

Vysoká škola: strojní a textilní Fakulta: strojní
Katedra: obrábění a montáže Školní rok: 1989/90

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro Jana Chvojku
obor 23-07-8 strojírenská technologie

Vedoucí katedry Vám ve smyslu nařízení vlády ČSSR č. 90/1980 Sb., o státních závěrečných zkouškách a státních rigorózních zkouškách, určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: Broušení keramiky.

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor současných poznatků v broušení keramiky.
2. Technologické podmínky a jejich vliv na kvalitu povrchové vrstvy.
3. Studium povrchových vad po obrábění broušením.
4. Vyhodnocení experimentů a doporučení dalšího postupu.

V 61/90 S

VYSOKÁ ŠKOLA
Ústřední knihovna
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ
PSČ 461 17

Kom/oh

Rozsah grafických prací: dle potřeby

Rozsah průvodní zprávy: 50 stran textu

Seznam odborné literatury:

- 1/ TOMEČKOVÁ, G.: Diamantové nástroje pro obrábění progresivní keramiky. /Diplomová práce/. VŠST Liberec, Liberec 1988
- 2/ VÁCLAVÍK, L.: Broušení rezné a konstrukční keramiky. /Diplomová práce/. VŠST Liberec, Liberec 1989
- 3/ SPUR, G. - TIO, T.H.: Schleifschäden an der Oberflächenrandzone keramischer Werkstoffe. IDR 4/87, s.234

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jaroslav Janoušek

Datum zadání diplomové práce: 10. 10. 1989

Termín odevzdání diplomové práce: ~~4. 6. 1990~~

17. srpna 1990



Gazda
Doc. Ing. Jaromír Gazda, CSc.
Vedoucí katedry

Prášil
Prof. Ing. Vladimír Prášil, DrSc.
Děkan

v Liberci dne 10.10. 1989

Vysoká škola strojní a textilní v Liberci

fakulta strojní

obor: 23 - 07 - 8

Strojírenská technologie

zaměření: obrábění a montáž

Katedra obrábění a montáže

Název: Broušení keramiky

KOM - OM - 680

Autor: Jan Chvojka

Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Janoušek
VŠST Liberec

Rozsah práce: počet stran 64
počet tabulek 1
počet obrázků 24
počet grafů 9

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146076260

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

Liberec dne 17.srpna 1990

Poděkování:

Děkuji vedoucímu své diplomové práce ing. J. Janouškovi za odborné vedení. Dále děkuji za praktickou pomoc při měření na přístrojích ing. Burianovi.

OBSAH

1. ÚVOD	8
2. NÁSTROJE PRO OPRACOVÁNÍ KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ	9
2.1 Popis diamantového zrna	10
2.2 Přírodní a syntetický diamant	10
2.3 Brousící kotouče	11
2.3.1 Koncentrace diamantu	11
2.3.2 Zrnitost diamantu	12
2.3.3 Vazba diamantového kotouče	12
2.3.4 Chlazení diamantových kotoučů	13
2.3.5 Orovnání diamantových kotoučů	13
3. KERAMIKA, JEJÍ VLASTNOSTI A ZPRACOVÁNÍ	15
3.1 Úvod	15
3.2 Struktura a vlastností keramiky	15
3.2.1 Atomová vazba a krystalické složení	15
3.2.2 Mechanické a termální vlastnosti	16
3.3 Zpracování keramiky	17
3.3.1 Příprava prášků a zhutnění	17
3.3.2 Opracování keramiky	19
4. OPTIMALIZACE PROCESU PŘI BROUŠENÍ KERAMICKÝCH VÝROBKŮ	21
4.1 Broušení keramických látek	21
4.2 Změny obrobiteľnosti broušením	21
4.3 Topografie broušení	22
4.4 Tvorba třísek u keramiky	23
4.5 Optimalizace broušení keramiky	25
5. PORUCHY PŘI BROUŠENÍ V POVRCHOVÉ ZÓNE KERAMICKÝCH LÁTEK	26

5.1	Pevnost keramických materiálů v ohybu a vlastní pnutí	26
5.1.1	Podmínky pokusu	26
5.1.2	Studium vlastních pnutí	27
5.1.3	Pevnost v ohybu	30
5.1.4	Shrnutí	38
5.2	Kooperativní práce CIRP	39
5.2.1	Cíle kooperativní práce	39
5.2.2	Obrábění vzorků	39
5.2.3	Geometrie a povrchová drsnost vzorků	40
5.2.4	Zkouška citlivosti povrchu	41
5.2.4.1	Optická kontrola	41
5.2.4.2	Měření tvrdosti	44
5.2.4.3	Měření zbytkového pnutí	44
5.2.4.4	Ultrazvukové měření	45
5.2.5	Závěr	46
6.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	48
6.1	Použitá zařízení při zkouškách	48
6.2	Použitý brousící nástroj	49
6.3	Vyhodnocení experimentálních výsledků	49
6.4	Vyhodnocení grafů	60
7.	ZÁVĚR A DOPORUČENÍ DALŠÍHO SMĚRU VÝZKUMU	63

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

a	tloušťka třísky
a_d	nastavení orovnění
b	šířka kotouče
c	vzdálenost mezi body dotyků
d	vzdálenost sousedních mřížkových rovin
d_s	průměr kotouče
E	Yongův modul pružnosti
F	síla zatížení
F_n	síla normálová
F_t	síla tečná
F/σ	hustota pravděpodobnosti
h	výška vzorku
HV	tvrdost podle Vickerse
K	koncentrace diamantu
l	šířka vzorku
m	Weibull parametr
Q	měrný výkon
R_a	střední aritmetická odchylka profilu
R_z	výška nerovnosti
R_{max}	maximální výška nerovnosti
t_c	doba záběru
v_b	zatěžovací rychlost
v_e	rychlost orovnávacího kotouče
v_{fa}	pracovní záběr
v_{ft}	rychlost posuvu
v_r	rychlost příčného posuvu
v_s	řezná rychlost diamantového kotouče
V'	měrný objem
λ	vlnová délka
θ	úhel ohybu
σ, σ_0	zatížení

1. ÚVOD

V mnohých průmyslových odvětvích jsou ve stále větší míře potřebné konstrukční materiály se špičkovými vlastnostmi, tj. materiály s vysokými pevnostními parametry, s vysokou odolností proti opotřebení, s vysokou otěruvzdorností a jinými vlastnostmi. Tyto rostoucí nároky na materiál si vyžadují vývoj a používání nových, netradičních, progresivních materiálů, mezi nimiž své významné místo mají rovněž keramické materiály. Technologie zpracování těchto materiálů však přináší řadu obtíží, zvláště při jejich obrábění.

Těžkoobrobitelné keramické materiály si vyžadují zvláštní technologické postupy a podmínky obrábění. Vzhledem k vysoké tvrdosti keramických materiálů je nutné používat při obrábění diamantových kotoučů.

Aplikace nových typů keramiky pro výrobu různých mechanických součástí se stávají předmětem všeobecného zájmu pro jejich vynikající odolnost vůči mechanickému namáhání, zvýšené teplotě, opotřebení a korozi. Během výrobního procesu však nelze vyloučit smršťování těchto keramických materiálů, proto je třeba zařadit obrábění keramických výrobků, aby bylo dosaženo předem požadované rozměrové přesnosti keramických výrobků.

Problémem při použití keramických materiálů je však vysoká finanční náročnost, která je způsobena zejména vysokou cenou obráběcího procesu. Největší část ceny keramického materiálu tvoří cena za obrábění.

2. NÁSTROJE PRO OPRACOVÁNÍ KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ

Pro výrobu součástí z keramických materiálů se používá nástrojů se speciálními vlastnostmi. Mezi jiné vlastnosti, které si vyžaduje keramika při obrábění, jako je vysoká pevnost, tvrdost a odolnost proti otěru, patří i rozměrová stabilita a schopnost vytvářet kvalitní povrch. Součástky, které jsou vyrobeny z keramických materiálů, se musejí vyznačovat vysokou přesností a vynikajícími funkčními vlastnostmi. To je vlastně určeno nasazením součástí z keramických materiálů na důležitých místech u různých zařízeních.

Jako nejvíce výhodný materiál pro obrábění keramiky se jeví diamant a to jak přírodní, tak i syntetický. Může se používat jako brusivo u brousících kotoučů, ve formě past pro lapování a prášků.

2.1 Popis diamantového zrna

Diamant umožňuje provádět takové technologické postupy a operace, které by bez jeho použití nebyly vůbec možné. To vše díky svým mechanickým, fyzikálním, tepelným, elektrickým a chemickým vlastnostem. Mezi tyto vlastnosti patří hlavně tvrdost, vysoká odolnost proti otěru, vysoká pevnost a vynikající tepelná vodivost. Opracování materiálů diamantem nám umožňuje vyrábět lépe, dosáhnout kvalitnějšího povrchu a mnoha dalších parametrů, výroba je také rychlejší, než u klasických metod opracování brousícími nástroji.

Diamant je doposud nejtvrdším materiálem, který je znám. Jeho vlastnosti vynikají tím více, čím tvrdší je opracovávaný keramický materiál. Pokud porovnáme diamant s ostatními materiály, zjistíme, že je vysoce převyšuje v mnoha vlastnostech. Mezi důležité fyzikální vlastnosti diamantu patří i malá teplotní roztažnost, která je zárukou rozměrové stability diamantového kotouče, který se při broušení opotřebovává jen velmi pomalu a při práci se téměř nemění. V souvislosti s touto vlastností můžeme hovořit o téměř konstantním nástroji, co se rozměru týče a u obrobku dosahujeme vysoké rozměrové přesnosti.

2.2 Přírodní a syntetický diamant

Modifikací uhlíku krystalické struktury, která většinou obsahuje velké množství příměsí, nazýváme přírodním diamantem. Může nabývat různých tvarů, velikostí, barev a kvalit. Dobývá se na rýžovištích, či v primárních ložiscích.

Diamant, který nazýváme syntetickým, získáváme za vysokého tlaku a vysoké teploty. Syntetický diamant je vyráběn s vlastnostmi přímo pro jeho použití i když vykazuje horší mechanické vlastnosti, než diamant přírodní. Vyrábí se jako monokrystaly a polykrystaly.

2.3 Brousící kotouče

Mezi diamantové nástroje, kam patří soustružnické nože, lapovací a leštící kotouče, honovací lišty, lapovací pasty a prášky, řadíme jako nejobsáhlejší skupinu diamantové brousící kotouče. Ve strojírenství se používají všude tam, kde je třeba opracovat velmi tvrdé materiály a je požadována velká rozměrová přesnost a dobrá kvalita povrchu.

2.3.1 Koncentrace diamantu

Koncentrace diamantu vyjadřuje hmotnostní obsah diamantového prášku v 1 cm^3 brusné vrstvy, která se vyjadřuje vzorcem

$$K = g / \text{cm}^3$$

Základem pro určení koncentrace je stanovena koncentrace $K = 100$, kde 1 cm^3 vrstvy obsahuje 0,88 g diamantového prášku. Toto množství prášku vyjadřuje 25 % objemu brusné vrstvy.

Volba koncentrace diamantu je velmi důležitá pro efektivní opracování keramických materiálů. Překročení optimální koncentrace má za následek zvýšení řezných odporů a snížení výkonu broušení.

2.3.2 Zrnitost diamantu

Zrna diamantu v závislosti na jejich rozměrech se dělí na prosívané a mikronové. Zrnitost je charakterizována poměrem frakce základní, tj. frakce, která je ve větším zastoupení, a frakcí vedlejších vyjádřených v procentech:

- a/ hmotnosti - pro prášky prosívané
- b/ počtu zrn - pro prášky mikronové

2.3.3 Vazba diamantového kotouče

Vazby diamantových nástrojů mají vliv na rychlost úběru a kvalitu povrchu a proto je lze posuzovat ze dvou protichůdných hledisek:

- a/ aby zrno pracovalo co nejdéle; vystupuje tu otupení zrna /u kovových vazeb dochází ke vzniku vyšších teplot - nutnost chlazení/.
- b/ aby se zrno po malém otupení buď rozdrtilo a utvořilo další břity, nebo aby se z pojiva uvolnila a obnažila další zrna.

Mezi pryskyřičné vazby řadíme vazbu označenou Ba, která představuje fenolkrezolovou pryskyřici se speciálními plnitely a vazbu nazvanou Ep, která představuje zvláštním způsobem upravenou epoxydovou pryskyřici obsahující jako plnitel kysličníky kovů. U této vazby je třeba pracovat s chlazením.

Druhou skupinu tvoří vazby kovové. Jako příklad uvedu vazbu Mk, která poměrně rychle obnažuje zrna, vazbu Bz, která

je tvořena bronzem s různým obsahem cínu a přísad. Patří sem i vazby El pro elektrolytické broušení s obsahem bronzového pojiva, vazba BzS, která se řadí mezi nejtvrďší pojiva, vazba Ni, jejímž obsahem je nikl a vazba Cu, která je použitelná pro velmi křehký obrobek.

2.3.4 Chlazení diamantových kotoučů

Na celkovou životnost diamantového nástroje má značný vliv i chlazení. Doporučuje se chladit všude tam, kde je to jen trochu možné. Chladicí kapalina jednak podstatně snižuje teplotu v místě obrábění, ale i dokonale odvádí produkt broušení. Kotouče, které jsou chlazené, jsou méně náchylné k zanášení a prodlužuje se jejich životnost a opotřebení.

2.3.5 Orovnání diamantových kotoučů

Zlepšení průběhu broušení keramického materiálu je také možné dosáhnout příslušným orovněním diamantového kotouče. Přesah zrna a topografie brousícího diamantového kotouče mohou na obrobitelnost materiálu tak působit, že kotouč již od začátku vykazuje stacionární chování. Jako nejpriznivější pro obrábění keramiky jsou uvedeny přesahy zrn dosahující od 10 do 20 % jejich použité velikosti.

Přesto musí být diamantový kotouč po profilování dodatečně naostřen tak, aby se odstranilo pojivo mezi zrny a aby se vyčistily třísky. Mezi důležité metody patří zapichovací ostření s korundovým blokem a ostření s rotujícím Si kotoučem. Jako další alternativa se nabízí ostření paprskem volných zrn. Přednostmi tohoto způsobu ostření jsou nejen nízké náklady, ale i krátký ostřicí čas. V nejhorším případě je kotouč ostřen po určitém počtu operací.

V ostatních případech může být zajímavé ošetřit brusný kotouč při jeho práci. Tento proces může být průběžný nebo přerušovaný. Přednosti současného ošetření korundovým blokem jsou nízké brusné síly a nepatrný zdvih těchto sil. Intenzivní ostření diamantového kotouče vyvolává opotřebení kotouče a vede k snížení jakosti povrchu.

3. KERAMIKA, JEJÍ VLASTNOSTI A ZPRACOVÁNÍ

3.1 Úvod

Keramické materiály se stávají stále více důležitými v moderní průmyslové technologii. Zásadou rozmanitosti zajímavých vlastností, jako je odolnost proti otěru, proti opotřebení a vysoké pevnosti při vysokých teplotách, je stále vzrůstající počet komponentů vyráběných právě z těchto vysokopevnostních materiálů.

3.2 Struktura a vlastnosti keramiky

3.2.1 Atomová vazba a krystalické složení

Keramika je obvykle definována jako materiál založený na anorganických nekovových sloučeninách. Tato definice však zahrnuje mnoho materiálů, které normálně nejsou považovány za keramiku. Na rozdíl od hrnčířského zboží je technická keramika zhuštěna na vysoký stupeň k dosažení její tvrdosti a vysoké pevnosti. Keramika je založena na oxidech, karbidech, nitridech, silicidtech a boridech. Je rozdělena do dvou hlavních skupin - na oxidovou a neoxidovou keramiku.

Vlastnosti keramických materiálů jsou ovládány přítomností atomů, jejich vazbovým mechanismem a krystalickou strukturou. Krystaly jsou tvořeny s kovalentním propojením, iontovým propojením a kombinací obou. Poměr kovalentního a iontového propojení se liší od 4:6 / Al_2O_3 , oxidová keramika/ do 9:1 /SiC, neoxidová keramika/.

3.2.2 Mechanické a termální vlastnosti

Tvrдость keramických materiálů a Yongův modul závisí na druhu atomového propojení. Materiály s kovovou vazbou vykazují vysokou tvárnost, keramika s kovalentní vazbou je typicky tvrdá a má vysokou tavicí teplotu. Tvrдость, Yongův modul a ostatní vlastnosti technické keramiky a oceli jsou uvedeny v tabulce č.1.

tab.č.1

složení	Al ₂ O ₃ 95% ZrO ₂ 5%	Al ₂ O ₃ 90% ZrO ₂ 10%	Al ₂ O ₃ 70% TiC 10%	Si ₃ N ₄ 100% Y ₂ O ₃	ocel 100 Cr 6
Hustota /g/cm ³ /	3,97	4,16	4,28	3,3	7,85
Tvrдость HV 0,5	2200	2000	2100	1800	860
Vrubová houževna- stost /MPa·m ^{1/2} /	5,1	5,3	5,0	7,0	833
Pevnost v ohybu /MPa/	600	650	600	720	1000
Tepelná vodivost /W/m·K/	25	25	30	35	50
Koeficient tepelné expanze %/K	8,0	8,0	8,0	3,2	11
Yongův modul /GPa/	390	380			

3.2.2 Mechanické a termální vlastnosti

Tvrđost keramických materiálů a Yongův modul závisí na druhu atomového propojení. Materiály s kovovou vazbou vykazují vysokou tvárnost, keramika s kovalentní vazbou je typicky tvrdá a má vysokou tavící teplotu. Tvrđost, Yongův modul a ostatní vlastnosti technické keramiky a oceli jsou uvedeny v tabulce č.1.

tab.č.1

složení	Al ₂ O ₃ 95% ZrO ₂ 5%	Al ₂ O ₃ 90% ZrO ₂ 10%	Al ₂ O ₃ 70% TiC 10%	Si ₃ N ₄ 100% Y ₂ O ₃	ocel 100 Cr 6
Hustota /g/cm ³ /	3,97	4,16	4,28	3,3	7,85
Tvrđost HV 0,5	2200	2000	2100	1800	860
Vrubová houževna- tost /MPa.m ^{1/2} /	5,1	5,3	5,0	7,0	833
Pevnost v ohybu /MPa/	600	650	600	720	1000
TepeIná vodivost /W//m.k//	25	25	30	35	50
Koeficient tepelné expanze %/K	8,0	8,0	8,0	3,2	11
Yongův modul /GPa/ pružnosti	390	380	400	280	210

Keramické materiály nevykazují tvárnost při pokojové teplotě. Důvodem jsou komplexní krystalografické struktury

a silný vazbový systém. Pukliny a ostatní defekty nejsou obklopeny podstatnou tvárnou zónou, která u tvárných materiálů směřuje ke snižování tlakových koncentrací a tak snižuje odolnost proti rozšiřování puklin. Z technického hlediska tato křehkost tvoří nejvíce kritickou vlastnost keramiky, protože právě tato křehkost způsobuje náhlé selhání keramických komponentů při nárazové zátěži.

Pevnost převážně iontově vázaných materiálů se značně snižuje se stoupající teplotou. Oproti tomu pevnost materiálů s kovalentní vazbou na teplotě nezávisí. Jejich nízký koeficient termální expanze a vysoká tepelná vodivost činí tyto materiály způsobilé pro použití při vysokých teplotách.

Znalost tepelných vlastností se stává důležitou při použití keramických materiálů v jakýchkoliv vysokých teplotách, protože keramika je křehká a nemůže snášet vnitřní pnutí způsobené nevhodnou tepelnou roztažností nebo rychle klesající teplotou.

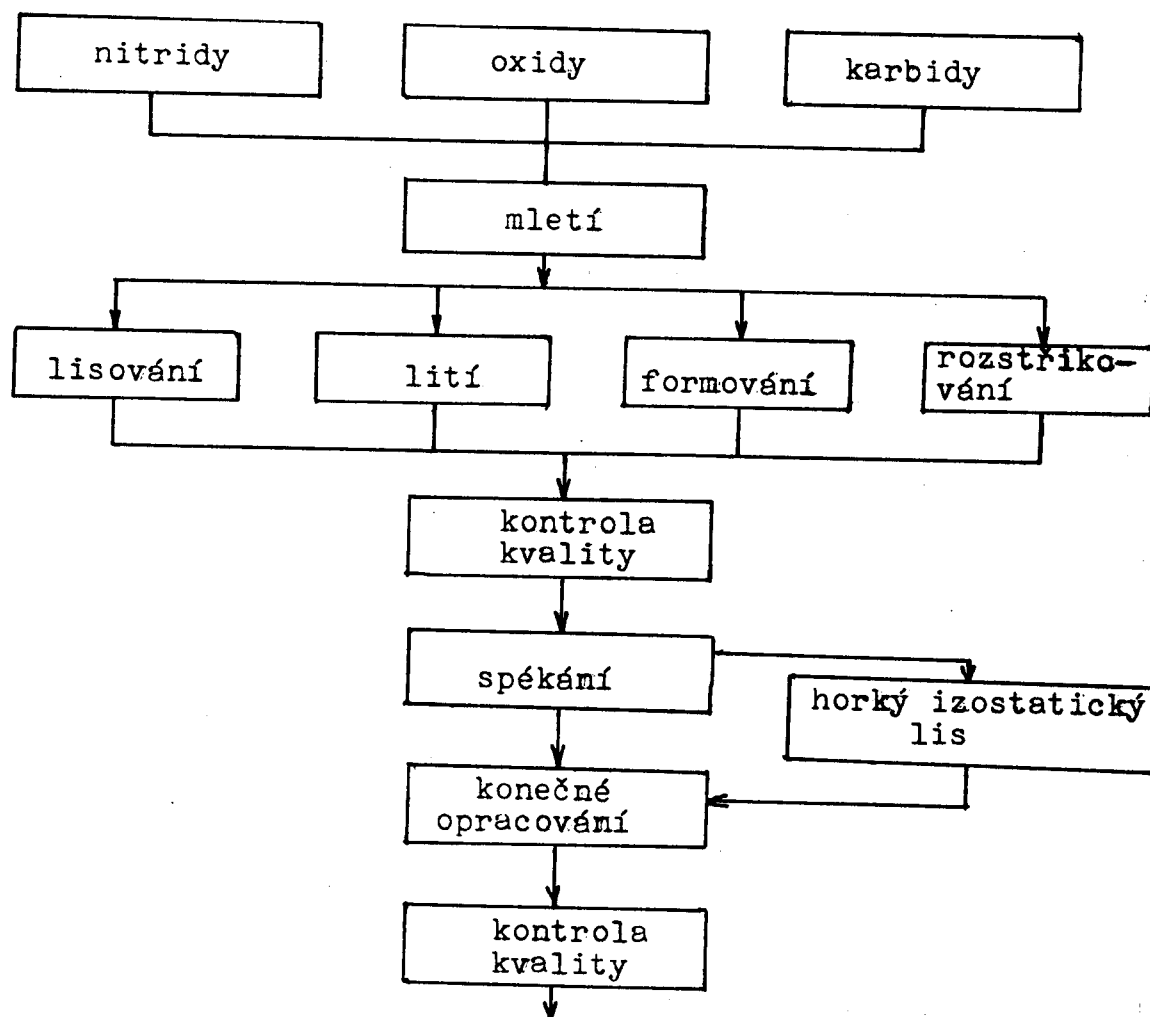
3.3 Zpracování keramiky

3.3.1 Příprava prášku a zhutnění

Pro keramický materiál a jeho vlastnosti je kromě složení a mikrostruktury důležitá i technika zpracování - jako je mletí, zhutnění a spékání. Druh suroviny má převažující účinek na konečné vlastnosti keramických komponentů.

Keramický prášek je zpracováván několika mlecími technikami jako je tření, kulové mletí, sušení za zmrazeného stavu. Roztříděný a zhutněný prášek, který je smíchán s pojivem a mazivem, je potom formován do požadovaných tvarů lisováním. Některé z těchto technik, jako lisování za tepla, spojují zpevnění a zhutnění v jedné operaci, viz obrázek č.1.

obr.č.1



Tato operace musí být ve zpracování pečlivě kontrolována, protože trhliny limitují pevnost mohou být způsobeny nedostatečným lisováním.

Konečné zhutnění slisovaného prášku je provedeno spékacím procesem. Je to odstranění pórů mezi částicemi a vytvořením silných vazeb mezi nimi. Spékací mechanismus je aktivován teplem; potřebná teplota je kolem 1700°C .

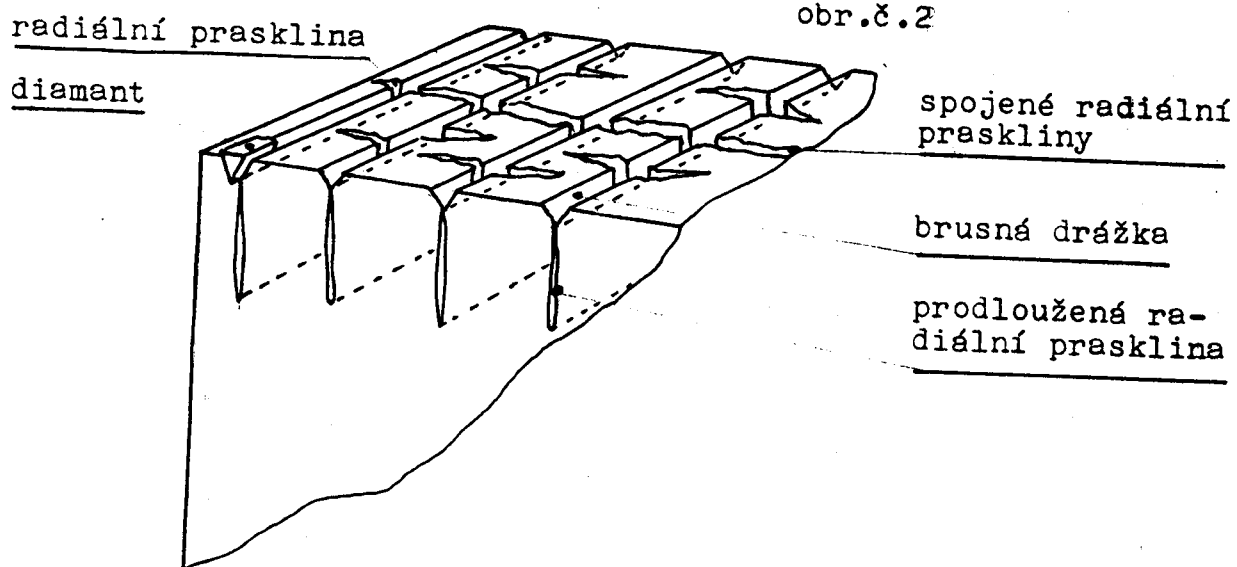
Spékání je doprovázeno se smrštěním komponentu. Ve

většině případů je procento smrštění vysoké / až do 25 % /. Proto pouze jenom některé díly mohou být vyráběny v jejich konečném tvaru přímo spékáním. Ke splnění těsných rozměrových tolerancí a ke zlepšení konečné úpravy povrchu je třeba opracování. Představuje podstatnou část výrobních nákladů - až do 60 % a způsobuje pevnost keramiky.

3.3.2 Opracování keramiky

Nejrozšířenějším způsobem opracování keramiky je broušení diamantovými kotouči. Broušení musí být prováděno pečlivě, aby se zabránilo lámání uvnitř povrchu a tak snížení pevnosti komponentu.

Aby byl znám vliv broušení na pevnost keramických materiálů, byly zkoumány vzájemné vlivy mezi jednotlivými zrnky diamantů vyrytých do keramického povrchu. Materiál v přímé dráze pohybu brusných zrněk je napěchován vysokým tlakem a teplotou. Materiál naléhající na abrazivní částici je stlačen a může být plasticky deformován. Po proběhlém odbroušení se materiál vzchopí a vzniknou praskliny nebo odštěpky vzhledem k působícímu napětí v tahu.



Obrázek č.2 ukazuje schematicky typy štěrbin, které se formují na zbroušeném povrchu. Mediální štěrbiný běží paralelně se směrem broušení a jsou kolmé k povrchu. Vznikají vysokými tažnými tlaky na spodní straně brusných drážek. Protože jsou tyto štěrbiný nejhlubší, způsobují největší počet snížení pevnosti.

Radiální štěrbiný se rozšiřují hvězdicově od drážek. Jsou umístěny kolmo ke směru broušení a povrchu, ale ne tak hluboko jako středové štěrbiný; tudíž nesnižují pevnost ve stejném počtu.

Z technického hlediska je důležité poznamenat, že obráběcí proces má vliv na snížení pevnosti, která je závislá na směru opracování. Povaha tohoto úbytku pevnosti a vztah k parametrům obrábění a specifikaci materiálu nejsou dosud plně známy.

4. OPTIMALIZACE PROCESU PŘI BROUŠENÍ KERAMICKÝCH VÝROBKŮ

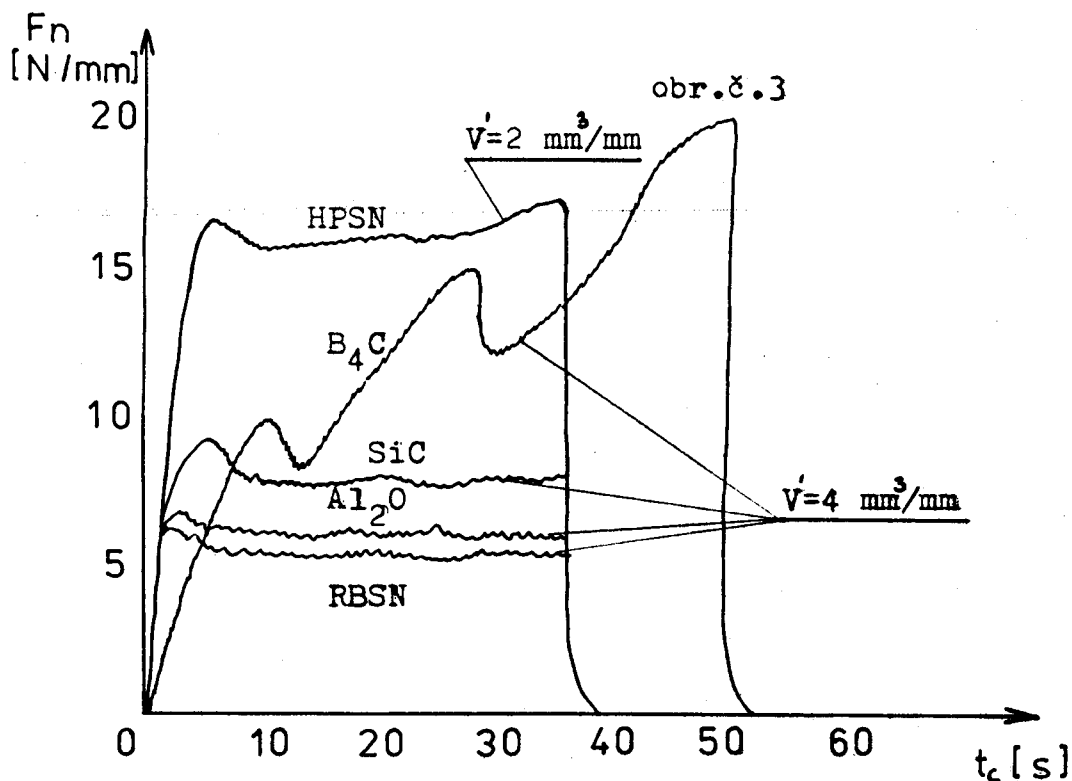
4.1 Broušení keramických látek

V praxi se brousí velký počet keramických látek. Rozdíly v obrobiteľnosti závisí na chemickém složení a vnitřní struktuře.

Nejvyšší hodnoty pevnosti vykazují jemnozrnné, nepórezní látky ze silicium karbidu a silicium nitrokarbidu. Jsou zpravidla hůře obrobiteľné než hrubozrnné nebo pórezní keramické materiály. Brousící kotouč a technologické podmínky musí být v souladu s obrobiteľností keramiky. Ze srovnání tvrdostí běžných řezných materiálů vyplývá, že hospodárné obrábění keramiky je možné pouze s diamantovým nástrojem. Důležitým faktorem je při tom vliv opotřebení pracovního nástroje. Při změnách ostrosti a geometrie brousícího kotouče v průběhu času může docházet k ovlivnění postupu broušení a kvality výrobků. Podmínky broušení a specifikace brousícího kotouče mohou být zvoleny tak, aby kotouč pracoval v oblasti samoostření. Důležité okrajové podmínky jsou hospodárnost, vyjádřená odbroušeným objemem a opotřebení kotouče, právě tak jako porušení povrchové zóny výrobku mikrotrhlinami.

4.2 Změny obrobiteľnosti broušením

Brousící síly a jejich průběh je silně závislý na materiálu. Zatímco se pro Al_2O_3 po krátkém čase síly ustalují, vykazují jiné keramické látky typické změny v průběhu sil. Pro RBNS a SSiC je typická závislost stoupajících sil na postupném otupování kotouče.



Kotouč s velikostí zrna D 126

$v_s = 20 \text{ m/s}$

$v_{ft} = 0,5 \text{ m/s}$

Problematické jsou změny sil závislé na deformaci stroje a odchylkách tvaru výrobku. S ohledem na vysokou přesnost výrobku by měli být brusné síly co možná nejkonstantnější. Pokud to není možné dosáhnout technologickými opatřeními, zvyšují se požadavky na tuhost stroje.

4.3 Topografie broušení

Chování brusných sil je měřitelné změnami topografie broušícího kotouče. Při broušení materiálu HPSN se kotouč opotřebovává převážně otěrem zrn. Proto se mohou tvořit na jednotlivých brusných zrnech velké opotřeбенé plochy. S prodlužujícím časem broušení se struktura opotřeбенého povrchu zarovnáává.

Potom dochází k tření velkých ploch pojiva na povrchu obrobku. Zvlášť patrné jsou změny topografie u přečnívajících částí zrn.

Podobný postup opotřebení je pozorovatelný při broušení SiC a B_4C . Oproti kovovým látkám zde nedochází k erozi pojiva třískami. Pojivo je proto převážně snášeno třením. To je nevýhoda u metalických pojiv odolných proti otěru. Následkem jsou často vyšší brusné síly. Pojivo z keramiky nebo umělé pryskyřice vykazuje příznivější opotřebení proti otěru. Při broušení hrubozrnné Al_2O_3 a RBSN keramiky je pozorovatelné opotřebení pojiva abrazivním působením odštěpujících se kousků keramiky. Brousící kotouče s otěruvzdorným bronzovým nebo polyamidovým pojivem ukazují při broušení Al_2O_3 vyšší životnost než kotouče s fenolpryskyřičným pojivem.

4.4 Tvorba třísek u keramiky

Způsoby otěru zrn a pojiva dávají předpoklad, že obrus materiálu u keramiky probíhá více drcením a rytím povrchu, než oběrem třísky v klasickém smyslu. Tento druh úběru materiálu je určen křehkostí materiálu.

Záběr zrna je možno rozdělit do tří fází, jako u broušení kovů. Při malé hloubce záběru brusných zrn, případně při velkých brusných plochách zrn převažují elastické deformace. Směrodatný je tlak mezi zrnem a látkou, při kterém odvod materiálu je možný ještě rýpáním.

Na obrázcích č. 4, 5 a 6 vidíme různé typy třísek. Jedná se o nepravidelně formovanou drť, která u HPSN pro svoji malou velikost vypadává. Toto vysvětluje také nepatrnou erozi pojiva při broušení. Naproti tomu je tříska B_4C ostro-

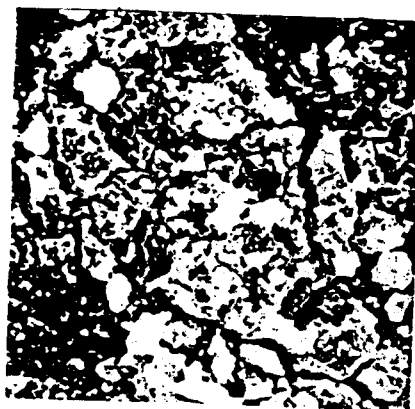
hranná. Rozdíly ve tvaru třísek zdůrazňují zvláště vliv látky na tvorbu třísky.

obr.č.4



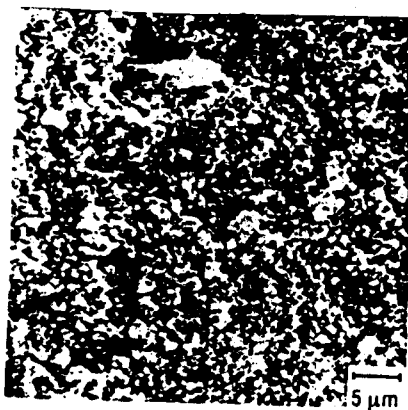
B₄C

obr.č.5



SSiC

obr.č.6



HPSN

4.5 Optimalizace broušení keramiky

Předpokladem pro stacionární broušení je rovnováha mezi otupením jednotlivých brusných zrn a samoostřením; to znamená s drcením a praskáním zrn. Tento stav může být ovlivňován pevností případně křehkostí zrn a pevností pojiva broušícího kotouče.

Z hlediska brusných sil se keramika chová obdobně jako broušený kov. S rostoucí řeznou rychlostí se brusné síly zmenšují. Důležité jsou i zvyšující se teploty, které na základě ohraničené tepelné odolnosti pojiva z umělé pryskyřice vedou ke zvýšenému opotřebení. Zvýšené bude také tepelné namáhání kotouče vzhledem k malému přenosu tepla v keramickém materiálu.

Při broušení neoxidické keramiky má smysl kombinace snadno se drtícího zrna a tvrdého pojiva z umělé pryskyřice. Díky příznivým poměrům mikroopotřebení se může zrno relativně dlouho udržet v pojivu. Vysoké brusné síly a opotřebení u CBN zrn podtrhují technologické přednosti diamantu při broušení keramiky.

5. PORUCHY PŘI BROUŠENÍ V POVRCHOVÉ ZÓNĚ KERAMICKÝCH LÁTEK

5.1 Pevnost keramických materiálů v ohybu a vlastní pnutí

Lomová mechanika /pružnost, pevnost/ a analýza napětí dokládají, že poruchy vedoucí k poškození keramických materiálů jsou zpravidla povrchové a vznikají buď při přípravě keramiky nebo jsou způsobeny třískovým obráběním.

5.1.1 Podmínky pokusu

Jako pokusná látka sloužil silicium nitrid /HPSN/ a siliciumkarbid /SiSiC/ za horka lisovaný. HPSN vykazuje v teplotním rozhraní do 1000°C největší ohybovou pevnost ze všech SiC a Si_3N_4 keramik. SiSiC v pokojové teplotě má ve srovnání s HPSN nižší pevnost v ohybu a je levnější než HPSN.

Pro pokusy byly použity ploché brusky Jung JF 520 DS. Pro chlazení byla nasazena 4,5 % emulze. Jako nástroj byl použit kotouč s velikostí zrna D 126, koncentrace 50. Rozměry kotouče byly:

Průměr brousícího nástroje $d_s = 225 \text{ mm}$

Šířka kotouče $b = 10 \text{ mm}$

Diamantový kotouč byl před každým pokusem profilován SiC kotoučem s cizím pohonem a to za následujících podmínek:

Orovnávací kotouč C 60 N 5 V

Postup protiběžný

Obvodová rychlost
diamantového kotouče

$$v_s = 10 \text{ m/s}$$

Obvodová rychlost
orovnávacího kotouče

$$v_e = 17,5 \text{ m/s}$$

Rychlost příčného posuvu

$$v_r = 0,4 \text{ m/min}$$

Nastavení orovnění

$$a_d = 10 \text{ } \mu\text{m}$$

Nakonec proběhlo broušení kotouče pomocí korundového bloku za následujících podmínek:

Ostřicí řezná rychlost

$$v_e = 20 \text{ m/s}$$

Měrný výkon

$$Q' = 5 \text{ mm}^3/\text{mm.s}$$

Postup broušení

protiběžný

Při určitých pokusech je nutná systematická variace objemu odbroušeného materiálu, aby byl eliminován rozdílný odpor zrn. Zde je určen měrný výkon od 0 do $25 \text{ mm}^3/\text{mm.s}$. Při výkonu $Q'=0$ byl kotouč přímo po profilování, to znamená, že byl nasažen bez dalšího broušení k použití.

5.1.2 Studium vlastních pnutí

Studium vlastních pnutí probíhalo ve spolupráci s institutem pracovní mechaniky ve Freiburgu. Byly použity rentgenografické postupy. Rentgenografické studium měření napětí spočívá na studiu protažení mřížky, to znamená na změnách vzdáleností atomů. Základem jevu je ohyb měkkého rentgenového záření na krystalech, které je popsáno Braggovou rovnicí

$$2 \cdot d \cdot \sin \theta = \lambda, \text{ kde}$$

λ = vlnová délka rentgenového záření

d = vzdálenost sousedních mřížkových rovin

θ = úhel ohybu

Při daném elastickém napětí je krystalická mřížka deformována, přičemž se vzdálenost jednotlivých mřížkových rovin mění a úhel ohybu se zvětšuje nebo zmenšuje o takovou hodnotu, aby bylo dosaženo maximální intenzity odraženého záření. Na základě změny úhlu může být zjišťována změna vzdálenosti rovin mřížky, případně protažení, deformaci mřížky.

Přesnost zjištění je silně závislá a anizotropii a heterogenitě látky. Pro hexagonální strukturu Si_3N_4 a zvláště SiC je vliv anizotropie zvláště na rentgenografickém zjištění značný. Na základě skutečnosti, že konstanta elasticity rentgenograficky zjištěná u neoxidické keramiky je částečně závislá na jakosti povrchu vzorku, je naměřená hodnota zatížena velkým rozptylem. Vlastní pnutí SiSiC bylo se zářením FeK naměřeno $156,2^\circ$ a u HPSN se zářičem CuK $141,5^\circ$. Uváděné naměřené hodnoty jsou dle údajů Institutu průměrné hodnoty měřeného povrchu o velikosti $30 \times 10 \text{ mm}$ a hloubkou průniku rentgenového záření $40 \mu\text{m}$.

Rozměry použitých keramických vzorků byly $50 \times 50 \times 3$ až 8 mm . Nastavené podmínky pro broušení keramiky při zjišťování vlastních pnutí byly s výjimkou zkoumaných parametrů konstantní:

Řezná rychlost

$$v_s = 35 \text{ m/s}$$

Rychlost posuvu

$$v_{ft} = 10 \text{ m/min}$$

Tloušťka třísky

$$a = 30 \text{ } \mu\text{m}$$

Příčný posuv

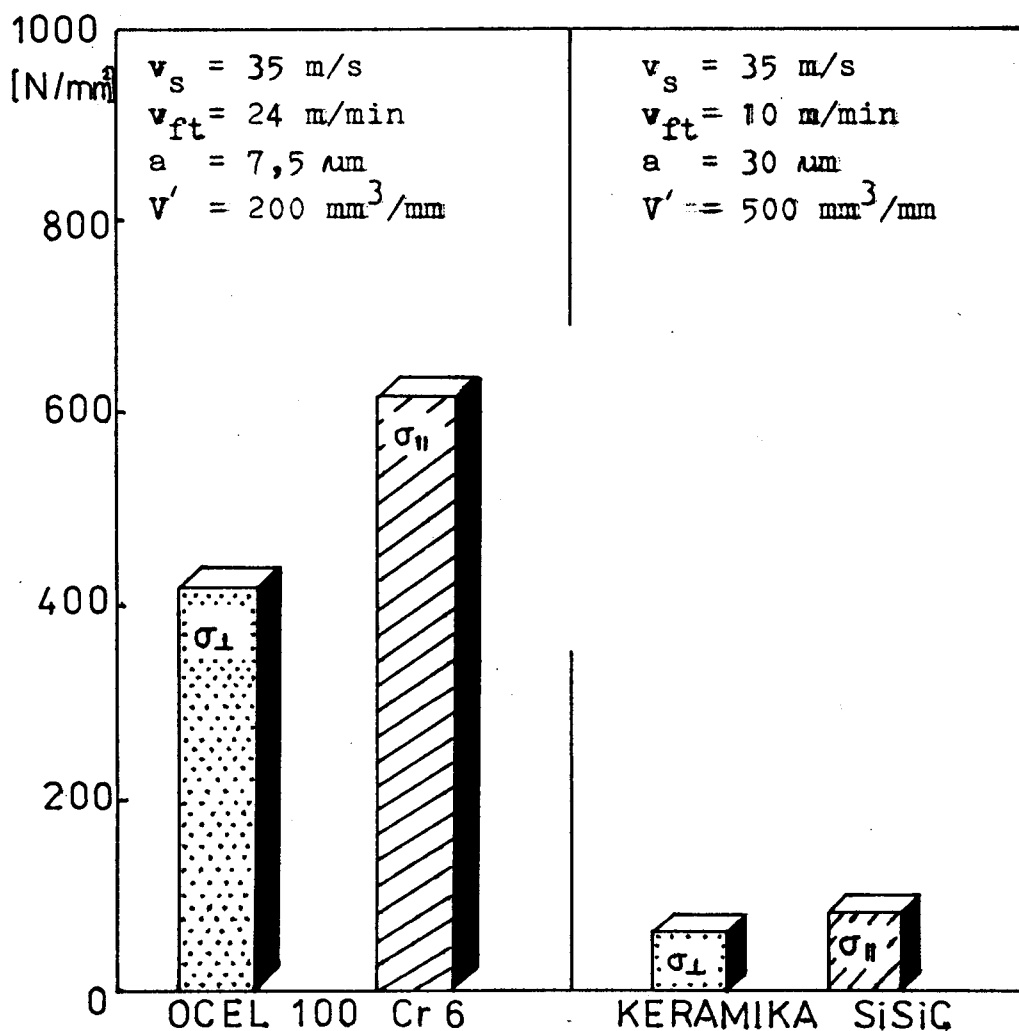
$$a_p = 5 \text{ mm}$$

Měrný objem

$$V' = 500 \text{ mm}^3/\text{mm}$$

Následkem chybějící duktility, vysoké tepelné odolnosti a malého koeficientu vyzařování tepla krystalů SiC a Si_3N_4 je předpokládáno, že odpovědný za vlastní napětí při broušení je vznikající skleněná fáze na hranicích zrn u HPSN a volný křemík u SiSiC . Tento předpoklad je podporován především srovnáním chování kovů při broušení, kde vznikají mnohem větší napětí /viz obr.č.7/.

obr.č.7



Největší pnutí, které při této pokusové řadě vystupovalo, bylo pouze $1/6$ velké, jako je při broušení oceli. Důvod pro nízké zjištěné vlastní pnutí může také spočívat v malé hloubce průniku rentgenového záření $40\text{ }\mu\text{m}$. Jsou-li v povrchové hraniční zóně gradienty vlastního pnutí, poskytuje měření popsanou metodou střední hodnotu napětí v celkové měřené hloubce. Není tedy vyloučeno, že při brousícím procesu vzniknou podstatně vyšší napětí, než ta, která byla naměřena.

Přes malé hodnoty vlastních napětí jsou zřejmě jasné tendence při určitých brusných procesech. S místně vysokým mechanickým zatížením vznikají podobně jako u kovů přednostně tlaková napětí. Se stoupající řeznou rychlostí je odpovídajícím způsobem zjišťováno snižování tlakového napětí. Napětí se mění s měnící se tloušťkou třísky. S narůstající třískou je také spojeno narůstání tepelného a mechanického namáhání. Největší tlakové napětí bylo zjištěno při síle třísky $a = 20\text{ }\mu\text{m}$. Proti očekávání nebyly nalezeny žádné rozdíly ve vlastních napětích v závislosti na rychlosti posuvu.

Oproti HPSN vykazují vlastní napětí při broušení SiSiC jiné tendence. Nenaostřený brusný kotouč vyvolává tlaková napětí a ostře nabroušený tahová napětí. Při nízkých rychlostech posuvu, při kterých vystupuje pravděpodobně vyšší tepelné namáhání, vznikají vyšší tlaková napětí.

Zvláště kladná je skutečnost, že až na některé podmínky broušení se u obou keramik vyskytují tlaková napětí. Kromě rozdílných podmínek broušení má na vlastní napětí vliv také jakost povrchu výrobku.

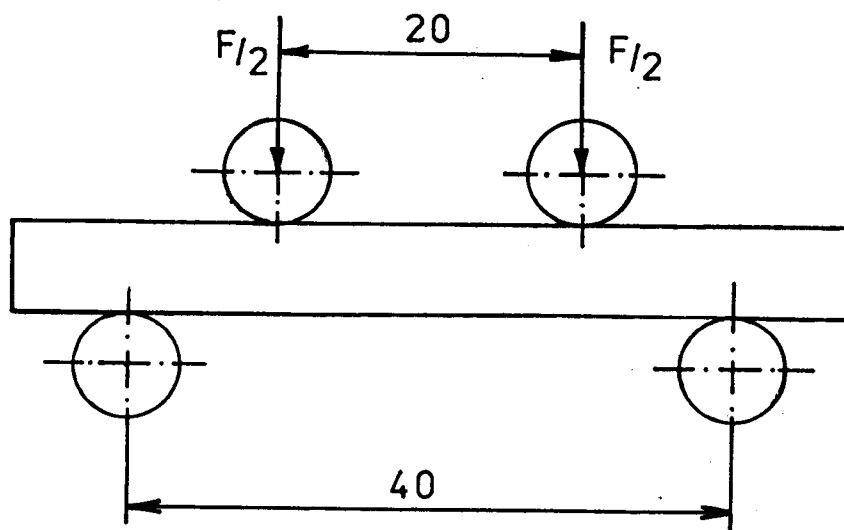
5.1.3 Pevnost v ohybu

Měření čtyřbodové zkoušky ohybu vzorku o rozměru

45 x 4,5 x 3,4 mm jsou stanovena Německou keramickou společností /DKG/ a jsou doporučena v keramickém průmyslu pro ohybové zkoušky. S přibývajícím objemem roste pravděpodobnost, že zkouška odhalí chyby, které snižují pevnost. To znamená, že čím větší dávka vzorků je, tím nižší je zjišťovaná pevnost a současně stoupá rozptyl hodnot pevností. Možnost reprodukování pokusů je úzce závislá na vlastnostech látky. Pro zkoumání byly použity proto látky pouze z jedné šarže.

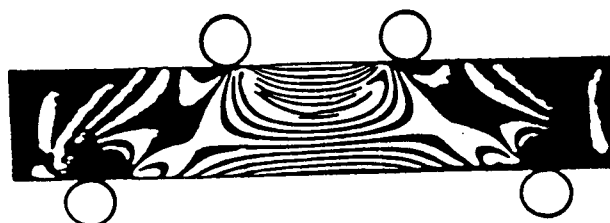
Měření ohybové pevnosti /až do lomu/ proběhlo na stroji Netsch při možnosti tepelného namáhání. Maximální síla byla rozdělena do tří stupňů: na 500, 1250 a 2500 N a rychlost zetížení čtyřmi možnými posuny zatěžovacího závaží do celkem 12 stupňů. Přerušení posunu nastalo při prasknutí vzorku a lomová síla se odečítala na stupnici odpovídající posunu zatěžovacího závaží. Vzhledem k vysoké pevnosti zkoumaných látek bylo použito stabilní konstrukce se dvěma ocelovými válci. Na obrázku č.8 je znázorněno uspořádání čtyřbodové zkoušky ohybové pevnosti.

obr.č.8



Obroušená plocha byla namáhána tahovým zatížením. Jak je zřejmé, vzniká mezi vnitřními body dotyku sil oblast, ve které převládá konstantní ohybový moment a tím se nevyskytují žádná stříhová napětí. Aby se zabránilo zlomení vzorku mimo body zatížení, bylo stanoveno DKG, že vnitřní body zatížení budou mít poloviční vzdálenost /20 mm/ než vnější. Na obrázku č.9 je znázorněno, jak vypadá namáhání při čtyřbodové ohybové zkoušce.

obr.č.9



Tmavé a světlé pruhy ukazují konstantní průběh napětí na spodní straně vzorku mezi vnitřními body namáhání. Čtyřbodové ohybové zkoušky byly se systematickou změnou parametrů provedeny u keramik HPSN a SiSiC.

Pro zachování konstantních podmínek zůstaly následující podmínky broušení a ohybových zkoušek následující:

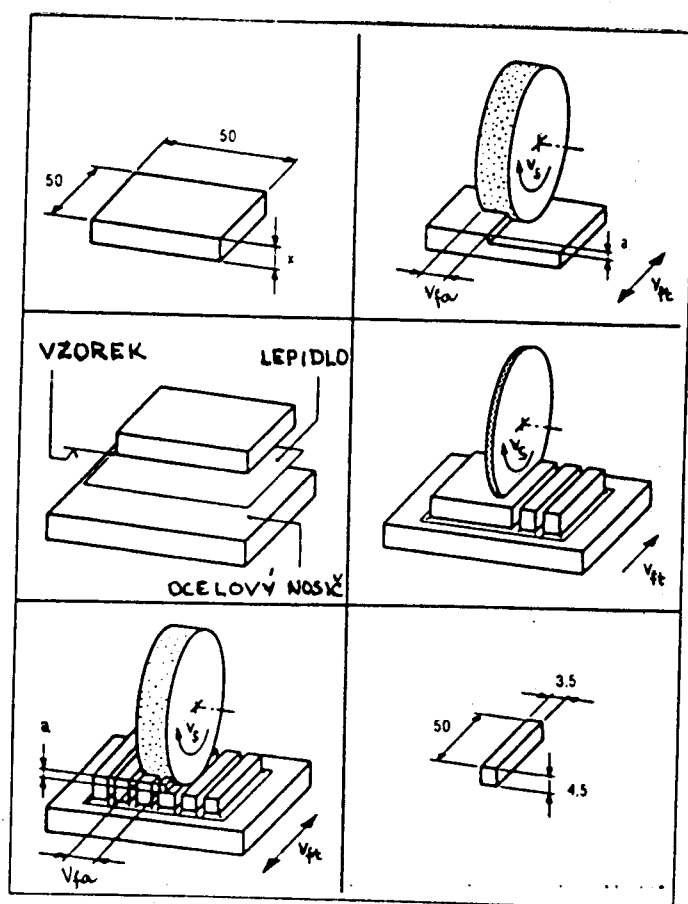
Rezná rychlost	$v_s = 35 \text{ m/s}$
Rychlost posuvu	$v_{ft} = 10 \text{ m/min}$
Síla třísky	$a = 30 \text{ } \mu\text{m}$
Příčný posuv	$v_{pa} = 5 \text{ mm}$
Postup broušení	protiběžný

Odbroušený objem

$$V' = 600 \text{ mm}^3/\text{mm}$$

Pro snížení nákladů na experimenty je nutný kritický výběr kombinací parametrů. Základním kritériem je zde vliv jakýchkoliv parametrů na jakost povrchu. Jsou měněny nejen nastavené podmínky, ale i velikost zrn, jejich odpor, protiběžné a souběžné ostření. Na obrázku č.10 je předvedena příprava vzorku pro čtyřbodovou ohybovou zkoušku.

obr.č.10



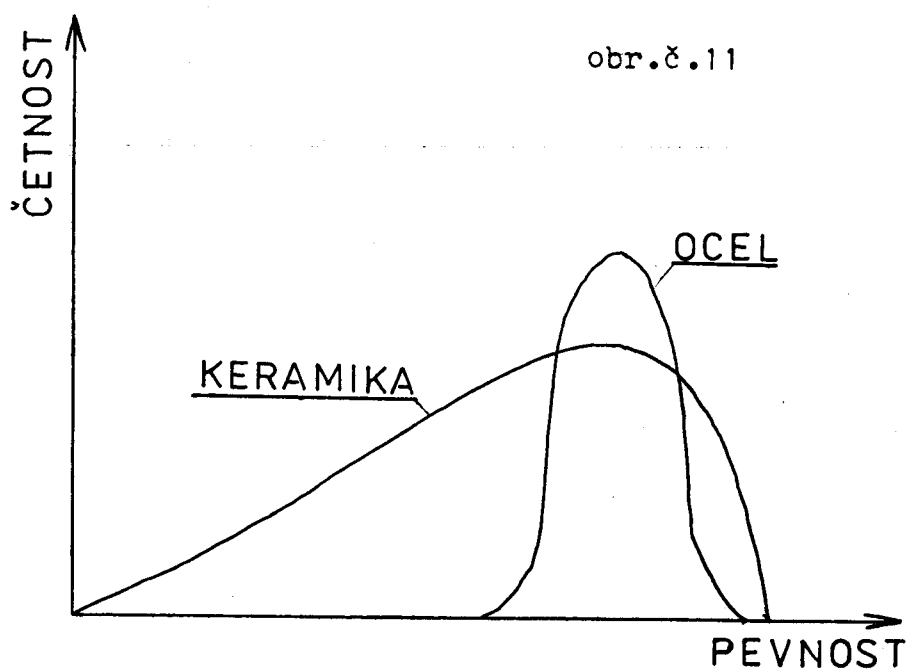
V prvním kroku probíhá opracování povrchu od spečeného materiálu. Materiál je oboustraně odebrán tak, že zůstane síla 7,5 mm. Je zde možnost po odříznutí vzorku opracovat objem třísek $V = 6000 \text{ mm}^3$ a dosáhnout konečného vzorku o sí-

le 4,5 mm. Při broušení vrubové strany na konci brousícího procesu se snižuje síla třísky a posuv, aby bylo dosaženo co možná nejlepší jakosti povrchu. Po prvním broušení byl vzorek přilepen za horka tuhoucím lepidlem na ocelový nosič. Vrstva lepidla měla po vytuhnutí sílu 200 - 300 μm . Tak mohl při následujícím řezání řezný kotouč zaříznout do vrstvy lepidla, přičemž bylo zabráněno, aby se projeвило opotřebení řezného kotouče zaoblením spodní strany vzorů. Řezání bylo provedeno kotoučem D 126 Bz K45 rozměrů 200x1 mm. Řezná rychlost byla 30 m/s a rychlost posuvu 10 m/min. Před jednotlivými brusnými operacemi byl brousící kotouč podle definovaných o-rovnávacích parametrů profilován a ostřen. S ohledem na poddajnost měřícího zařízení a zvedání stroje při broušení, byl nasazen kontrolní přístroj a to při příčném posuvu $v_{sa}=5$ mm, šířce brousícího kotouče $b_s = 10$ mm. Na základě tohoto měření bylo broušeno posledních 150 μm bez příčného posuvu.

Po poslední ubrané třísce a přebroušení kotoučem byl brousící stroj zastaven, aby nedošlo k žádným změnám broušeného povrchu zpětným během. Povrch a poškození povrchové oblasti tedy odpovídají jednostupňovému brusnému procesu bez dalších opracování. Maximální zatížení vzorku SiSiC bylo vzhledem k jeho menší pevnosti v lomu 1250 N a HPSN 2500 N. Přito byly použity rozdílné zatěžovací rychlosti. U SiSiC byla rychlost $v_b=5,9$ N/s a u HPSN $v_b = 11,8$ N/s.

Průběh pevnosti keramických látek se dalece liší od kovů. Jak bylo zjištěno, jsou ohybové pevnosti závislé na geometrii vzorku, jeho objemu, stavu napětí, rychlosti zatěžování a jakosti povrchu výrobku. K jakosti povrchu se také počítá porušení povrchové vrstvy poruchami při předcházejícím zpracování.

Zatímco u tažených kovových látek platí, že definované namáhání vyvolává porušení materiálu, u keramických látek se vychází z pravděpodobnosti porušení materiálu P_f namáháním.



Na obrázku č.11 je znázorněn rozptyl hodnot pevnosti křehké keramické látky jako je sklo a rozdělení hodnot pro kovy. Tato hodnota představuje střední hodnotu. U kovů je rozdělení hodnot soustředěno do úzké oblasti střední hodnoty. Nalevo od křivky se dle pravidla neočekávají žádné lomy a je možné volbou faktorů bezpečnosti dosáhnout velkou pravděpodobnost toho, že součást vyhoví pevnostním nárokům. Rozdělení pevností netažných materiálů naproti tomu znázorňuje zřetelně asymetrická křivka. Monotoně stoupá od nuly ke své maximální hodnotě a potom rychle upadá.

Pro netažné materiály jako je keramika není žádná nejnižší hodnota pevnosti, pod kterou by látka s jistotou snesla zatížení. Na tomto základě je pevnost keramických látek uávána jenom jako statistická hodnota. Souvislost mezi pravděpodobností porušení a pevností popisuje empiricky Weibull-Statistik. Podle Weibull rozdělení se jedná o všeobecnou

exponenciální závislost hustoty pravděpodobnosti:

$$F/x/ = 1 - e^{-\theta x}$$

Spodní hodnota mediánu je 63,2 % a horní 36,8 %. Pro popis pevnosti se zpravidla volí dvouparametrická forma

$$F/\sigma/ = 1 - e^{-\sigma/\sigma_0/.m}, \text{ kde}$$

$F/ /$ = hustota pravděpodobnosti

σ, σ_0 = zatížení

m = Weibull parametr

Weibull parametr m přitom opisuje stupeň odchylky hodnot pevnosti. Hodnota mediánu křivky má název " charakteristická pevnost lomu " a je používána jako hodnota látky s pravděpodobností porušení lomem 63,2 %. Pro vyhodnocení pevnosti se používá výpočet funkce a Weibull modul m . K tomu se využívají zlomová napětí zjištěná při zatěžovacích zkouškách. Ohybová napětí čtyřbodové zkoušky vycházejí ze zatížení F :

$$\sigma = 3.F.c/(l.h^2), \text{ kde}$$

c = vzdálenost mezi body dotyků přenosu sil

h = výška vzorku

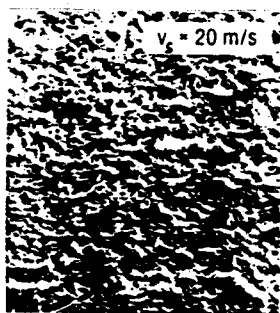
l = šířka vzorku

V průměru leží ohybová pevnost pro látku SiSiC asi 15 % pod předpokládanou hodnotou. U HPSN je střední hodnota naměřených ohybových pevností asi o 20 % menší. Příčina

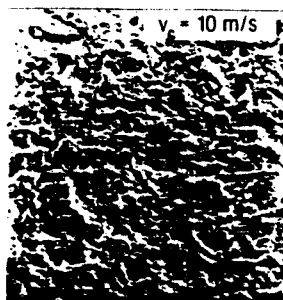
je v extrémním obrobení jednostupňovým broušením bez konečného obrobení načisto, které by mělo za následek snížení pevnosti výrobku. Toto bylo vyvoláno mikrorysy v povrchové hraniční zóně.

Mušlovité výlomky na povrchu broušených vzorků, jak jsou patrné na obr.č. 12, 13 a 14, jsou v úzké souvislosti s laterálními trhlinami.

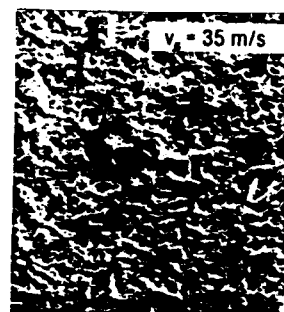
obr.č.12



obr.č.13



obr.č.14



Jedná se zřejmě o výlomky u laterálních trhlin, které vedly k odlomení částí materiálu.

Jak bylo očekáváno, byl zjištěn nejvyšší pokles pevnosti u materiálu HPSN při broušení napříč směrem zatížení. Pokles pevnosti dosahoval v tomto případě asi 30 % pevnosti v tahu. Další parametr, který rovněž velmi ovlivňuje ohybovou pevnost je rychlost řezu. U HPSN dochází k nárustu pevnosti o 18 % při snížení rychlosti z $v_s = 35$ m/s na 10 m/s. Menší vliv než směr broušení a rychlost řezu má odpor zrn brousícího kotouče. Při broušení s kotoučem, který obsahuje zrna s velkou otěruvzdorností je zjišťován menší pokles ohybové pevnosti. Výroba zrn s definovanou otěruvzdorností je předpokladem pro zhotovování keramických částí s určitou

zárukou jejich kvality.

5.1.4 Shrnutí

Směr broušení má velký vliv na pevnost látek. Broušené části vykazují velkou anizotropii, přičemž pevnost v tahu kolmá na směr broušení je více než 30 % nižší než pevnost v tahu rovnoběžně se směrem broušení. Další důležité vlivy jsou rychlost řezu a odpor zrn. Překvapující je vliv třísky. Při zvýšení tloušťky třísky o 20 μm byl sotva pokles pevnosti materiálu zaznamenán. To jistě nevylučuje, že další zvýšení tloušťky třísky může vést k poklesu pevnosti nebo vzniku mikrotrhlin. Působení zvýšení rychlosti posuvu na pevnost materiálu je závislé na druhu látky. Zatímco u SiSiC zvýšení posuvu z 10 na 20 m/min způsobí 10 % snížení pevnosti, nebyly u HPSN podobné závislosti pozorovány. Dle vyhodnocení hloubky reliéfu povrchu a čtyřbodové ohybové zkoušky se ukázalo, že u keramiky SiSiC je kolerace, u keramiky HPSN kolerace nebyla pozorována. Příčina spočívá pravděpodobně v tom, že mechanismus vzniku reliéfu povrchu materiálu a poškození povrchové hraniční zóny je totožný.

Kolerace mezi poklesem pevnosti a vlastními napětími v povrchové zóně nebyla dle současných výsledků pozorována. Místo toho jsou změřená napětí u SiSiC a HPSN keramiky podstatně nižší než u tažných kovových materiálů. Příčina může spočívat v tom, že měřicí rentgenové paprsky pronikají pouze do hloubky 40 μm . Zde je počítáno se středními hodnotami. Není tedy vyloučeno, že na povrchu výrobku vznikají vlivem brusných procesů velká vlastní napětí.

5.2 Kooperativní práce CIRP

5.2.1 Cíle kooperativní práce

Pukliny a zbývající tlaky u obráběných keramických povrchů mohou způsobovat vážné škody na komponentech, protože určují jejich pevnost. Znalosti o puklinách a reziduálních tlacích při obrábění, jakož i technika jejich měření jsou velmi důležité ve výrobní technice. Větší znalosti jsou vyžadovány při plnění zvyšujících požadavků na vysokou pevnost a přesnost keramických komponentů.

Účastníci kooperativní práce souhlasili se zkouškami, kde každý z účastníků obdržel vlastní sadu vzorků. Tak mohly být použity různé destruktivní a nedestruktivní testovací metody.

5.2.2 Obrábění vzorků

V kooperaci CIRP byly použity vzorky vyrobené z Al_2O_3 a Si_3N_4 keramiky. Tyto materiály byly vybrány pro jejich odlišnou opracovatelnost. Kysličník hlinitý je typicky tvrdý a křehký a snadno se dá brousit. Silikonový nitrid je méně tvrdý, ale tvárný a obtížně se brousí. Kromě materiálů byly zvoleny i dvě rozdílné rychlosti /řezné/, tak každý z účastníků dostal čtyři rozdílné vzorky.

Vzorky byly broušeny na povrchovém brusném stroji, který využívá posuvný způsob podávání. Obrázek č.15 ukazuje seřízení obrábění.

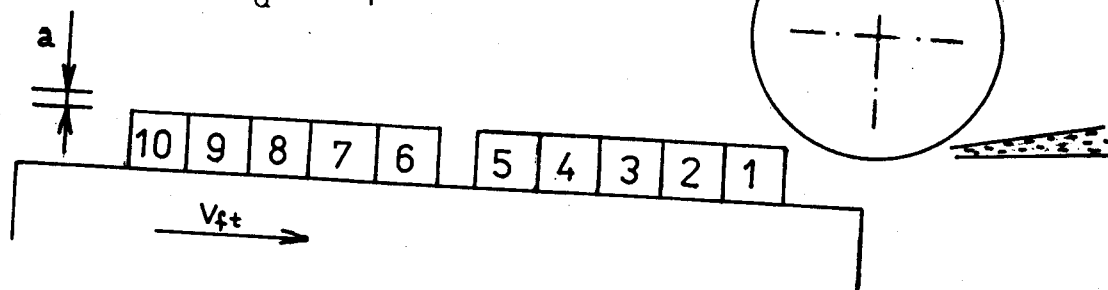
$$v_c = 20/40 \text{ m/s}$$

$$a = 570 \text{ } \mu\text{m}$$

$$v_{ft} = 102 \text{ mm/min}$$

$$\text{orovnění: } v_e = 20 \text{ m/s}$$

$$a_d = 5 \text{ } \mu\text{m}$$



obr.č. 15

Pro broušení byl použit diamantový kotouč, kde velikost zrna byla D 54 podle FEPA, koncentrace zrnitosti byla K 100. Orovnání kotouče bylo provedeno orovnávačem používajícího hodnotu posuvu 0,2 mm/ot a rychlost řezu $v_e = 20 \text{ m/s}$. Vzorky byly broušeny při řezné rychlosti 20 a 40 m/s s posuvem 102 mm/min a pracovním záběru 0,57 mm/zdvih. Jako chladicí směs byl použit 5 % roztok oleje ve vodě. Nejprve bylo odbroušeno 80 mm³ materiálu na jednotku šířky brousícího kotouče, aby se upravila topografie kotouče k obráběcím podmínkám a tak se minimalizovala změna této topografie během experimentu.

5.2.3 Geometrie a povrchová drsnost vzorků

V prvním kroku zkoumání účastníci změřili drsnost vzorků. Byly naměřeny střední aritmetické odchylky profilu R_a , 10 bodů výšky nerovnosti R_z a maximální výška nerovnosti R_m . Všeobecně vzato, povrchy ze vzorků z broušeného oxidu hlinitého se jeví hladší než u vzorků ze silikon nitridu.

5.2.4 Zkouška citlivosti povrchu

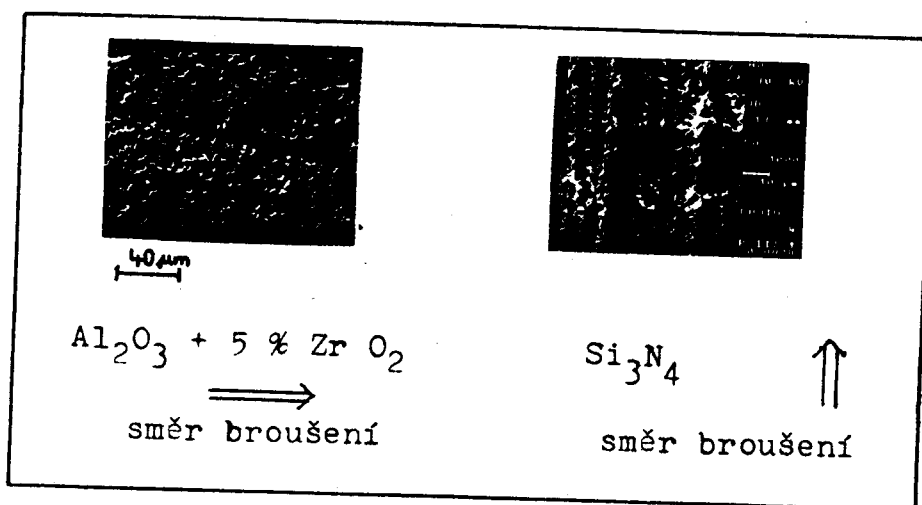
Všeobecně můžeme rozlišovat mezi mechanickými, tepelnými a chemickými účinky, které ovlivňují stav povrchových a podpovrchových vrstev.

Mechanické účinky mohou mít za následek plastické deformace, reziduální pnutí a pukliny, kdežto tepelné účinky mohou vést k tažným tlakům, puklinám, postupným přeměnám. Zkouška celistvosti povrchu a odhad zóny poškození byly prováděny destruktivními a nedestruktivními metodami.

5.2.4.1 Optická kontrola

Pro zjišťování povrchové struktury a detekce trhlin a otevřených pórů použila většina účastníků snímací elektronový mikroskop. Obrázek č.16 ukazuje SEM fotografie broušené keramiky z kysličníku hlinitého a silikon nitridu.

obr.č.16



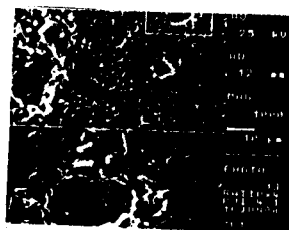
Levý obraz znázorňuje strukturu povrchu broušeného

vzorku z oxidu hlinitého. Je zde vidět pouze mělká vybroušená drážka. Struktura povrchu je určena neřízenou pórovitostí.

Naproti tomu silikon nitrid ukazuje typickou brusnou strukturu s viditelnou vybroušenou drážkou ve směru broušení. Na bocích vybroušených drážek se vyskytují malé štěpinky. Tyto štěpinky mohou vyjadřovat přítomnost křehkého lomu, kdežto v případě keramiky z oxidu hlinitého musí tvoření povrchové struktury zaručovat jiný mechanismus. Tepelný šok následkem chladicí emulze je považován za závažný. Teplota vzorku rychle klesá na teplotu okolí. Prohlídka keramiky, která byla broušena při různých rychlostech řezu, nevykazuje žádné rozdíly v topografii jejího povrchu.

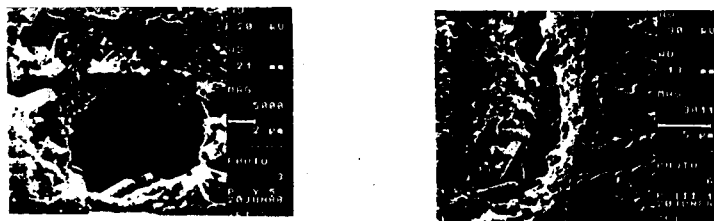
Otevřené póry a praskliny zjištěné SEM v broušené keramice Al_2O_3 a silikon nitridu jsou znázorněny na obrázcích č.17 a č.18.

obr.č.17



Materiál : $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5 \% \text{ZrO}_2$
Kotouč : D54K + 8821 JY C 100
 $v_s = 20 \text{ m/s}$
 $v_{ft} = 102 \text{ mm/min}$
 $a = 0,57 \text{ mm}$

obr.č.18



Materiál : Si_3N_4

Kotouč : D54K + 8821 JY C 100

$v_s = 20/40 \text{ m/s}$

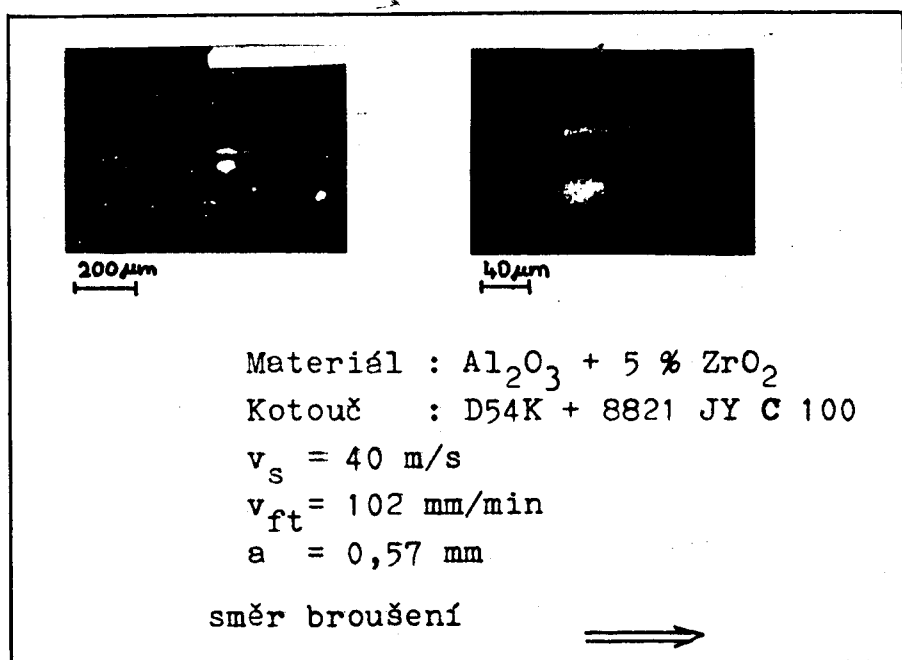
$v_{ft} = 102 \text{ mm/min}$

$a = 0,57 \text{ mm}$

V obou případech povrchové defekty vznikají během zpracování keramických materiálů. Velká zrna uvnitř defektů, která se vyvinula během spékání vzrůstem zrn ukazují, že defekty nevznikají opracováním vzorků. Krystaly uvnitř pó-rů ze silikon nitridu ukazují typický tvar hexagonální mříž-ky. Krystaly této struktury mohou růst pouze na volném povr-chu během spékání.

V Hannoveru byla použita jako kontrola barevného pro-nikání /penetrace/. Penetrant byl použit v kombinaci s čer-ným světlem, poréznost byla zjištěna ve všech vzorcích. Do-datečně byly zjištěny povrchové pukliny v keramice Al_2O_3 pa-ralerně se směrem broušení, viz obrázek č.19.

obr.č.19



5.2.4.2 Měření tvrdosti

V různých místech bylo prováděno měření tvrdosti. Bylo používáno různé zatížení a zkoušen sypký i pevný materiál na tvrdost. Měření tvrdosti provedené na jedné úrovni / HV 5 / ukazuje dobrou opakovatelnost pro hliníkovou keramiku, zatímco v případě silikon nitridové keramiky je pozorován velký rozptyl hodnot. Se zvyšováním použitého zatížení se tvrdost materiálu zdá být menší. Tento vliv je patrný ve výsledcích z Hannoveru pro stupně zatížení HV 5, HV 10, HV 15,625.

5.2.4.3 Měření zbytkového pnutí

Při zkouškách měření zbytkového pnutí vykazuje keramika Al_2O_3 a ZrO_2 mírné zvýšení zbytkového tlakového pnutí při zvyšování rychlosti kotouče. U silikon nitridové kerami-

ky jsou hodnoty napětí posouvány směrem k tahovým napětím při zvyšující se rychlosti kotouče. Naměřené hodnoty mají dobrou kohernaci, i když byly použity různé způsoby měření.

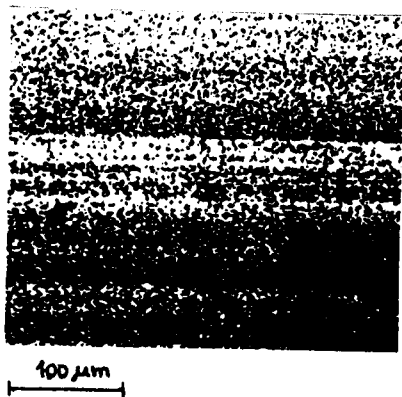
K měření zbytkového pnutí byl použit i průnik záření Cu, který je asi $36 \mu\text{m}$ pro Si_3N_4 a $30 \mu\text{m}$ pro $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$. Použití Cr záření snižuje hloubku průniku díky delší vlnové hodnotě.

5.2.4.4 Ultrazvukové měření

Jako další byla použita metoda měření ultrazvukových vln o různé frekvenci pro charakterizaci a zjištění trhlin. Rozdílné frekvence dovolila ohodnocení hloubky trhlin díky rozdílné hloubce průniku povrchových vln. Největší hloubka trhlin byla nalezena 1 mm při frekvenci 6 MHz.

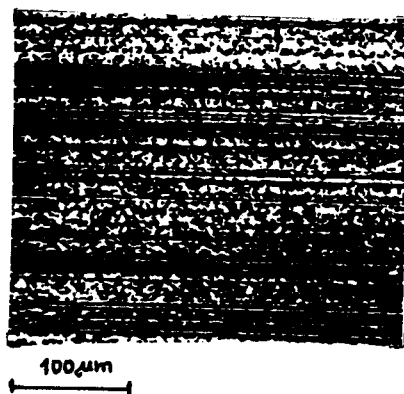
Obrázek č.20 a 21 ukazují výsledky skanovacího mikroskopu. Použitá byla frekvence 16 MHz, hloubka průniku vln byla $10 \mu\text{m}$.

obr.č.20



Mikroakustický pohled na aluminium vzorek / $v_s = 40 \text{ m/s}$ /

obr.č.21



Mikroakustický pohled na vzorek silikon nitridu / $v_s = 40$ m/s/

Obrázek č. 20 ukazuje vzhled trhliny v keramickém vzorku z Al_2O_3 . Bílý vodorovný proužek ve středu naznačuje vadu způsobenou broušením. Trhliny byly zjištěny kolmé na vady způsobené broušením.

Obrázek č. 21 ukazuje vzhled silikon nitridu v mikroskopu při rychlosti $v_s = 40$ m/s. Bílý vodorovný proužek opět označuje vady při broušení.

5.2.5 Závěr

Bylo zjištěno, že povrchová struktura materiálů je různá. U silikon nitridu vykazuje povrch při broušení brusné stopy jako u kovů a dále trhlínkování, vznikající při broušení vlivem křehkých lomů. U alumina jsou brusné stopy pouze ojedinělé, jeho struktura je pórézní. Trhliny a poškození objevované v obou materiálech se zdají být způsobeny při výrobě. Ty trhliny, které mohou být přiřazeny brusným procesům, byly zjištěny ultrazvukovými a barvicími penetračními metodami.

Měření tvrdosti ukázalo jasnou závislost hodnot tvrdosti na zatížení, i když byl značný rozptyl hodnot zjištěných různými institucemi.

Měření zbytkových pnutí provedené účastníky a ATW skupinou ukázalo, že této metody může být využito pro popis povrchových vlastností. Pokusy ukázaly ostrý napěťový gradient v prvních mikrometrech povrchových vrstev.

Pokusy pro ocenění mocnosti vrstvy poškození na povrchu keramiky poskytly zajímavé výsledky. Zóna poškození, způsobená broušením se zdá být u silikon nitridu ve větší hloubce než u aluminia při stejných podmínkách. Může to být způsobeno větší tvrdostí aluminia. Ovlivněné pásmo v keramice bylo nalezeno v rozsahu 10 - 30 mikrometrů pro aluminium a 15 - 36 mikrometrů pro silikon nitridy.

Společná práce ukázala, že konvenční měřicí metody použité při laboratorních procesech mají nedostatky v rozhodování. Všechny tyto metody dovolují pouze bodové hodnocení. Není možné postihnout celou povrchovou zónu a nalézt slabá místa, 100 % kontrola těmito metodami není možná. Pouze barvicí penetrační metoda má potřebnou rozhodnost a úsporu času při průběžné průmyslové kontrole.

6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Úkolem experimentální části této práce je objasnit některé technologické závislosti při broušení keramiky Al_2O_3 pomocí diamantových kotoučů. Jako technologické parametry pro vyhodnocení a porovnávání byly vybrány tři faktory, a to drsnost povrchu obrobku po přebroušení diamantovým kotoučem, normálová a tečná síla, působící mezi kotoučem a obrobkem v závislosti na tloušťce odebírané třísky.

6.1 Použité zařízení při zkouškách

a/ Rovinná bruska BPH 20 WA.

Na této rovinné brusce bylo prováděno veškeré broušení keramického materiálu diamantovým kotoučem. Nevýhodou tohoto stroje bylo ruční nastavování jednotlivých úběrů a příčného posuvu, což vždy nebylo zcela přesné. Obtížné je také nastavení podélného posuvu v_{ft} na danou hodnotu.

b/ Registrační zařízení.

Jako registrační zařízení byla použita tenzometrická aparatura M 1000, výrobek podniku Mikrotechna Praha a zařízení vytvářející záznam sil na světlo citlivou pásku ULTRA VIOLET RECORDER 205.

c/ Dynamometr

Ke snímání jednotlivých sil byl použit dynamometr KISTLER s piezoelektrickými tenzometrickými snímači. Konstrukce tohoto dynamometru je založena na malé tuhosti, což se projevilo vibracemi, a velké citlivosti v případě normálové složky působící síly.

d/ Profiloměr.

Na profiloměru bylo prováděno měření drsnosti povrchu, konkrétně tedy měření střední aritmetické odchylky profilu R_a . Byl použit profiloměr značky HOMMEL TESTER T3.

6.2 Použitý brousící nástroj

Při měření normálových a tečných sil a pro vyhotovení vzorků z keramického materiálu byl použit diamantový kotouč, výrobce DIAS TURNOV, typ 82 111/37 - 100/80, o rozměrech $\varnothing 120 \times 16 \times 42$ mm.

6.3 Vyhodnocení experimentálních výsledků

Graf č.1 udává závislost měrné normálové síly při daném množství odbroušeného měrného objemu a dané rychlosti v_{s1} na velikosti odebírané třísky. Se zvyšující se tloušťkou třísky se zvyšuje i normálová síla při broušení. Diamantový kotouč je orovnan na brusce kotoučem C 49 $\varnothing 500$ mm.

Graf č.2 udává opět závislost normálové síly na velikosti odebírané třísky materiálu, avšak při vyšší brusné rychlosti v_{s2} . Podle předpokladu tato normálová síla roste se zvětšující se tloušťkou třísky a její hodnota je jen o něco málo nižší, než při rychlosti v_{s1} .

Graf č.3 sleduje závislost tečné síly při broušení při určitém množství odebraného měrného objemu a rychlosti v_{s1} na tloušťce odebrané třísky. I tečná síla vykazuje stoupající charakter s rostoucí tloušťkou třísky. Kotouč je orovnan kotoučem C 49 $\varnothing 500$.

Graf č.4 opět popisuje normálovou sílu v závislosti na tloušťce třísky při rychlosti v_{s2} . Normálová síla je o určitou hodnotu menší než při použití řezné rychlosti broušení v_{s1} .

Graf č.5 nám dává závislost drsnosti povrchu představovanou střední aritmetickou odchylkou profilu R_a na tloušťce odebírané třísky. Na dané závislosti je zřetelně vidět, že se zvyšující se tloušťkou třísky klesá drsnost povrchu materiálu. Kotouč byl orovněn kotoučem C 49 ϕ 500.

Graf č.6 popisuje střední aritmetickou odchylku profilu v závislosti na příčném posuvu při tloušťce třísky $a = 5 \mu\text{m}$ a rychlosti broušení v_{s1} . Drsnost povrchu se s měnící hodnotou příčného posuvu příliš nemění.

Graf č.7 opět udává závislost drsnosti povrchu na měnící se hodnotě příčného posuvu. Drsnost povrchu s rostoucí hodnotou povrchu jen nepatrně klesá. Tloušťka odebírané třísky byla opět 0,005 mm, avšak řezná rychlost byla v_{s2} .

Graf č.8 ukazuje střední aritmetickou odchylku profilu v závislosti na příčném posuvu, tentokrát při tloušťce třísky $a = 0,015 \text{ mm}$. Drsnost povrchu je menší než v předchozích dvou případech.

Graf č.9 opět udává vztah drsnosti k příčnému posuvu při tloušťce třísky 0,015 mm a řezné rychlosti v_{s2} . Hodnota střední aritmetické odchylky profilu se příliš nemění. Diamantový kotouč byl orovněn kotoučem C 49 ϕ 500.

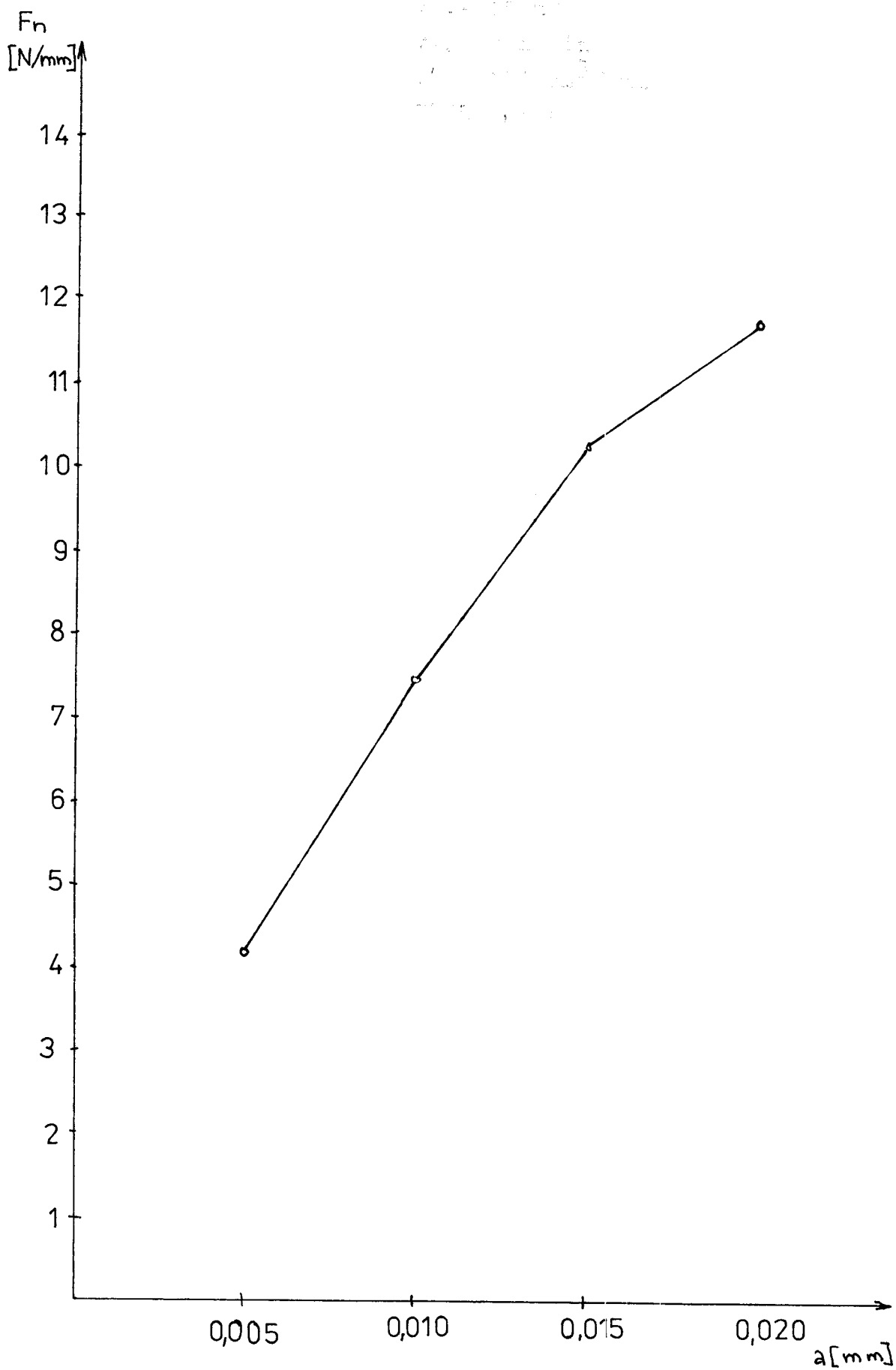
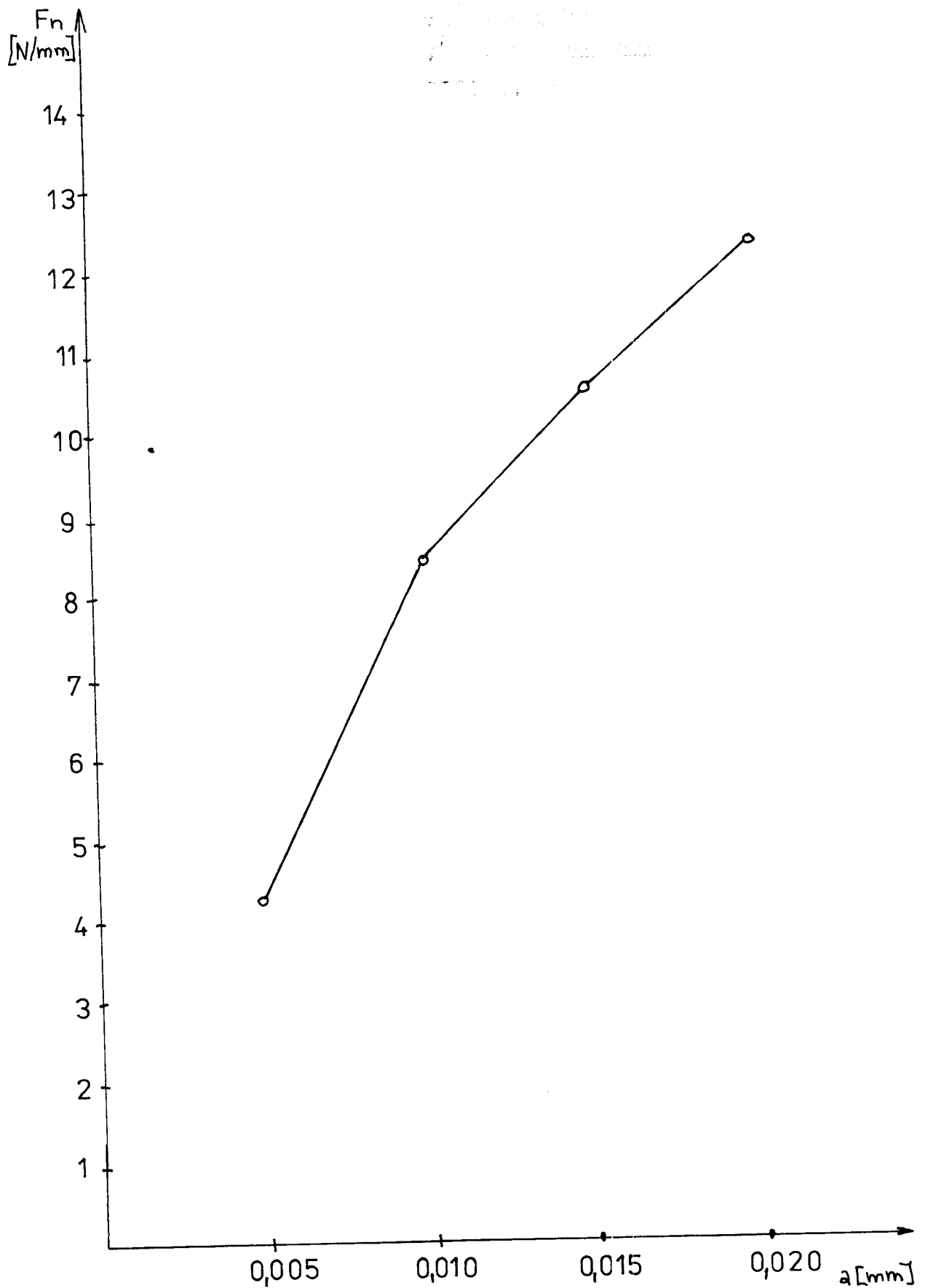


Table 1.

Material: 6061-T6 Aluminum
1. $\sigma_{0.2} = 240 \text{ MPa}$
2. $\sigma_{UTS} = 320 \text{ MPa}$
3. $E = 68.9 \text{ GPa}$
4. $\nu = 0.33$
5. $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$
6. $\mu = 0.001 \text{ s/m}^2$



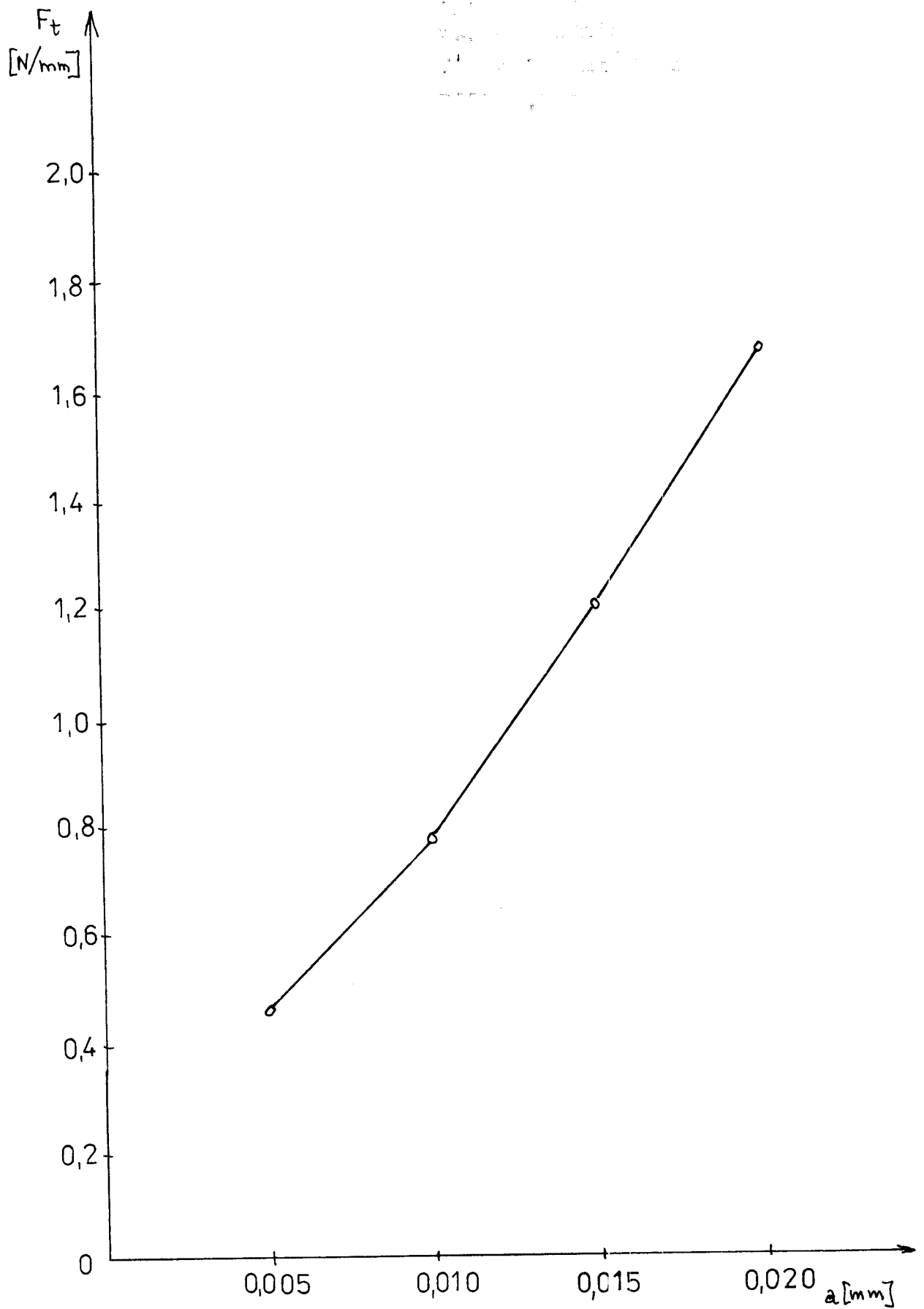
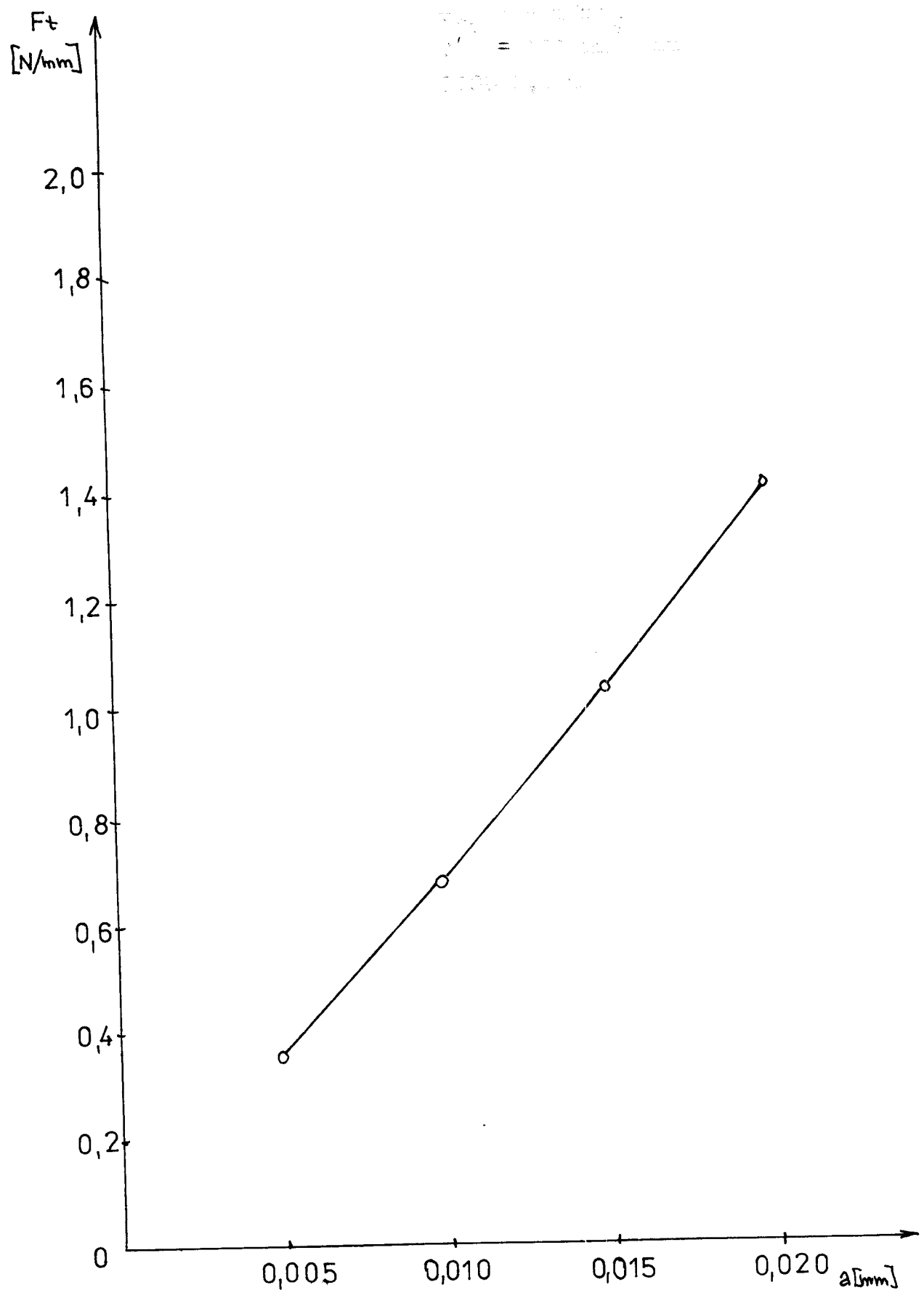
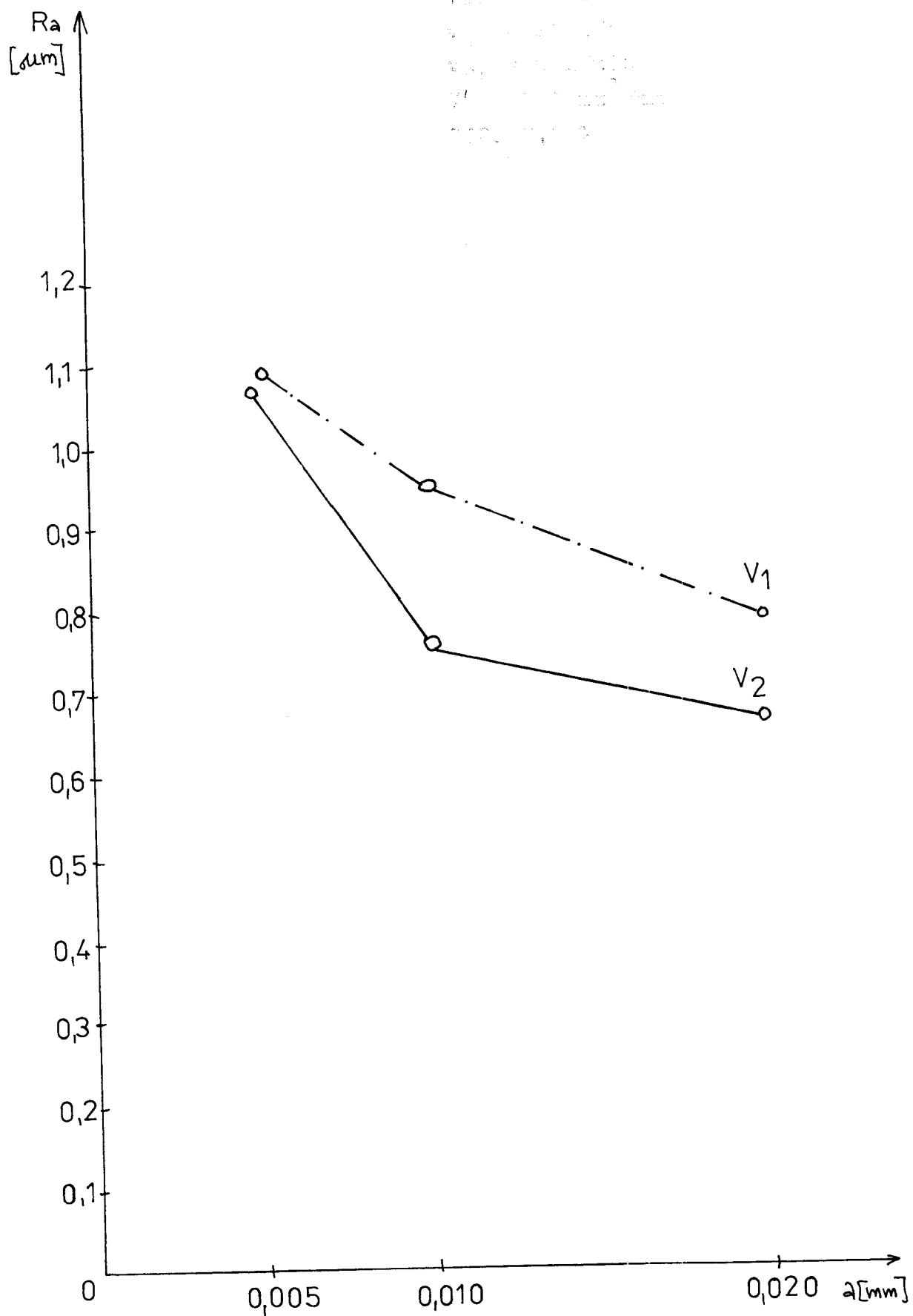


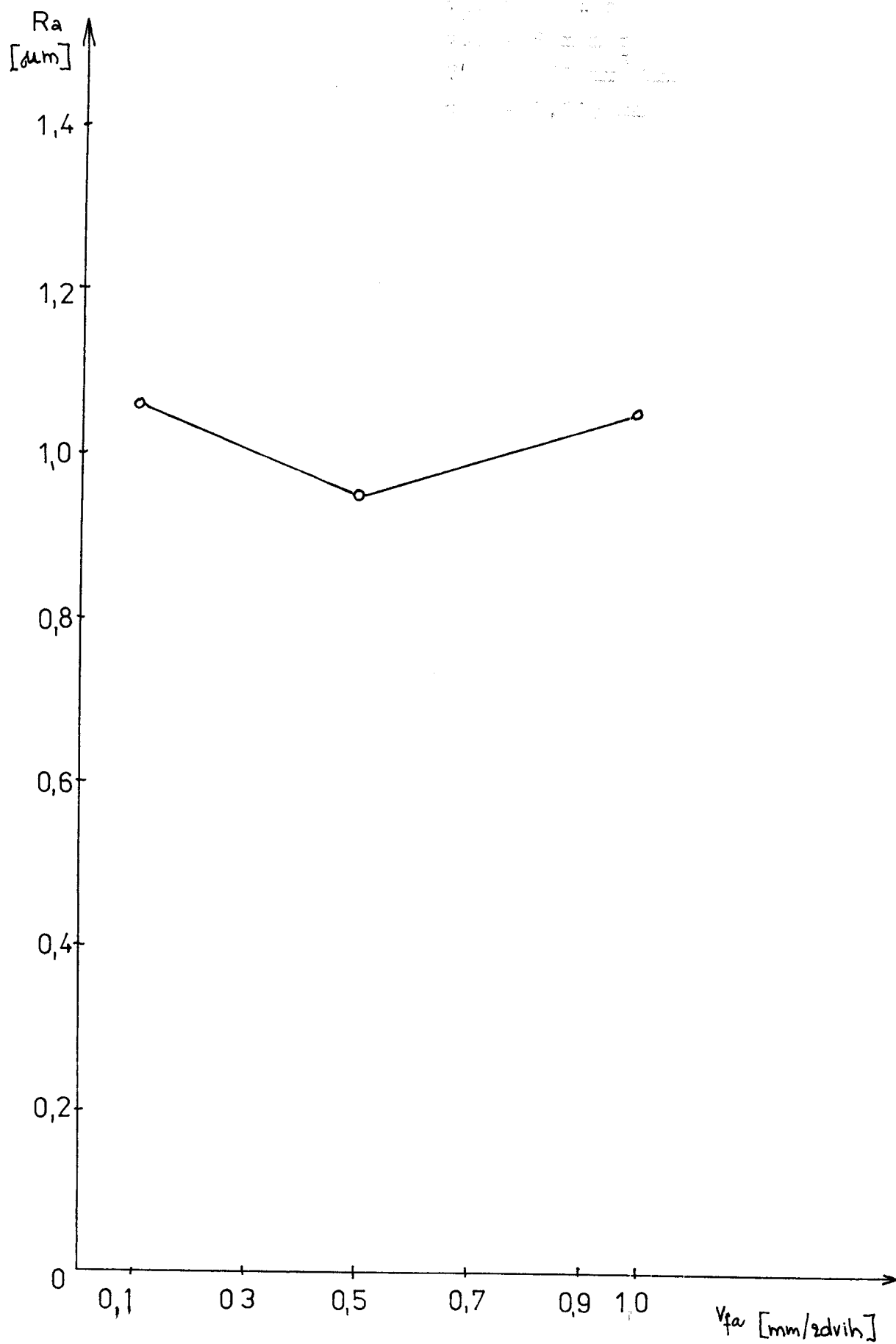
Figure 8.1

Figure 8.1 shows the relationship between the force F_t and the distance a . The data points are plotted and a straight line is drawn through them. The equation of the line is $F_t = 70a$, where F_t is in N/mm and a is in mm.



1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, 2030, 2031, 2032, 2033, 2034, 2035, 2036, 2037, 2038, 2039, 2040, 2041, 2042, 2043, 2044, 2045, 2046, 2047, 2048, 2049, 2050, 2051, 2052, 2053, 2054, 2055, 2056, 2057, 2058, 2059, 2060, 2061, 2062, 2063, 2064, 2065, 2066, 2067, 2068, 2069, 2070, 2071, 2072, 2073, 2074, 2075, 2076, 2077, 2078, 2079, 2080, 2081, 2082, 2083, 2084, 2085, 2086, 2087, 2088, 2089, 2090, 2091, 2092, 2093, 2094, 2095, 2096, 2097, 2098, 2099, 2100, 2101, 2102, 2103, 2104, 2105, 2106, 2107, 2108, 2109, 2110, 2111, 2112, 2113, 2114, 2115, 2116, 2117, 2118, 2119, 2120, 2121, 2122, 2123, 2124, 2125, 2126, 2127, 2128, 2129, 2130, 2131, 2132, 2133, 2134, 2135, 2136, 2137, 2138, 2139, 2140, 2141, 2142, 2143, 2144, 2145, 2146, 2147, 2148, 2149, 2150, 2151, 2152, 2153, 2154, 2155, 2156, 2157, 2158, 2159, 2160, 2161, 2162, 2163, 2164, 2165, 2166, 2167, 2168, 2169, 2170, 2171, 2172, 2173, 2174, 2175, 2176, 2177, 2178, 2179, 2180, 2181, 2182, 2183, 2184, 2185, 2186, 2187, 2188, 2189, 2190, 2191, 2192, 2193, 2194, 2195, 2196, 2197, 2198, 2199, 2200, 2201, 2202, 2203, 2204, 2205, 2206, 2207, 2208, 2209, 2210, 2211, 2212, 2213, 2214, 2215, 2216, 2217, 2218, 2219, 2220, 2221, 2222, 2223, 2224, 2225, 2226, 2227, 2228, 2229, 2230, 2231, 2232, 2233, 2234, 2235, 2236, 2237, 2238, 2239, 2240, 2241, 2242, 2243, 2244, 2245, 2246, 2247, 2248, 2249, 2250, 2251, 2252, 2253, 2254, 2255, 2256, 2257, 2258, 2259, 2260, 2261, 2262, 2263, 2264, 2265, 2266, 2267, 2268, 2269, 2270, 2271, 2272, 2273, 2274, 2275, 2276, 2277, 2278, 2279, 2280, 2281, 2282, 2283, 2284, 2285, 2286, 2287, 2288, 2289, 2290, 2291, 2292, 2293, 2294, 2295, 2296, 2297, 2298, 2299, 2300, 2301, 2302, 2303, 2304, 2305, 2306, 2307, 2308, 2309, 2310, 2311, 2312, 2313, 2314, 2315, 2316, 2317, 2318, 2319, 2320, 2321, 2322, 2323, 2324, 2325, 2326, 2327, 2328, 2329, 2330, 2331, 2332, 2333, 2334, 2335, 2336, 2337, 2338, 2339, 2340, 2341, 2342, 2343, 2344, 2345, 2346, 2347, 2348, 2349, 2350, 2351, 2352, 2353, 2354, 2355, 2356, 2357, 2358, 2359, 2360, 2361, 2362, 2363, 2364, 2365, 2366, 2367, 2368, 2369, 2370, 2371, 2372, 2373, 2374, 2375, 2376, 2377, 2378, 2379, 2380, 2381, 2382, 2383, 2384, 2385, 2386, 2387, 2388, 2389, 2390, 2391, 2392, 2393, 2394, 2395, 2396, 2397, 2398, 2399, 2400, 2401, 2402, 2403, 2404, 2405, 2406, 2407, 2408, 2409, 2410, 2411, 2412, 2413, 2414, 2415, 2416, 2417, 2418, 2419, 2420, 2421, 2422, 2423, 2424, 2425, 2426, 2427, 2428, 2429, 2430, 2431, 2432, 2433, 2434, 2435, 2436, 2437, 2438, 2439, 2440, 2441, 2442, 2443, 2444, 2445, 2446, 2447, 2448, 2449, 2450, 2451, 2452, 2453, 2454, 2455, 2456, 2457, 2458, 2459, 2460, 2461, 2462, 2463, 2464, 2465, 2466, 2467, 2468, 2469, 2470, 2471, 2472, 2473, 2474, 2475, 2476, 2477, 2478, 2479, 2480, 2481, 2482, 2483, 2484, 2485, 2486, 2487, 2488, 2489, 2490, 2491, 2492, 2493, 2494, 2495, 2496, 2497, 2498, 2499, 2500, 2501, 2502, 2503, 2504, 2505, 2506, 2507, 2508, 2509, 2510, 2511, 2512, 2513, 2514, 2515, 2516, 2517, 2518, 2519, 2520, 2521, 2522, 2523, 2524, 2525, 2526, 2527, 2528, 2529, 2530, 2531, 2532, 2533, 2534, 2535, 2536, 2537, 2538, 2539, 2540, 2541, 2542, 2543, 2544, 2545, 2546, 2547, 2548, 2549, 2550, 2551, 2552, 2553, 2554, 2555, 2556, 2557, 2558, 2559, 2560, 2561, 2562, 2563, 2564, 2565, 2566, 2567, 2568, 2569, 2570, 2571, 2572, 2573, 2574, 2575, 2576, 2577, 2578, 2579, 2580, 2581, 2582, 2583, 2584, 2585, 2586, 2587, 2588, 2589, 2590, 2591, 2592, 2593, 2594, 2595, 2596, 2597, 2598, 2599, 2600, 2601, 2602, 2603, 2604, 2605, 2606, 2607, 2608, 2609, 2610, 2611, 2612, 2613, 2614, 2615, 2616, 2617, 2618, 2619, 2620, 2621, 2622, 2623, 2624, 2625, 2626, 2627, 2628, 2629, 2630, 2631, 2632, 2633, 2634, 2635, 2636, 2637, 2638, 2639, 2640, 2641, 2642, 2643, 2644, 2645, 2646, 2647, 2648, 2649, 2650, 2651, 2652, 2653, 2654, 2655, 2656, 2657, 2658, 2659, 2660, 2661, 2662, 2663, 2664, 2665, 2666, 2667, 2668, 2669, 2670, 2671, 2672, 2673, 2674, 2675, 2676, 2677, 2678, 2679, 26





0-100 %

100 % 100 % 100 % 100 %

100 % 100 % 100 %

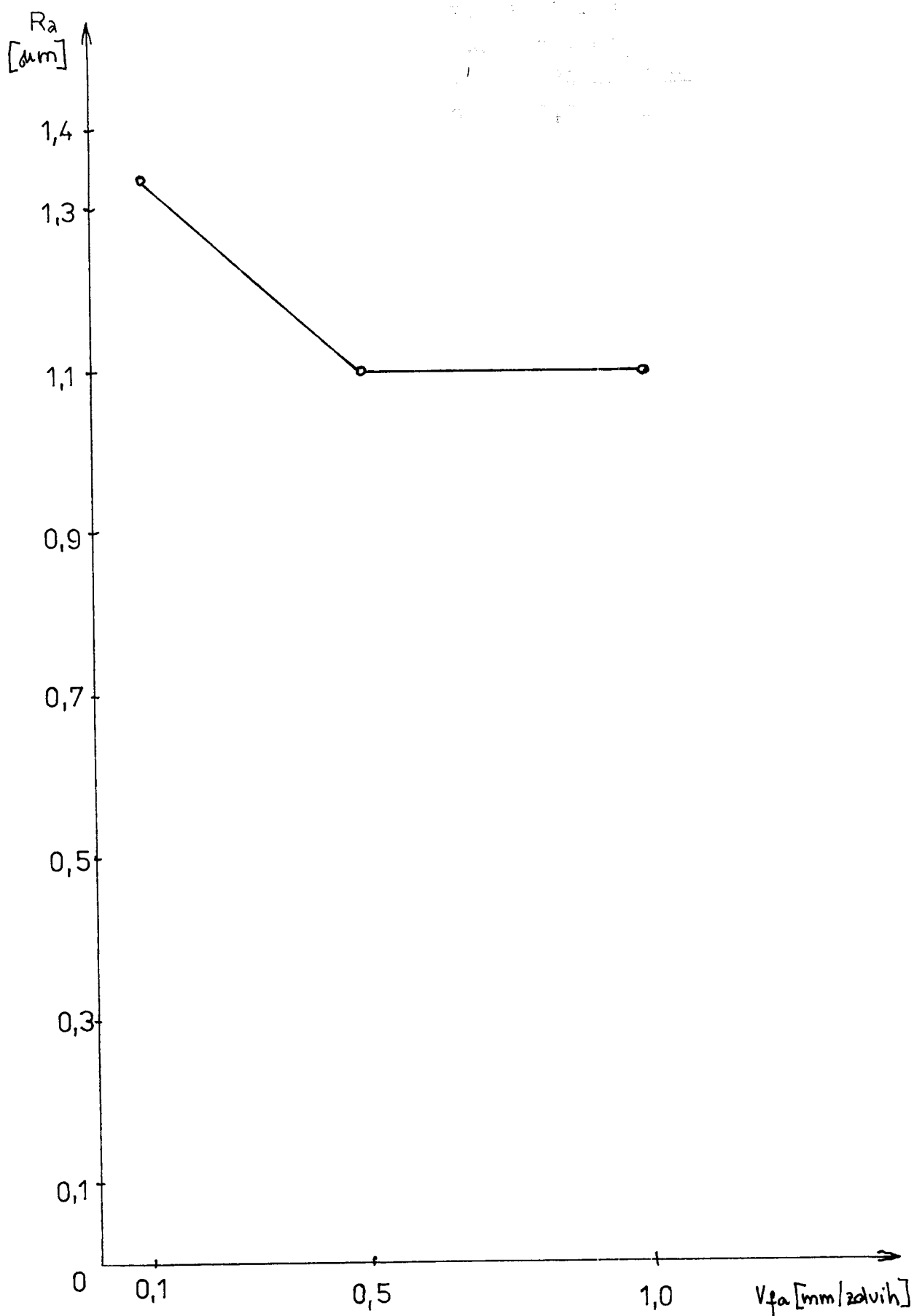
100 % 100 % 100 % 100 %

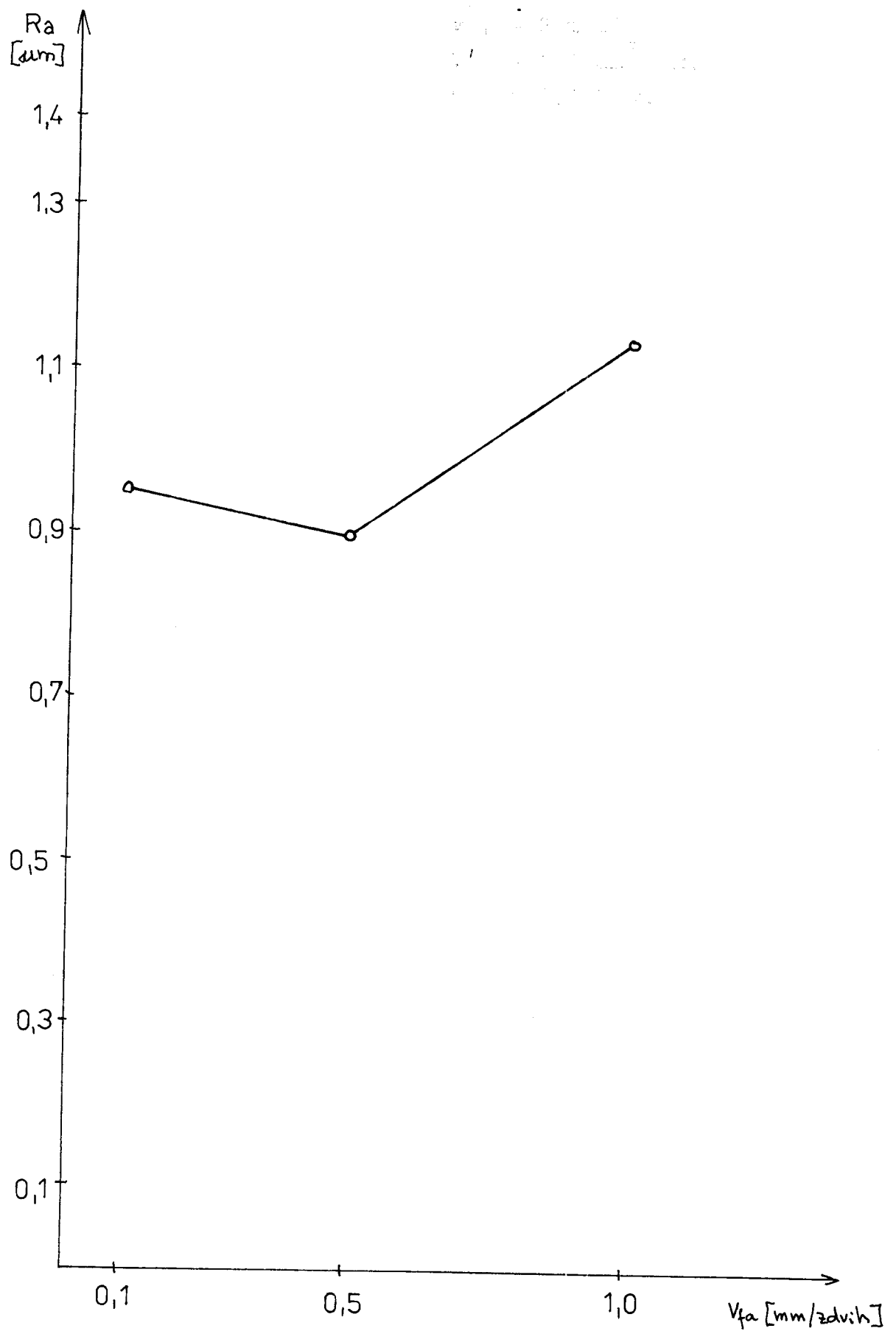
100 % 100 % 100 %

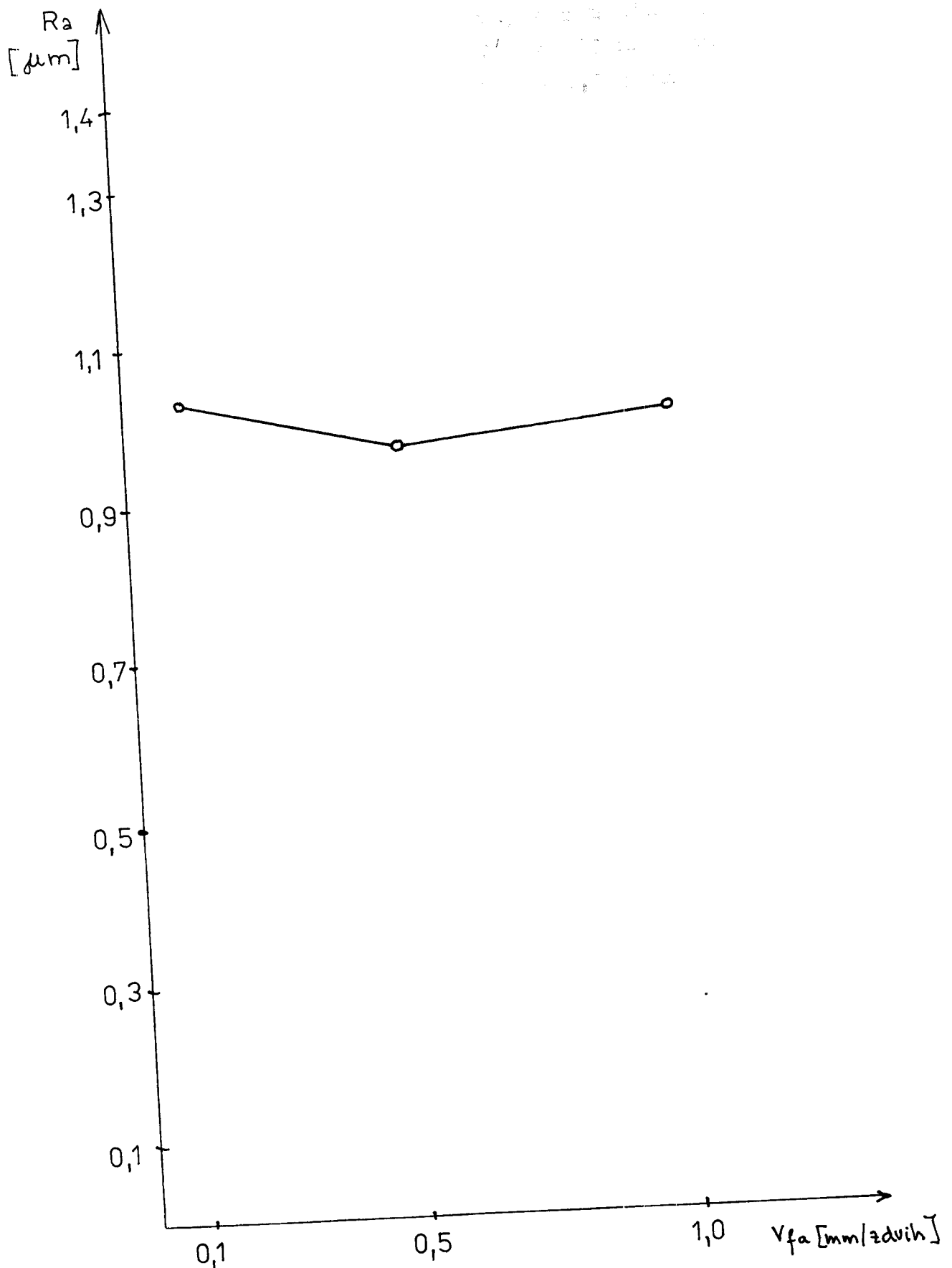
100 % 100 % 100 %

100 % 100 % 100 %

100 % 100 % 100 %







6.4 Vyhodnocení grafů

Při pozorování změny velikosti měrné normálové síly je patrný velký vliv tloušťky odebírané třísky, kde s rostoucí tloušťkou stoupá i normálová síla. Hodnota normálové síly při dané tloušťce třísky byla brána až po určitém odbroušení měrného objemu, neboť tato síla, stejně jako síla tečná, rostla postupně vlivem odpružení keramického materiálu.

V případě měrné tečné síly byla brána střední hodnota, neboť při broušení protiběžném byla velikost tečné síly větší než při broušení sousledném. Hodnota měrné tečné síly je téměř o jeden řád nižší než hodnota měrné síly normálové za stejných technologických podmínek.

Při sledování drsnosti povrchu se zjistilo, že optimální volbou velikosti odebírané vrstvy můžeme docílit požadovanou kvalitu povrchu. Ve většině případů vyšší úběr materiálu vykazuje kvalitu povrchu lepší než úběry malé. Velikost příčného posuvu materiálu nemá tak výrazný vliv na drsnost povrchu tak, jako volba velikosti odebírané vrstvy. Při orovnání kotoučem C 49 se vazba otevře a obnaží se zrna diamantového kotouče, čímž na povrchu materiálu vznikají hlubší drážky a drsnost bude větší, než v případě kotouče neorovnaného.

obr. 22



10 μm

3 μm

Profil povrchu : $v_s = 21 \text{ m/s}$

$v_{ft} = 8 \text{ m/min}$

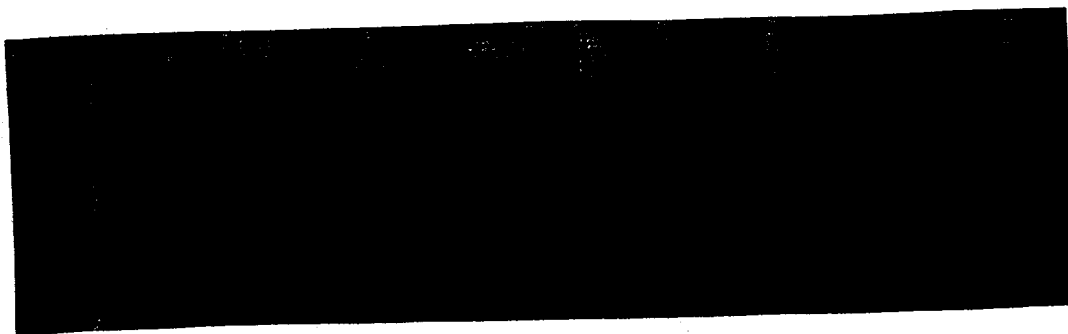
$a = 0,005 \text{ mm}$

$v_{fa} = 1,0 \text{ mm/zdvih}$

$V = 120 \text{ mm}^3/\text{mm}$

$Ra = 1,1 \mu\text{m}$

obr. 23



Profil povrchu : $v_s = 21 \text{ m/s}$

$v_{ft} = 8 \text{ m/min}$

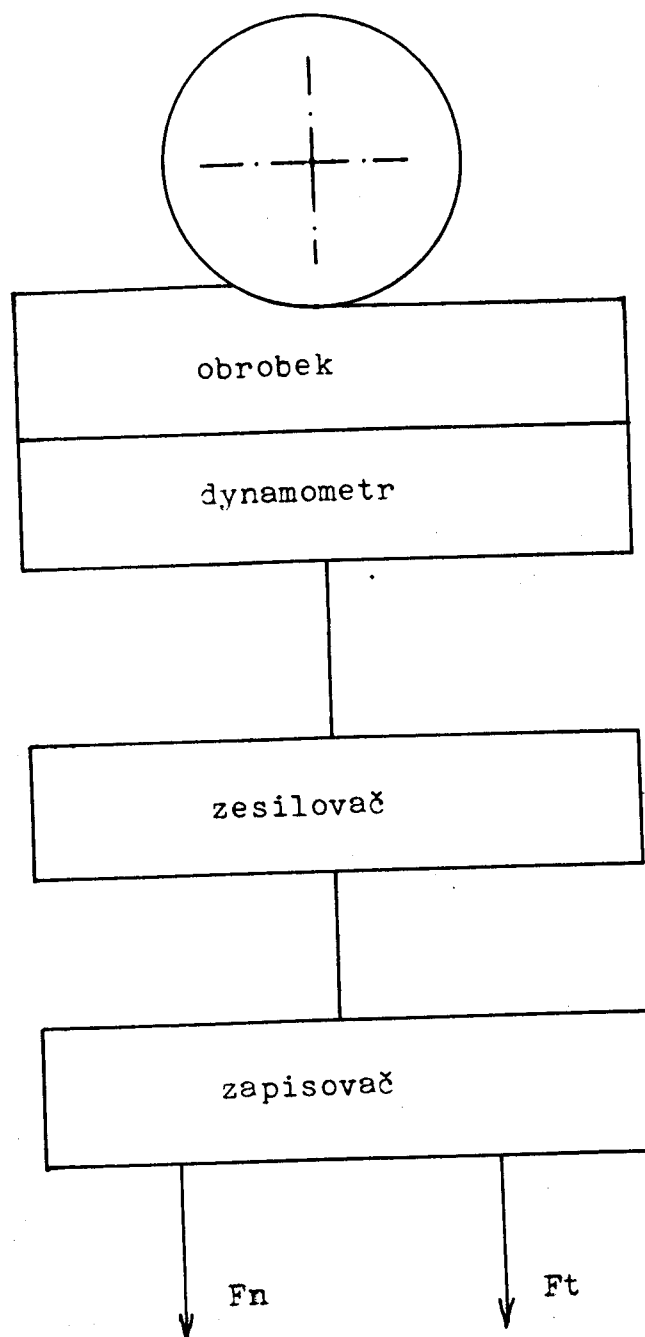
$a = 0,015 \text{ mm}$

$v_{fa} = 1,0 \text{ mm/zdvih}$

$V = 120 \text{ mm}^3/\text{mm}$

$Ra = 1,0 \mu\text{m}$

obr.č.24



7. ZÁVĚR A DOPORUČENÍ DALŠÍHO SMĚRU VÝZKUMU

Součástí této práce měl být i praktický výzkum některých vad a poruch v povrchové zóně keramického materiálu po broušení. Avšak z důvodů časových a hlavně kvůli poruchovosti přístrojů nemohla být tato moje představa plně realizována.

Dalším směrem výzkumu může být cesta vedoucí k dalšímu snížení drsnosti povrchu, dále klasifikace keramiky dle její opracovatelnosti nebo modifikace odběrových metod /ubírání třísky/ dle různých druhů keramických materiálů.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] : IDR , 4-1987
- [2] : Annals of the CIRP , 35-1989
- [3] : Václavík L.: Broušení řezné a konstrukční keramiky,
/diplomová práce/, VŠST Liberec, 1989