar, DrSc.  
Prof. Ing.. Karol Vasilko, DrSc.

Datum obhajoby: 17. 12. 2002

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

opotřebení, trvanlivost, keramika, vstřikování keramiky, vstřikování, forma, nářadí

## **KEY WORDS**

wear, durability, ceramics, injection moulding of ceramics, injection moulding, mould, tool

Práce je uložena na oddělení pro vědu a výzkum na FSI VUT v Brně

© Viktor Bělák, 2003

ISBN 80-214-2306-4

ISSN 1213-4198

# OBSAH

1 ÚVOD .....	5
2 OBSAH PRÁCE.....	5
3 SOUČASNÝ STAV .....	6
4 CÍLE PRÁCE, ZVOLENÉ METODY A ZPRACOVÁNÍ.....	7
5 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE .....	8
5.1 Konstrukce forem.....	8
5.1.1 Vtokový kanál.....	8
5.1.2 Rozváděcí kanál .....	8
5.1.3 Vtokové ústí.....	9
5.1.4 Odvzdušnění formy.....	9
5.1.5 Vyhození dílů z formy.....	9
5.2 Opotřebení stroje a nástroje .....	10
5.2.1 Opotřebení stroje .....	10
5.2.2 Opotřebení formy.....	11
5.3 Zkoušky odolnosti materiálů proti otěru keramikou.....	12
5.3.1 Průběh a podmínky měření .....	13
5.4 Porovnání chování materiálů při různých rychlostech.....	14
5.4.1 Opotřebení vzorků z oceli 11 600 .....	14
5.4.2 Opotřebení vzorků z 19 856.4 kalené na $H_V 850$ .....	14
5.4.3 Opotřebení vzorků ze slinutých karbidů.....	15
5.4.4 Opotřebení vzorků z keramiky.....	15
5.5 Porovnání chování materiálů při jednotlivých rychlostech.....	16
5.5.1 Rychlost otáčení $32 \text{ min}^{-1}$ .....	16
5.5.2 Rychlost otáčení $50 \text{ min}^{-1}$ .....	16
5.5.3 Rychlost otáčení $80 \text{ min}^{-1}$ .....	17
6 ZÁVĚR.....	17
7 PUBLIKACE A CITOVANÁ LITERATURA.....	20
8 SUMMARY.....	20
9 CURICULUM VITAE .....	23



# 1 ÚVOD

Jedním z hlavních směrů rozvoje technologických procesů je širší využití výsledků vědy a zavedení progresivních technologií a moderních zařízení do praktického masového použití. Za progresivní technologii v oblasti zpracování keramiky můžeme považovat vstřikování. Tato technologie vychází z kombinace principů známých již dříve. Jednak je to vstřikování, které se dnes ve velké míře používá při zpracování plastů. Následně se jedná o principy slinování, které se uplatňují při výrobě dílů z těžko tavitelných materiálů nebo materiálů konvenčními technologiemi jen velmi obtížně zpracovatelných.

Keramika je jedním z nejstarších materiálů v dějinách lidstva. Rozsah použití keramických materiálů je široký. Od nádob z kameniny, přes jemný porcelán, po keramiku a porcelán pro chemický a strojný průmysl, zdravotnictví, silnoproudou elektrotechniku a v neposlední řadě i elektroniku. Toto poměrně široké spektrum použití umožňují některé zajímavé vlastnosti keramiky, jako například chemická odolnost, odolnost proti tepelným šokům, podstatně nižší tepelná vodivost než u kovů, vysoká mechanická pevnost i za zvýšených teplot, tvrdost, vysoký elektrický odpor, vysoká elektrická průrazná pevnost, dobrá biologická snášenlivost, možnost dosáhnout vysoké kvality povrchu a u některých typů keramik při jejich vysoké čistotě i průhlednost a mnohé další. Keramika má samozřejmě také negativní vlastnosti: malou rázovou houževnatost, nízkou pevnost v tahu, náchylnost k praskání vlivem velmi malých trhlin a jiné. Samozřejmě, že se výše uvedené chování mění s typem použité keramiky, její čistotou, procesem výroby atd.

Je zřejmé, že nároky na keramické výrobky s sebou přinášejí i vyšší náročnost na čistotu materiálu, na stálost (uniformitu) užitných vlastností, a v neposlední řadě na efektivnost jejího zpracování.

## 2 OBSAH PRÁCE

Práce se zabývá výzkumem vlivu technologických parametrů vstřikování keramiky, zjištěním funkčních závislostí mezi nejdůležitějšími reznými parametry a výsledky obrábění a jejich optimalizací.

Práce je rozdělena na část teoretickou a experimentální a formálně je členěna do třinácti kapitol. Úvod poukazuje na význam použití keramických materiálů a zavedení progresivních technologií a moderních zařízení do výroby, zachycuje současný stav a podává přehled o práci samotné. Ukazuje souvislosti mezi technologickými podmínkami a výsledky vstřikování.

V první kapitole jsou specifikovány cíle disertace.

Druhá kapitola uvádí přehled keramických materiálů [1,2].

Ve třetí kapitole je rozebrán postup při vstřikování keramiky od zamíchání směsi přes odstříknutí výrobku, odstranění pojiva, ke slinování. Je zde také načrtnuta problematika distribuce velikosti částic ve směsi, vlivy teploty a stupně plnění na viskozitu a specifika toku vysoce plněných polymerů. [3,4,5,6].

Kapitola čtvrtá popisuje základní principy metod zkoušení geometrie funkčních částí forem [8,9,36].

Pátá kapitola popisuje problematiku metod zvyšování otěruvzdornosti povrchů. Zabývá se problematikou kalení, povrchového kalení, popouštění, cementování, nitrídování, ionitridování, boridování i problematikou vytváření zvláště tvrdých povlaků na bázi wolframkarbidu, titannitridu a titankarbidu. [2,8,10,11].

Šestá kapitola se zabývá metodami nanášení těchto velmi tvrdých povlaků, tedy konkrétně popisuje chemické metody (CVD), jako např. vakuové napařování, fyzikální metody (PVD), tedy zhotovování povlaku na principu iontové implantace a popisuje i jiné metody zvyšování otěruvzdornosti např. elektrojiskrové zpevňování povrchu, plazmový přenosný oblouk, metodu detonační trysky, zpevňování povrchu kovu výbuchem, povlakování laserem a metody nanášení povlaků TiN [10,14,15,16,17,18].

V sedmé kapitole je popsán samotný proces vstřikování keramiky se zaměřením na vstřikovací stroje, jejich vstřikovací systémy, řízení procesu, vstřikovací parametry, úlohu tlaku teploty a času při vstřikování, určení teploty a tlaku ve formě, popisuje experimentální metody pro stanovení teplotních a tlakových mezí a zabývá se tokovou analýzou a chybami výrobků a jejich možnými příčinami. [19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29].

Osmá kapitola se zabývá návrhem zásad konstrukce forem, jejich vtokových a rozváděcích kanálů a vtokového ústí. Vlivem velikosti, tvaru a umístění vtokového ústí na kvalitu výrobku. Dále pak i vlivem počtu a velikosti tvarových dutin ve formě na tvar vtokového ústí. V této kapitole je také popsána metodika konstrukce odvzdušnění formy stejně tak jako principy pro vyhození dílů z formy. [15,19,20,24].

V deváté kapitole je uvedena míra opotřebení jak stroje, tak i nástroje v průběhu zpracovávání směsí plastu s keramickým práškem. [19].

Kapitola desátá obsahuje popis průběhu měření opotřebení a jeho výsledky pro testované materiály, včetně porovnání chování těchto materiálů při různých rychlostech. Také jsou zde porovnány materiály navzájem vždy při stejných podmínkách opotřebení materiálů a výsledky měření opotřebení.

Jedenáctá kapitola obsahuje shrnutí a zobecnění získaných výsledků jednak v oblasti zpracování keramiky, a jednak z hlediska otěruvzdornosti jednotlivých materiálů.

Kapitola dvanáctá uvádí seznam symbolů a zkratk, třináctou tvoří soubor použité literatury a citace.

### **3 SOUČASNÝ STAV**

Zpracování keramiky pomocí vstřikovacích technologií není dosud příliš rozšířeno. Vstřikovací způsob výroby se v současnosti používá hlavně při zpracování polymerních, zejména termoplastických materiálů. Technologické podmínky při zpracování keramiky pomocí vstřikovací technologie se blíží podmínkám při zpracování polymerů s vysokým stupněm plnění. Zpracováním keramiky metodou

vstřikování se nabízí poměrně široké možnosti při výrobě malých, tvarově složitých a velmi přesných dílců, bez nutnosti dalšího opracování.

Pro účely vstřikování, se používají především keramiky jednak na bázi oxidů ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$  atd.), dále pak tzv. neoxidové keramiky (hlavně nitridy a karbidy).

Zpracování keramiky je možno rozdělit do několika základních stupňů. Prvním stupněm je dočasné převedení keramiky v práškovém stavu do podoby směsi, kterou je možné vstřikovat. Tato úprava se provádí tak, že se keramický prášek smíchá s polymerním materiálem, který umožňuje vlastní zpracování odstříknutím, a mazivem, které může být nízkopolymerní, nebo na bázi mastných kyselin (kyselina stearová apod.). Mazivo má usnadnit proces vstřikování tím, že umožní snazší zatékání materiálu do formy a současně sníží opotřebením jak stroje, tak formy.

Druhým stupněm je pak vlastní odstříknutí a třetím vlastní slinování při teplotách, podle druhu použité keramiky, pohybujících se v rozmezí cca 1 500 °C až 2 000 °C.

Mazivo i polymerní matrice musí být při míchání snadno zamísitelné, avšak při slinování snadno odstranitelné z výrobku. Navíc musí mít takové vlastnosti, aby po odstranění z výrobku nezanechávalo mikro dutiny a nezabraňovalo slinutí vlastního keramického materiálu. (3)

## 4 CÍLE PRÁCE, ZVOLENÉ METODY A ZPRACOVÁNÍ

Možnost použít vstřikovací technologii pro zpracování keramiky a výrobu keramických slinovaných dílů je do značné míry závislá na požadavcích kladených na takto zhotovované součásti (reklamní a propagační předměty, tepelně či mechanicky namáhané součástky komplexních tvarů, speciální nářadí apod.).

S ohledem na dosavadní výsledky dosažené v oblasti vstřikování keramiky byly zvoleny následující cíle této disertační práce:

1. Vyšetřit mechanické opotřebením materiálů vhodných pro konstrukci nářadí pro zpracování keramiky s ohledem na značnou abrazivnost zpracovávaných materiálů. Vzorky přicházející do kontaktu s pohybující se keramikou vykazují značné opotřebením v místě kontaktu a zejména pak tam, kde je rychlost pohybu vyšší. Proto lze očekávat vliv relativní rychlosti otěru obou složek, tedy materiálu nástroje a keramiky, na výsledky zkoušek opotřebením.

Vzhledem k možnostem byla zvolena k vyšetření mechanického opotřebením zkouška otěru kovových vzorků po válci s keramickým povlakem, kde je míra opotřebením vyhodnocována pomocí úbytku hmotnosti otíraného tělesa v závislosti na dráze otěru.

2. Navrhnout zásady pro konstrukci nářadí pro zpracování keramických materiálů pro použití vstřikovací technologie, a to jednak z hlediska geometrie dutiny formy, ale hlavně však z hlediska životnosti tohoto nářadí.

## 5 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

### 5.1 KONSTRUKCE FOREM

Před návrhem a konstruováním formy je třeba zvážit a pečlivě stanovit požadovaný tvar dílce. Proveditelnost výroby daného dílce vstřikovacími technologiemi by měla být založena na takových faktorech, jako je jeho velikost a hmotnost, použité zaoblení (radii), tloušťka stěn, očekávané smrštění, požadované tolerance, úkosy, požadovaný objem výroby, velikost a umístění děr a závitů.

#### 5.1.1 Vtokový kanál

Pro zajištění správného vyhození obsahu vtokového kanálu při otevření formy a aby jeho správné vytažení bylo vůbec možné, je důležité, aby výstupní konec vtokové vložky měl vnitřní průměr o přibližně o 1 mm větší, než je vnitřní průměr vstupní části. Tryska s příliš malým průměrem neúměrně zvyšuje celkový čas vstřikovacího cyklu, zapříčiňuje špatné odplynění formy (zavírání vzduchu), a vnáší napětí do zpracovávaného materiálu.

Ostatní rozměry vtokové vložky musí být vztaženy k jeho základním rozměrům a mohou být konstruktérem formy měněny.

V zásadě by vtokový kanál měl mít kuželovitost  $3^\circ$  až  $5^\circ$ . Když je tento úkos menší, může dojít k tomu, že se materiál ke vtokovému kanálu takzvaně přilepí a při vyhazování se přetrhne. (24) Což má zpravidla za následek odstávku formy a náročné čištění zatuhlého zbytku ve vtokovém kanálu.

Protože je vtoková vložka velmi namáhanou součástí, je velmi vhodné, aby byla proti opotřebení otěrem chráněna alespoň zakalením.

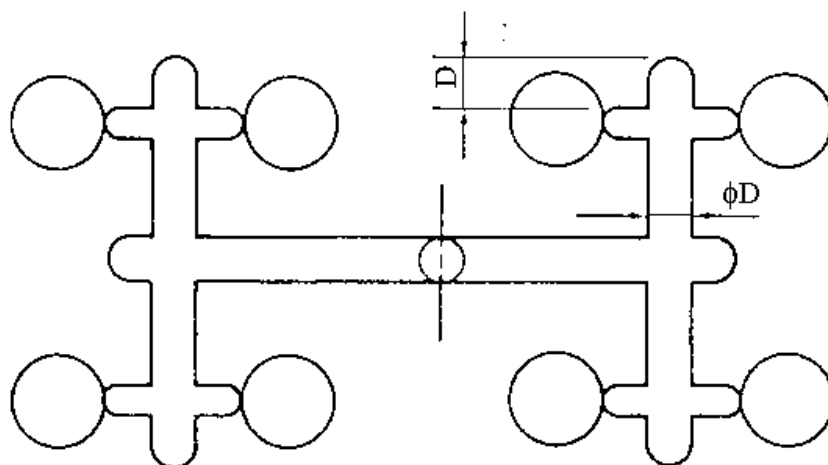
#### 5.1.2 Rozváděcí kanál

Optimální průměr rozváděcího kanálu se nachází v rozmezí  $\phi 3$  mm až  $\phi 10$  mm.

Aby vstřikované díly po otevření formy zůstávaly vždy na straně vyhazovačů, je lepší, když jsou rozváděcí kanály vytvořeny v nástroji na straně vyhazovačů. Je velmi důležité, aby rozváděcí kanály byly vyleštěny ve směru toku taveniny a neměly ostré ohyby. U několikanásobných nebo sdružených forem mívá každá tvarová dutina vlastní vstřikovací kanál. Potom tedy musí hlavní rozváděcí kanál mít průřez, rovnající se sumě průřezů všech kanálů na něj ve směru proudění taveniny navazujících. Protože pokles tlaku v rozváděcím kanále je úměrný čtverci jeho délky, je velmi důležité konstruovat rozváděcí kanály co nejkratší.

Optimální rozmístění tvarových dutin ve formě s ohledem na co nejkratší délku jednotlivých kanálů je potom takové, že rozváděcí kanály vedou radiálně (paprskovitě) od vtokového kanálu k jednotlivým dutinám. Dále pak je vhodné rozváděcí kanál prodloužit za jeho průsečík s navazující větví pro zachycení ochlazeného čela tekoucí taveniny. Schéma takového vyváženého vtokového systému můžeme vidět na obrázku 1.





Obr. 1 Schéma vyváženého vtokového systému

### 5.1.3 Vtokové ústí

Pro nejlepší výsledky vstřikování by vtokové ústí mělo být umístěno v relativně tenkém průřezu vstřikovaného dílu proto, aby tok taveniny mohl být směřován směrem k silnější části.

Zvětšení průřezu vtokového ústí má za následek zvýšení rychlosti plnění tvarové dutiny formy. Zvětšování vtokového ústí s sebou přináší i snižování počtu stop po skládání materiálu do tvarové dutiny nástroje a ostatních chyb pozorovaných u vtokového ústí s menším průřezem.

### 5.1.4 Odvzdušnění formy

Poloha odvzdušnění by měla být určena s vazbou na polohu vtokového ústí. Jak totiž ukazují zkušenosti, mělo by být odvzdušnění umístěno naproti každého ústí. Účelem odvzdušnění je umožnit co nejrychlejší zaplnění formy bez uzavírání vzduchových bublin. Odvzdušnění by mělo být v místě, kde dochází ke stýkání paprsků materiálu, nebo v dělicí rovině.

Vložená jádra, drobné škrábance na lícovaných plochách nebo na vyhazovači mohou také sloužit jako odvzdušnění. Experimentálně bylo zjištěno na formě pro komplexní dílec s proudnicovou částí, že odvzdušnění může být 0,07 mm hluboké a 0,7 mm široké. (19)

### 5.1.5 Vyhození dílů z formy

Při rozhodování, kolik a jakých vyhazovačů použít, je nutno mít na paměti, že materiál je při vyhazování z nástroje ještě měkký. Proto je nutné zvolit vyhazovače s dostatečnou styčnou plochou s výrobkem a s odpovídajícím rozložením v dutině nástroje. Vyhazovače také musí být dobře slícovány jak s deskou vyhazovačů, tak i s tvarovou deskou, aby byla zajištěna jejich bezvadná funkce při provozu nástroje a nedocházelo k jejich zadírání, vzpříčování a eventuálně i ke zlomení. U dílů

s tenkými stěnami je lepší použít stírací desku, protože klasické vyhazovače by tuto tenkou stěnu mohly propíchnout.

Vytahovač vtokového zbytku, jehož úkolem je vtáhnout vtokový zbytek ze vtokového a rozváděcích kanálů a udržet jej na straně vyhazovačů, bývá zpravidla integrován s vyhazovačem vtokového zbytku, který následně tento vtokový zbytek vyhodí z nástroje. Přidržovač vtokového zbytku je v podstatě válcový otvor s podkosem, jehož dno tvoří vyhazovač vtokového zbytku zpravidla také válcového tvaru. Umístění přidržovače a vyhazovače vtokového zbytku se většinou volí tak, že tento systém leží v prodloužení osy vtokového kanálu

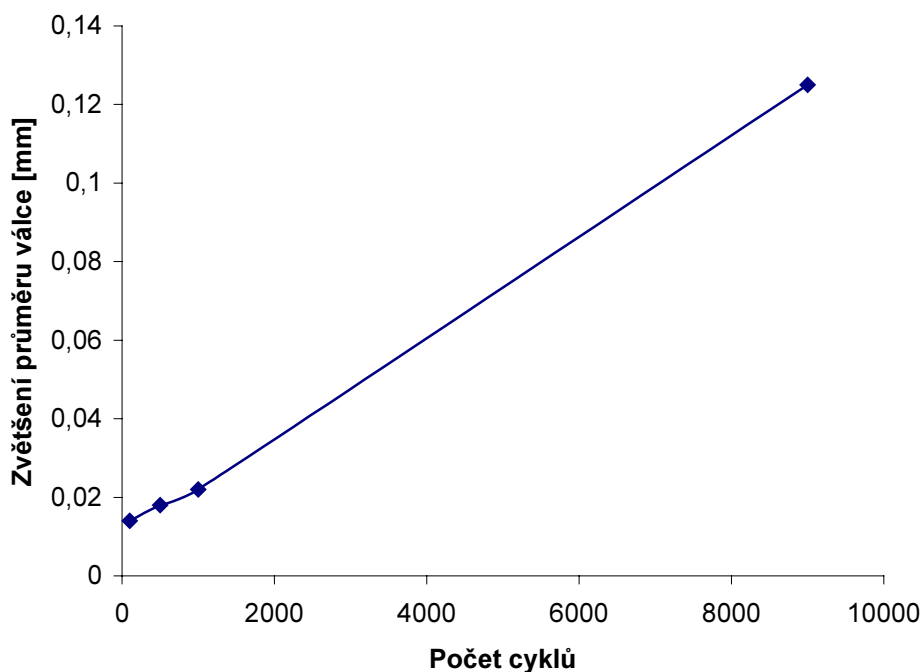
## 5.2 OPOTŘEBENÍ STROJE A NÁSTROJE

### 5.2.1 Opotřebenění stroje

Přestože následující informace jsou založeny pouze na omezeném počtu výsledků, nabízejí velmi zajímavý náhled na problematiku opotřebenění strojů, na kterých se zpracovávají keramické materiály. Zaměříme-li se na vnitřní průměr vstřikovacího válce a jeho zvětšení jako míru opotřebenění vztaženou k času, který je reprezentován počtem pracovních cyklů, můžeme stanovit následující průběh opotřebenění. (tab. I, graf 1)

počet zdvihů	100	500	1000	9000
Zvětšení $\phi D$ [mm]	0,014	0,018	0,022	0,125

Tabulka I. Opotřebenění válce vstřikovací jednotky.

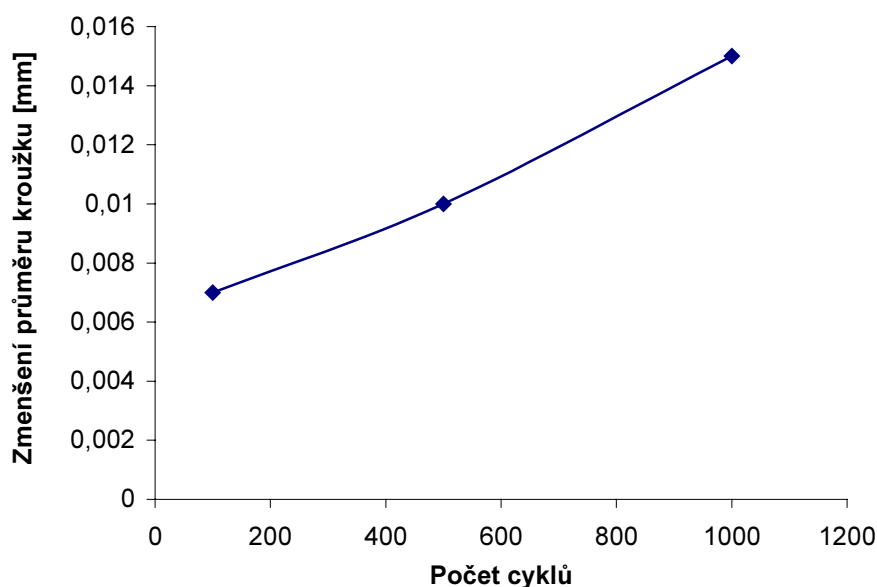


Graf 1. Opotřebenění válce vstřikovací jednotky.

Vstřikovací válec byl zhotoven z niklové oceli. Opotřebení po délce válce je však nerovnoměrné. Nevětší míra opotřebení byla zjištěna ve vzdálenosti cca 40mm od jeho konce. Toto místo odpovídá polovině zdvihu šneku v místě, kde se pohybuje kroužek zamezující zpětnému toku taveniny do závitů šneku při vstřikování. Šnek jako takový nevykazuje tak veliké opotřebení jako válec. Opotřebení vnějšího průměru šneku činilo pouze 0,0025 mm až 0,058 mm. (19) Opotřebení kroužku zamezujícího zpětnému toku taveniny, který byl zhotoven ze slinované slitiny komplexních boridů s obsahem železa, uvádí následující přehled.

počet zdvihů	100	500	1000
Zvětšení $\phi d$ / mm	0,007	0,010	0,015

Tabulka II. Opotřebení zpětného kroužku .



Graf 2. Opotřebení zpětného kroužku .

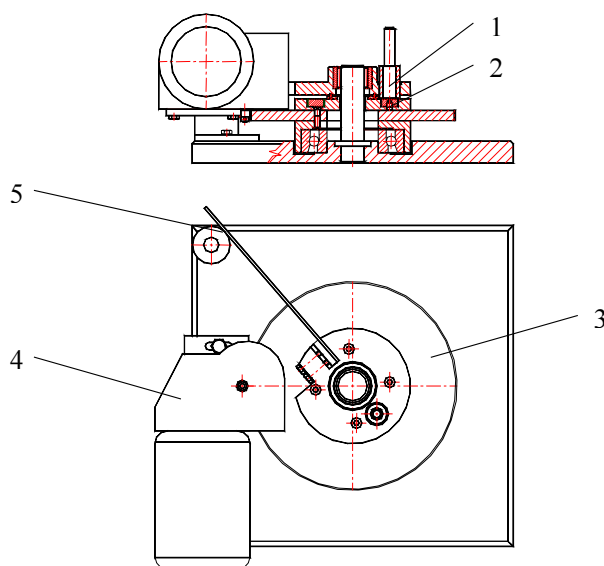
Vzrůstání opotřebení kroužku bylo, jak můžeme vidět z grafu, velmi stejnoměrné.

### 5.2.2 Opotřebení formy

Studium zásad konstrukce forem ukázalo, že umístění vtokového ústí musí být takové aby materiál vstupující do tvarové dutiny nástroje se pokud možno co nejdříve dostal do kontaktu se stěnou formy. K nejvýraznějšímu opotřebení dochází místech, kde materiál rychle naráží na povrch formy. Z důvodu opravdu značného opotřebení v těchto místech je nutné povrch, který přichází do styku s keramickým materiálem, opatřit zvláště tvrdými povlaky nebo vložkami z odolných materiálů. Vhodnost použití jednotlivých materiálů pro ochranu ploch, přicházejících do styku s keramickým materiálem, byla testována a je uvedena dále.

### 5.3 ZKOUŠKY ODOLNOSTI MATERIÁLŮ PROTI OTĚRU KERAMIKOU

Pro testování míry opotřebení dílů plastikářských zařízení byla zkonstruována a vyrobena následující zařízení. První měřící zařízení imituje vytlačovací proces. Roztavený plast proudí ve vytlačovací hlavě kolem zkušebních vzorků, u kterých se sleduje hmotnostní úbytek v závislosti na technologických podmínkách. Druhý zkušební přístroj imituje pracovní podmínky vytlačovacích šneků.



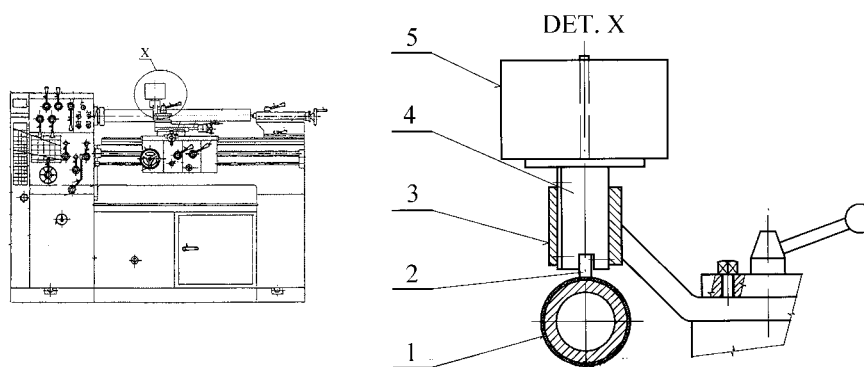
Obr. 2 Schéma přístroje na hodnocení opotřebení

- 1- prostor pro granule, 2- mezikruží z testovaného materiálu, 3- ozubené kolo,
- 4- hnací motor s převodovkou, 5-meřící nosič opatřený tenzometrickým snímačem

Třetí zkušební zařízení pracuje na principu přitlačování granulí, taveniny nebo tuhých plastových mezikruží na testované materiály. Jako zkušební vzorky byly testovány materiály běžně používané při konstrukci strojních zařízení a vzorky ze slinutých karbidů a keramiky. Přístroj umožňuje měřit tlaky, teploty taveniny, třecí rychlost, míru opotřebení a koeficient tření.

Další zařízení, které bylo zkonstruováno pro měření míry opotřebení a je založeno na principu vzájemného translačního pohybu testovaného vzorku a keramického povrchu. Jeho princip spočívá v tom, že na ocelovou tyč byl nanesen keramický materiál. Tato tyč byla upnuta do sklíčidla soustruhu a na volném konci pomocí středícího dűlku zajištěna otočným hrotem upnutým v pinole koníku. Nosič vzorku se následně upnul do nožové hlavy. Vzorek samotný byl upnut do držáku pomocí šroubů. Držák na vzorku se umístila závaží, která vyvozovala odpovídající přítlak vzorku na keramický povrch tyče.

Schéma zařízení uvádí následující obrázek.



Obr. 3 Schéma zařízení na hodnocení opotřebení

### 5.3.1 Průběh a podmínky měření

Měření samotné probíhalo tak, že před měřením byl vzorek zvážen na laboratorních vahách. Potom v časových intervalech odpovídajících dráze otěru 1000 m byl vzorek demontován z nosiče a zvážen na stejných vahách. Z difference hmotností neopotřebovaného vzorku a aktuální hmotnost odpovídající dráze otěru byl vypočítán relativní hmotnostní úbytek  $w$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) dle rovnice 1 čímž se usnadní vzájemné srovnávání jednotlivých výsledků.

$$w = \frac{m_0 - m_x}{a \cdot b} \quad (1)$$

kde  $m_0$  je hmotnost vzorku na počátku měření;  $m_x$  je hmotnost vzorku po dráze otěru  $x$ ;  $a$  je šířka otíraného průřezu;  $b$  je výška otíraného průřezu.

Použité vzorky byly kvádrového tvaru o rozměrech podstavy 5 mm × 12 mm.

Vzorky byly zhotoveny z následujících materiálů:

- Ocel třídy 11 600
- Ocel třídy 19 856.4 zakalené na tvrdost  $H_V$  850
- Slinutý karbid P20
- Keramika  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{CaO}$

Jako otírací člen byl použit následující element. Jednalo se válcovou tyč jejíž jádro tvořila ocelová trubka o průměru  $\varnothing 33$  mm s tloušťkou stěny 7 mm o délce 800 mm. Na ocelovém jádru byla nanášena keramická vrstva o tloušťce 1 mm. Takže výsledný průměr tyče dosáhl  $\varnothing 34,8$  mm  $\pm 0,1$  mm.

Keramický povlak byl tvořen keramikou na bázi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanášený metodou palzmového navařování.

Otěr probíhal za níže uvedených podmínek. Vzorek byl na otírací plochu přitlačován závažím o celkové hmotnosti 9,117 kg, čímž bylo na stykové ploše docíleno tlaku 1,49 MPa.

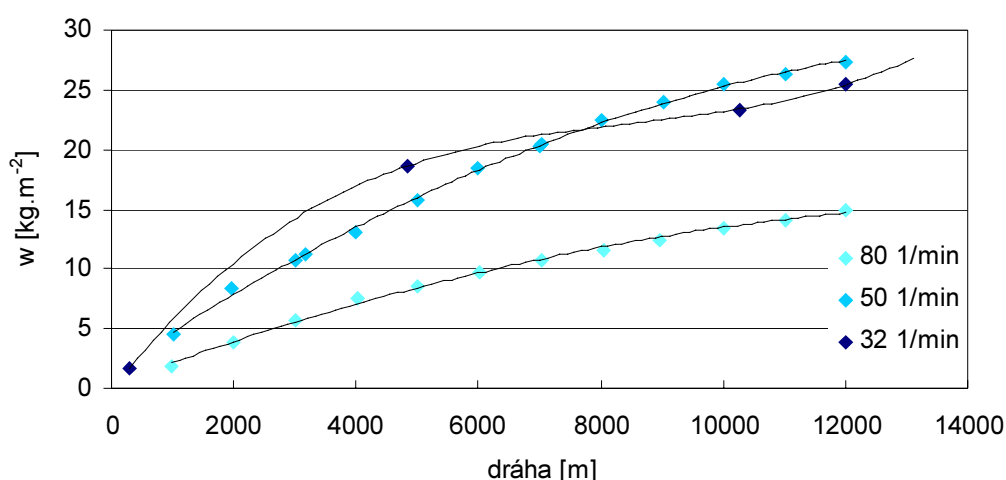
Opotřebení vzorku bylo měřeno při různých otáčkách otíracího elementu a tedy i různých relativních rychlostech vzorku a otíracího členu. Měření bylo prováděno při otáčkách  $32 \text{ min}^{-1}$ ,  $50 \text{ min}^{-1}$  a  $80 \text{ min}^{-1}$ , což při průměru otíracího členu  $\varnothing 34,8 \text{ mm}$  odpovídá obvodové rychlosti  $0,583 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $0,911 \text{ m.s}^{-1}$  resp.  $1,458 \text{ m.s}^{-1}$ .

Posuv podél osy rotace (podélný posuv) byl zvolen o velikosti  $0,03 \text{ mm.ot}^{-1}$ .

## 5.4 POROVNÁNÍ CHOVÁNÍ MATERIÁLŮ PŘI RŮZNÝCH RYCHLOSTECH

### 5.4.1 Opotřebení vzorků z oceli 11 600

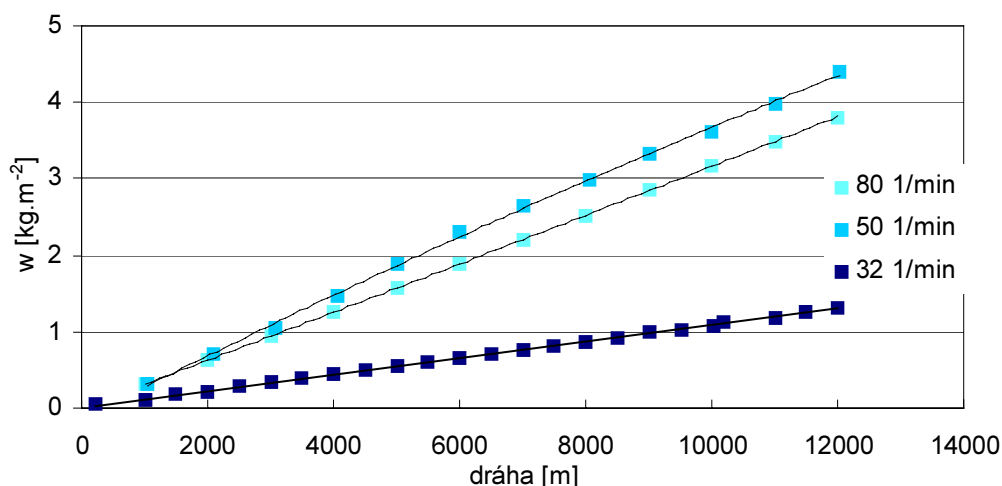
Ze srovnání opotřebení vzorků z oceli 11 600 vzorků z oceli 11 600 v grafu 3 při jednotlivých rychlostech vyplývá, že míra opotřebení se vzrůstající rychlostí klesá.



Graf 3. Opotřebení vzorků z oceli 11 600 při různých rychlostech

### 5.4.2 Opotřebení vzorků z 19 856.4 kalené na H<sub>V</sub> 850

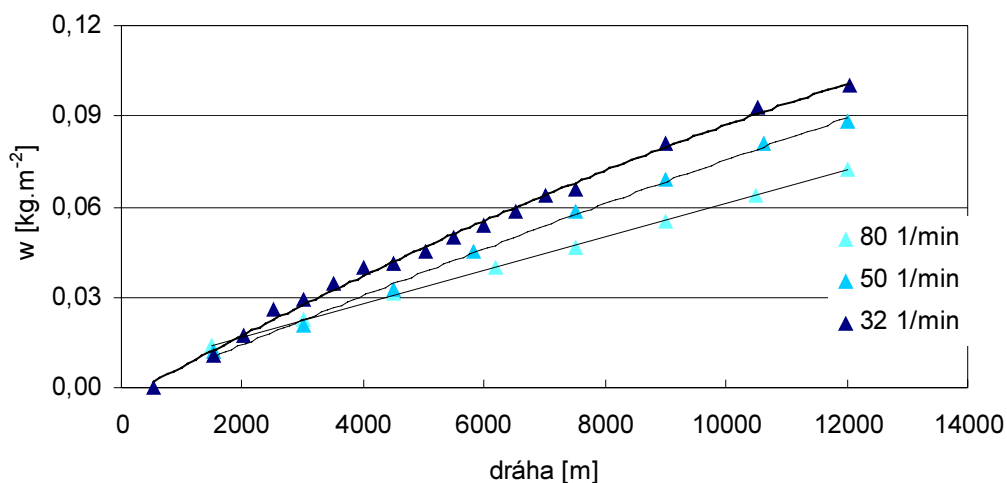
Ze srovnání opotřebení vzorků z kalené oceli v grafu 4 při jednotlivých rychlostech vyplývá, že míra opotřebení byla nejvyšší při  $50 \text{ min}^{-1}$ .



Graf 4. Opotřebení vzorků z kalené oceli při různých rychlostech

### 5.4.3 Opotřebení vzorků ze slinitých karbidů

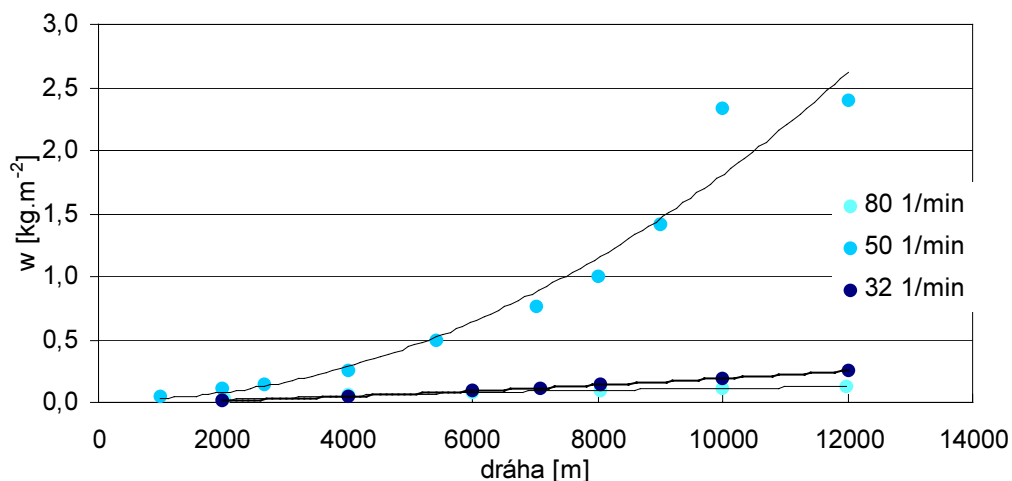
Ze srovnání opotřebení vzorků ze slinitých karbidů v grafu 5 při jednotlivých rychlostech vyplývá, že míra opotřebení se vzrůstající rychlostí klesá.



Graf 5. Opotřebení vzorků ze slinitých karbidů při různých rychlostech

### 5.4.4 Opotřebení vzorků z keramiky

Ze srovnání opotřebení vzorků z keramiky v grafu 6 při jednotlivých rychlostech vyplývá, že míra opotřebení bylo nejvyšší při 50 min<sup>-1</sup>, kdy docházelo k silným vibracím. Následkem těchto vibrací pak došlo k prasknutí vzorku v místě jeho upnutí.

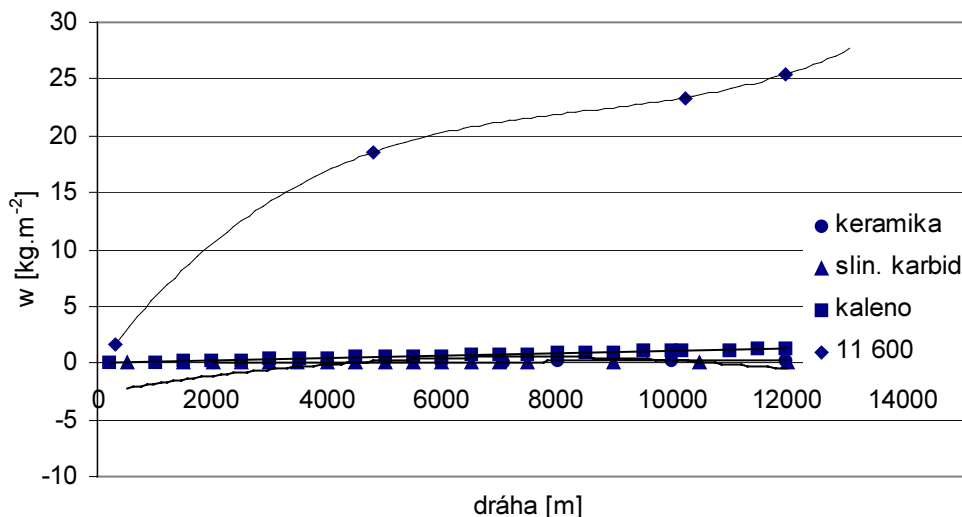


Graf 6. Opotřebení vzorků z keramiky při různých rychlostech

## 5.5 POROVNÁNÍ CHOVÁNÍ MATERIÁLŮ PŘI JEDNOTLIVÝCH RYCHLOSTECH

### 5.5.1 Rychlost otáčení 32 min<sup>-1</sup>

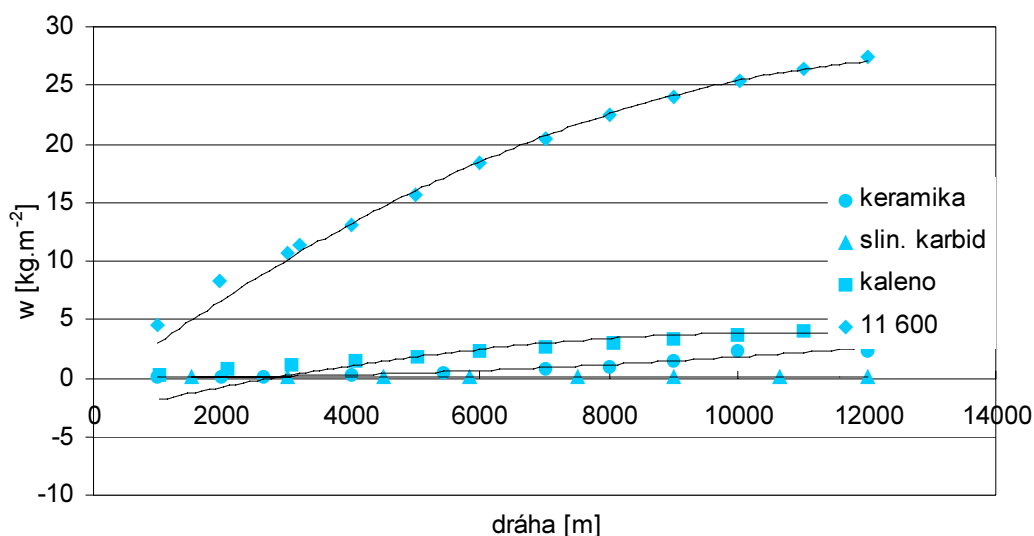
Z grafu 7 je zřejmé, že nejnižší opotřebení bylo naměřeno u vzorku ze slinutého karbidu, které bylo při 12.10<sup>3</sup> m 2,5× nižší než u vzorku z keramiky. Nejvyšší opotřebení potom dosáhl vzorek z oceli 11 600 (250× více než SK). U vzorku z kalené oceli bylo dosaženo 13× většího opotřebení než u vzorku ze slinutého karbidu.



Graf 7. Opatření vzorků z různých materiálů při 32 min<sup>-1</sup>

### 5.5.2 Rychlost otáčení 50 min<sup>-1</sup>

Z grafu 8 je zřejmé, že nejnižší opotřebení bylo naměřeno u vzorku ze slinutého karbidu, opotřebení vzorku ze slinutých karbidů bylo při 12.10<sup>3</sup> m 27× nižší než u vzorku z keramiky. Nejvyšší opotřebení potom dosáhl vzorek z oceli 11 600 (305× více než SK). U vzorku z kalené oceli bylo dosaženo 49× většího opotřebení než u vzorku ze slinutého karbidu.

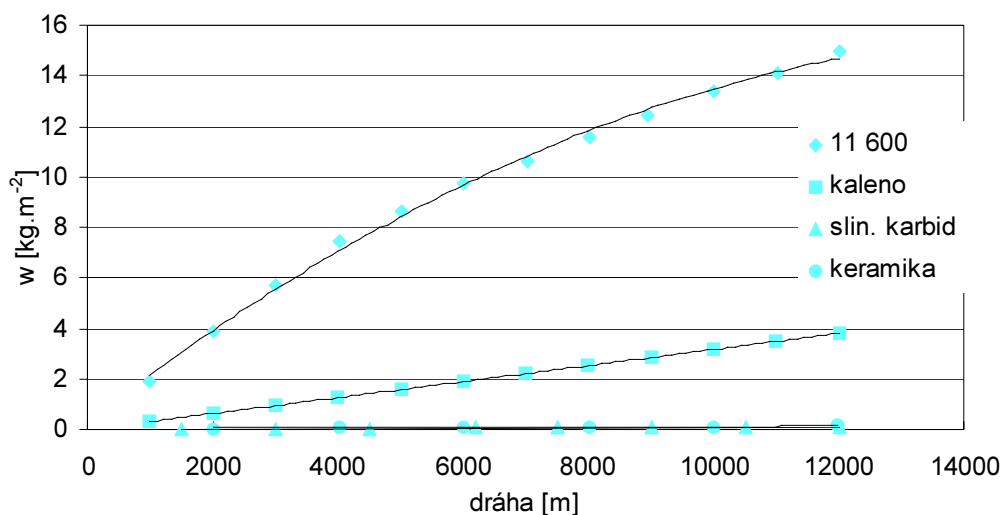


Graf 8. Opatření vzorků z různých materiálů při 50 min<sup>-1</sup>



### 5.5.3 Rychlost otáčení 80 min<sup>-1</sup>

Z grafu 9 je zřejmé, že nejnižší opotřebení bylo naměřeno u vzorku ze slinutého karbidu, opotřebení u vzorku ze slinutých karbidů bylo při 12.10<sup>3</sup> m 1,7× nižší než u vzorku z keramiky. Nejvyšší opotřebení potom dosáhl vzorek z oceli 11 600 (214× více než SK). U vzorku z kalené oceli bylo dosaženo 54× většího opotřebení než u vzorku ze slinutého karbidu.



Graf 9. Opatření vzorků z různých materiálů při 80 min<sup>-1</sup>

## 6 ZÁVĚR

Užitné vlastnosti výrobků jsou ve velké míře závislé na materiálu, z něhož jsou vyrobeny. V různých podmínkách potom nabývají mimořádný význam specifické vlastnosti výrobků, jako je jejich odolnost proti opotřebení, citlivost ke koncentraci napětí, odolnost proti porušení při statických, rázových či střídavě cyklických zatíženích a jiné...

Výzkum problémů použití nových materiálů vytváří podmínky na vybudování nových teorií a vývojových tendencí, jejichž cílem je zlepšit funkčnost součástí technologickými metodami. Vazby technologií a jakosti výrobků v návaznosti na jejich funkčnost musí v budoucnu zajímat celý technický svět, neboť ukazují cesty, jak řešit neustále se zvyšující požadavky na kvalitu těchto výrobků.

Problém optimalizace technologie vstřikování podle poznatků současného vývoje s cílem dosáhnout konkrétní funkčnosti výrobku byl rovněž řešen v této práci, jejíž náplní bylo studium vlivu technologických parametrů při vstřikování keramiky, zjištění funkčních závislostí mezi těmito nejdůležitějšími vstřikovacími parametry a výsledky vstřikování a jejich optimalizace tak, aby konečným výstupem byly bezdefektní díly.

Přestože vstřikování keramiky patří mezi nové technologie, nabízí se široká možnost uplatnění výrobků vyráběných touto technologií

Při zpracování keramiky ovšem dochází ke značnému opotřebení technologických zařízení, proto je další část práce zaměřena právě na vliv použitých materiálů a míru jejich opotřebení při styku s pohyblivou se keramickou masou.

Na základě vyhodnocení zkoušek opotřebení vzorků z oceli 11 600, z oceli 19 856.4 kalené na  $H_V$  850, slinutých karbidů a keramiky otíraných za různých rychlostních podmínek o keramický materiál, lze úspěšně charakterizovat a na základě konkrétních požadavků stanovit z hlediska požadované životnosti a ceny nejvhodnější materiál pro konstrukci součástí, jež budou ve styku s takto abrazivním materiálem.

Ze zjištěných závislostí plynou tyto závěry:

- Nejpříjemněji lze v současné době charakterizovat koncepci konstruování forem pro zpracování keramiky tak, že obecně můžeme říci, že forma musí mít rozvodné kanály dostatečného průřezu bez zbytečných ostrých záhybů. Stejně tak i vtoková ústí musí být konstruována s dostatečným průřezem aby nedocházelo k příliš rychlému vstupu taveniny do dutiny formy. Vtokové ústí je také vhodné umístit tak, aby se materiál co nejdříve dostal do kontaktu se stěnou nástroje, tím se dá předejít vzniku nehomogenit ve výrobku zapříčiněných tzv. skládáním materiálu v dutině formy, v důsledku tzv. volného proudu taveniny do dutiny formy. Místa těchto spojů jsou totiž příčinou nehomogenit, které v keramickém materiálu způsobují vysokou koncentraci napětí. Tato koncentrace napětí má v součinnosti s charakteristickými vlastnostmi keramik (tvrdost, křehkost) destruktivní účinek na keramický dílec.
- Při návrhu dílce je třeba zohlednit materiál, ze kterého má být díl vyroben a tomu přizpůsobit tloušťky stěn, přechody umístění otvorů dutin atd.. v této fázi je také třeba uvažovat, kde bude umístěn vtok a jakým způsobem bude zaplňována dutina formy.
- Konstrukci každého nástroje je třeba optimalizovat pro konkrétní tvar výrobku a co je neméně důležité, přímo pro přesně daný materiál, který budeme zpracovávat. Cílem všech výše zmiňovaných kroků je vyrábět v co největší míře bezvadné díly.
- Konstrukci technologického zařízení je nezbytné provádět nejen s ohledem na výrobu bezvadných dílů, ale je nutné zabývat se i otázkou životnosti jak nástroje, který má být pro tuto technologii použit, tak i zřízení, jehož úkolem je materiál připravovat a zpracovávat.
- Velmi dobrých výsledků z hlediska abrazivního opotřebení bylo dosaženo u vzorku zhotoveného ze slinutého karbidu jenž vykazoval při dráze otěru  $1,2 \cdot 10^4$  m minimálně  $1,7 \times$  menší relativní hmotnostní úbytek než tomu bylo u keramického materiálu.
- Pro určitou kombinaci materiálů třecí dvojice existuje lokální extrém (minimum), kde je opotřebení nejnižší.
- Ve výsledcích se při frekvenci otáčení  $50 \text{ min}^{-1}$  objevilo maximum. Tento jev však neodpovídá předpokládanému průběhu opotřebení. Možnou příčinou takového chování může být také skutečnost, že při dané rychlosti docházelo

k přiblížení se frekvence vibrací k vlastní frekvenci soustavy, a tím k jejímu rozkmitání.

Výsledky zkoušek uskutečněných v rámci této práce a poznatky z navazujících okruhů poznatků v této práci shrnutých mohou být přínosem a podkladem pro konstruování vhodných nástrojů pro výrobu předmětů z keramických materiálů, pro tuto moderní a rozvíjející se oblast.

## 7 PUBLIKACE A CITOVANÁ LITERATURA

### SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HANYKÝŘ V., HAVRDA J., TRÁVNÍČEK Z.: Speciální technologie keramiky II., Skriptum VŠCHT Praha, Praha, VŠCHT, 1989
- [2] LUKOVICS I.: Konstrukční materiály a technologie, Zlín, FT VUT, 1992
- [3] ŠTENCLOVÁ E.: Teplotní závislost tokových vlastností vstřikovací keramiky, Diplomová práce, Zlín, FT VUT 1994
- [4] COLYER A. A., UTRACKI L. A.: Polymer Rheology and Processing, Elsevier, 1990, s. 241 -277
- [5] BIGG, D. M.: Rheological Behavior of Highly Filled Polymer Melts, Polymer Engineering and Science, March 1983, vol. 23, no. 4, s. 206 - 210
- [6] PATTERSON B. R., RHONDA L. MACKEY: Effect of Particle Size and Volume Fraction on Powder Metallurgy Injection Molding Feedstock. Annual Powder Metallurgy Conference Proceeding
- [7] Whelan, A., Craft, J.H. Development in Injection Molding, Vol., Applied Science Publishers, London, England, 1981.
- [8] TOMIS F.: Gumárenská a plastikářská technologie, zpracovatelské procesy, skriptum VUT FT Gottwaldov, VUT, Brno, 1987
- [9] TOMIS F.: Základy zpracování plastů, interní skripta, Gottwaldov, FT VUT, 1979
- [10] HLUCHÝ, M. aj.: Strojírenská technologie. 1. sv. 2. vyd. Praha 1978.
- [11] MORÁVEK, O.-BABOROVSKÝ, V.: Základy tepelného zpracování oceli. 1. vyd. Praha 1961
- [12] MILLER, B., Plastics World, 47, 1989, č. 1, s. 42.
- [13] PÍŠEK, F.-JENÍČEK, L.-RYŠ, P.: Nauka o materiálu. 3. sv. 2. vyd. Praha 1973.
- [14] FREMUNT, P.-KREJČÍK, J.-PODRÁBSKÝ, T.: Nástrojové oceli. 1. vyd. Brno 1994.
- [15] TOMIS, F.-HELŠTÝN, J.: Formy a přípravky. FT VUT, Gottwaldov, 1984
- [16] DVOŘÁK, M.-VYPLAŠIL, E., Strojírenská výroba, 43, 1995, č. 5-6, s. 32.
- [17] MILAŠIUS, L.-NECKÁŘ, F.-KAFKA, J., Strojírenská výroba, 41, 1993, č. 3-4, 34.
- [18] MILAŠIUS, L.-KVASNIČKA, I., Strojírenská výroba, 41, 1993, č. 9-10, s. 21. , s. 25. 1997
- [19] MUTSUDDY, B.C., FORD, R.G., Ceramic Injection Molding, Capman & Hall, 1995
- [20] MAŇAS, M.-HELŠTÝN, J., Výrobní stroje a zařízení Gumárenské a plastikářské stroje II VUT Brno 1990

- [21] NAKAGAWA, T. ET AL. Freeze Injection and Compression Molding of Fine Ceramic Powder by Using Water Binder, J. Japan Soc. Powder & Powder Metall., 1987
- [22] KURDER, G.A.- NUNN, R.E., Extruder Efficiency, How You Measure It-How You Get It, Plast Eng., 20/6/1981
- [23] MAY, C.Y.W., SPE Antec. Tech. Papers. 1972, s.18, 851.
- [24] ROSATO, D.V., Process Control Technology – Injection Molding Handbook, Van Nostrand Reinhold 1986
- [25] SPENCER, R.S., GILMORE, G.D., Role Of Pressure, Temperature and Time in the Injection Molding Process, Modern Plastics, 1950
- [26] EDIRISINGHE, M.J., Computer Simulation Solidification of Ceramic Injection Molding Formulations, J. Matl. Sci & Letters, 1988/, s.509-510.
- [27] MUTSUDDY, B.C., KAHN, L.R., A Practical Approach in Relating Capillary Viscosity and Spiral Length Data For Molding Ceramic Mixes, Advances in Ceramics, Vol.9 – Forming of Ceramics , Mangels and Messing, Am. Ceram.Soc., 1984
- [28] CHUNG, T.S., RYAN, M.E., Analysis of the Packing Stage in Injection Molding, Poly. Eng. Sci. 1981
- [29] ZHANG, T., JIANG, Z., WU, J., CHEN, Z., Influence Rheological Behavior of Ceramic Mixes on Injection Molding of Ceramic Compacts, J. Am. Ceram. Soc., 1990
- [30] TRUNEC M., CIHLÁŘ J., Injection Moulding of Alumina Bioceramics, In: Materials in Clinical Applications. Florencie, Itálie: Techna Srl. 1994 s. 99-107.
- [31] TRUNEC M., CIHLÁŘ J., Thermal Debinding of Injection Moulded Ceramics. In: Journal of the European Society. - ISSN - 0955-2219. - Roč.17, č. 2-3, (1997) s. 203-210.
- [32] TRUNEC M., CIHLÁŘ J., Removal of Thermoplastic Binders from Ceramic Green Bodies. In: Ceramics-Silikáty. - ISSN - 0862-5468. - Roč.41, č. 2, (1997) s. 67-81.
- [33] TRUNEC M., CIHLÁŘ J., Tvarování keramických suspenzí injekčním vstřikováním. In: Sklář a keramik. - ISSN - 0037-637X. - Roč.48, č. 3, (1998) s. 49-53.
- [34] TRUNEC M., DOBŠÁK P., CIHLÁŘ J., Effect of powder treatment on injection moulded zirconia ceramics. In: Journal of the European Society. - ISSN - 0955-2219. - Roč.20, č. 7, (2000) s. 859-867.
- [35] TRUNEC M., CIHLÁŘ J., Effect of Activated Carbon Bed on Binder Removal from Ceramic Injection Moldings. In: Journal of the American Ceramic Society. - ISSN - 0002-7820. - Roč.84, č. 3 s. 675-678.

## PUBLIKACE AUTORA

- [36] LUKOVICS I., MAŇAS M., BĚLÁK V.: Výroba keramických řezných nástrojů vstříkovaním. In.: Nové směry vo výrobných technológiách, FVT TU Košice, COMMERC SERVICE s.r.o. Prešov, 1996. s 125- 129 (ISBN 80-88859-05-0)
- [37] LUKOVICS, I., BĚLÁK, V: Development and the testing of tools for injection moulding of ceramics, In: WORKSHOP 97, ČVUT, Praha, 1997, str. 1445 - 1446
- [38] KEYZLAROVÁ, L., ZDRAŽILOVÁ, B., MURAS, J., SÁHA, P., BĚLÁK, V.: Influence of miscible polymer on ocilation flow of polymer melt, In: WORKSHOP 97, ČVUT, Praha, 1997, str. 649 - 650
- [39] LUKOVICS, I., BĚLÁK, V: Techologie výroby ložisek s keramickými tělísky, In: Strojárska technológia a valivé ložiská '97,Žilinská univerzita, Žilina, 1997, str. 70 - 72
- [40] MAŇAS, M., RŮŽIČKA, Z., BĚLÁK, V., SÁHA, P.: Chování taveniny v dutině vstříkovací formy, In:PLASTKO '97,FATRA a.s., Zlín - Napajedla, 1997, sekce B
- [41] MAŇAS, M., BĚLÁK, V., RŮŽIČKA, Z., SÁHA, P.: Velmi přesné díly vyráběné vstříkovaním, In:PLASTKO '97,FATRA a.s., Zlín - Napajedla, 1997, sekce B
- [42] BĚLÁK, V., LUKOVICS, I.: Technology of produktion ceramic tools by injection moulding, In: TRANSCOM '97,Žilinská univerzita, Žilina, 1997, str. 125 – 128
- [43] Lukovics, I., Koudelková, Z., Bělák, V., Tribologické charakteristiky polymerů v třecích uzlech / Tribological Characteristics of Polymer Friction Couples, Nové směry vo výrobnom inženieerstve, Prešov, 2002, str. 442 – 445, (ISBN 80-700 99-828-8)
- [44] Lukovics, I., Koudelková, Z., Bělák, V., Development of Ploymer Baseguide Elements for Moulds, Rozvoj technologie obrábania, Košice, 2002,

## 8 CURICULUM VITAE

**Jméno:** Viktor Bělák, Ing.  
**Datum narození:** 05.04.1972  
**Adresa:** Osvoboditelů 1814, 688 01 Uherský Brod  
**Telefon:** +421/(0)34/69 00-140, 572 638 514

### Vzdělání

1986 – 90 SPŠ Zlín, tř. T.Bati 4187 Obor provozuschopnost výrobních zařízení  
1990 – 95 VUT Brno, Fakulta Technologická, Ing. v oboru Technologie kůže, plastů a pryže  
1995-dosud Doktorandské studium na VUT FS v Brně, v roce 1998 složena rigorózní zkouška na téma Vývoj a testování nářadí pro výrobu keramiky vstříkovaním.

### Odborná praxe:

1998 – 1999 RIM-Tech a.s Zlín. – Konstruktor CAD, programátor CNC strojů.  
1999 – 2000 Kastek spol. s r.o. Uherský Brod – Technolog TPV  
2000 – dosud Skupina Eissmann GmbH, vývojový pracovník, konstruktor CAD; do r. 2002 centrála v SRN, Bad Urach, od r. 2002 dceřinná společnost Eissmann automotive Slovensko, Holíč.

## 9 SUMMARY

In this work, we consider the current state of our understanding of manufacturing injection-moulded parts of technical ceramic. The influence of geometry and of injection-tooling materials was investigated on an injection-moulding process of ceramic materials with an aspect of a tooling lifetime. This research was made for optimisation of cavity's geometry and injection mould's material. Significant dependencies of geometry of mould's cavity on the melt flow in an injection-moulding process and the influence of tooling's material on the lifetime of this tool.

The way of reciprocal abrasion of the rotating ceramic cylinder and specimens with different material's superficies was used for the simulation of abrasion wearing of tools. The rate of wastage of specimens was determined by analysis of dependence of the time and relative speed of this, for the tool's material, destructive process.