

Vysoká škola: strojní a textilní

Katedra: sklářství a keramiky

Fakulta: strojní

Školní rok: 1973/74

DIPLOMOVÝ ÚKOL

pro Milana Š n a j d r a

obor 04-1-04 Zaměření na sklářské stroje a zařízení

Protože jste splnil... požadavky učebního plánu, zadává Vám vedoucí katedry ve smyslu směrnic ministerstva školství o státních závěrečných zkouškách tento diplomový úkol:

Název tématu: Abrazivita a eroze skla.

Pokyny pro vypracování:

Určete abrazivitu skleněného prášku na materiálech:

- a) plexisklo
- b) sklo.

Určete erozi několika různých druhů skel při impaktním úhlu 90° .

Změřte erozi skla v závislosti na impaktním úhlu pro prášky karbid křemíku, korund a skleněný prášek.

Určete opotřebení skleněných tvarovaných trubíc při průchodu tryskacího prášku v závislosti na poloměru křivosti.

VYSOKÁ ŠKOLA-STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LIBEC EC 1, STUDENTSKÁ 5
PSČ 461 17

V. G. 1. 1974

Autory: ...
závěrečné zkoušky ... 31. 7. 727/52.41;
13. červenec 1974. Vědecký ústav VŠM, část 24. 25. 26.
31. 8. 1974. 4. autorizace zákona 2 115/53 S

Rozsah grafických laboratorních prací: 15 stran

Rozsah průvodní zprávy: 35 stran

Seznam odborné literatury:

Sodomka L.: Eroze materiálů proudem částic. Text VŠST 1973

ČSN 01 50 50 : Opotřebení materiálů

Beneš L.: Obrábění ultrazvukem

Jetleb P.: Diplomová práce . VŠST Liberec 1971

Brunner J.: Diplomová práce . VŠST Liberec 1973

Plný V.: Diplomová práce . VŠST Liberec 1973

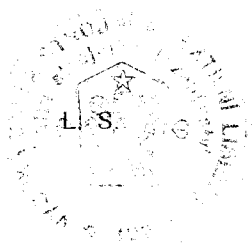
Spolu s vybranou literaturou uvedenou ve výše uvedených pracích.

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Jiří W a g n e r , CSc

Konsultanti: RNDr. Lubomír Sodomka, CSc

Datum zahájení diplomové práce: 15. 10. 1973

Datum odevzdání diplomové práce: 31. 5. 1974



Prof. Ing. Dr. F. Kotšmíd

Vedoucí katedry

Doc. Ing. O. Krejčíř, CSc

Děkan

Obsah

	Úvod.	3
1.	Definice veličin.	6
1.1.	Eroze.	6
1.2.	Impaktní úhel.	6
1.3.	Jednotky tlaku.	7
2.	Tryskací zařízení.	8
2.1.	Princip otryskávání.	9
2.2.	Popis funkce tryskacího zařízení.	9
2.3.	Části tryskacího zařízení.	12
2.3.1.	Směšovací nádobka	12
2.3.2.	Tryskače.	13
2.3.3.	Trysky	17
2.3.4.	Výměnné přípravky	18
3.	Eroze skla v závislosti na impaktním úhlu pro prášky karbid křemíku, korund a skelný prášek. .	19
3.1.	Pracovní podmínky	19
3.2.	V zorky	19
3.3.	Abrazivní prášky	19
3.4.	Vlastní průběh měření	22
3.5.	Výsledky měření	22
3.5.1.	Tabulové sklo	22
3.5.2.	Plexisklo	23
3.6.	Zhodnocení měření	23
4.	Eroze různých druhů skel při imp.úhlu 90° . .	32
4.1.	Pracovní podmínky	32
4.2.	Stanovení průtočného množství prášků	32
4.3.	Vzorky	33

VŠST Liberec		Katedra SK - FY	
Fakulta strojní	Abrazivita a eroze skla.	DP 227/74	str. 2
4.4.	Průběh měření	33	
4.5.	Výsledky měření	35	
4.5.1.	Tabulové sklo	35	
4.5.2.	Olovnaté sklo	35	
4.6.	Zh odnocení měření	35	
5 .	Abrazivita skel. prášku na materiálech sklo a plexisklo.	47	
5.1.	Vzorky	47	
5.2.	Abrazivita skelného prášku na sklu a plexisklu v závislosti na impaktním úhlu	47	
5.2.1.	Výsledky měření	47	
5.2.2.	Zhodnocení	48	
5.3.	Abrazivita skel. prášku na skle a plexiskle v závislosti na množství prášku	48	
5.3.1.	Výsledky měření	48	
5.3.2.	Zhodnocení	54	
6.	Opetřebení skleněných tvarovaných trubíc při průchodu prášku SiC	55	
6.1.	Trubice	55	
6.2.	Pracovní podmínky	55	
6.3.	Průběh měření	55	
6.4.	Výsledky měření	59	
6.5.	Zhodnocení měření	61	
7.	Zhodnocení výsledků celé práce	64	
	Závěr	65	
	Literatura	66	

VŠST Liberec	Abrazivita a eroze skla.	Katedra SK - FY	
Fakulta strojní		DP 227/74	str. 3

Úvod

Mezi technologie opracování materiálů počítáme také ty, které užívají částic abrazivních materiálů různé zrnitosti. Jsou to:

- 1) Eroze, při které proud částic nesených obvykle vzduchem nebo jiným plynným prostředím naráží na povrch opracovávaného materiálu rychlostí určenou velikostí a směrem, vzhledem k povrchu opracovávaného materiálu.
- 2) Ultrazvukové opracování. Při tomto způsobu opracování jsou abrazivní částice s kapalinou, nejčastěji vodou, urychlovány kmitajícím zařízením. Částice pak narážejí na povrch materiálu, který opracovávají.
- 3) Abraze a broušení. Při této technice jsou částice fixovány v rovinné desce nebo kotouči, které se pohybují po povrchu opracovávaného materiálu za neustálého přitlačování vnější silou k povrchu.
- 4) Lapování a leštění. Touto technikou jsou volné částice za pohybu tlačeny k opracovávanému povrchu prostřednictvím jiné plochy.

S abrazivitou a erozí se však též setkáváme jako s parazitním jevem v řadě technických problémů.

- 1) Opotřebení: je trvale nežádoucí změna povrchu (rozměrů) způsobená vzájemným působením funkčních povrchů nebo funkčního povrchu a opotřebovávajícího média. Projevuje se jako odstraňování nebo přemisťování částic z opotřebováváného povrchu mechanickými účinky, popř. doprovázenými i jinými vlivy (chemickými, elektrickými, elektrochemickými).

VŠST Liberec	Abrazivita a eroze skla.	Katedra SK - FY	
Fakulta strojní		DP 227/74	str. 4

2) Přebíáající podmínky procesu opotřebení jsou určeny:

- a) druhem a aharakteristikami opotřebovávaných a opotřebovávajících těles a charakteristikami média
- b) charakteristikami vzájemného relativního pohybu
- c) charakteristikami zatížení
- d) charakteristikami prostředí

3) Pro analýzu podmínek procesu opotřebení je účelné vyšetřovat časový průběh opotřebení a výsledky průběžně hodnotit z grafického záznamu.

4) Základní druhy opotřebení:

- a) Adhezní opotřebení
- b) Abrazivní opotřebení: je charakterizováno oddělováním částic z opotřebovávaného povrchu
 - rýhováním a řezáním tvrdými částicemi
 - rýhováním a řezáním tvrdým a drsným povrchem druhého tělesa
- c) Erozivní opotřebení: je charakterizováno oddělováním částic a poškozováním opotřebovávaného povrchu
 - částicemi nesenými proudem kapaliny
 - částicemi nesenými proudem plynu
 - proudem kapaliny, kapek, páry nebo plynu

Intenzita erozivního opotřebení je ovlivněna jak druhem, vlastnostmi, rychlostí, tlakem, teplotou, chemickým působením a ostatními podmínkami proudění nosného média, tak i druhem, vlastnostmi, množstvím, velikostí, tvarem, rychlostí a úhlem dopadu nesených částic na exponovaný povrch a vlastnostmi tohoto povrchu (je-

VŠST Liberec	Abrazivita a eroze skla.	Katedra SK - FY	
Fakulta strojní		DP 227/74	str. 5

ho materiálu a povrchových a podpovrchových vrstev).

Pro erozivní opotřebení je typické nerovnoměrné opotřebení povrchu součástí. Částice mohou být v průběhu erozivního opotřebení odstraňovány i z nejnižších míst povrchu, zatímco při jiných druzích opotřebení, zejména abrazivním, dochází k odstraňování částic především z vrcholů nerovností.

- d) Kavitační opotřebení
- e) Únavové opotřebení
- f) Vibrační opotřebení
- g) Jiné opotřebení: kombinace předešlých opotřebení.

Studium abrazivity a eroze je vynuceno požadavky technického rozvoje a technické praxe. Při obrábění se s erozí setkáváme při čištění odlitků, při zdrsňování a zjemňování povrchů, ve sklářství při matování a reliéfování skel.

Z důvodů opotřebení se s erozí zabýváme při provozu helikoptér a turbínových motorů, u kavitace parních a vodních turbín, při provozu lodních šroubů a při opotřebení trysek v raketové technice. Proto se věnuje studiu eroze zvýšená pozornost.

VŠST Liberec	Abrazivita a eroze skla.	Katedra SK - FY	
Fakulta strojní		DP 227/74	str. 6

1. Definice veličin

1. 1. Eroze

Erozi E kvantifikujeme veličinou snadno definovatelnou a měřitelnou - úbytkem hmoty Δm materiálu způsobeným jednotkovým množstvím abrazivního materiálu. Od určité hodnoty použitého množství částic při erozi je průběh celkového úběru Δm lineární, což vede k jednoduché definici hmotové eroze

$$E = \Delta m / M,$$

kde M je hmota částic užitých při erozi. Číselně se vyjadřuje veličinou obvykle s rozměrem (g/kg).

Výhodnější je definice objemové eroze

$$E_v = \Delta V / M,$$

udávané v (mm³/kg) nebo v (cm³/kg).

ΔV je objem ubraného materiálu.

Takto zavedená veličina je funkcí nejrozličnějších vlivů, které se podílejí na mechanismu eroze. Jsou to:

- 1) Velikost a směr vektoru rychlosti částic dopadajících na povrch materiálu
- 2) Velikost, tvar a materiálové vlastnosti částic užitých při erozi (tvrdost, pevnost atd.)
- 3) Mechanické vlastnosti zkoušeného materiálu (pevnost, tvrdost, houževnatost, křehkost, atd.)

1.2. Impaktní úhel

Na erozi má vliv velikost impaktního úhlu. Impaktní úhel je úhel, který svírá vektor rychlosti

částic dopadajících na povrch otryskávaného materiálu s rovinou otryskávaného materiálu.

Např. při tzv. kolmém otryskávání je tedy impaktní úhel roven hodnotě 90° .

1.3. Jednotky tlaku

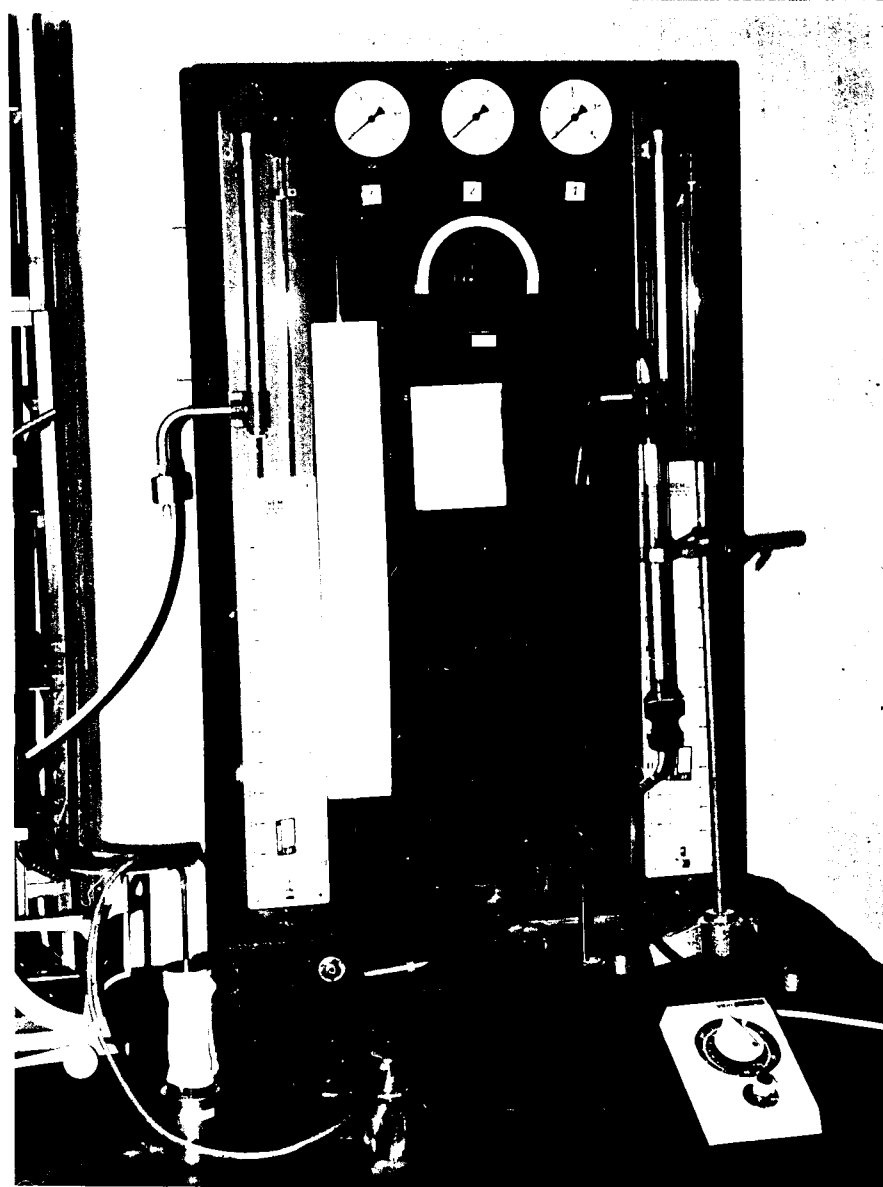
V celé diplomové práci je jako jednotka tlaku používána více vžitá 1 atp, tzv. technická atmosféra. Pro přepočítání do nové jednotkové soustavy SI je zde uvedena tab. I

technická atmosféra	1 atp = 1 kp/cm ² = 98 066,5 Pa
fyzikální atmosféra	1 atm = 760 torr = 101 325 Pa
1 Pascal	- 1 Pa = N/m ²
1 bar	- 1 b = 10 ⁵ Pa
1 torr	= 133,322 Pa

Tab. I. Převody jednotek tlaku ze staré soustavy (technické) do nové soustavy SI.

2. Tryskací zařízení

Veškeré operace otryskávání vzorků proudem volného brusiva byly prováděny na tryskacím zařízení (obr. 1), které bylo pro tento účel zkonstruováno v laboratořích katedry fyziky v Doubí u Liberce.



Obr. 1. Tryskací zařízení.

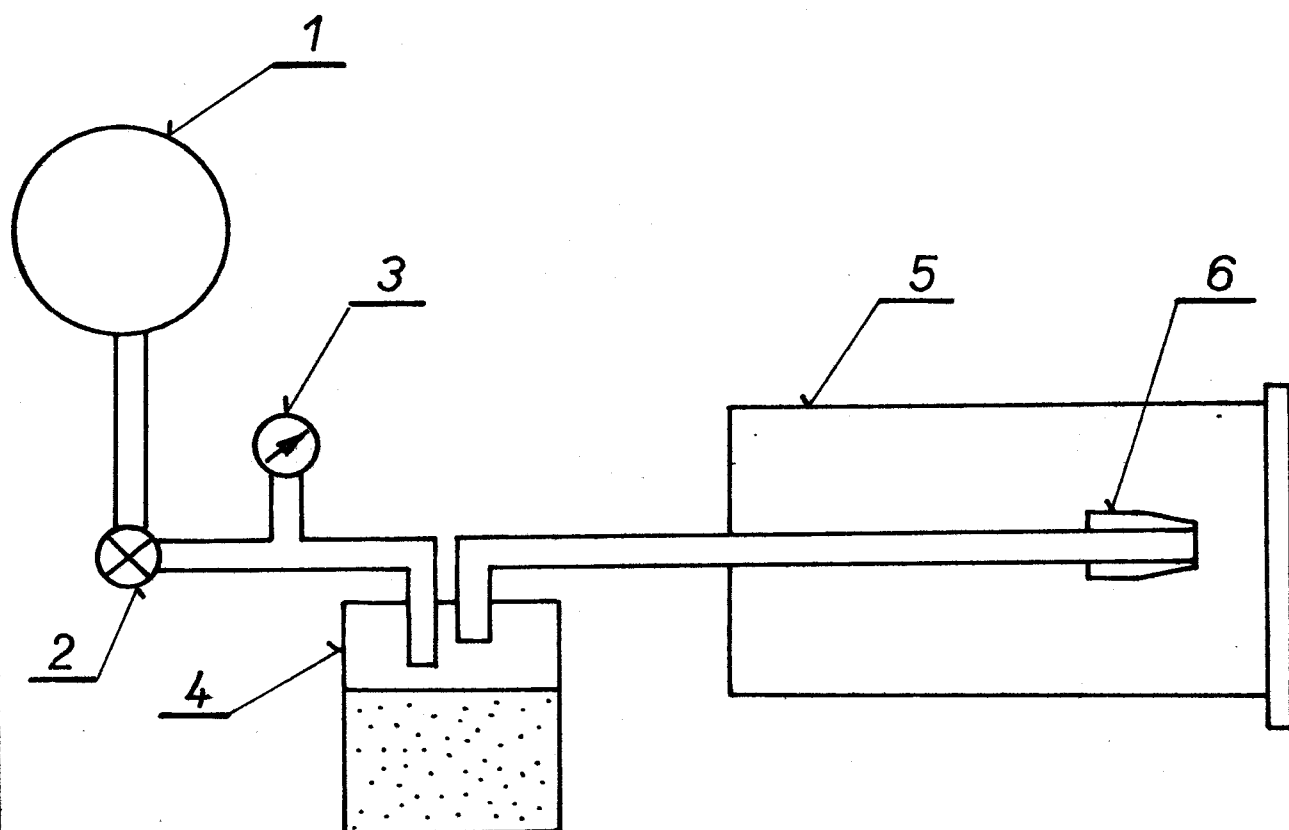
VŠST Liberec	Abrazivita a eroze skla.	Katedra SK - FY	
Fakulta strojní		DP 227/74	str. 9

2. 1. Princip otryskávání

Na obr. 2 je znázorněn princip otryskávání. Stlačený vzduch vystupuje ze vzduchového akumulátoru 1 a je regulován redukčním ventilem 2. Tlak vzduchu je měřen manometrem 3, připojeným před vstupem do směšovací nádoby 4. Do této směšovací nádoby je nasypáno brusivo tak, aby vstupní i výstupní trubice byly volné. Proudem vzduchu vstupujícího do nádoby se brusivo rozvíří a je hnáno do tryskače 5, kde vystupuje z trysky 6 proti otryskávanému vzorku.

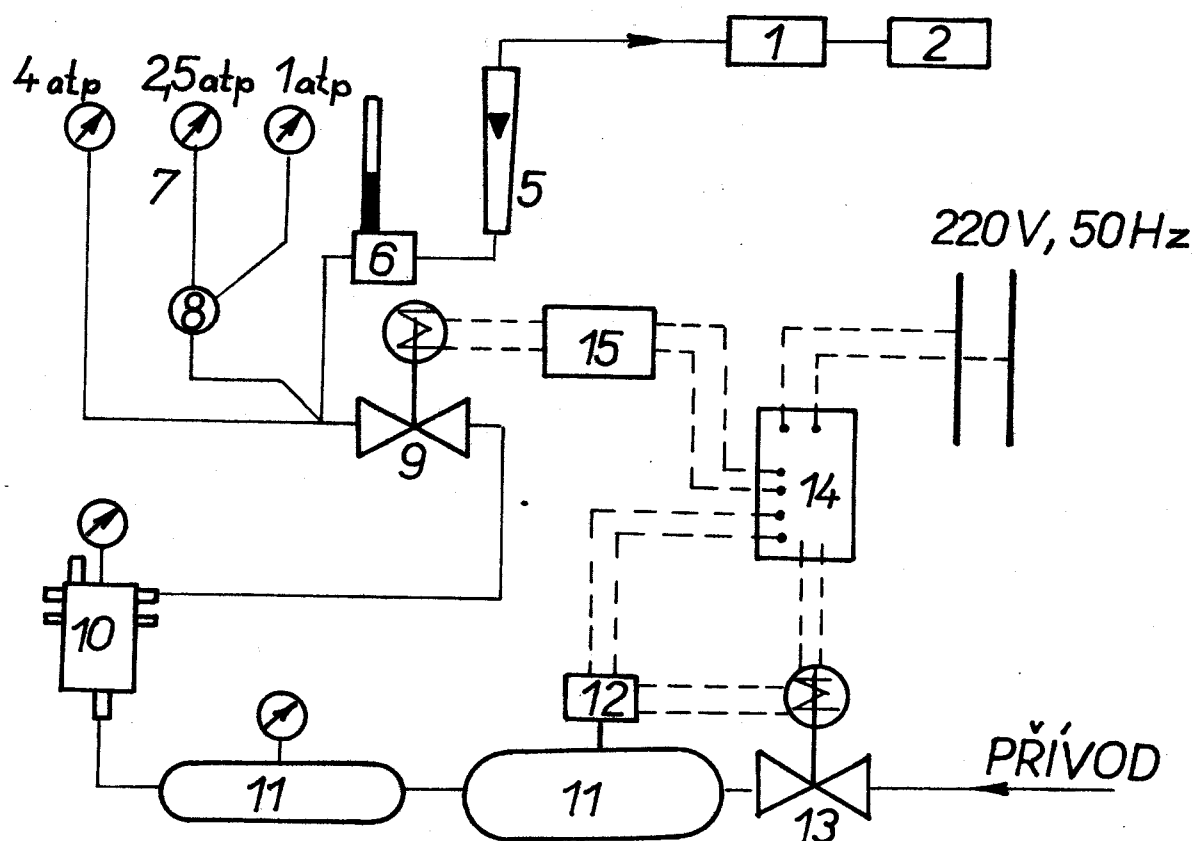
2.2. Popis funkce tryskacího zařízení

Na obr. 3 je blokové schéma tryskacího zařízení. Přívod vzduchu je od kompresoru, který není na schématu znázorněn. Stlačený vzduch jde do vzduchových akumulátorů 11, které zaručují stálou dodávku vzduchu bez pulsace. Stálý žádaný tlak zajišťuje tlakové čidlo 12 a elektromagnetický ventil 13. Z akumulátoru jde vzduch přes ruční regulátor tlaku 10 a elektromagnetický ventil 9 do pětipolohového ventilu 8 a přes clonku 6 a rotametr 5 do směšovače 1 a tryskače 2. Pětipolohový ventil umožňuje použít více tryskačů najednou, zde však byl používán vždy jen jeden, ostatní otvory byly zaslepeny. Elektromagnetický ventil 9 je ovládán časovým spínačem 15. Jako časového spínače zde bylo použito expozičních hodin VIPO Combi. Na nich se nastavovala doba otryskávání vzorku. K měření tlaku tryskacího média bylo použito tři manometrů 7 s různými rozsahy. Pro kontrolu tlaku zde ještě



1-VZDUCHOVÝ AKUMULÁTOR, 2-REDUKČNÍ VENTIL,
3-MANOMETR, 4-SMĚŠOVACÍ NÁDOBK, 5-TRYSKAČ,
6-TRYSKA.

Obr. 2. Princip otryskávání.



1-SMĚŠOVAČ, 2-TRYSKAČ, 5-ROTAMETR, 6-CLONKA S DIF. TLAKOMĚREM, 7-MANOMETRY, 8-5ti POLOHOVÝ VENTIL, 9-EL.MAG. VENTIL, 10 RUČNÍ REGULÁTOR TLAKU, 11-VZDUCH. AKUMULÁTORY, 12-TLAK. ČIDLO, 13-EL.MAG. VENTIL, 14-ROZVODNÁ DESKA, 15-ČASOVÝ SPÍNAČ.

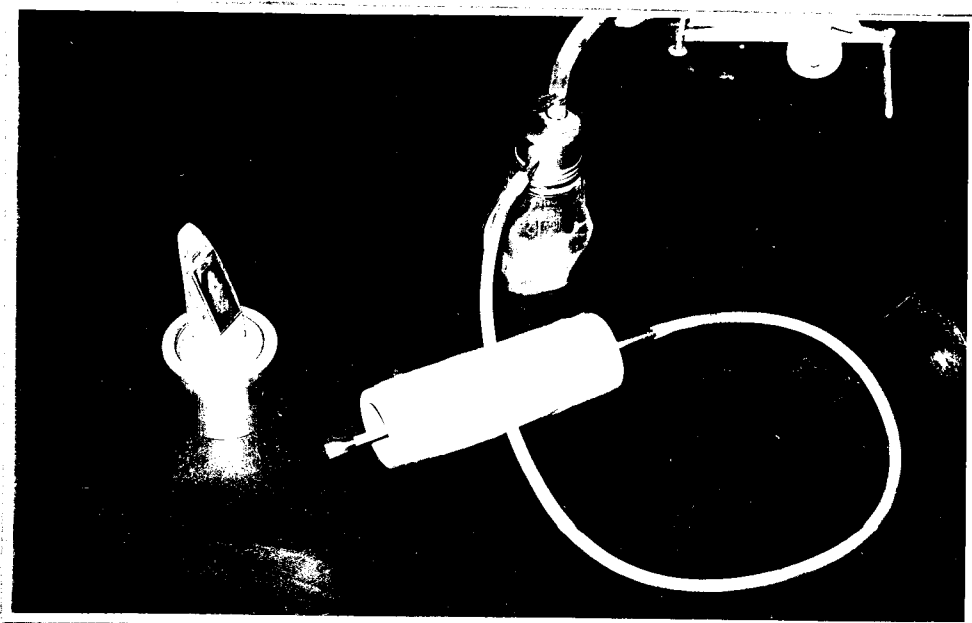
Obr. 3. Blokové schéma tryskacího zařízení.

byla použita clonka s diferenčním tlakoměrem. Na rota-
metru 6 se kontrolovala stálost průtoku vzduchu. Elektric-
ké spotřebiče se připojovaly na rozvodnou desku 14.

2.3. Části tryskacího zařízení

2.3.1. Směšovací nádobka

Při otryskávání byla používána skleněná směšovací
nádobka opatřená kovovým uzávěrem se závitem. V uzávěru
jsou dva otvory. Jeden pro vstup stlačeného vzduchu a
druhý pro výstup směsi tryskacího prášku a nosného vzdu-
chu. Nádobka je na obr. 4.



Obr. 4. Směšovací nádobka, tryskač, výměnný přípravek
se vzorkem.

VŠST Liberec	Abrazivita a eroze skla.	Katedra SK - FY	
Fakulta strojní		DP 227/74	str. 13

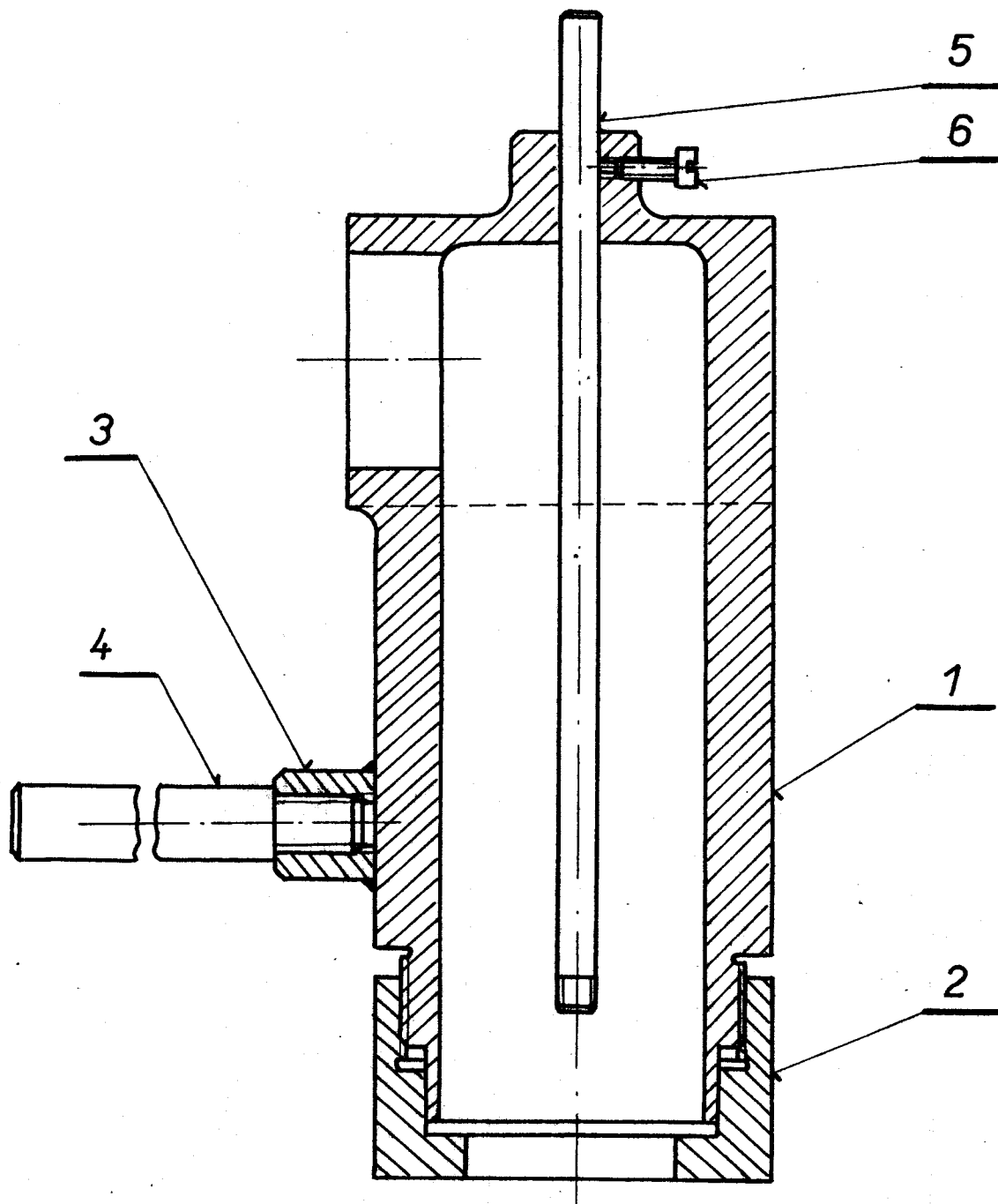
2.3.2. Tryskače

Při práci s tryskací aparaturou bylo používáno dvou druhů tryskačů:

- tryskače pro otryskávání s imp. úhlem 90° ,
- tryskač pro otryskávání pod různými imp. úhly.

a) Tryskač pro otryskávání s imp. úhlem 90° :

Tryskač je naobr. 5. Tryskač se skládá z tryskací komory 1, na kterou je našroubováno víko tryskače 2. Na dně víka je umístěn vzorek, který chceme otryskávat. Aby se vzorek při upínání nepoškodil a aby bylo zamezeno unikání prášku do okolí, umístíme mezi vzorek a komoru pryžovou podložku mezikruhového průřezu. Vzorek může být jak kruhového, tak i čtvercového tvaru. Maximální průměr či úhlopříčka je 44 mm. Ve dně víka je otvor o průměru 32 mm. Dovoluje nám pozorovat průběh otryskávání. Na protilehlé straně víka, tzn. na dně komory, je otvor, kterým prochází nosič výměnných trysek 5. Na něj se našroubovávají trysky. Na vnější straně dna komory je aretační šroub 6, jímž se zajišťuje vzdálenost trysky od otryskávaného vzorku. Na povrchu nosiče je vyryta milimetrová stupnice o rozsahu 0 - 40 mm, pro rychlejší a přesnější nastavení vzdálenosti trysky od vzorku. Na stěně komory je otvor, kterým se odvádí tryskací prášek např. pomocí vysavače. Na plášti komory je matice 3, v níž je našroubován držák tryskače 4. Pracovní poloha tryskače je volena tak, aby podélná osa tryskače byla horizontální.



1-TRYSKACÍ KOMORA, 2-VÍKO TRYSKAČE, 3-MATICE, 4-DRŽÁK TRYSKAČE, 5-DRŽÁK TRYSKY, 6-ARET.ŠROUB.

Obr. 5. Tryskač pro otryskávání s imp. úhlem 90° .

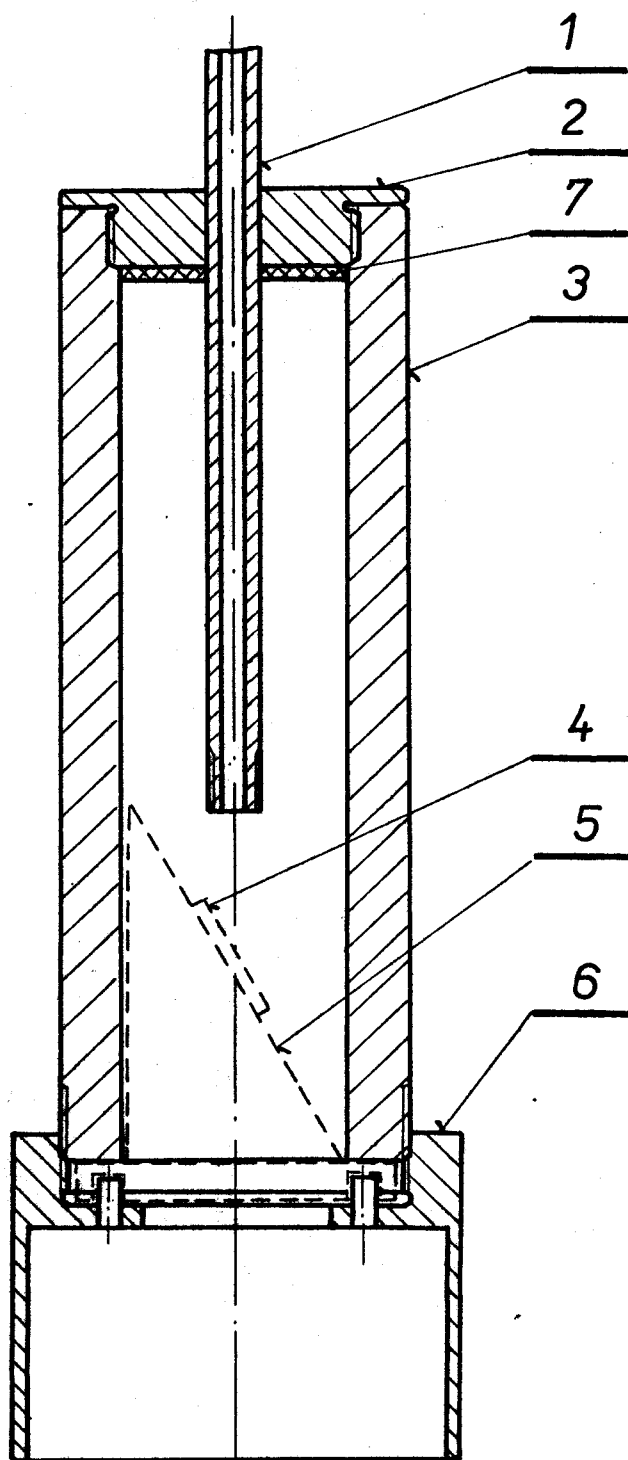
VŠST Liberec	Abrazivita a eroze skla.	Katedra SK - FY	
Fakulta strojní		DP 227/74	str. 15

Tryskač slouží nejen k práci s brusným práškem, ale může se použít i k otryskávání kapalnými suspenzemi.

b) Tryskač pro otryskávání pod různými imp. úhly:

Tryskač je na obr. 4 a na obr. 6.

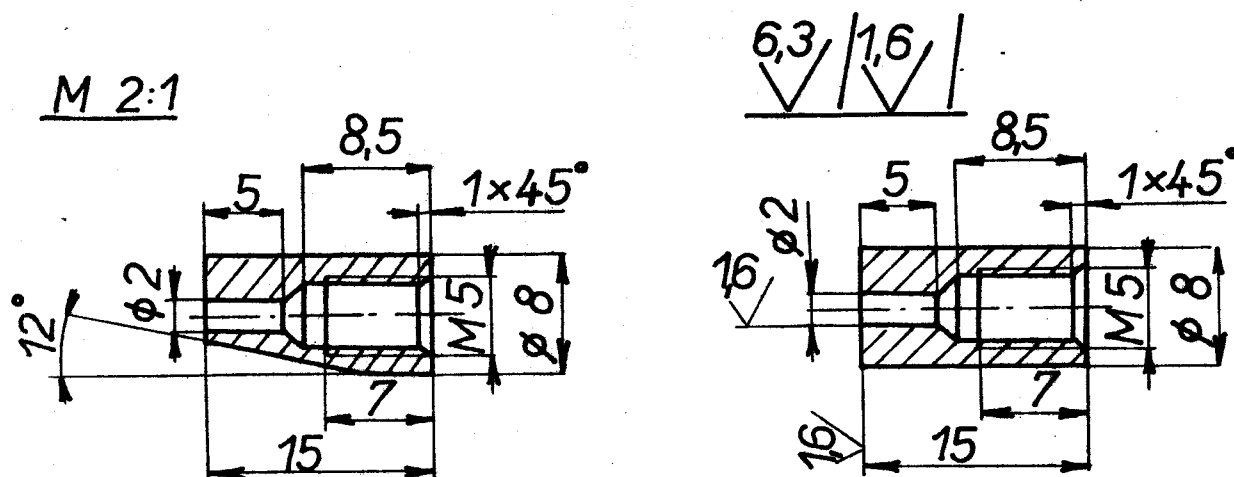
Těleso tryskače 3 je podélně profrézováno. Na těleso se navlékne plátěný kryt, jenž je na obou koncích pevně přichycen. Plátno bylo zvoleno proto, aby vzduch mohl volně unikat z tryskače a brusivo zůstávalo v jeho vnitřní části. V matici 2, která uzavírá vstupní stranu tělesa, je otvor, jímž prochází držák trysky 1. Na něj se našroubuje tryska speciálně zkosená. Na nosič přípravků 6, který uzavírá druhou stranu tryskače, se upínají výměnné přípravky 5. Proti pootočení jsou zajištěny dvěma kolíky. Každý přípravek slouží k otryskávání pod jiným imp. úhlem. Na výměnný přípravek se přilepí vzorek 4. Vzorek a výměnný přípravek je na obr. 6 znázorněn čárkovaně. Po otryskání vzorku se vyšroubuje nosič přípravků s přípravkem a vzorkem, prášek se z tělesa tryskače vysype. Vyměníme přípravek (a tím i vzorek), vložíme jej na nosič přípravku a nosič zašroubujeme do tělesa tryskače. Tryskač je tak připraven k dalšímu otryskávání. Nastavení trysky do určité vzdálenosti od vzorku se provádí tak, že se tryska umístěná na konci držáku trysky 1 přisune na doraz k otryskávanému vzorku a potom se podle milimetrové stupni vysoustružené na držáku trysky, vysune o požadovanou vzdálenost 5. Aretace nastavení je zajištěna třením o pryžové těsnění 7.



1-DRŽÁK TRYSKY, 2-MATICE, 3-TĚLESO TRYSKAČE,
4-VZOREK, 5-VÝMĚNNÝ PŘÍPRAVEK, 6-NOSIČ PŘÍPRAV-
KŮ, 7-TĚSNĚNÍ.

Obr. 6. Tryskač pro otryskávání pod různými imp. úhly.

VŠST Liberec	Abrazivita a eroze skla.	Katedra SK - FY	
Fakulta strojní		DP 227/74	str. 17



Obr. 7. Trysky.

2.3.3. Trysky

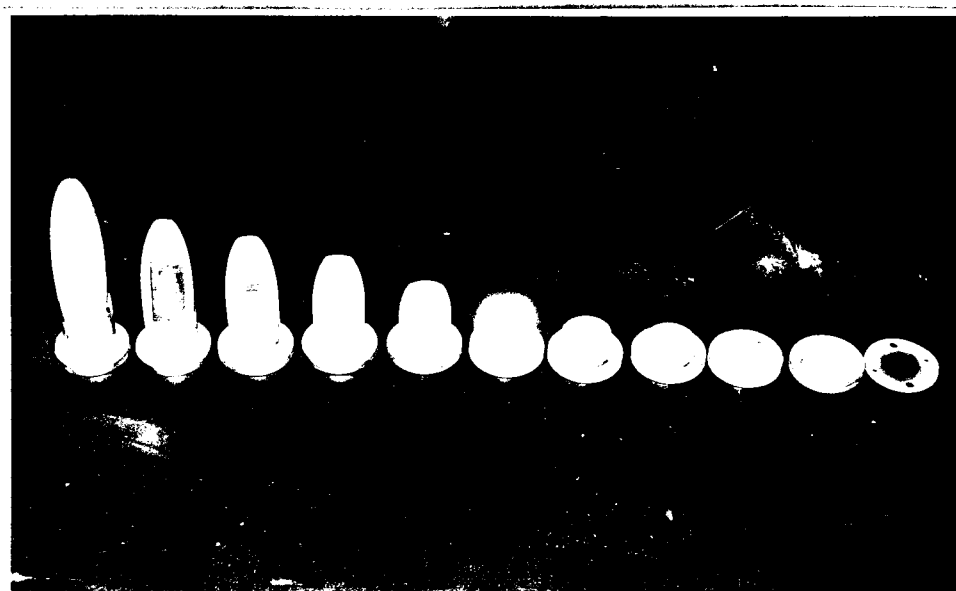
Pro otryskávání byly použity dva druhy; pro kolmé otryskávání normální tryška kruhového průřezu a pro otryskávání s různými imp. úhly tryška upravená, zkosená. Oba druhy trysek jsou na obr. 7. Zkosení tryšky slouží k lepšímu dosednutí tryšky na vzorek, a tím i k přesnějšímu nastavení vzdálenosti od vzorku.

Na tryšky byl použit materiál 19 221, tzv. stříbrnitá ocel. Je to nástrojová ocel, zpravidla tažená a žíhaná, velmi přesně broušená nebo leštěná. Po zakalení ve vodě má tvrdost 64 HRC. Trysky z tohoto materiálu vydržely zhruba 30 minut, potom se vnitřní průměr tryšky zvětšoval.

Výhodnější by bylo použít oceli POLDI 2 002, tj. 19 436 s tvrdostí 61 HRC. Tato ocel má zakalenou vrstvu v celém průřezu a vyzkoušeli ji v n. p. Kovofiniš v Ledči nad Sázavou.

213.4. Výměnné přípravky

K otryskávání pod různými impaktními úhly sloužila sada výměnných přípravků. Celá sada je na obr.8. Sada obsahovala 11 přípravků s imp. úhly 17° , $19^\circ 30'$, 27° , 37° , 47° , 57° , 67° , 77° , 87° a 90° .



Obr. 8. Sada výměnných přípravků.

VŠST Liberec	Abrazivita a eroze skla.	Katedra SK -FY	
Fakulta strojní		DP 227/74	str.19

3. Eroze skla v závislosti na impaktním úhlu pro prášky karbid křemíku, korund a skelný prášek.

3.1. Pracovní podmínky

Otryskávání probíhalo na tryskači z obr.4 a obr.6. V vzdálenost trysky od vzorku byla vždy 8 mm, pracovní tlak vzduchu byl vždy roven 1 atp.

3.2. Vzorky

K dispozici byly dva druhy skla - tažené ploché sklo tabulové ČSN 70 9051, $\rho = 2,50 \text{ g/cm}^3$ (dále již jen tabulové sklo). a polymetylmetakrylát deskový, tzn. organické sklo-obchodní název plexisklo(dále již jen plexisklo), $\rho = 1,19 \text{ g/cm}^3$, tvrdost 18 HB.

Vzorky plexiskla měly rozměry 25x25 mm a byly 2 mm silné. Vzorky tabulového skla měly rozměry 20x20 mm a byly 2,8 mm silné.

3.3. Abrazivní prášky

Oba druhy skel byly otryskávány třemi druhy abrazivních prášků, které byly použity i u následujících měření(kap. 4,5,6). Byly to:

- Skelný prášek s velmi různorodou zrnitostí. Prášek obsahuje částice nepatrné velikosti, ale také až milimetrové úlomky skla. Prášek je na obr.9.
- Korund Al_2O_3 - Kysličník hlinitý(dále již jen Al_2O_3), bílý, zrnitost 150 t.j. zrna o velikosti 80-100 μm .

Tvrдость Al_2O_3 odpovídá stupni 9 Mohsovy stupnice. Al_2O_3 je na obr. 10.

c) Karbid křemíku SiC zelený (dále již jen SiC), zrnitost 150, tzn. průměry zrn 80-100 μm . SiC je na obr. 11.

Pro fotografování zrn na mikroskopu Meopta 111 689 byl použit mikrofotografický přístroj „U“, typ č. 577 30 se zvětšením 150 x. Fotografovalo se na desky ORWO.



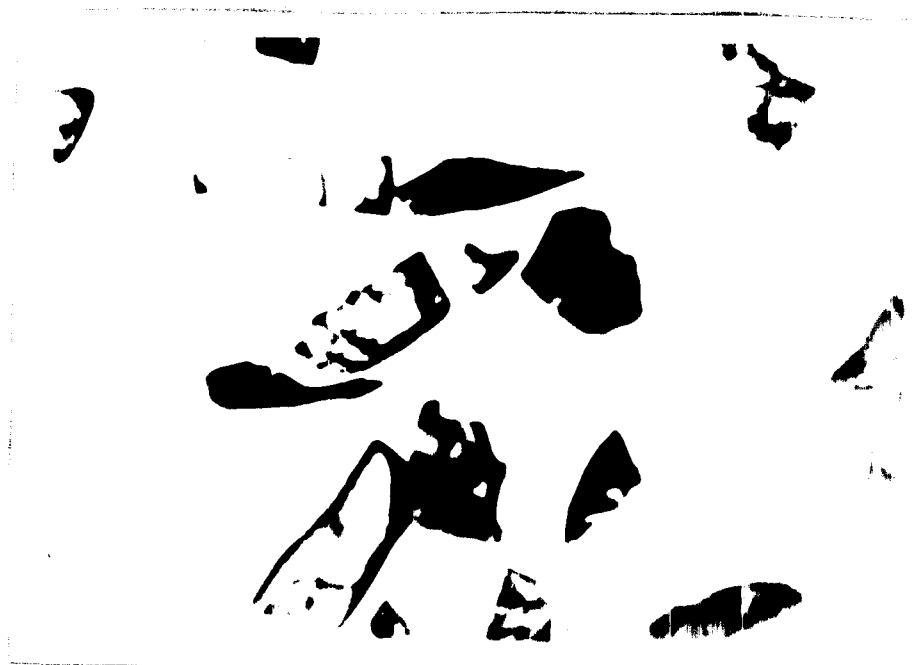
0 μ 200

Obr. 9. Zrno skelného prášku. 150 x zvětšeno.



Obr.10. Zrno korundu Al_2O_3 , zrnitost 150, bílý. 150 x zvětšeno.

0 μ 200



Obr.11. Zrno karbidu křemíku SiC , zrnitost 150, zelený.
150 x zvětšeno.

VŠST Liberec	Abrazivita a eroze skla.	Katedra SK - FY	
Fakulta strojní		DP 227/74	str.22

3.4. Vlastní průběh měření

Po očištění se vzorky očíslovaly a zvažily na poloautomatických analytických vahách Meopta ČSL.PAT.OHL. 0302317 s přesností 10^{-4} g. Potom se vzorky přilepily šelakem na výměnné přípravky a provedlo se otryskání celé serie pro všechny stanovené imp. úhly. Vzorky se znovu pečlivě očistily a zvažily.

Z rovnice $\Delta m = m_0 - m$ [mg] se vypočetl váhový úbytek Δm ; m_0 je váha vzorku před otryskáním m je váha vzorku po otryskání.

Objemové úbytky ΔV [mm³] se počítaly ze vzorce

$$\Delta V = \Delta m / \rho \quad [\text{mm}^3],$$

kde Δm je opět váhový úbytek a ρ je měrná hmotnost vzorku.

Oba úbytky, váhový i objemový, byly potom úměrou přepočítány na úbytky připadající na 1 kg tryskacího prášku. Směšovací nádobka byla naplněna určitým množstvím prášku (60 g nebo 100 g) a celé množství prášku bylo vytryskáno. K zajištění reprodukovatelnosti měření byly otryskány 3 vzorky za stejných podmínek. Z jednotlivých úbytků byl spočítán aritmetický průměr. Pro nedostatek vzorků byly skelným práškem otryskány jen 2 vzorky za stejných podmínek pro každý impaktní úhel.

3.5. Výsledky měření

3.5.1. Tabulové sklo

Výsledky měření úbytku (eroze) pro tabulové sklo jsou v tabulce II pro otryskávání skelným práškem

VŠST Liberec		Katedra SK - FY	
Fakulta strojní	Abrazivita a eroze skla.	DP 227/74	str.23

v tabulce III pro otryskávání Al_2O_3 a v tabulce IV pro otryskávání SiC.

Získané závislosti jsou na obr.12,kde je váhová eroze a na obr.13, kde je objemová eroze.

3.5.2. Plexisklo

Výsledky měření eroze pro plexisklo jsou v tabulce V pro skelný prášek,v tabulce VI pro Al_2O_3 a v tabulce VII pro SiC.

Při otryskávání skelným práškem pro impaktní úhel 37° byly oba vzorky proraženy proudem brusiva a proto je nutné tento výsledek aproximovat.Pro tento imp. úhel jsme naměřily maximální erozi.

Získané závislosti jsou na obr.14,kde je váhová eroze a na obr.15,kde je objemová eroze.

3.6 . Zhodnocení měření

Z obr.12 a obr.13 vidíme,že erozivní účinky SiC a Al_2O_3 na tabulové sklo jsou téměř stejné.SiC je o něco abrazivnější.Sestoupajícím imp.úhlem eroze tabulového skla prudce stoupá,při imp. úhlu 90° (kolném dopadu částic) je největší.

Při otryskávání skelným práškem vykazovalo tabulové sklo minimální erozi,při kolném otryskávání je eroze opět největší.

V tabulce IV byla u druhé serie vzorků použita nová tryska,proto jsou zde naměřené úbytky největší.Zvětšující se průměr trysky poněkud ovlivňoval měření.Počáteční

VŠST Liberec		Abrazivita a eroze skla.		Katedra SK - FY	
Fakulta strojní				DP 227/74	str.24

číslo vzorku	impaktní úhel	váhový úbytek [mg]	průměr.váhový úbytek [mg]	průměr.váňový úbytek/kg [mg/kg]	průměr.obj. úbytek/kg [mm ³ /kg]
1	90°	2,4	1,55	25,8	10,5
2		0,7			
3	87°	0,4	0,45	7,5	3
4		0,5			
5	77°	0,7	0,45	7,5	3
6		0,2			
7	67°	0,5	0,6	10,0	4
8		0,7			
9	57°	0,6	0,65	10,8	4,32
10		0,7			
11	47°	0,4	0,4	6,7	2,67
12		0,4			
13	37°	0,7	0,55	9,2	3,68
14		0,4			
15	27°	1,0	0,6	10,0	4
16		0,2			
17	22°	-	0,4	6,7	2,67
18		0,4			
19	19°30'	0,6	0,65	10,8	4,32
20		0,7			
21	17°	-	0,4	6,7	2,67
22		0,4			

Tab.II. Eroze tabulového skla pro otryskávání skelným práškem v závislosti na impaktním úhlu(60 g prášku).

VŠST Liberec		Abrazivita a eroze skla		Katedra SK-FY	
Fakulta strojní				DP 227-74	str.25

číslo vzorku	impaktní úhel	váhový úbytek [mg]	průměr.váhový úbytek [mg]	průměr.váhový úbytek/kg [mg/kg]	průměr.obj. úbytek/kg [mm ³ /kg]
1 12 23	90°	65,9 64,4 53,3	61,2	612	245
2 13 24	87°	61,3 53,3 60,2	58,3	583	233,4
4 15 26	77°	52,3 42,6 43,4	46,1	461	184,3
5 16 27	57°	45,4 41,7 35,6	40,9	409	163,7
6 17 28	47°	32,1 30,3 33,1	31,5	315	126
7 18 29	37°	21,3 19,2 19,9	20,1	201	80,4
8 19 30	27°	12,4 10,6 11,9	11,6	116	46,4
9 20 31	22°	8,4 2,1 6,7	5 ,7	57	22,8
10 21 32	19° 30'	5,7 5,1 5,9	5,6	56	22,4
11 22 33	17°	8,7 3,7 4,7	4,4	44	17,6

Tab.III. Eroze tabulového skla pro otryskávání Al₂O₃ v závislosti na impaktním úhlu(100 g prášku).

VŠST Liberec		Abrazivita a eroze skla.		Katedra SK - FY	
Fakulta strojní				DP 227-74	str.26

číslo vzorku	impaktní úhel	váhový úbytek [mg]	průměr.váhový úbytek [mg]	průměr.váhový úbytek/kg [mg/kg]	průměr.objem. úbytek/kg [mm ³ /kg]
1	90°	45,9	63,83	638,3	255
2		81,8			
3		63,8			
4	87°	52,3	64,43	644,3	257,8
5		79,4			
6		61,6			
7	77°	47,0	56,27	562,7	225
8		67,8			
9		54,0			
10	67°	42,8	52,17	521,7	208,7
11		61,1			
12		52,6			
13	57°	27,3	40,03	4 00,3	160
14		51,8			
15		41,0			
16	47°	35,1	38,17	381,7	152,5
17		47,2			
18		32,2			
19	37°	18,0	25,87	258,7	105
20		38,9			
21		20,7			
22	27°	10,6	13,53	135,3	54,1
23		18,0			
24		12,0			
25	22°	7,1	9,17	91,7	36,7
26		12,1			
27		8,2			
28	19° 30'	5,8	7,33	73,3	29,3
29		9,4			
30		6,8			
31	17°	6,0	6 ,87	68,7	27,5
32		8,0			
33		6,6			

Tab.IV. Eroze tabulového skla pro otryskávání SiC v závislosti na impaktním úhlu(100 g prášku).

VŠST Liberec		Abrazivita a eroze skla		Katedra SK - FY	
Fakulta strojní				DP 227/74	str.26a
číslo vzorku	impaktní úhel	váhový úbytek mg	Ø váhový úbytek mg	Ø váhový úbytek/kg mg/kg	Ø objemový úbytek/kg mm ³ /kg
1	90°	14,1	12,7	210,8	177,8
2		11,3			
3	87°	12,3	13,8	230	193,2
4		15,3			
5	77°	12,3	12,4	206,8	173,8
6		12,5			
7	67°	12,8	12,55	209	175,8
8		12,3			
9	57 °	17,0	18,1	302	253,9
10		19,2			
11	47°	27,9	23,3	388,4	326,4
12		18,7			
13	37°	20,3	22,25	375	315
14		24,0			
15	27°	32,5	29,1	485	407
16		25,7			
17	22°	20,5	21,55	359,5	300,2
18		22,6			
19	19°30'	-	19,1	318	267
20		19,1			
21	17°	17,2	17,3	288,2	242,2
22		17,4			

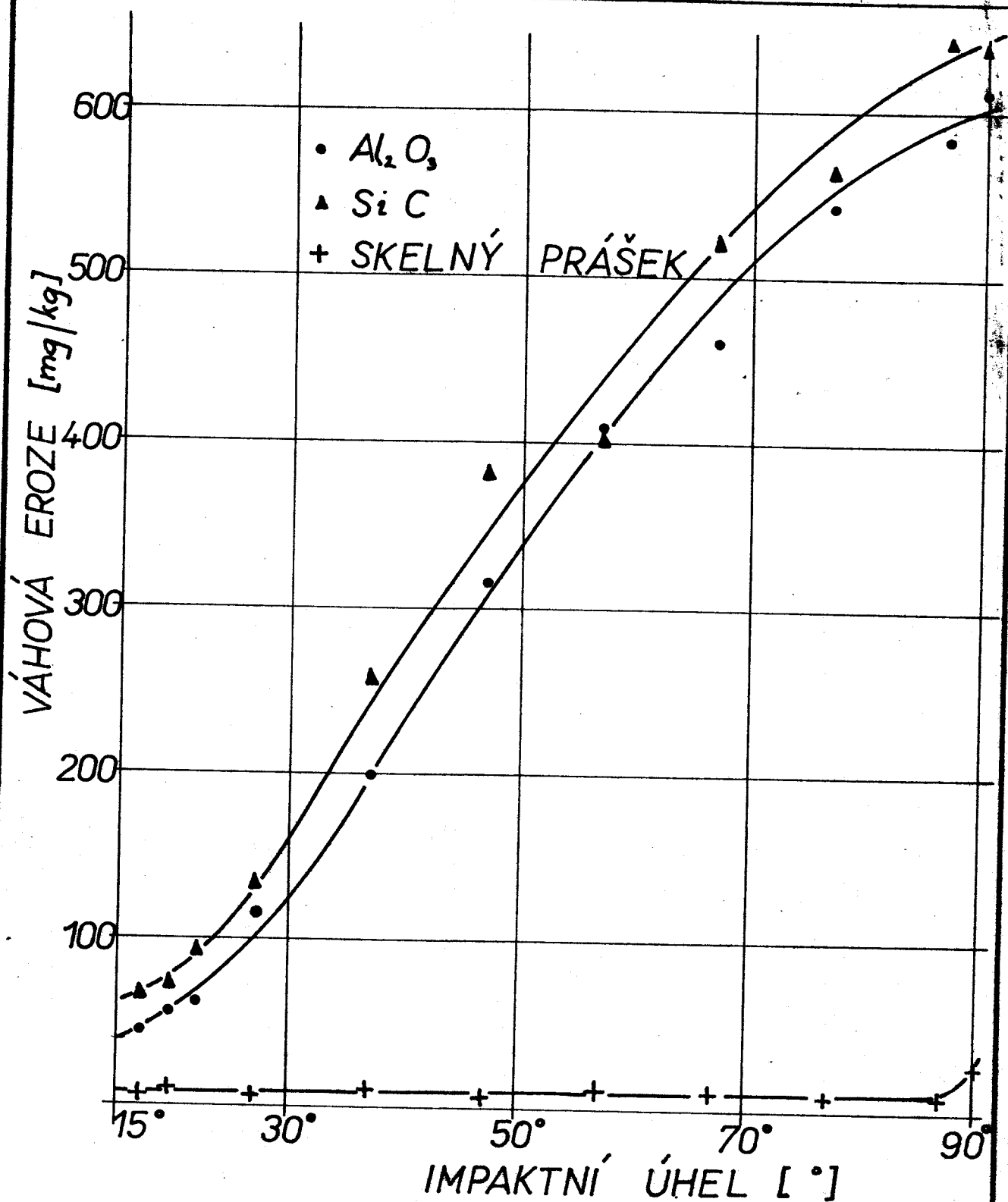
Tab. V. Eroze plexiskla pro otryskávání skelným práškem v závislosti na impaktním úhlu(60 g prášku).

VŠST Liberec		Abrazivita a eroze skla		Katedra SK - FY	
Fakulta strojní				DP 227/74	str.26b
číslo vzorku	impaktní úhel	váňový úbytek mg	Ø váňový úbytek mg	Ø váňový úbytek/kg mg/kg	Ø objemový úbytek/kg mm ³ /kg
1 2 3	90°	5,7 3,6 4,7	4,66	76,7	64,5
4 5 6		6,9 3,8 4,5			
7 8 9		7,9 4,9 4,0			
10 11 12	87°	9,4 5,3 5,3	5,06	84,4	71,0
13 14 15		10,3 6,9 6,4			
16 17 18		12,2 9,7 8,7			
19 20 21	77°	12,9 9,9 9,2	5,6	93,5	78,5
22 23 24		13,9 9,1 9,4			
25 26 27		14,1 7,1 8,9			
28 29 30	67°	12,7 8,3 8,0	6,66	111	92,5
31 32 33		12,7 9,8 10,4			
1 2 3	57°	5,7 3,6 4,7	7,86	131	110,2
4 5 6		6,9 3,8 4,5			
7 8 9		7,9 4,9 4,0			
10 11 12	47°	9,4 5,3 5,3	10,2	170	142,8
13 14 15		10,3 6,9 6,4			
16 17 18		12,2 9,7 8,7			
19 20 21	37°	12,9 9,9 9,2	10,33	178	149
22 23 24		13,9 9,1 9,4			
25 26 27		14,1 7,1 8,9			
28 29 30	27°	12,7 8,3 8,0	10,8	180	151,2
31 32 33		12,7 9,8 10,4			
1 2 3	22°	5,7 3,6 4,7	10033	166	139
4 5 6		6,9 3,8 4,5			
7 8 9		7,9 4,9 4,0			
10 11 12	19°30'	9,4 5,3 5,3	9,66	161	135,2
13 14 15		10,3 6,9 6,4			
16 17 18		12,2 9,7 8,7			
19 20 21	17°	12,9 9,9 9,2	10,97	183	153,8
22 23 24		13,9 9,1 9,4			
25 26 27		14,1 7,1 8,9			
28 29 30		12,7 8,3 8,0			
31 32 33		12,7 9,8 10,4			

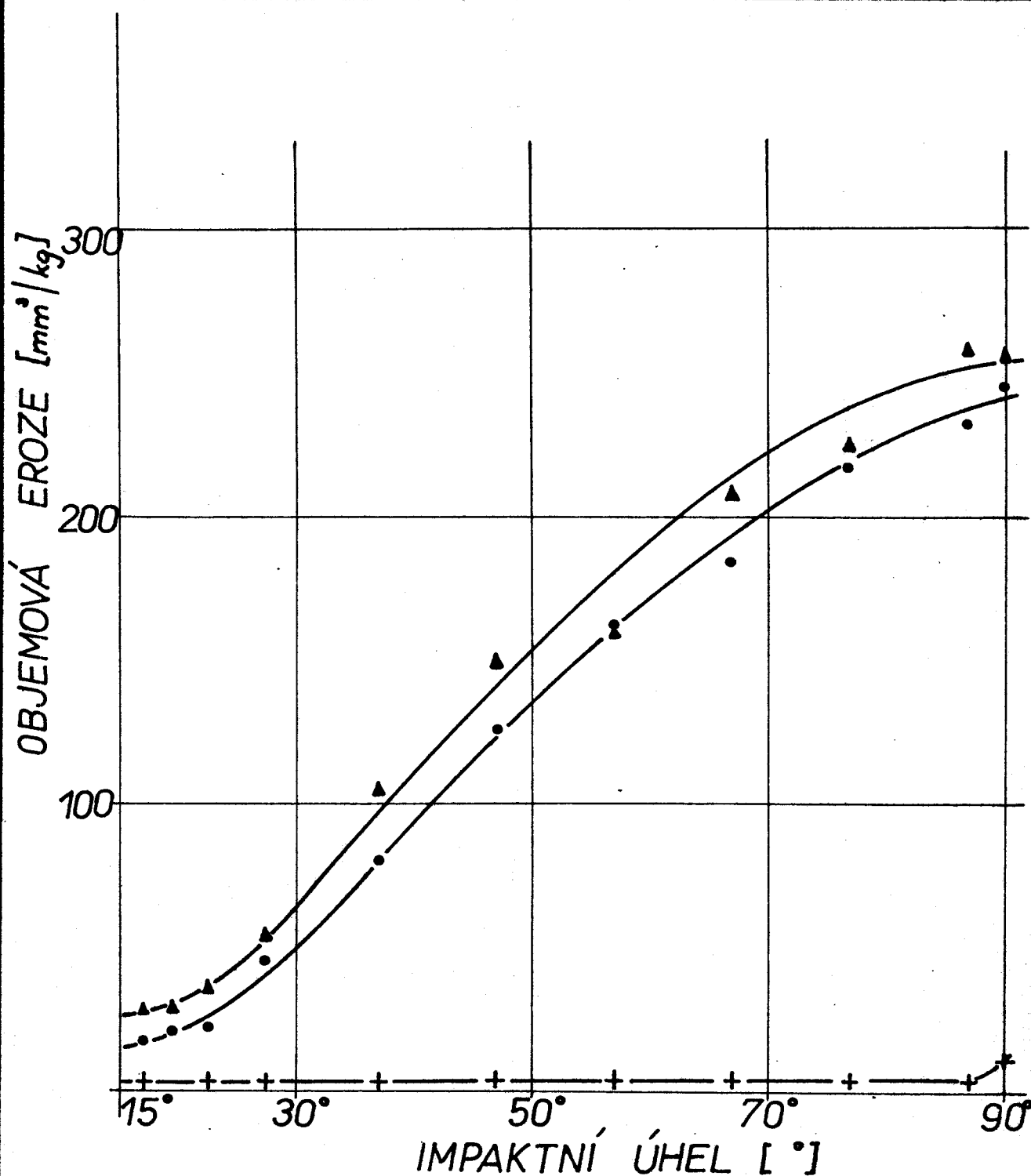
Tab.VI. Eroze plexiskla pro otryskávání Al_2O_3 v závislosti na impaktním úhlu.(60 g prášku).

VŠST Liberec		Abrazivita a eroze skla.		Katedra SK - FY	
Fakulta strojní				DP 227/74	str.26e
číslo vzorku	impaktní úhel	váhový úbytek mg	Ø váhový úbytek mg	Ø váhový úbytek/kg mg/kg	Ø objemový úbytek/kg mm ³ /kg
1 2 3	90°	6,8 6,9 7,4	7,03	117,1	98,4
4 5 6	67°	7,1 8,4 7,7	7,73	128,3	107,9
7 8 9	77°	6,5 9,5 7,6	7,87	131,0	108,5
10 11 12	67°	9,1 10,4 7,4	8,97	149,6	125,9
13 14 15	57°	11,4 10,3 9,9	10,53	175,6	147,6
16 17 18	47°	11,2 11,8 10,3	11,1	185,0	155,3
19 20 21	37°	12,7 12,3 10,8	11,93	198,9	167,0
22 23 24	27°	13,1 11,9 9,9	11,63	194,0	163,1
25 26 27	22°	11,6 10,6 9,9	10,7	178,1	149,5
28 29 30	19°30'	11,6 10,6 9,7	10,66	177,5	149,2
31 32 33	17°	- 10,1 8,9	9,5	158,0	132,8

Tab.VII. Eroze plexiskla pro otryskávání SiC v závislosti na impaktním úhlu(60 g prášku).



Obr. 12. Váhová eroze tabulového skla v závislosti na impaktním úhlu.



Obr. 13. Objemová eroze tabulového skla v závislosti na impaktním úhlu.

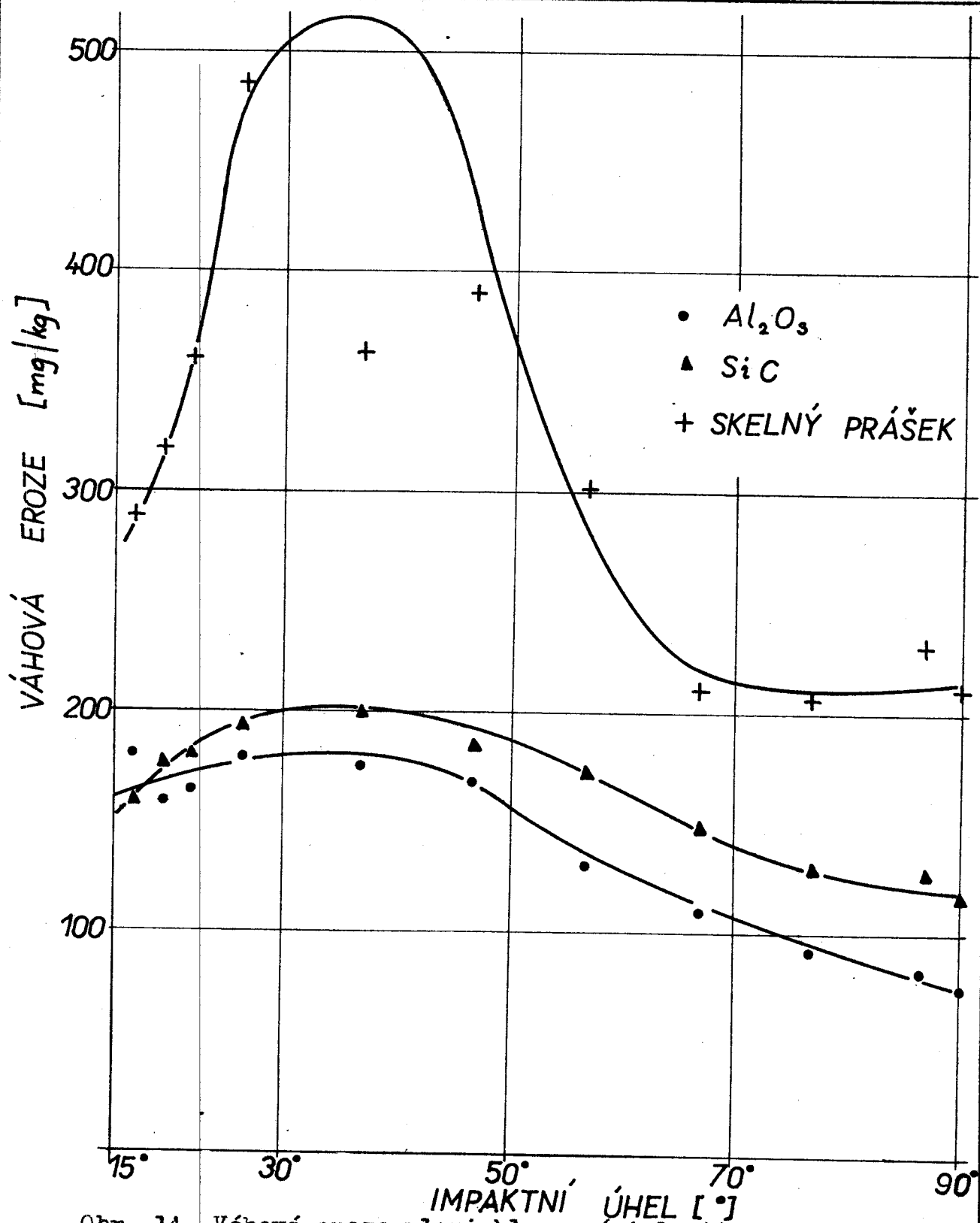
VŠST Liberec	Abrazivita a eroze skla.	K atedra SK - FY	
Fakulta strojní		DP 227/74	str. 29

nedostatek nových trysek nedovoloval výměnu trysky po každé serii.

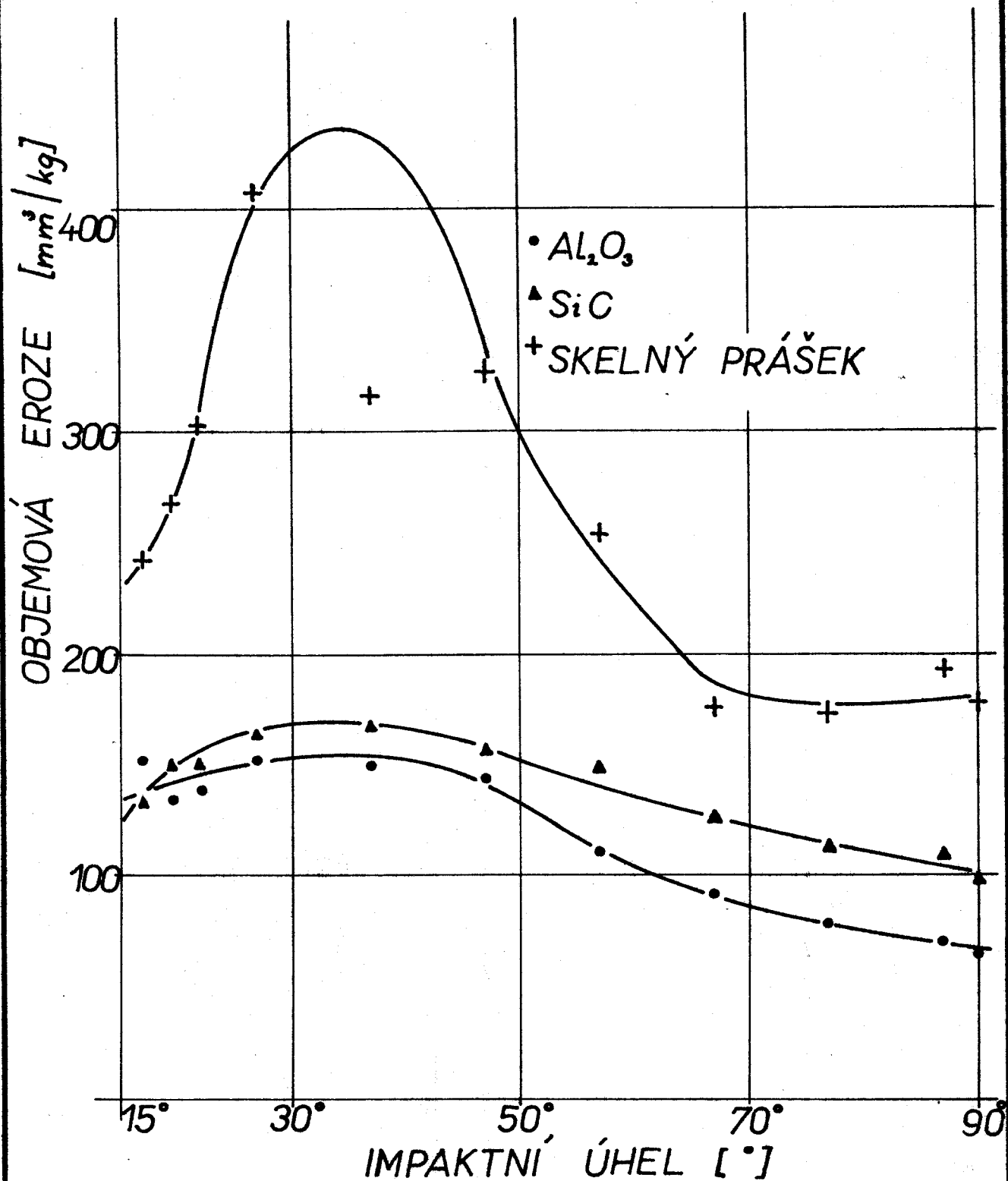
U plexiskla, jak je vidět z obr.14 a obr. 15, je charakter naměřených závislostí úplně odlišný. Se stoupajícím imp. úhlem eroze stoupá, maxima dosahuje mezi 25° až 45°. Potom opět klesá a při velkých impaktních úhlech je téměř stejná. Naměřené závislosti jsou zde pro Al_2O_3 a SiC opět takřka stejné. SiC je o něco abrazivnější.

Při otryskávání skelným práškem byla eroze plexiskla několikanásobně vyšší než u SiC a Al_2O_3 , hlavně v rozmezí imp. úhlů 25° - 45°. Tento interval by do budoucna potřeboval podrobněji prozkoumat.

Porovnáním získaných závislostí pro tabulové sklo a plexisklo zjistíme, že křivka křehkého, fragilního materiálu (tabulové sklo) má úplně odlišný charakter než křivka tažného, duktilního materiálu (plexisklo).



Obr. 14. Váhová eroze plexiskla v závislosti na impaktním úhlu.



Obr. 15. Objemová eroze plexiskla v závislosti na im-
paktním úhlu.

VŠST Liberec	Abrazivita a eroze skla.	Katedra SK - FY	
Fakulta strojní		DP 227/74	str. 32

4. Eroze různých druhů skel při impaktním úhlu 90°.

Ukázalo se, že eroze skla byla největší při otryskávání pod impaktním úhlem 90° (viz. kap.3). Proto bylo provedeno měření eroze v závislosti na množství tryskacího prášku pro dva druhy skel při impaktním úhlu 90° (kolmé otryskávání).

4.1. Pracovní podmínky

Tryskání se provádělo na tryskači z obr.5. Tlak nosného média byl opět roven 1 atp a vzdálenost trysky od vzorku se rovnala 8 mm.

Tryskání se provádělo počt s prášky SiC, Al₂O₃ a skelným práškem. K otryskávání se používalo trysek bez sraženin (obr.7).

4.2. Stanovení průtočného množství prášků

Abychom si usnadnili měření, zjistili jsme si průtočné množství prášků v závislosti na čase. Do směšovací nádoby jsme dali 120 g prášku. Po 12 vteřinách otryskávání jsme vždy zvážili úbytek prášku v nádobce. Toto měření bylo pro každý prášek (SiC, Al₂O₃, skelný prášek) provedeno 10 x.

Údaje o měření jsou v tabulce VIII. Naměřené závislosti jsou na obr.16. Vidíme, že závislosti jsou lineární. Největší průtok vykazoval SiC, nejmenší skelný prášek.

Nyní se již při vlastním otryskávání vzorků měřil pouze čas otryskávání v sekundách a pomocí závislostí z obr.16 se převáděl na množství prášku v kilogramech.

VŠST Liberec	Abrazivita a eroze skla.	Katedra SK - FY	
Fakulta strojní		DP 227/74	str. 33

číslo měření	doba tryskání [sec]	úbytek [g]		
		skel.prášek	Al ₂ O ₃	SiC
1	12	13,7	12,2	12,0
2	24	22,39	26,0	23,2
3	36	29,5	38,0	36,5
4	48	39,95	48,0	47,0
5	60	52,16	57,7	59,0
6	72	45,6	68,4	70,0
7	84	64,59	77,6	80,0
8	96	68,51	86,5	90,0
9	108	84,53	94,1	102,0
10	120	95,05	110,0	110
průtok [g/sec]		0,8	0,92	0,94

Tab. VIII. Průtok prášků v závislosti na čase.

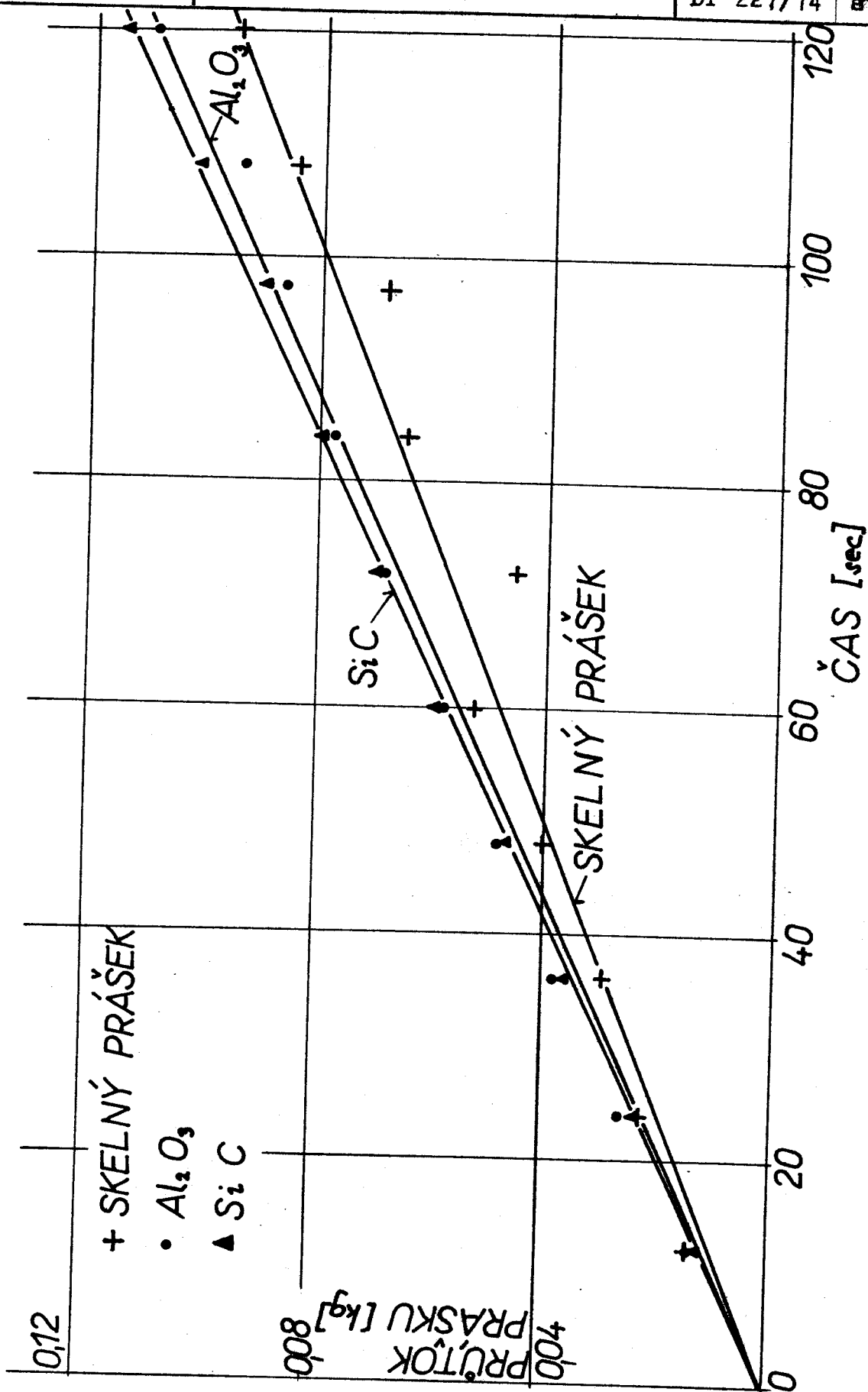
4.3. Vzorky

Pro vzorky zde byly použity dva druhy skla. Opět tažené tabulové sklo ČSN 70 9051 (dále již jen tabulové sklo) s měrnou hmotností $\rho = 2,50 \text{ g/cm}^3$, jako představitel tvrdších skel a olovnaté sklo (65,96% PbO, 30,91% SiO₂, 2,63% K₂O, 0,5% As₂O₃) s měrnou hmotností $\rho = 4,77 \text{ g/cm}^3$ jako představitel měkčích skel.

Vzorky tabulového skla měly opět rozměry 20 x 20 x 2,8 mm, olovnaté sklo bylo silné 8,4 mm. Zbylé dva rozměry byly pro každý vzorek různé, neboť vzorky byly získávány odlamováním z tabulek skla.

4.4. Průběh měření

Vzorky byly opět pečlivě očištěny, zváženy a upnuty



Obr. 16. Průtok prášků v závislosti na čase.

VŠST Liberec	Abrazivita a eroze skla.	Katedra SK - FY	
Fakulta strojní		DP 227/74	str. 35

do tryskače. Vzorky byly otryskány po dobu 12, 24, 36 ...
... 120 sec. Pro každou časovou expozici byly otryskány
vždy dva vzorky. Vzorky se znovu očistily a zvažily. Po-
stup při výpočtu váhových a objemových úbytků skla je
stejný jako v kap. 3, 4. Časové expozice tryskání byly
převedeny pomocí grafu z obr. 16 na příslušná množství
tryskacího prášku.

4.5. Výsledky měření

4.5.1. Tabulové sklo

Naměřené hodnoty eroze jsou v tabulce IX pro otrys-
kávání skelným práškem, v tabulce X pro Al_2O_3 a v tabulce
XI pro SiC.

Získané závislosti jsou na obr. 17, kde je váhový
úbytek, a na obr. 18, kde je objemový úbytek tabulového
skla.

4.5.2. Olovnaté sklo

Naměřené hodnoty eroze jsou v tabulce XII pro skelný
prášek, v tabulce XIII pro Al_2O_3 a v tabulce XIV pro SiC.

Získané závislosti jsou na obrázku 19 (váhový úbytek)
a na obr. 20 (objemový úbytek).

4.6. Zhodnocení měření

Při hodnocení eroze skla na množství tryskacího práš-
ku opět vidíme, že nejméně abrazivní je skelný prášek;
nejabrazivnější je SiC. Al_2O_3 se svými účinky blíží SiC.
Účinky skelného prášku na tabulové sklo byly takřka nulové.

číslo vzorku	doba tryskání [sec]	váhový úbytek [mg]	Ø váhový úbytek [mg]	Ø objem. úbytek [mm ³]
1	12	0	0	0
2		0		
3	24	0	0	0
4		0		
5	36	0	0	0
6		0		
7	48	0	0	0
8		0		
9	60	0	0	0
10		0		
11	72	0	0	0
12		0		
13	84	0	0	0
14		0		
15	96	0	0	0
16		0		
17	108	1	1	0,4
18		1		
19	120	1	1,5	0,6
20		2		

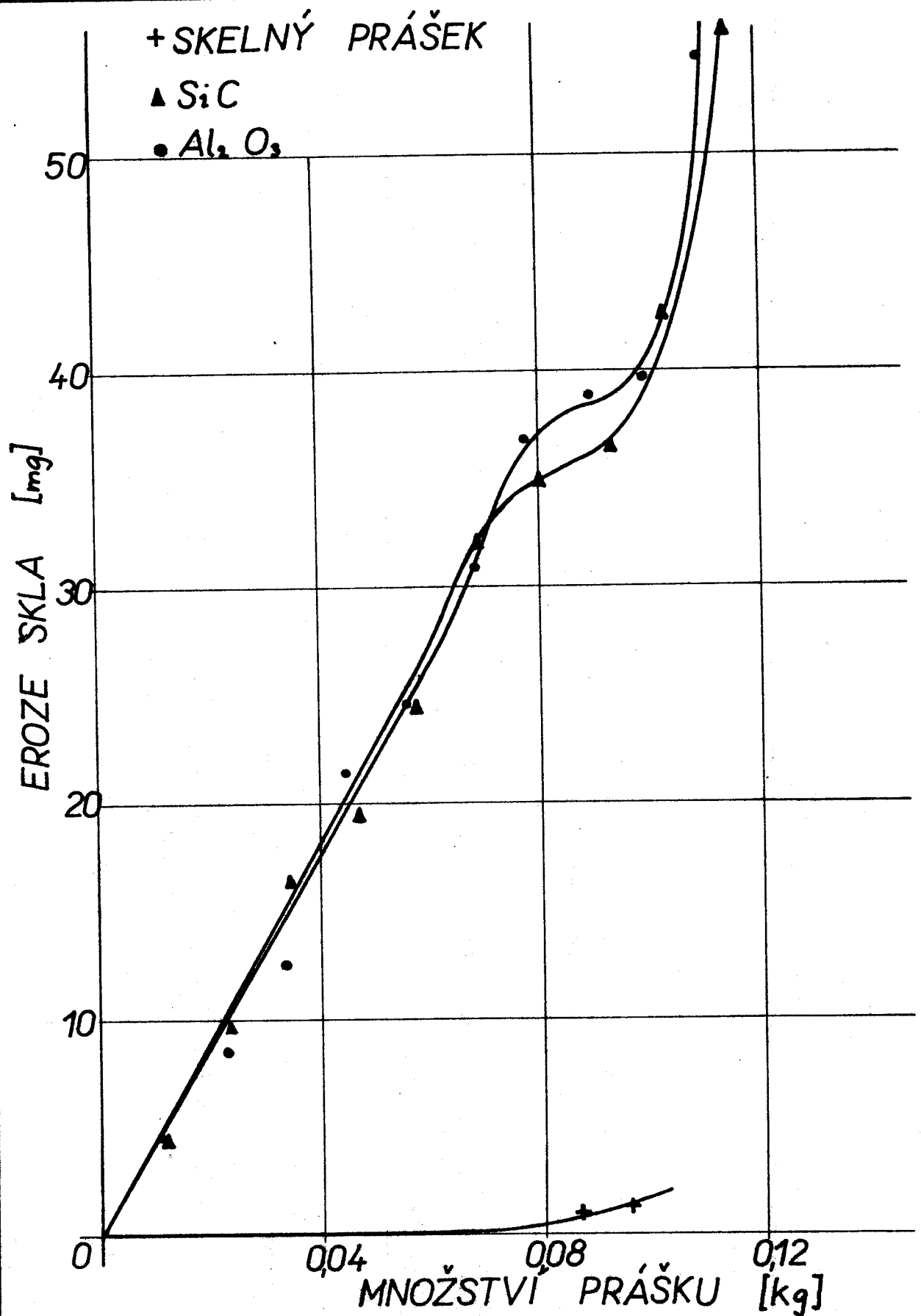
Tab. IX. Eroze tabulového skla v závislosti na množství skelného prášku (imp. úhel 90°).

číslo vzorku	doba tryskání [sec]	váhový úbytek [mg]	Ø váhový úbytek [mg]	Ø objem. úbytek [mm ³]
1	12	5,0	4,95	1,98
2		4,9		
3	24	8,4	8,55	3,42
4		8,7		
5	36	12,7	12,3	4,92
6		11,9		
7	48	22,9	21,55	8,62
8		20,2		
9	60	22,4	24,75	9,9
10		27,1		
11	72	28,7	30,95	12,4
12		33,2		
13	84	32,8	36,75	14,7
14		40,7		
15	96	38,3	38,75	15,5
16		39,2		
17	108	41,6	39,65	15,85
18		37,7		
19	120	51,8	54,55	21,8
20		57,3		

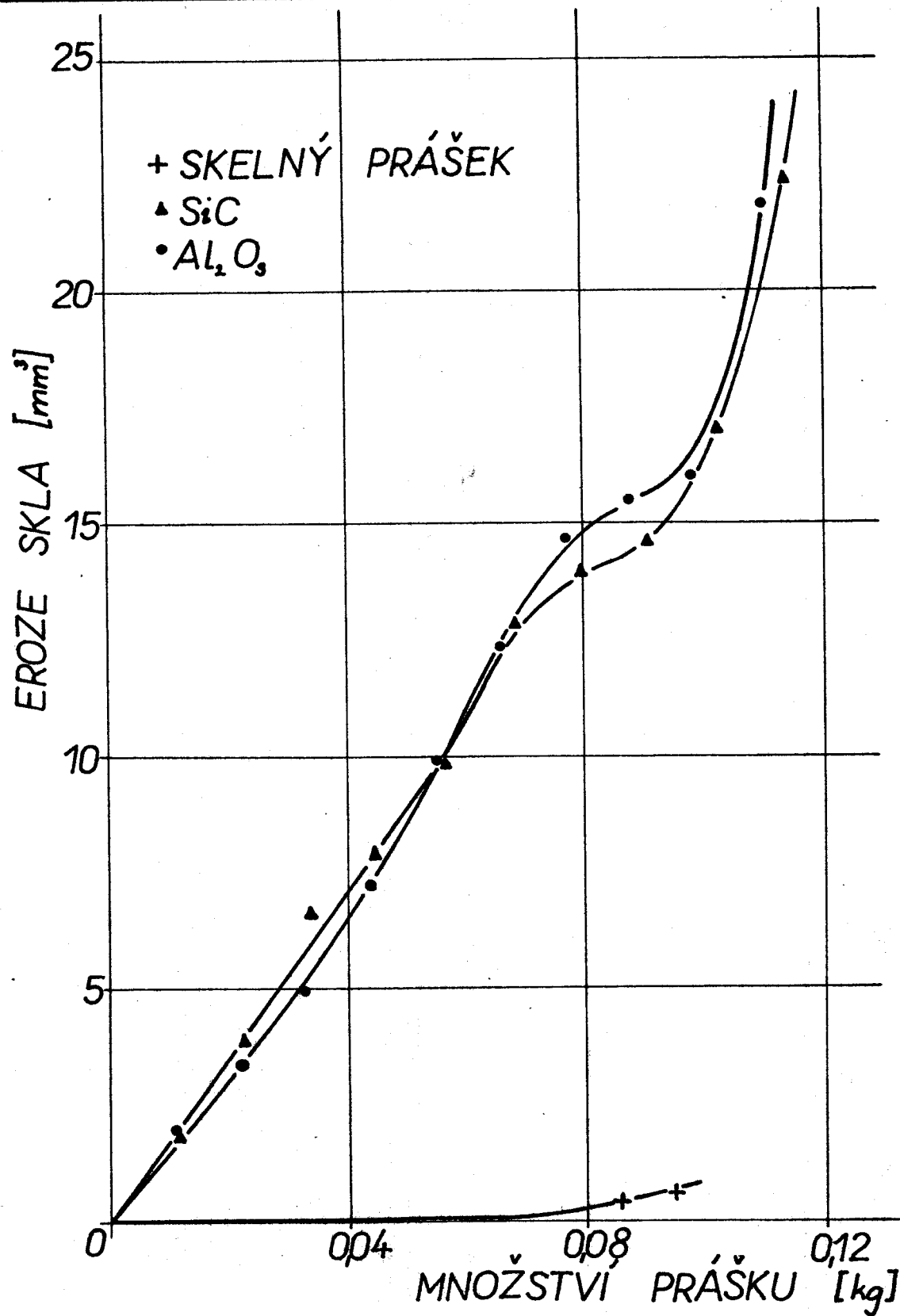
Tab. X. Eroze tabulového skla v závislosti na množství Al_2O_3 (imp. úhel 90°).

číslo vzorku	doba tryskání [sec]	váhový úbytek [mg]	Ø váhový úbytek [mg]	Ø objem. úbytek [mm ³]
1	12	5,4	4,7	1,88
2		4,0		
3	24	9,9	9,8	3,92
4		9,7		
5	36	15,8	16,5	6,61
6		17,2		
7	48	17,8	19,55	7,82
8		20,5		
9	60	22,6	24,6	9,84
10		26,6		
11	72	32,3	32,15	12,85
12		32,0		
13	84	37,1	34,95	13,98
14		32,8		
15	96	39,7	36,5	14,6
16		33,0		
17	108	48,5	42,65	17,1
18		46,6		
19	120	55,5	56,0	22,4
20		56,6		

Tab. XI. Eroze tabulového skla v závislosti na množství
SiC (imp. úhel 90°).



Obr. 17. Váhová eroze tabulového skla v závislosti na množství prášků.



Obr. 18. Objemová eroze tabulového skla v závislosti na množství prášků.

VŠST Liberec	Abrazivita a eroze skla.	Katedra SK - FY	
Fakulta strojní		DP 227/74	str. 41

číslo vzorku	doba tryskání [sec]	váhový úbytek [mg]	Ø váhový úbytek [mg]	Ø objem. úbytek [mm ³]
1	12	11,4	13,6	2,85
2		15,8		
3	24	21,3	21,45	4,5
4		21,6		
5	36	35,2	31,15	6,53
6		27,1		
7	48	29,3	36,15	7,59
8		43,0		
9	60	42,2	42,2	8,85
10		-		
11	72	41,7	47,55	9,77
12		53,4		
13	84	58,0	60,05	12,63
14		62,1		
15	96	67,6	59,8	12,56
16		52,0		
17	108	40,7	43,25	9,09
18		45,8		
19	120	58,0	57,75	12,1
20		57,5		

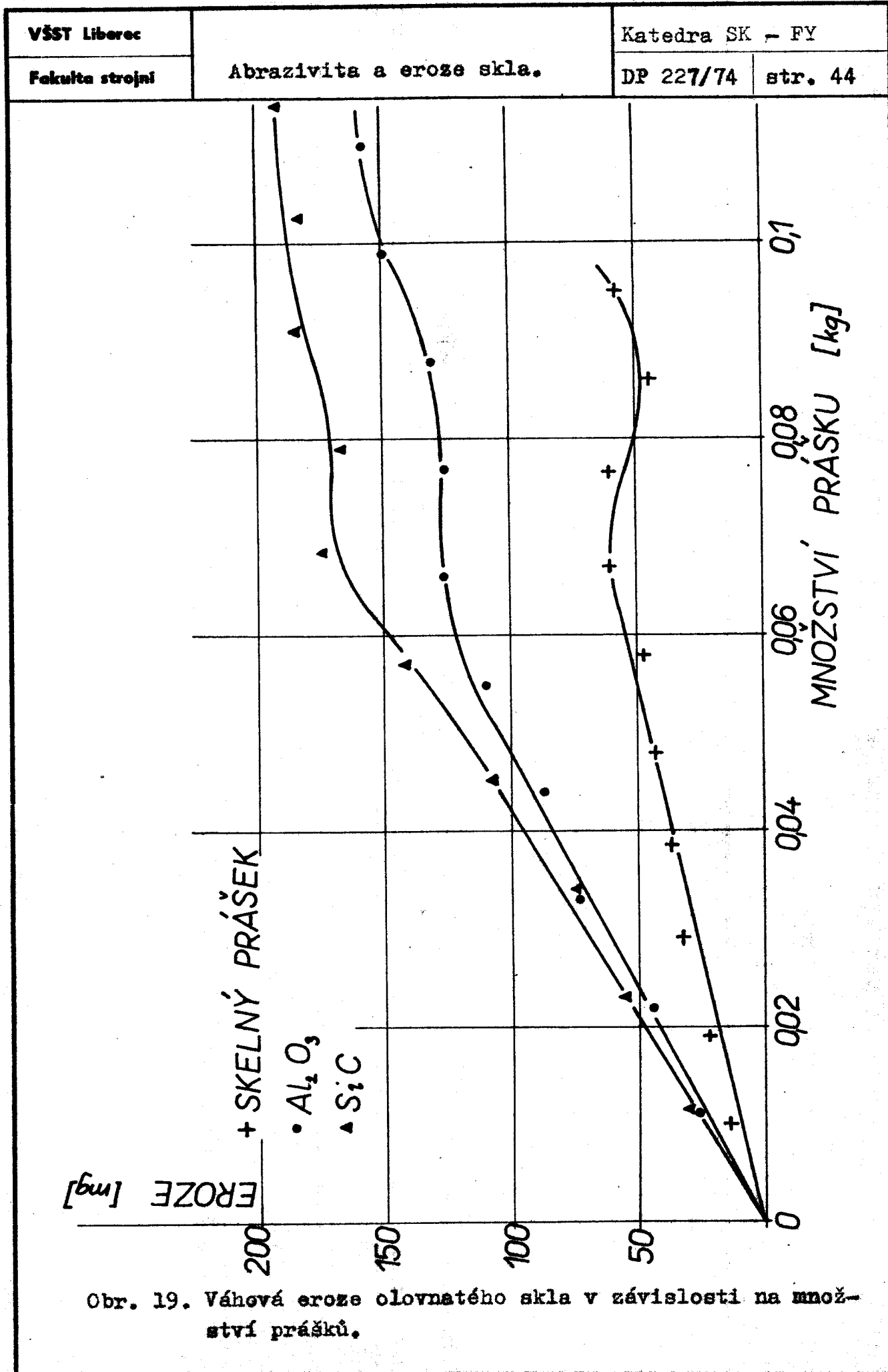
Tab. XII. Eroze olovnatého skla v závislosti na množství skelného prášku (imp. úhel 90°).

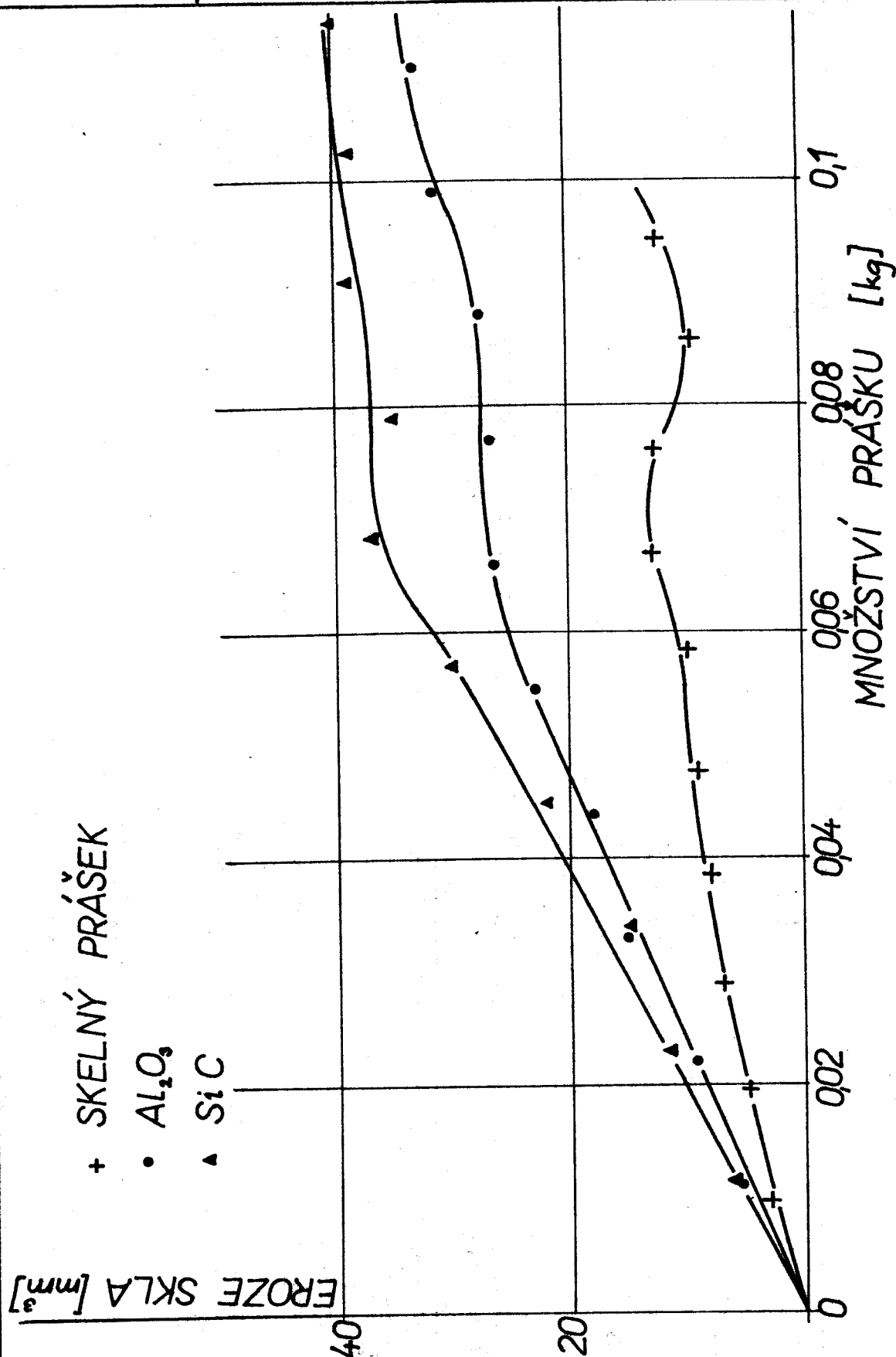
číslo vzorku	doba tryskání [sec]	váhový úbytek [mg]	Ø váhový úbytek [mg]	Ø objem. úbytek [mm ³]
1	12	25,5	26,3	5,51
2		27,1		
3	24	45,8	44,7	9,37
4		43,6		
5	36	78,5	72,6	15,25
6		66,7		
7	48	88,7	86,95	18,2
8		85,2		
9	60	107,3	109,7	23,0
10		92,1		
11	72	142,0	126,25	26,45
12		110,5		
13	84	136,9	126,6	26,51
14		116,3		
15	96	139,8	131,3	27,5
16		122,8		
17	108	136,2	149,5	31,3
18		162,8		
19	120	160,7	158,2	33,8
20		155,7		

Tab. XIII. Eroze olovnatého skla v závislosti na množství Al_2O_3 (imp. úhel 90°).

číslo vzorku	doba tryskání [sec]	váhový úbytek [mg]	Ø váhový úbytek [mg]	Ø objem. úbytek [mm ³]
1	12	26,85	28,8	6,04
2		37,75		
3	24	57,8	53,52	11,2
4		49,25		
5	36	75,5	70,37	14,73
6		65,25		
7	48	113,25	105,95	22,15
8		98,65		
9	60	175,4	141,15	29,6
10		106,9		
11	72	193,6	174,87	36,7
12		156,15		
13	84	211,05	167,0	35,0
14		122,95		
15	96	233,45	185,32	38,95
16		137,2		
17	108	204,1	182,9	38,3
18		161,7		
19	120	208,25	193,42	40,6
20		178,6		

Tab. XIV. Eroze olovnatého skla v závislosti na množství
SiC (imp. úhel 90°).





Obr. Objemová eroze olovnatého skla v závislosti na množství prášků.

VŠST Liberec		Katedra SK - FY	
Fakulta strojní	Abrazivita a eroze skla.	DP 227/74	str. 46

U prášku SiC a Al_2O_3 je průběh eroze v závislosti na množství prášku zpočátku lineární. Potom došlo k zmenšení eroze, s přibývajícím množstvím tryskacího prášku však úbytek skla prudce stoupal.

U měkčího olovnatého skla je eroze několikanásobně větší než u tabulového skla. Krátery jsou daleko hlubší a větší. Zpočátku úbytek skla opět lineárně stoupá se zvětšujícím se množstvím tryskacího prášku. Pak však dojde u všech tří prášků k zvlnění křivek z dosud přesně nevysvětlených příčin. Prohlubující se a zvětšující se kráter vyvolává složitější jevy, jako např. víření. Tím dojde k zmenšení účinku dopadajících částic, které již povrch vzorku atakovaly. Větší vliv na změnu linearitu křivky eroze v závislosti na množství prášku má jiná skutečnost. Částice atakující povrch vzorku dopadají na stěny kráteru už ne kolmo, ale pod různými úhly. V kap. 3 jsme poznali, že změna impaktního úhlu erozi ovlivňuje a že eroze skel je největší při imp. úhlu 90° . Proto se růst eroze zpomalil. Přesto jsou však účinky abrazivních prášků na olovnatém skle značné, zejména jedná-li se o prášky SiC a Al_2O_3 .

VŠST Liberec	Abrazivita a eroze skla.	Katedra SK - FY	
Fakulta strojní		DP 227/74	str. 47

5. Abrazivita skelného prášku na materiálech sklo a plexisklo.

Protože skelný prášek je nejlacinější a nejsnáze získatelný, z námi zkoušených abrazivních prášků, přikročili jsme ke zkoumání abrazivity tohoto brusiva na materiálech sklo a plexisklo.

Námi použitý skelný prášek má velmi různorodou zrnitost. Obsahuje částice v rozmezí několik μ m až 1 mm. Je na obr. 9.

5.1. Vzorky

Jako vzorků zde opět byly použity materiály plexisklo, tabulové sklo a olovnaté sklo (viz. kap. 3.2. a 4.3.)

5.2. Abrazivita skelného prášku na sklu a plexisklu v závislosti na imp. úhlu.

V této stati je použito výsledků z kap. 3.5.1. a 3.5.2. Průběh měření, použité zařízení, pracovní podmínky a výpočet eroze jsou rovněž shodné s kap. 3.

5.2.1. Výsledky měření

Naměřené hodnoty pro tabulové sklo jsou v tabulce II., hodnoty pro plexisklo jsou v tabulce V.

Otryskávání olovnatého skla nemohlo být provedeno, protože velká tloušťka tohoto skla nedovolila použít tryskač, který jsme měli k dispozici

Získané závislosti jsou na obr. 21, kde je vahová eroze materiálů v závislosti na imp. úhlu pro skel. prášek;

VŠST Liberec	Abrazivita a eroze skla.	Katedra SK - FY	
Fakulta strojní		DP 227/74	str.48

objemová eroze je na obr. 22.

Pro erozi tabulového skla bylo použito zvláštního měřítka. U křivky eroze plexiskla je opět provedena aproximace pro imp. úhel 37° (vzorek proražen).

5.2.2. Zhodnocení

Z grafů opět vidíme, že skelný prášek se pro otryskávání tvrdších materiálů příliš nehodí. Eroze pro tabulové sklo je pro všechny imp. úhly velmi malá, téměř stejná. Pouze pro impaktní úhel 90° nastává zvýšení eroze přibližně na dvojnásobek. Eroze plexiskla je mnohokrát větší. Největší eroze bylo dosaženo pro imp. úhly kolem 40° . Opracování plexiskla otryskáváním pro tyto imp. úhly je velmi produktivní, úběr plexiskla velmi intenzivní.

5.3. Abrazivita skelného prášku na skle a plexiskle v závislosti na množství prášku.

Měření se provádělo na vzorcích tabulového skla, olovnatého skla a plexiskla.

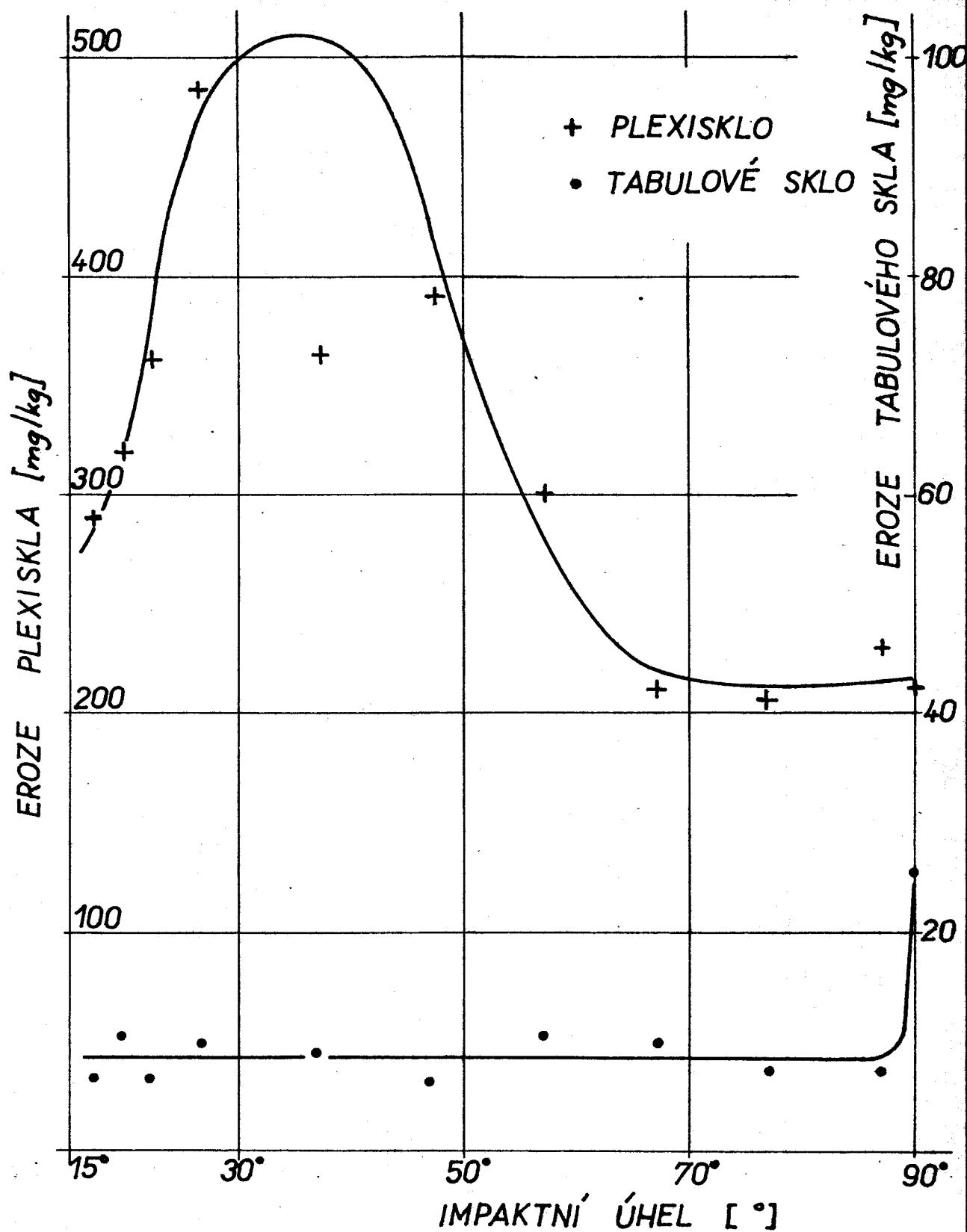
Pro první dva materiály je použito výsledků z předchozí kap. 4. Bylo však nutné provést ještě měření eroze plexiskla.

Tryskací zařízení, pracovní podmínky i postupy při výpočtu eroze jsou stejné jako v kap. 4.

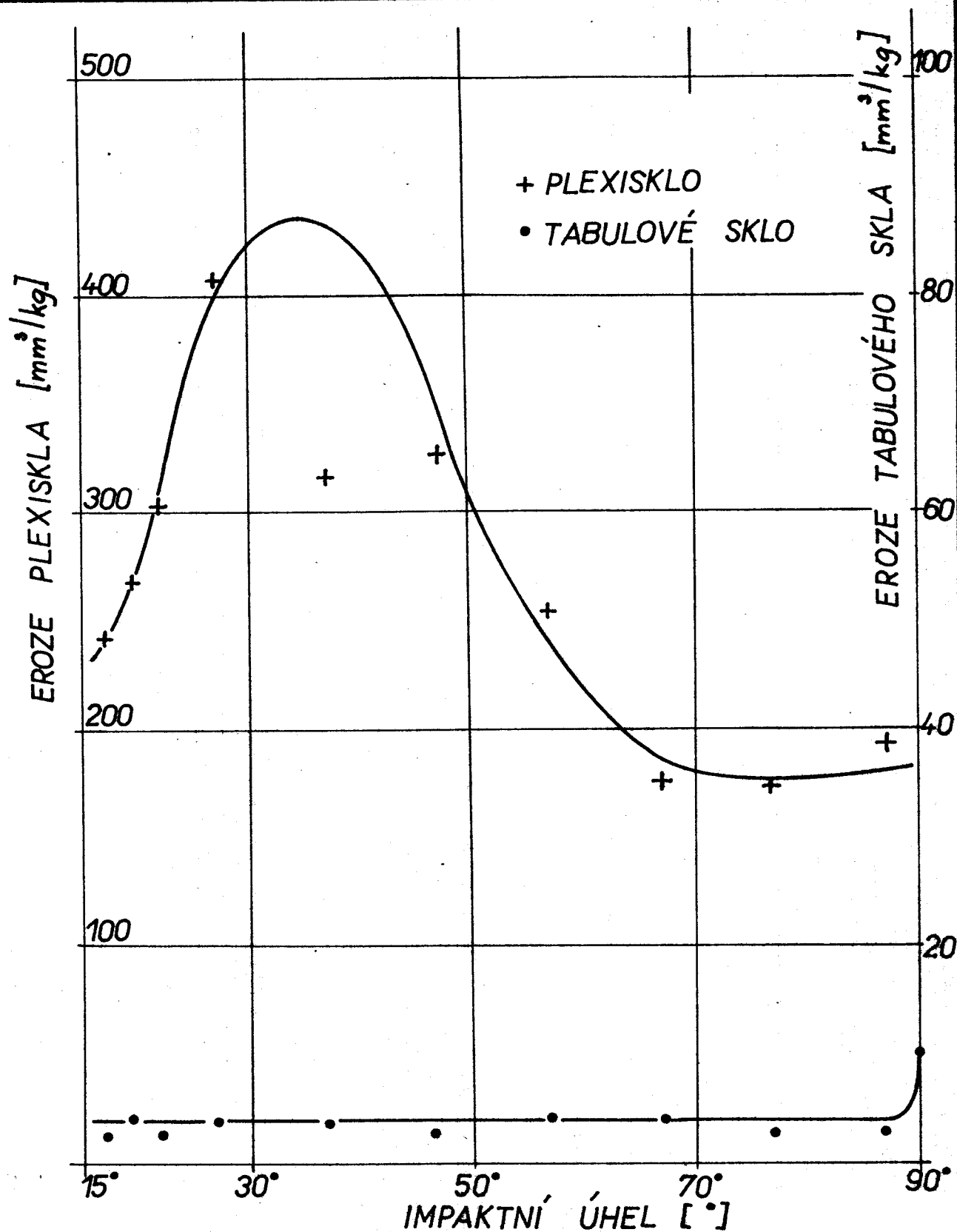
5.3.1. Výsledky měření.

Naměřené hodnoty eroze pro tabulové sklo jsou v tab. IX, pro olovnaté sklo v tab. XII a pro plexisklo v tab. XV.

Váhová eroze pro otryskávání skelným práškem je na obr. 23, objemová eroze na obr. 24.



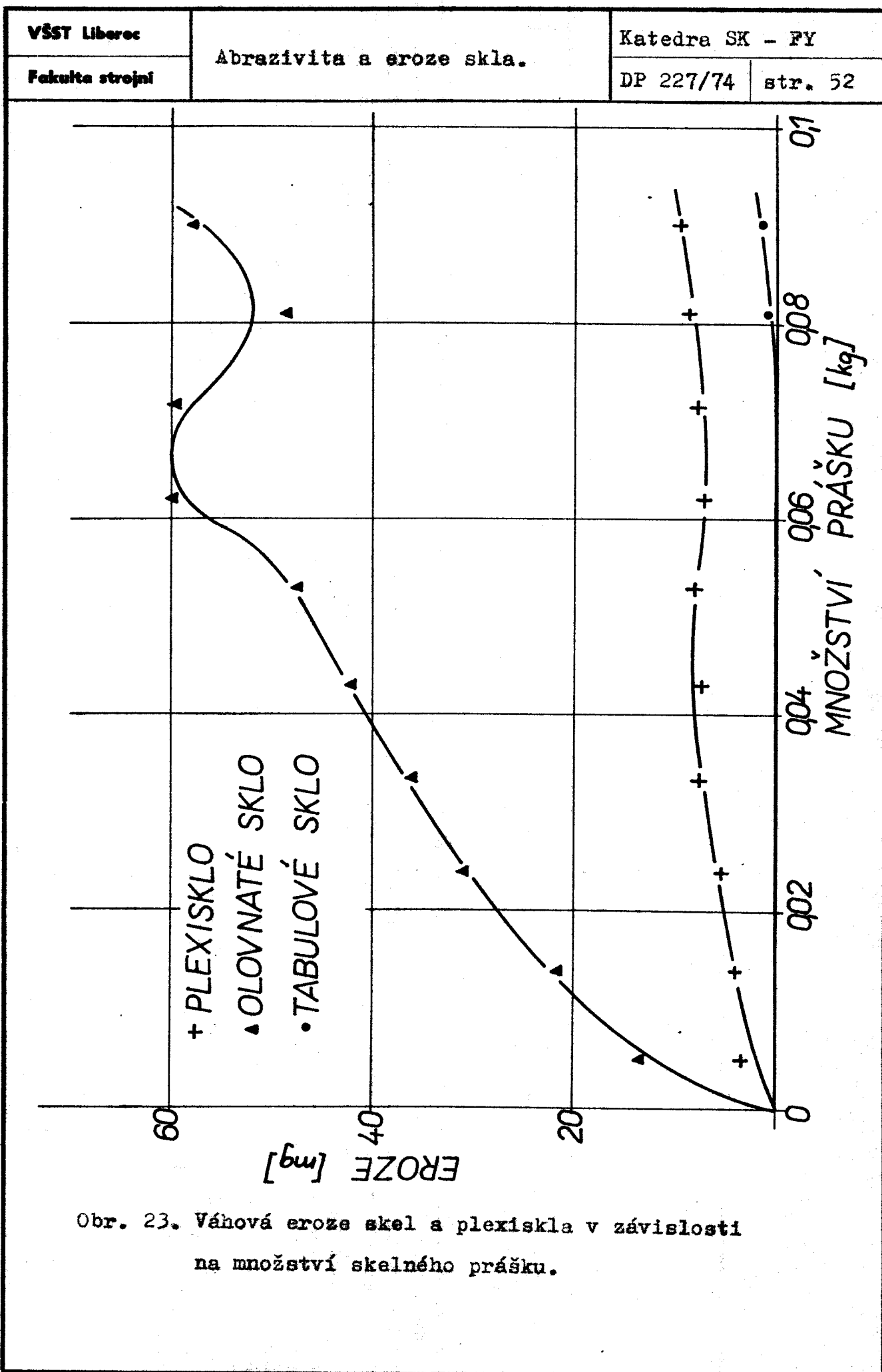
Obr. 21. Váňová eroze plexiskla a tabulového skla
v závislosti na imp. úhlu pro skelný prášek.



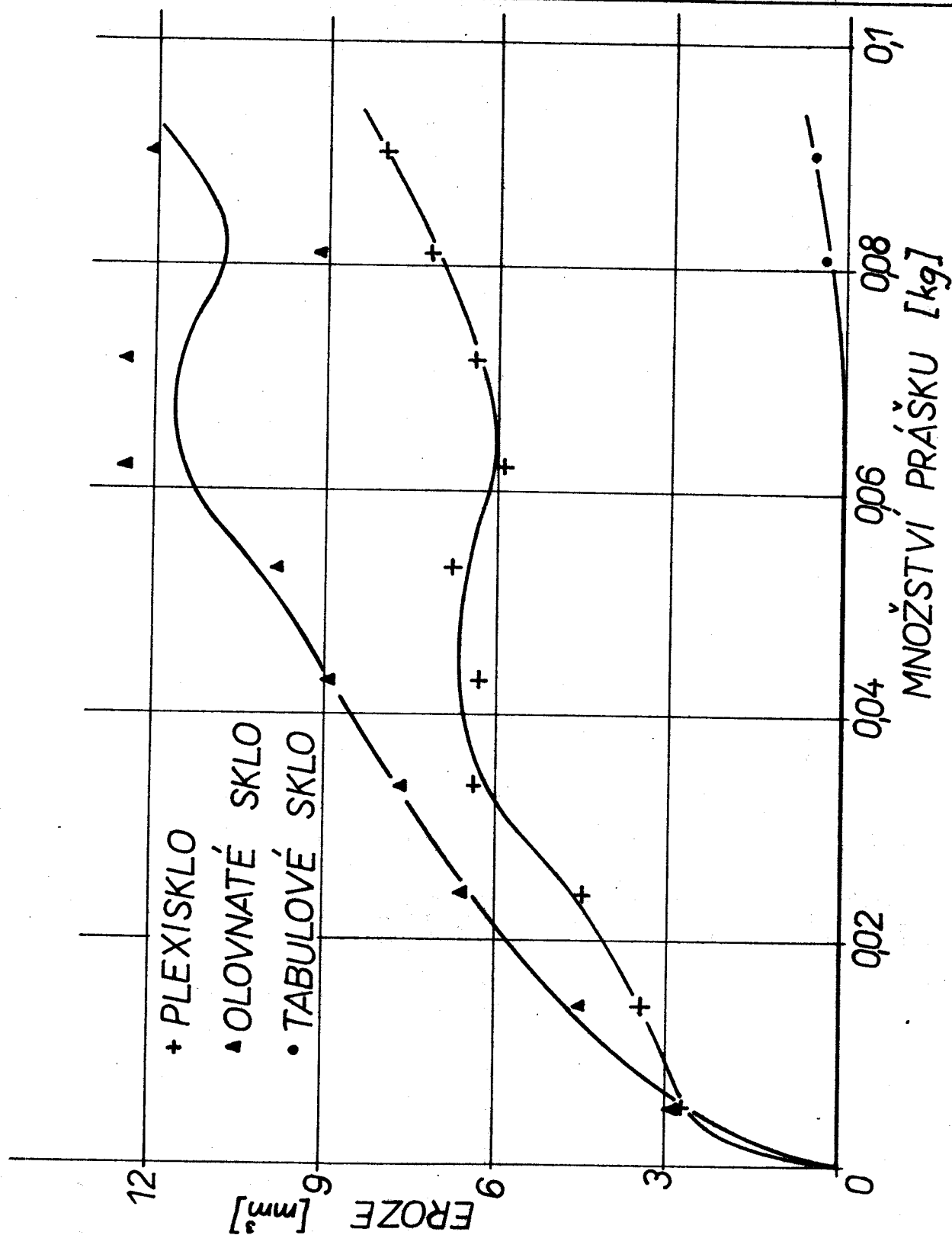
Obr. 22. Objemová eroze plexiskla a tabulového skla
v závislosti na imp. úhlu pro skelný prášek.

číslo vzorku	doba tryskání [sec]	váhový úbytek [mg]	Ø váhový úbytek [mg]	Ø objem. úbytek [mm ³]
1	12	3,2	3,3	2,77
2		3,4		
3	24	4,5	4,1	3,45
4		3,7		
5	36	5,1	5,3	4,46
6		5,5		
7	48	7,5	7,55	6,35
8		7,6		
9	60	-	7,4	6,22
10		7,4		
11	72	6,9	8,05	6,77
12		9,2		
13	84	6,5	7,0	5,88
14		7,5		
15	96	8,3	7,6	6,39
16		6,9		
17	108	8,3	8,55	7,18
18		8,8		
19	120	9,1	9,5	7,98
20		9,9		

Tab. XV. Eroze plexiskla v závislosti na množství
skelného prášku (imp. úhel 90°).



Obr. 23. Váhová eroze skel a plexiskla v závislosti na množství skelného prášku.



Obr. 24. Objemová eroze skel a plexiskla v závislosti na množství skelného prášku.

VŠST Liberec	Abrazivita a eroze skla.	Katedra SK - FY	
Fakulta strojní		DP 227/74	str. 54

5.3.2. Zhodnocení

Ze získaných křivek vidíme, že závislosti eroze na množství skelného prášku jsou složité. Úběr tabulového skla je velmi malý, největší úběr vykazovalo olovnaté sklo. U tohoto měkého skla, stejně jako u plexiskla, nastane počáteční rychlý úběr. S přibývajícím množstvím skelného prášku se křivky takřka linearizují. Potom však nastává zvlnění křivek. Příčina tohoto zvlnění je opět prohlubující se a zvětšující se kráter. Zde dochází k šikmému dopadu částic skelného prášku na stěně kráteru, víření, atd. Jistý vliv zde má i nestejnoměrná zrnitost skelného prášku.

Při práci jsme použili dvakrát za sebou prášku, kterým již bylo otryskáváno. Zjistili jsme, že abrazivita již použitého prášku takřka nemění. Při dopadu částice na atakovaný povrch se sice obrousí ostré hrany, ale částice nárazem praskne, a tímto dělením se vytvoří hrany nové. Při následujícím použití se toto opakuje. Abrazivita skelného prášku poklesne až po třech až čtyřech použitích, kdy jsou částice již velmi malé a zaoblené. Toto vše je ve shodě se závěry z práce /5/.

VŠST Liberec		Katedra SK - FY	
Fakulta strojní	Abrázivita a eroze skla.	DP 227/74	str. 55

6. Opotřebení skleněných tvarovaných trubíc při průchodu prášku SiC.

Skleněné trubice nejrůznějších tvarů jsou vhodné pro pneumatický transport. Žádají se pro možnost pozorování průtoku prášku.

6.1. Trubice

Pro měření bylo použito trubíc různých tvarů. Jsou znázorněny na obr. 25 a obr. 26. Vnější průměr trubíc se pohybuje v rozmezí 6,8 - 7,2 mm, vnitřní průměr od 4,2 do 5 mm. Pro přehlednost byly trubice podle svého charakteristického tvaru označeny písmeny velké abecedy (U-kus, T-kus, atd.). V dalším textu jsou označovány již jen takto. Trubice jsou z n. p. Železnobrodské sklo, závod Držkov.

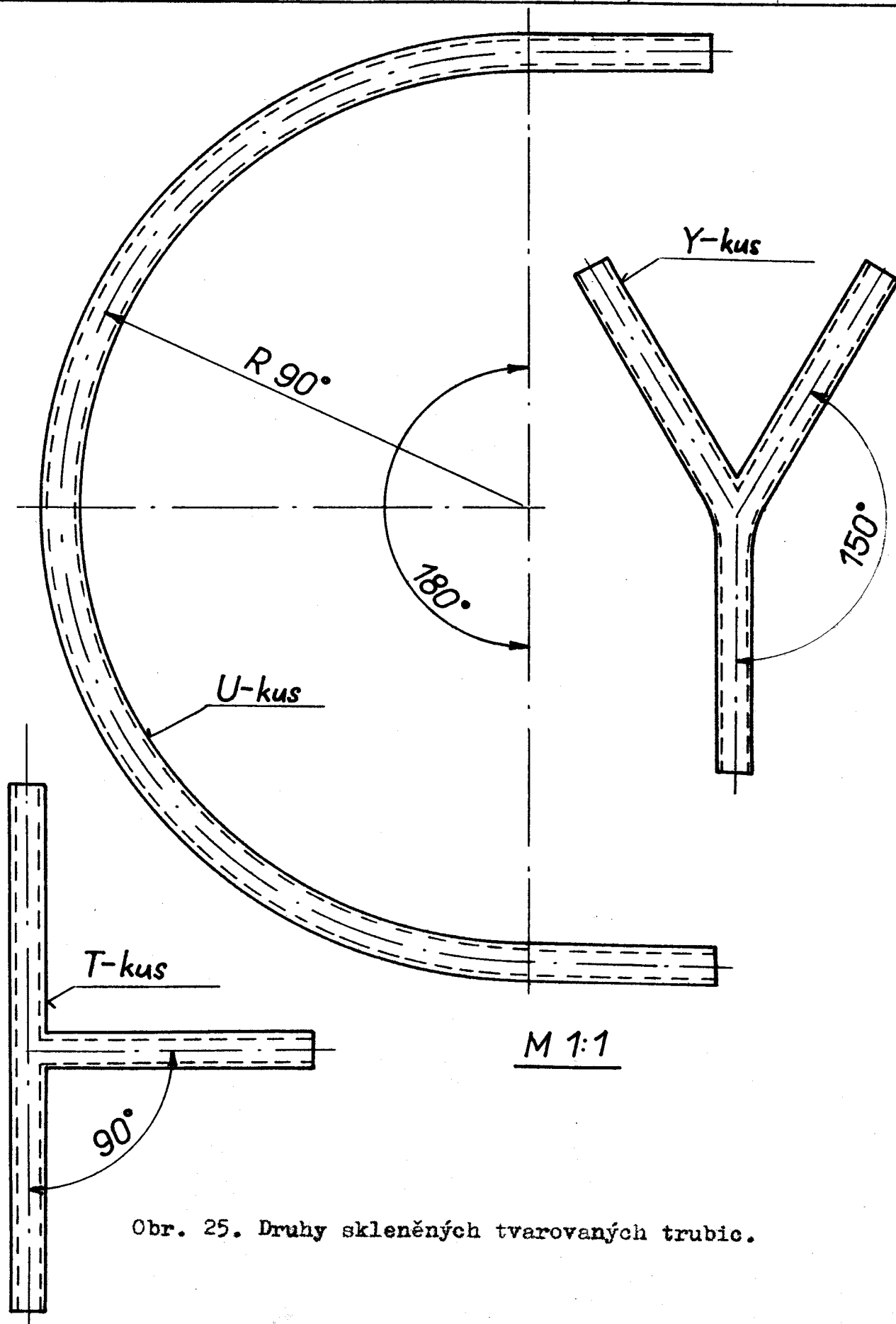
6.2. Pracovní podmínky

Pro měření byl zvolen SiC, nejabrazivnější z námi zkoumaných prášků. Tlak nosného média je opět 1 atp.

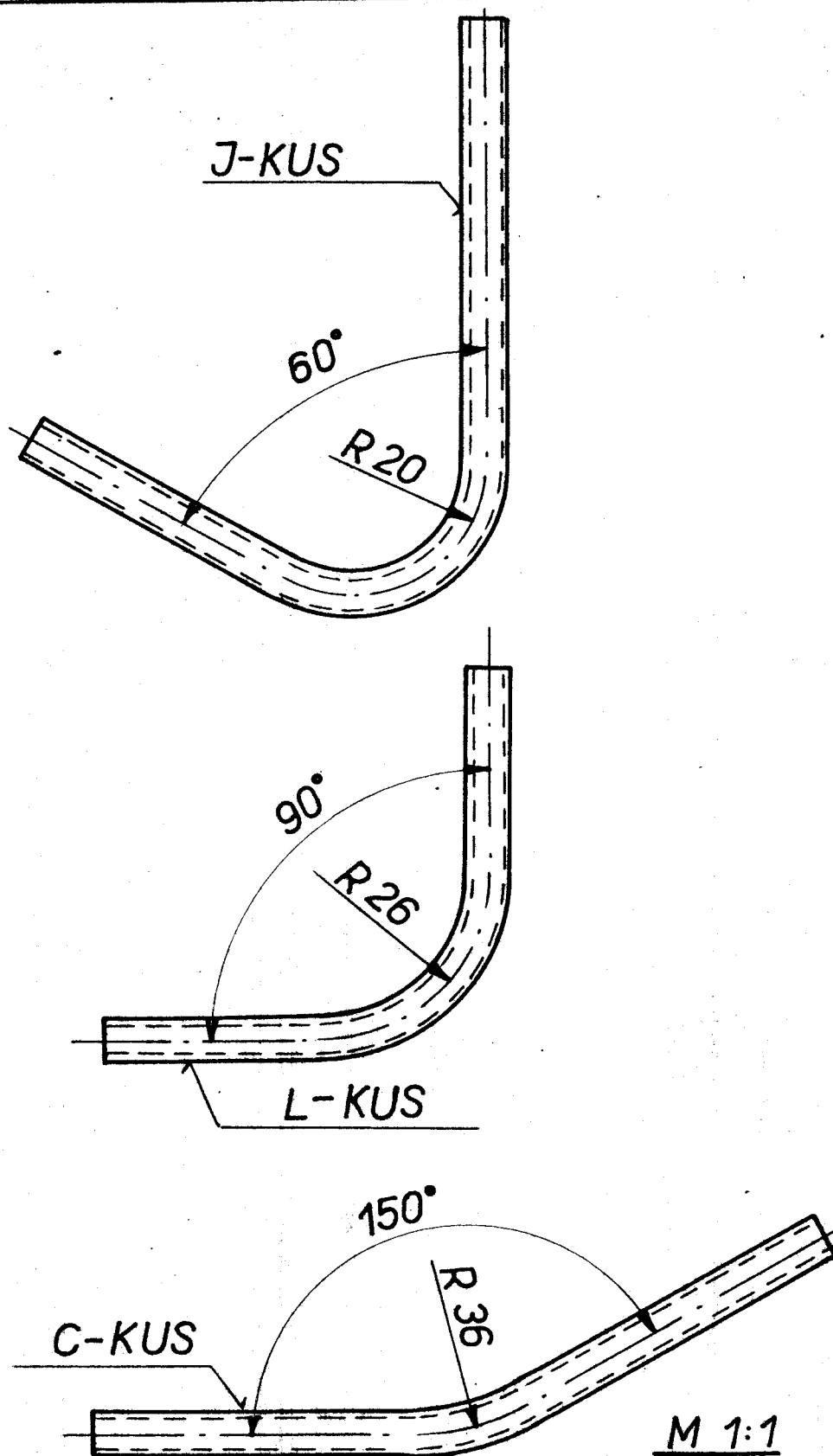
Schema zapojení je na obr. 27. Stlačený vzduch vstupuje do směšovací nádoby, unáší sebou prášek SiC a vstupuje do trubíc. Trubice jsou v horizontální poloze a mezi sebou jsou pospojovány pryžovými hadicemi. Po projití všemi trubicemi vstupuje prášek do tryskače (obr. 5), odkud je odsáván vysavačem.

6.3. Průběh měření

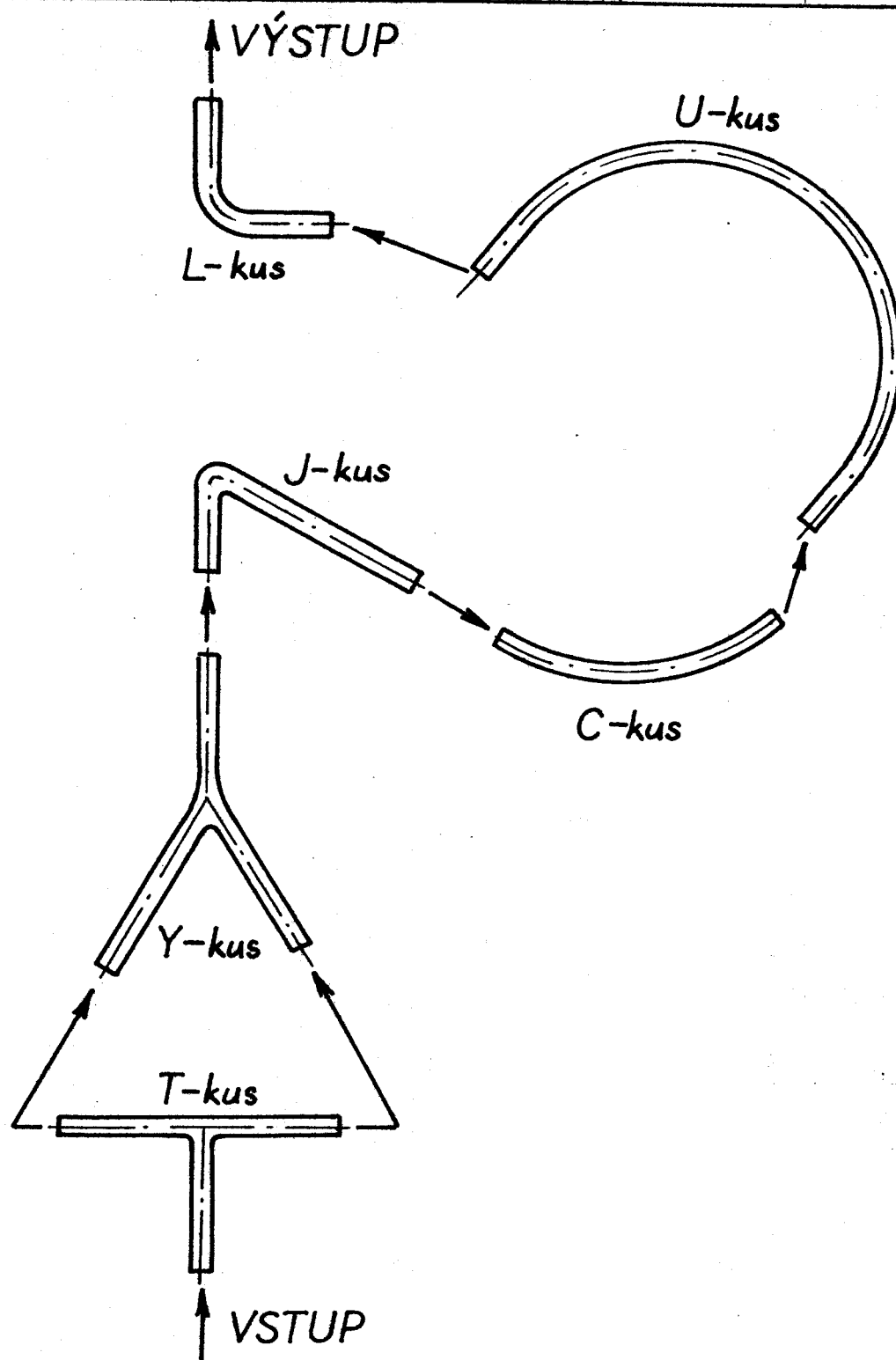
Před měřením se trubice zvážily na analytických laboratorních váhách s přesností 10^{-2} g. Nemohlo se použít přesnějších poloautomatických vah pro velké rozměry trubíc. Přesnost vážení 10^{-2} g není zde, jak se v průběhu měření ukázalo,



Obr. 25. Druhy skleněných tvarovaných trubíc.



Obr. 26. Druhy skleněných tvarovaných trubic.



Obr. 27. Schema zapojení skleněných tvarovaných trubíc.

VŠST Liberec	Abrazivita a eroze skla.	Katedra SK - FY	
Fakulta strojní		DP 227/74	str. 59

dostačující.

Po zvážení se trubice zapojily dle schematu na obr. 27. Po otryskání, které trvalo čtyři minuty, se vzorky pečlivě očistily a znovu zvážily. Úbytek se zapsal do tabulek a znovu se čtyři minuty otryskávalo. Toto vše se opakovalo až do celkové časové expozice šedesát minut. V závěru měření, kdy se zjistilo, že úbytky jsou malé, se trubice zvážily po osmi minutách. Čas tryskání v minutách se pomocí grafu z obr. 16 převáděl na množství tryskacího prášku SiC v kg.

Každá trubice má jinou délku, a při takřka stejných průměrech jinou váhu. Abychom mohli porovnávat výsledky měření, nanášeli jsme do grafu tzv. poměrnou erozi. $[mg/g]$, což je úbytek materiálu v miligramech, připadající na gram skleněné trubice. Každý úbytek materiálu jsme tedy vydělili původní váhou trubice.

Při měření jsme též průběžně pozorovali topografii opotřebení na jednotlivých kusech.

6.4. Výsledky měření

Naměřené hodnoty jsou v tab. XVI, kde V je původní váha trubice, D vnější průměr, d vnitřní průměr trubice. Získané závislosti jsou na obr. 28. Při pozorování opotřebení se u L-kusu a C-kusu neobjevily v průběhu měření žádné výrazné stopy opotřebení, úběr byl rovnoměrný po celé délce kusů. U T-kusu po dvouminutovém otryskávání objevila v místě dopadu oválná stopa, která se s přibývajícím množstvím prášku zvětšovala. Po dvanácti minutách (tj. po průchodu cca 0,7 kg SiC) se kráter začal prohlubovat. U Y-kusu byly po dvanácti minutách tryskání patrné stopy opotřebení, v místech, kde se proudy

VŠST Liberec		Abrazivita a eroze skla.										Katedra SK - FY	
Fakulta strojní												DP 227/74	str. 60
Druh trubice V [g] Ø D/Ø d [mm]	4	8	12	16	20	24	28	32	40	48	60	čas [min]	
	10	10	20	20	30	30	35	35	40	40	50	úbytek [mg] Poměrná eroze [mg/g]	
U-kus 17,70 7,2/5,0	0,565	0,565	1,13	1,13	1,7	1,7	1,98	1,98	2,26	2,26	2,83		
	-10	-10	-10	10	10	20	20	20	40	40	50	úbytek	
T-kus 7,57 6,8/4,2	-1,3	-1,3	-1,3	1,3	1,3	2,64	2,64	2,64	5,28	5,28	6,6	poměr. eroze	
	10	10	10	10	20	20	20	20	30	30	30	úbytek	
Y-kus 7,68 7,0/4,5	1,3	1,3	1,3	1,3	2,6	2,6	2,6	2,6	3,9	3,9	3,9	poměr. eroze	
	20	30	30	30	50	50	50	50	50	50	70	úbytek	
J-kus 8,20 6,9/4,5	2,44	3,66	3,66	3,66	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	8,53	poměr. eroze	
	10	30	30	40	40	50	60	60	70	80	100	úbytek	
L-kus 5,55 6,8/4,2	1,8	5,4	5,4	7,2	7,2	9,0	10,8	10,8	12,6	14,4	18,0	poměr. eroze	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10	úbytek	
C-kus 6,45 7,2/4,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,55	1,55	poměr. eroze	

Tab. XVI. Eroze skleněných tvarovaných trubice při průchodu prášku SiC.

Tab. XVI. Eroze skleněných tvarovaných trubíc při průchodu prášku SiC.

VŠST Liberec		Katedra SK - FY	
Fakulta strojní	Abrazivita a eroze skla.	DP 227/74	str. 61

prášku sbíhaly. Po dvacetičtyřech minutách (1,4 kg SiC) byla stopa opotřebení patrná kolem celého obvodu trubice, v místě dopadu částic. U C-kusu se po dvacetičtyřech minutách objevila podélná šroubovitá rýha, která se s přibývajícím množstvím prohlubovala. U J-kusu se po dvacetičtyřech minutách objevily na vnější stěně tři stopy oválného tvaru jdoucí za sebou. Jiné stopy opotřebení nebyly v průběhu měření pozorovány.

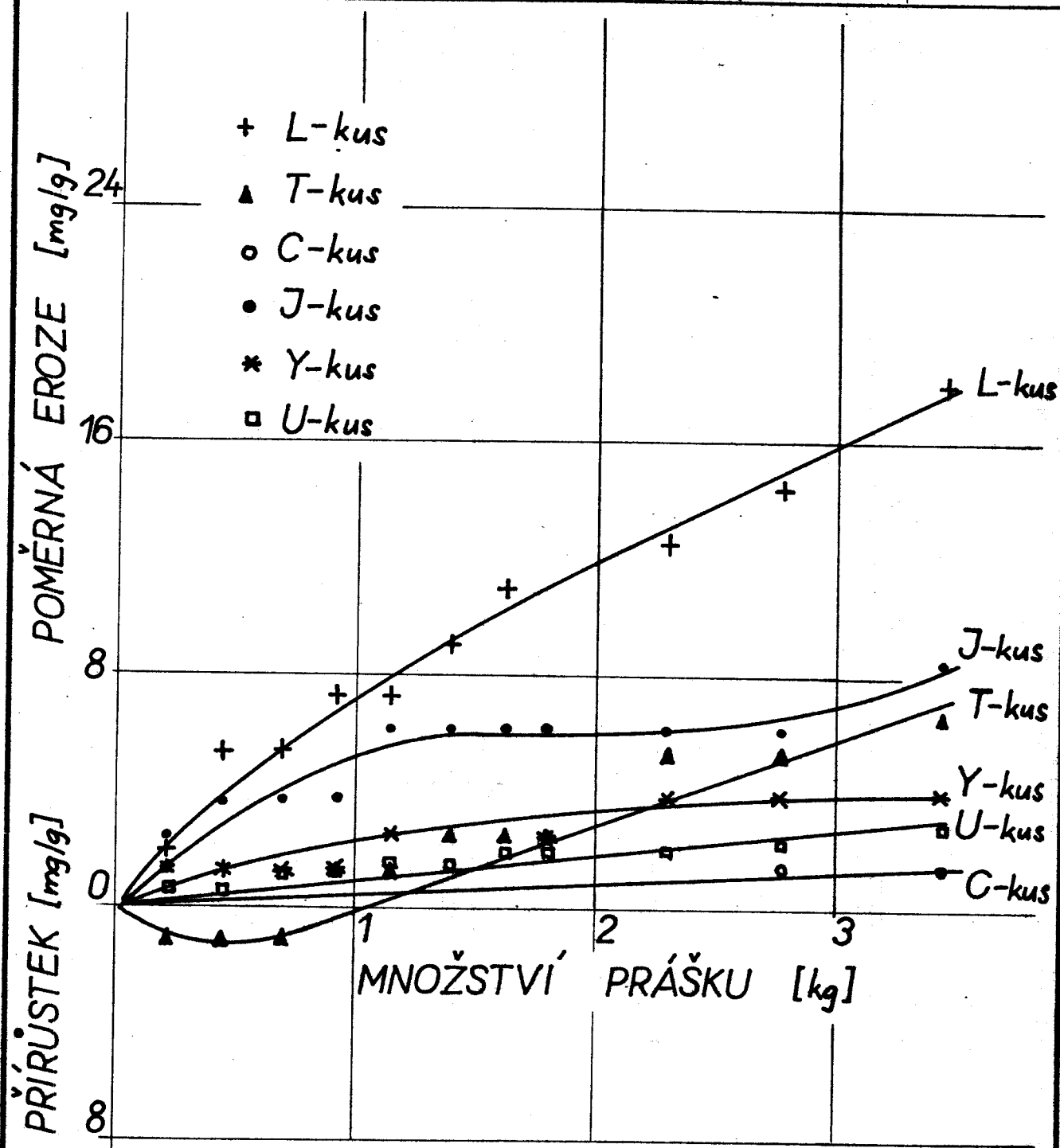
6.5. Zhodnocení měření

Největší opotřebení vykazovaly C-kus a J-kus, trubice s nejprudší změnou směru průtoku. U L-kusu prášek působí po celé délce trubice, proto je opotřebení větší. U J-kusu proud částic narazí na stěnu, je odkloněn a nastává víření. Je zajímavé, že největší úběr vykazoval, ten kus, který byl zařazen až na konci zapojení.; tedy tam, kde již procházel prášek několikrát použitý.

U T-kusu, kde jsme očekávali největší úběr, došlo z počátku dokonce k mírnému přírůstku váhy. Úběr je intenzivní jen v místě dopadu, pak se proud rozvíří a není již příliš nebezpečný.

U ostatních kusů je závislost na množství i prášku takřka lineární a menší.

Ukázalo se, že možnost použití skleněných trubíc tady je, ovšem s několika výhradami. Při přímém směru průtoku je opotřebení minimální a tedy doba použití dlouhá. Dokladem toho je C-kus, který se přímé trubici blíží. Ovšem prudké změny směru průtoku s malým poloměrem zakřivení erozi prudce zvýší. Na exponovaných místech může dojít až k proražení trubice. Proto je v těchto případech nutná kontrola a možnost vymění-



Obr. 28. Poměrná eroze skleněných tvarovaných trubice
v závislosti na množství prášku SiC.

VŠST Liberec	Abrazivita a eroze skla.	Katedra SK - FY	
Fakulta strojní		DP 227/74	str. 63

telnosti prvků. V místech, kde je náhlá změna průtoku nutná, je výhodnější použít pryžových hadic s minimálním opotřebením.

7. Zhodnocení výsledků celé práce

Ze získaných grafů vidíme, že eroze materiálů je závislá na impaktním úhlu. Závislost úběru materiálu na imp. úhlu umožňuje rozlišit látky tažné (duktilní) a křehké (fragilní). V našem případě křivku křehkého materiálu vykazovalo tabulové a olovnaté sklo, křivku tažného materiálu plexisklo.

Prášky SiC a Al_2O_3 jsou vhodné pro opracování námi zkoumaných materiálů. Zejména SiC vykazoval vysokou abrazivitu. Skelný prášek se hodí pro otryskávání měkkých materiálů. Velmi vysoké eroze bylo tímto práškem dosaženo na plexisklu při otryskávání pod impaktními úhly kolem 40° . Tento interval úhlů by bylo v budoucnu vhodné prozkoumat podrobněji a nalézt ten impaktní úhel, pod kterým by bylo otryskávání plexiskla nejintenzivnější. Pro otryskávání materiálů stejného stupně tvrdosti, jako je skelný prášek, a materiálů tvrdších, se tento prášek nehodí.

Použití skleněných trubíc při průchodu abrazivních prášků je možné, zejména těch, které se tvarem blíží přímým trubícím. Náhlá změna směru průtoku s malým poloměrem křivosti je nebezpečná, na exponovaném místě může brzy dojít k proražení trubice. Na místech, kde pneumatický transport prudkou změnu směru toku vyžaduje, je vhodné použít pryžových hadic.

VŠST Liberec	Abrazivita a eroze skla.	Katedra SK - FY	
Fakulta strojní		DP 227/74	str. 65

Z á v ě r

Tato práce je přímým pokračováním řady prací, které se zabývaly podobnou tematikou. Řešený problém je rovněž součástí vědeckovýzkumného úkolu II4/8 vedeného RNDr. L. Sodomkou, CSc.

Uvedené tabulky a výsledky ukazují, že měření bylo časově velmi náročné.

Z křivek eroze je možné získat měrnou energii eroze E_e /1/, potřebnou k úběru jednotky hmoty. Tato měrná energie eroze se po prozkoumání mnoha materiálů může stát určující materiálovou konstantou, jako je dnes pevnost, tvrdost, atd.

V další práci se bude třeba zaměřit na další závislosti a vlivy, jako je např. tlak nosného plynu, velikost zrn, další druhy prášků atd.

Děkuji RNDr. Lubomíru Sodomkovi, CSc za inspirativní rady, návrhy a připomínky, RNDr. Wágnerovi za podporu a zájem a Aleši Kleprlíkovi za všestrannou pomoc při měření a fotografování prášků.

Milan Trápek

VŠST Liberec		Katedra SK - FY	
Fakulta strojní	Abrazivita a eroze skla.	DP 227/74	str. 66
Literatura:			
/1/ Sodomka, L.	:Eroze materiálů proudem částic (připraveno do tisku)		
/2/ ČSN 01 5050	:Opotřebení materiálu		
/3/ Jetleb, P.	:studium opracování materiálů tryskáním prášků, DP 1971, VŠST Liberec		
/4/ Plný, V.	:Abrazivita prášku SiC..., DP 1973, VŠST Liberec		
/5/ Brunner, J.	:Abrazivita prášku korundu při ot- ryskávání, DP 1973, VŠST Liberec		
/ 6/ Bönisch, D.	:Eroze důležitých strojních mate- riálů tryskáním prášku SiC, DP 1974, VŠST Liberec		
/7/ Jančo, P.	:Eroze důležitých strojních mate- riálů tryskáním prášku Al ₂ O ₃ , VŠST Liberec, DP 1974		
/8/ Plný, V.; Brunner, J.	:Kapalinový tryskač, studentská vědecká práce, VŠST Liberec, 1973		