Vysoká škola: strojní a textilní v Liberci

Katedra: obrábění a ekonomiky

Fakulta: strojní

Školní rok: 1973/74

DIPLOMOVÝ ÚKOL

pro Dietera Böische

obor strojírenská technologie

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

Název tématu: Eroze důležitých strojních materiálů tryskáním prášku karbidu křemíku

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte otrýskávání vzorků práškem karbidu křemíku :

   a/ plastických materiálů
   b/ kovových materiálů
   c/ skla

2. Vyzkoušejte technologii přípravy a připevňování vzorků
3. Proveďte měření úbytku hmoty v závislosti na impaktním úhlu
4. Proveďte konstrukci zařízení pro rázové otrýskávání materiálu kapalinami nebo pevnými látkami s rychlostmi kolem 1000 m/s .

V 3/1974 S

Rozsah grafických laboratorních prací: 20 stran

Rozsah průvodní zprávy: 30 stran

Seznam odborné literatury:

Sodomka,L. : Eroze materiálu proudem částic. Text VŠST Liberec 1973

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.

ČSN 01 50 50 : Opotřebení materiálů

Vedoucí diplomové práce: RNDr Lubomír Sodomka CSc

Konsultanti: RNDr Lubomír Sodomka CSc

Datum zahájení diplomové práce: 15.10.1973

Datum odevzdání diplomové práce: 31. 5.1974

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ LIBEREC fakulta strojního inženýrství 102

Vedoucí katedry

Děkan

v Liberci dne 15.10. 19 73

O b s a h

	Úvod	3
1.	Charakteristické veličiny	5
1.1.	Opotřebení	5
1.2.	Eroze	5
1.3.	Impaktní úhel	6
2.	Řešená problematika	8
3.	Vlastnosti prášku karbidu křemíku	9
4.	Tryskací zařízení	11
4.1.	Popis funkce tryskacího zařízení	12
4.2.	Části tryskacího zařízení	12
4.2.1.	Směšovací nádobka	15
4.2.2.	Tryskač	16
4.2.3.	Ustavovací přípravky	16
4.2.4.	Trysky	17
4.3.	Návrhy pro zlepšení tryskacího zařízení .	18
5.	Technologie přípravy a připevňování vzorků	20
5.1.	Volba vzorků různých materiálů	20
5.2.	Rozměry a povrchová úprava vzorků	22
5.3.	Volba vhodného lepidla	23
6.	Otryskávání vzorků práškem karbidu křemíku	24
6.1.	Podmínky při tryskání	24
6.2.	Postup při tryskání	24
6.3.	Úbytek při tryskání	26
7.	Měření úbytku hmoty v závislosti na impaktním úhlu	27

7.1. Výsledky měření 27

7.2. Hmotový úbytek v závislosti na impaktním úhlu 28

7.2.1. Hmotový úbytek kovových materiálů 28

7.2.2. Hmotový úbytek plastických materiálů . . . 36

7.2.3. Hmotový úbytek tabulového skla 36

7.3. Objemový úbytek v závislosti na impaktním úhlu 39

7.4. Zhodnocení výsledků měření 39

8. Konstrukce zařízení pro rázové otryskávání 43

8.1. Hertzova teorie rázu 43

8.2. Otryskávání kapalinami nebo pevnými látkami 47

8.3. Princip činnosti zařízení 50

8.4. Konstrukční řešení zařízení 50

8.5. Konstrukční řešení reduktoru 51

8.6. Zhodnocení navržené konstrukce 53

9. Zhodnocení a závěr 54

Literatura 55

Přílohy

Příloha 1 - Výkresová dokumentace zařízení pro rázové otryskávání

Příloha 2 - Výrobní výkres tryskače

Autorské právo se řídí směrnicemi MŠK pro ... j. 31 727/62-III/2 ... Věstník MŠK XVIII, ... autorského zákona č. 115/53 Sb.

ÚVOD

V technické praxi se stále častěji setkáváme s technologií opracování materiálů, které užívají částic abrazivních materiálů různé zrnitosti. Mezi tyto technologie patří eroze, ultrazvukové opracování, abraze a broušení, leštění a lapování.

Všechny uvedené technologie, ať již je jejich definice jakákoliv, mají společné to, že při nich dochází k lokálnímu rozrušování materiálů a jedině za těchto podmínek jsou řiditelné.

Z uvedených technologií je fyzikálně nejpřístupnější jak k experimentování, tak i k teoretickému a analytickému zpracování eroze, která se podrobně začala studovat od roku 1960.

Eroze je technologie opracování materiálů, při které proud částic nesených obvykle vzduchem nebo jiným prostředím, naráží na povrch opracovávaného materiálu rychlostí určenou velikostí a směrem, vzhledem k povrchu opracovávaného materiálu.

Z praktického hlediska je eroze předmětem zájmu pro možnost technologického využití při opracování tvrdých a křehkých materiálů otryskáváním a pískováním, např. čištění odlitků, vyhlazování či zdrsňování povrchu součástí, odstranění povrchových pnutí, matování a reliéfování průhledných skel, atd.

Autorská právo se řídí směrnicemi MŠK [illegible]
[illegible] 21 727/62 [illegible]
[illegible] MŠK XIII [illegible]
[illegible] zákona č. 115, [illegible] Sb.

S erozí se také setkáváme jako s nežádoucím jevem v různých technických oborech. Možno uvést poškozování rozvodů při transportu pevných látek, poškozování lopatek plynových a parních turbín. Problémy ereze se vyskytují při provozu helikoptér, raketových motorů, kde dochází k poškozování trysek, ap.

Z těchto důvodů se věnuje studiu ereze v poslední době zvýšená pozornost.

Erosion
Erosion

1. Charakteristické veličiny

1.1. Opotřebení

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 opotřebovaného povrchu mechanickými účinky, popř. doprovázenými i jinými vlivy / 5 /.

Erozivní opotřebení je charakterizováno oddělováním částic a poškozováním opotřebovávaného povrchu:

1, částicemi nesenými proudem kapaliny

2, částicemi nesenými proudem plynu

3, proudem kapaliny, kapek, páry nebo plynu.

Intezita 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.

1.2. Eroze

Erozi E kvantifikujeme veličinou snadno definovatelnou a měřitelnou úbytkem hmoty Δm materiálu způsobeným jednotkovým množstvím abrazivního prášku, takže

$$E = \Delta m / M$$

kde M je hmota částic užitých při erozi / 1 /. Číselně se vyjadřuje veličinou obvykle s rozměrem $[g / kg]$. Vý-

hodnější je však popisovat erozi úbytkem objemu V způsobeným jednotkovým množstvím abraziva, takže

$$E = \Delta V / M = \Delta m / \rho M$$

udávané v $\left[mm^3 / kg\right]$ nebo $\left[cm^3 / kg\right]$.

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

1, Velikost a směr rychlosti u částic dopadajících na povrch materiálu

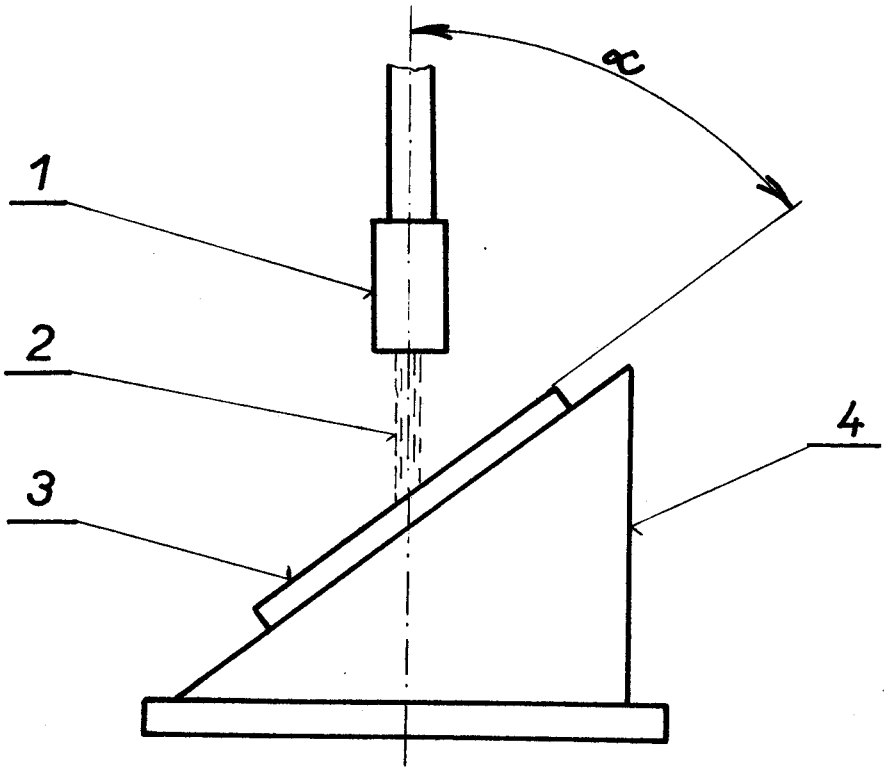
2, Velikost, tvar a materiálové vlastnosti částic užitých při erozi / tvrdost, pevnost, ap. /.

3, Mechanické vlastnosti zkoušeného materiálu / pevnost, tvrdost, houževnatost, atd. /.

1.3. Impaktní úhel - žádný obrázek?

Impaktní úhel / obrázek 1 / je úhel, který svírá normála procházející rovinnou vzorku se směrem rychlosti dopadajících částic abrazivního prášku.

Při tzv. kolmém tryskání, kdy směr rychlosti částic je kolmý na povrch zkušebního vzorku, je tedy impaktní úhel roven 90 .



Obrázek 1 - Definice impaktního úhlu

1 - tryska; 2 - abrazivní prášek; 3 - zkušební vzorek; 4 - ustavovací přípravek; - impaktní úhel

Obě lišaka

2. Řešená problematika

Postihnout všechny vlivy, které se na erozi podílejí, není v této práci možné. Doposud se v laboratořích KFY v Doubí studovalo pouze rozložení rychlostí brusných zrn při tryskání a triboluminiscence / 2 /, studovala se abrazivita prášků v závislosti na velikosti zrna, podmínky při opakovaném tryskání, úbět materiálu v závislosti na množství tryskacího prášku / 3 , 4 /.

V této diplomové práci byla pozornost soustředěna na vyjádření eroze různých technicky důležitých materiálů pomocí váhových a objemových úbytků v závislosti na impaktním úhlu. Veškeré otryskávání se provádělo abrazivním práškem karbidu křemíku.

Úkolem konstrukční části diplomové práce bylo navrhnout zařízení, které má objasnit pochody, které vznikají při nárazu respektive vniknutí abrazivního materiálu do materiálu základního. Vystřelovaný projektil navrženého zařízení má reprezentovat jednu částici abrazivního materiálu.

obráběného, erodovaného

3. Vlastnosti prášku karbidu křemíku

Karbid křemíku / SiC / patří společně s umělým korundem / tavený kysličník hlinitý, Al_2O_3 / a karbidem bóru / B_4C / mezi nejčastěji užívané umělé brusiva / 6 /. V n. p. Karborundum Benátky n J. byl vyráběn průmyslově karbid křemíku již dva roky po vyrobení jako v prvním závodě na světě.

Karbid křemíku je krystalická látka, vzniklá termochemickou reakcí kysličníku křemičitého a uhlíku. Krystalizuje v šesterečné soustavě, krystaly jsou destičkové. Krystaly mají měrnou hmotu 3,2 g / cm^3.

Fotografie 1 - Karbid křemíku C - 49 zelený, označení zrnitosti 150, velikost zrn 80 - 100 mikronů. Zvětšeno 150 x.

Karbid křemíku má nízký koeficient tepelné roztažnosti a je dobrým vodičem tepla a elektřiny. Velmi dobře vzdoruje účinkům běžných anorganických kyselin. Tvrdost zeleného karbidu křemíku podle Mohse je 9,10 až 9,15. HV

V diplomové práci se pro všechna měření používal karbid křemíku zelený / fotografie 1 / zrnitosti 150, SiC zelený, jenž se označuje podle normy ČSN 22 4010 C 49. Zrnitostí 150 je dle ČSN 22 4012 určena velikost jednotlivých zrn v rozmezí 80 - 100 m.

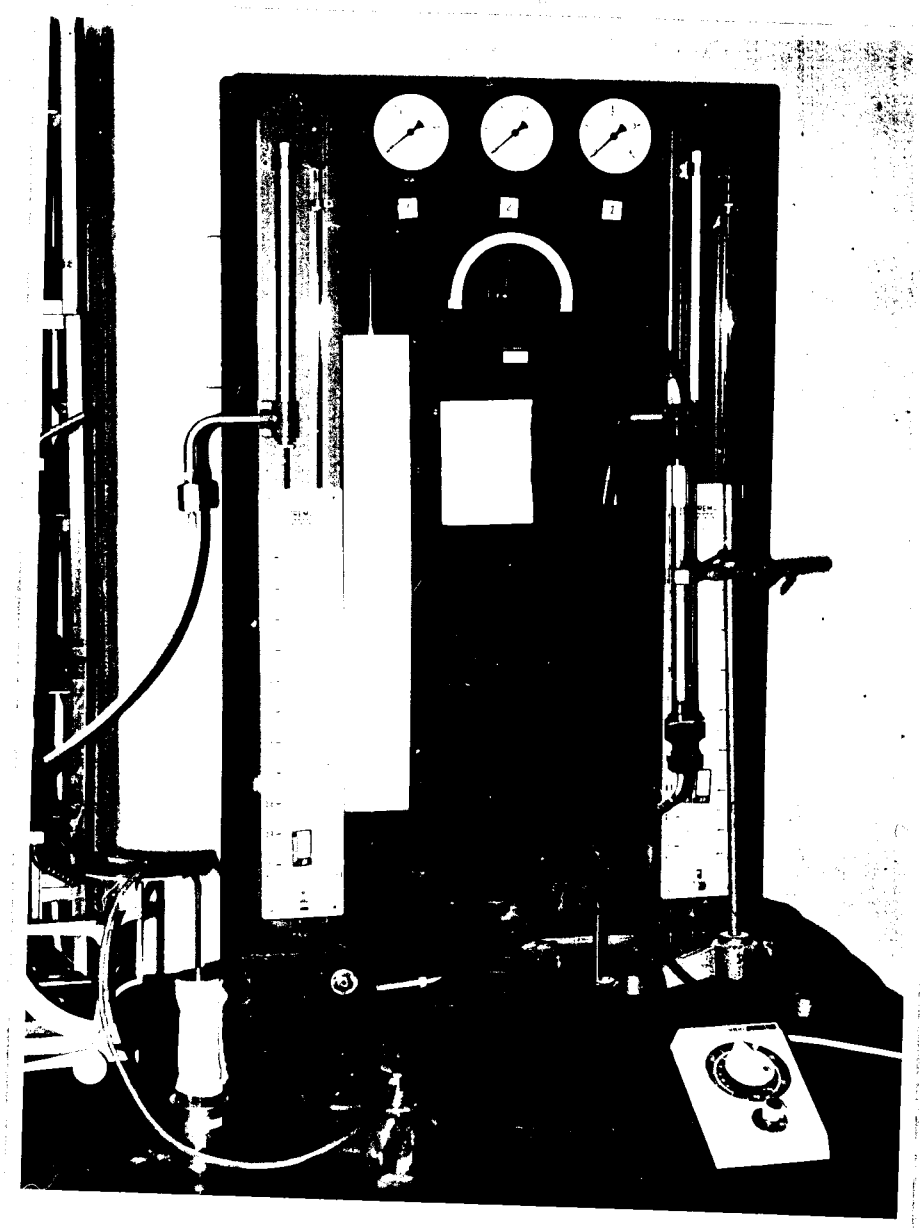
Prášek SiC se získává z křemenného písku a uhlíkatého materiálu / např. petrolejového koksu nebo antracitu / a vypaluje se při teplotě 2300°- 2550°C podobu 36 - 40 hodin. Po vychladnutí se SiC třídí, drtí a mele na zrna.

Karbidu křemíku se pro jeho vysoké abrazivní vlastnosti, vysokou tvrdost, výborné tepelné a mechanické vlastnosti, žáruvzdornost a žárupevnost užívá převážně na výrobu brusných nástrojů.

kuř, y nadel

4. Tryskací zařízení

Veškeré operace otryskávání vzorků proudem abrazivního prášku karbidu křemíku byly prováděny na tryskacím zařízení / fotografie 2 /, které bylo pro tento účel zkonstruováno v laboratořích KFY v Doubí u Liberce.



Fotografie 2 - Tryskací zařízení

4.1. Popis funkce tryskacího zařízení

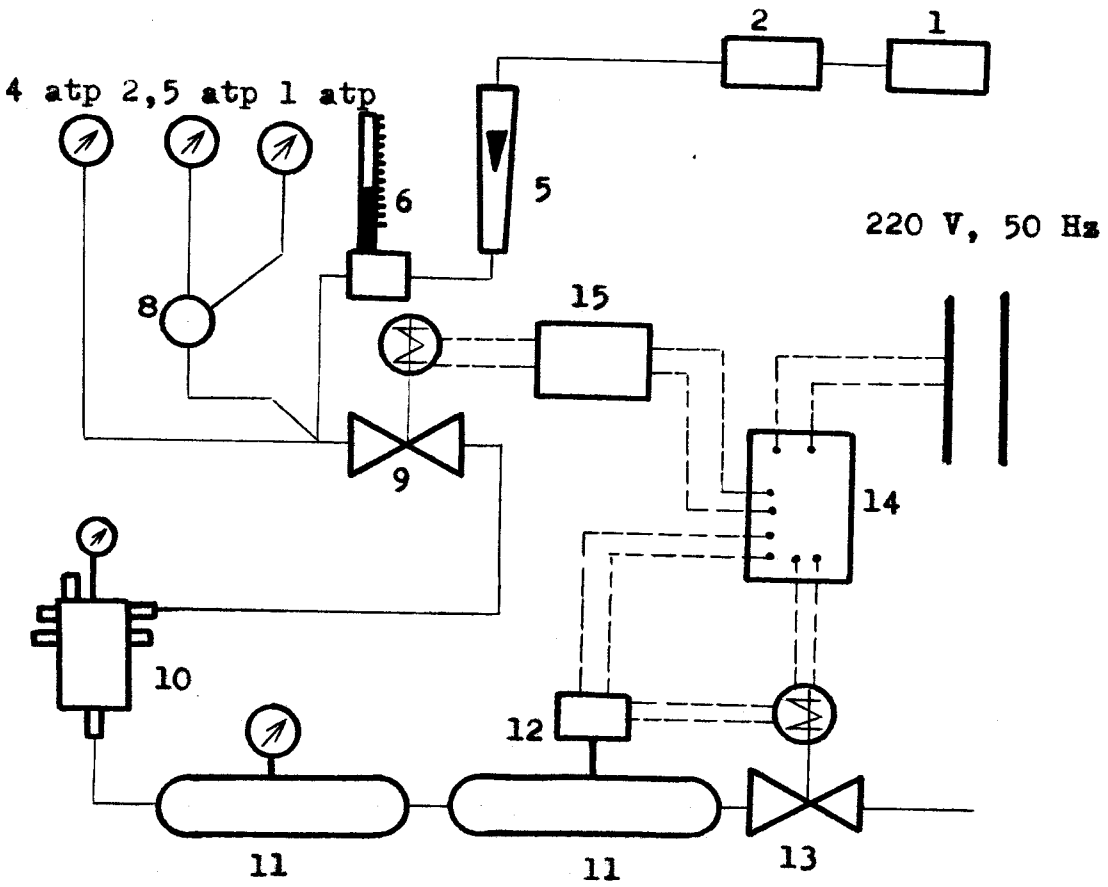
Celé zařízení / obrázek 3 / se skládá z tryskací komory, směšovací nádobky a měřícího panelu s rozvodem a regulací vzduchu.

Stlačený vzduch jde z rozvodného potrubí přes elektromagnetický ventil 96076 / II / 13 / do zásobníků vzduchu / 11 /. Jeho přívod je řízen elektricky v závislosti na tlaku uvnitř zásobníků vzduchu. K tomu slouží elektrický spínač OEZ typ IP 21 / 12 /, který byl seřízen na tlak 2 kp/cm^2. Ze zásobníků vzduchu jde stlačený vzduch přes regulační ventil RAT2 6 atp / 10 / doměřícího panelu, odkud jde přes elektromagnetický ventil 96076/II /9/ na kontrolní manometry s rozsahy: 0 - 4 atp, 0 - 2,5 atp, 0 - 1 atp / 7 /, umístěných na kontrolním panelu. Panel dále obsahuje clonku s diferenčním vodním tlakoměrem / 6 /, pětipolohový rozvodový ventil / 8 /, rotametr P69/4V Nr. 69 883 / 5 / a exposiční hodiny VICOMBI / 15 /. Exposičními hodinami se regulovalo sepnutí elektromagnetického ventilu / 9 / a tím doba otryskávání. tlak vzduchu se nastavoval ručním regulátorem tlaku / 10 /. Z kontrolního panelu vstupuje vzduch do směšovače / 2 /, kde se mísí s abrazivním práškem, a postupuje do tryskače / 1 /.

Schéma tryskacího zařízení je znázorněno na obrázku 2.

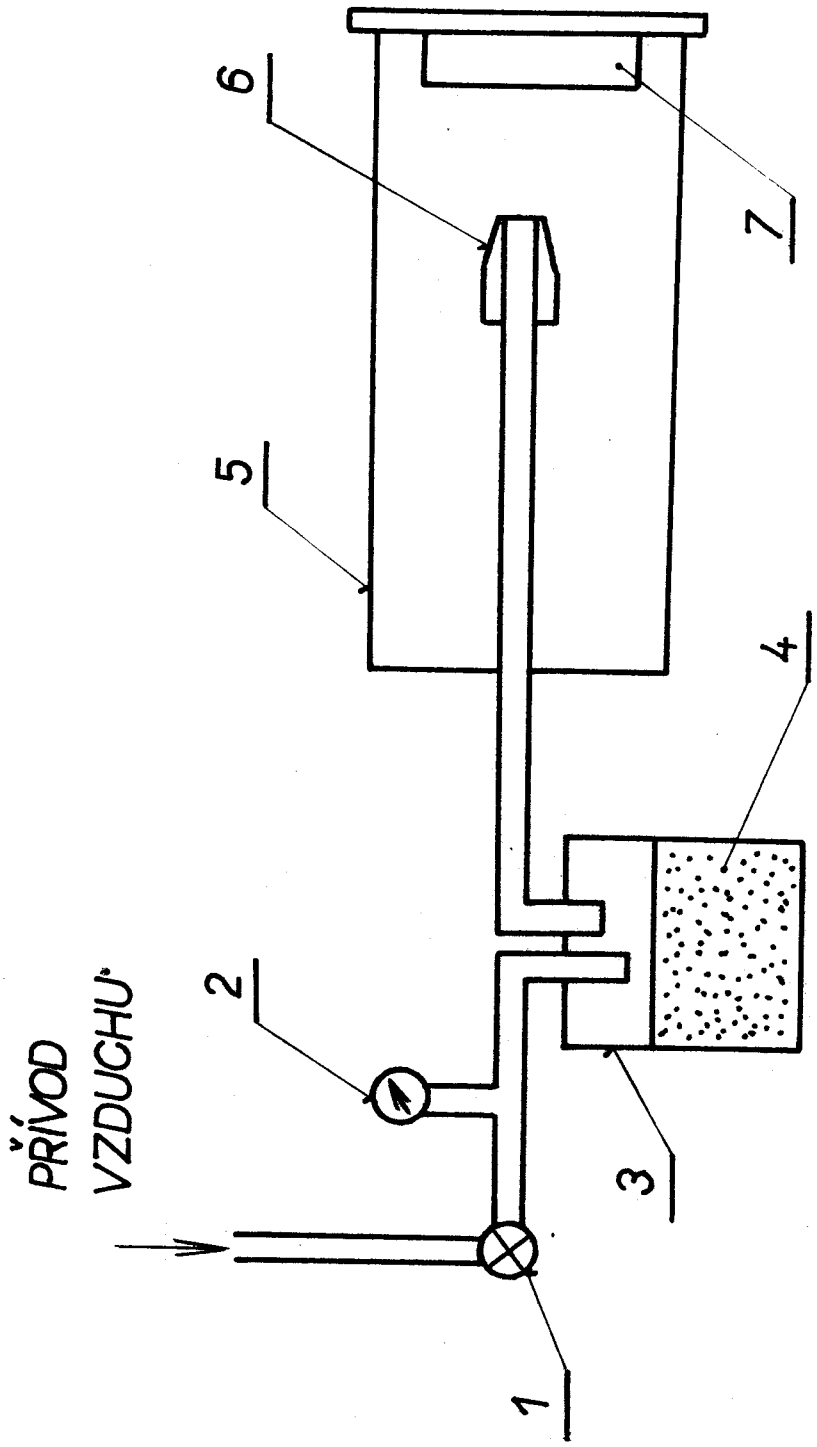
4.2. Části tryskacího zařízení

K základním částem tryskacího zařízení, které přichází do styku s pracovním práškem, patří směšovací nádobka,



Obrázek 1 - Blokové schéma tryskacího zařízení

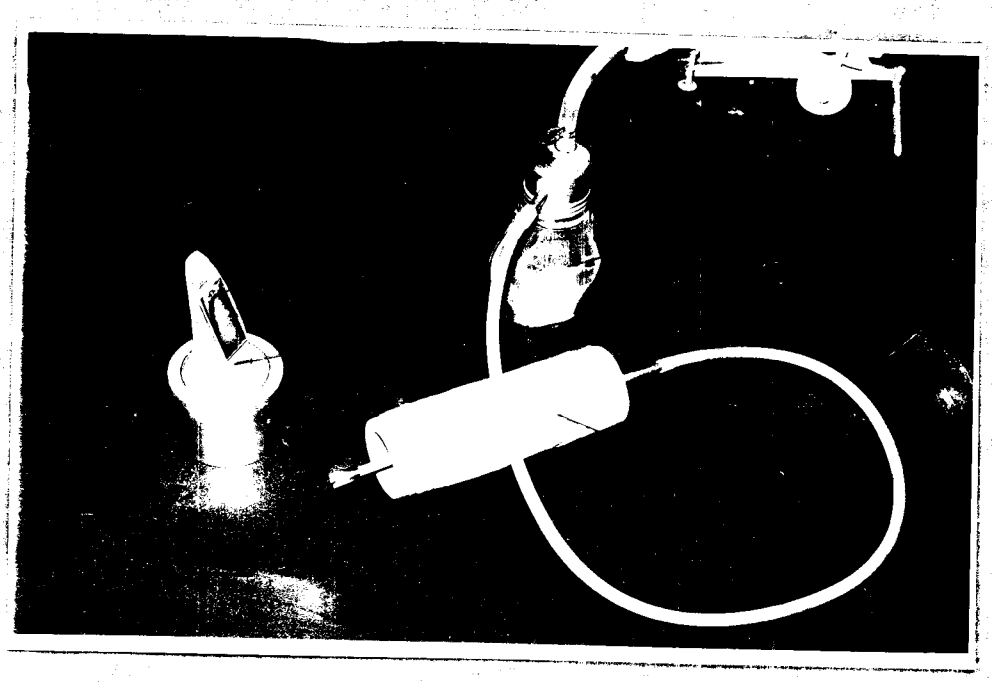
1 - tryskač; 2 - směšovač; 5 - rotametr; 6 - clonka s diferenčním tlakoměrem; 7 - manometry s rozsahem 4 atp, 2,5 atp, 1 atp; 8 - pětipolohový ventil; 9 - elektromagnetický ventil; 10 - ruční regulátor tlaku; 11 - zásobníky vzduchu; 12 - tlakové čidlo; 13 - elektromagnetický ventil ovládaný 12; 14 - rozvodová deska; 15 - expoziční hodiny



Obrázek 2 - Pryncip tryskacího zařízení

1 - redukční ventil; 2 - manometr; 3 - směšovací nádobka; 4 - abrazivní prášek; 5 - trysket; 6 - tryska; 7 - zkušební vzorek

tryskač, ustavovací přípravky a trysky / fotografie 3 /.



Fotografie 3 - Části tryskacího zařízení
1 - zkušební vzorek; 2 - ustavovací přípravek; 3 - tryska; 4 - kostra tryskače; 5 - směšovací nádobka

4.2.1. Směšovací nádobka

Skládá se ze skleněné nádobky o obsahu 100 ml a z našroubovatelného kovového uzávěru, do kterého ústí vstupní a výstupní trubice. Nádoba musí být v pracovní poloze tak, aby uzávěr nebyl zasypán. Z tohoto důvodu se při tryskání používalo maximálně 100 g pracovního prášku.

Vlastní směšování plynu a prášku je způsobeno rozvířením prášku vzduchem vstupujícím do nádoby. Výstupní

trubicí je pak prášek unášen do tryskače.

4.2.2. Tryskač

Tryskač je tvořen kostrou. Zadní část kostry je uzavřena našroubovatelným víčkem s těsněním, kterým prochází držák trysky. Držákem, který je opatřen milimetrovou stupnicí, je možno posouvat ve víčku, a tím se mění vzdálenost nastavení trysky od otryskávaného vzorku. Opačný konec kostry je opatřen závitem, na který se našroubovává uzávěr.

Uzávěr tryskače je opatřen vodícími kolíčky, které slouží k pevnému uložení ustavovacích přípravků, na kterých je uchycen vzorek. Vodící kolíčky jsou tolerovány tak, aby přípravky šly lehce vyjímat.

Aby nedocházelo k unikání brusiva kostrou tryskače do okolí, je celá kostra potažena plátěným obalem. Obsah tryskače činí asi 120 g tryskacího prášku SiC.

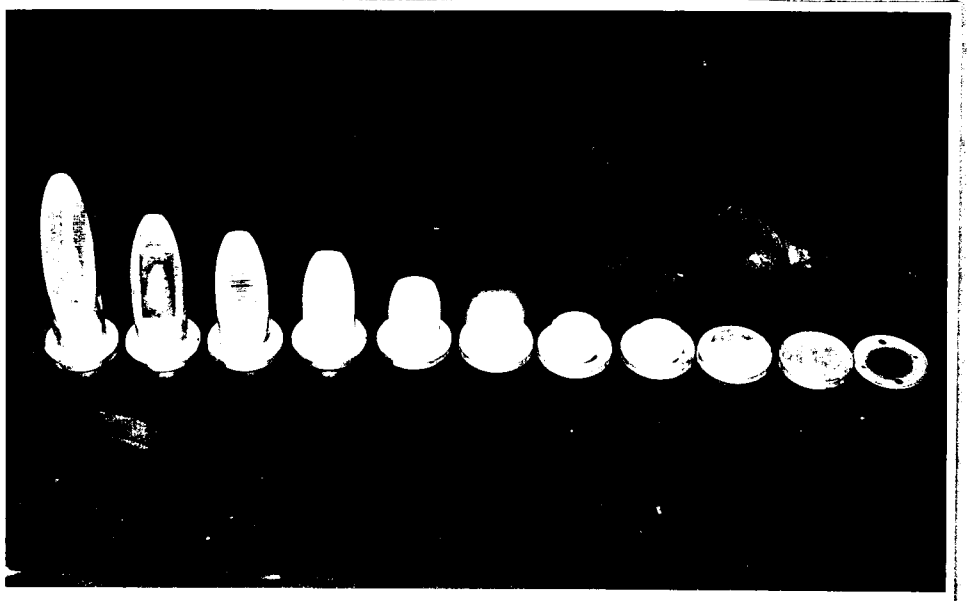
4.2.3. Ustavovací přípravky

K zjištění závislosti úběru materiálu na impaktním úhlu bylotřeba navrhnout a zhotovit přípravky, na kterých by byl zkušební vzorek ustaven pod různými úhly vzhledem ke směru rychlosti abrazivního prášku.

Bylo vyrobeno 10 přípravků / fotografie 4 / na kterých se dalo otryskávat pod těmito impaktními úhly: 17°, 19°30´, 22°, 27°, 37°, 47°, 57°, 67°, 77°, 87°. K tomu je nutno ještě přiřadit impaktní úhel 90° , který docílíme při kolmém tryskání.

Kromě ustavovacích přípravků vyrobených z plného materiálu se vyrobily i duté přípravky. Dutina slouží k tomu, aby se dala snímkovat luminiscence průhledných a průsvitných materiálů / sklo, plexisklo, ap. /.

K přilepení jednotlivých vzorků na ustavovací přípravky jsme použili šelakového lepidla.



Fotografie 4 - Ustavovací přípravky

4.2.4. Trysky

V průběhu tryskání se používalo trysek užívaných v pracech / 3, 4 / pouze s tím rozdílem, že byly z jedné strany skoseny pod úhlem 12°. Protože bychom nedosíhli u nízkých impaktních úhlů toho, aby byla vzdálenost trysky

Která vzdálenost je míněna?

od vzorku 8 mm, bylo nutné tuto úpravu provést.

Trysky, které měly ostré hrany a vnitřní průměr 2 mm, byly vyrobeny z tzv. stříbřenky. Stříbřenka je obchodní název pro nástrojovou ocel 19 220 nebo 19 221, která je zpravidla tažená a šíhaná.

vítali

4.3. Návrhy na zlepšení tryskacího zařízení

Při práci s tryskacím zařízením se objevilo několik problémů, z nichž některé byly během práce vyřešeny, jiné jsou řešeny formou těchto doporučení:

a,- nevýhodou pevných ustavovacích přípravků je skutečnost, že na nich nelze nastavit libovolný impaktní úhel, ve kterém je třeba zjistit úběr materiálu. Vyrobí-li se přípravek na kterém se může měnit úhel plynule, dá se jemněji určit průběh eroze v závislosti na impaktním úhlu.

b,- trysky vyrobené z tzv. stříbřenky se při tryskání brusiva SiC 150 velmi rychle opotřebovávají, tím se průměr trysky velmi zvětšuje. Při třicetiminutovém tryskání práškem SiC 150 se změní průměr trysky ze 2 mm na 2,45 až 2,5 mm. Bude-li použita k výrobě trysek ocel Poldi 2002, což odpovídá dle ČSN materiálu 19 436, doba tryskání, po které se musí vyměnit opotřebovaná tryska, bude podstatně delší.

Nutno tp. zp.

c,- při upevňování zkušebních vzorků na ustavovací přípravky bylo použito šelakového lepidla, které se rozpouští v lihu. Práce při lepení je velmi zdlouhavá. Při pou-

žití vhodného mechanického upínání by se velmi zkrátila doba potřebná k uchycení vzorku.

Pozn. Výrobní výkres tryskače, ustavovacích přípravků a trysky je obsažen v příloze 2.

5. Technologie přípravy a připevňování vzorků

5.1. Volba vzorků různých materiálů

Při volbě druhů materiálu, které se použily pro získávání závislosti úběru na impaktním úhlu, jsme vycházeli ze dvou hledisek:

1/ Snažili jsme se vybrat takové materiály, které mají určité charakteristické vlastnosti / křehkost, houževnatost, tažnost, ap./.

2/ Volili jsme materiály, které mají široké uplatnění jak ve strojírenství, tak i v jiných průmyslových odvětvích.

Určitým omezením při volbě materiálu byly omezené rozměry zkušebních vzorků. Proto jsme např. nepoužívali vzorků ze šedé litiny, neboť jejich příprava je velmi komlikovaná.

V podstatě lze vzorky rozdělit do tří skupin. První tvoří kovové materiály / ocel 11 321 , ocel 19 312.3, měď 99,5 ČSN 42 3005/, druhou plastické materiály / polymetylmetakrylát, polytetrafluoretylén a pryž ČSN 62 2024/. Třetí skupina je zastoupena představitelem křehkých materiálů, tabulovým sklem ČSN 70 9051.

Základní vlastnosti jednotlivých materiálů:

Ocel 11 321 - konstrukční ocel hlubokotažná, válcovaná za

studena. Obsahuje max. 0,1 % C, 0,45 % Mn, σ_{kt} = 24 kp / mm^2, σ_{pt} = 28 - 38 kp / mm^2, δ_{10} = 35 %. Měrná hmotnost ρ = 7,84 g / cm^3. Jedná se o ocel vhodnou pro hluboké tažení za tepla i za studena.

Ocel 19 312.3 - nástrojová ocel slitinová, žíhaná na měkko. Obsahuje 0,75 - 0,9 % C, 1,8 -2,5 % Mn, 0,4 % Si, 0,1 - 0,25 % V. Žíhá se při teplotě 680° - 700°C, ochlazuje v peci po dobu 4 - 8 hod. Minimální tvrdost po kalení je 61 HRC. Měrná hmotnost oceli ρ = 8,67 g / cm^3. Ocel se používá na střihadla, k výrobě šroubů a nýtů tvářením, na závitořezné nástroje, na formy pro lisování plastických hmot.

Měď 99,5 ČSN 42 3005 - jako polotovary se vyrábějí plechy. Minimální hodnoty měkkého stavu Cu 99,5: σ_{pt} = 21 - 26 kp / mm^2, σ_{kt} = 6 kp / mm^2, δ_{10} = 30 %, používá se v elektrotechnice / např. pásy pro dynama /. ρ = 8,94 g / cm^3.

Poly metylmetakrylát ČSN 64 3411 - organické sklo, které měkne při teplotách nad 100°C. Obchodní názvy organického skla jsou: Umaplex, Plexiglas, Plexisklo. Měrná hmotnost ρ = 1,19 g / cm^3, mez pevnosti v tahu σ_{pt} = 700 kp / cm^2, tvrdost 18 HB. Je to nejrozšířenější čirá hmota velmi dobrých fyzikálních vlastností. Lze se s ní setkat při stavbě letadel, automobilů a lodí, v modelářství. Používá se dále také na lékařské nástroje

a pomůcky, nábytek, ap.

Polytetrafluoretylén - obchodní název Teflon, Fluon, je látka chemicky stálá, lze ji použít v teplotním rozmezí - 100 až + 300°C. Je to krystalická látka, která má vynikající elektroizolační vlastnosti. Měrná hmotnost ρ = 2,1 - 2,3 g/cm^3, mez pevnosti v tahu σ_{pt} = až 300 kp/cm^2, δ_{10} = 100 až 500 %. Použití: ložiska, těsnění, ucpávky, potrubí ap.

Pryž 024 ČSN 62 2024 - pryž pro všeobecné použití, odolná v atmosferických podmínkách. Měrná hmotnost ρ = 1,2 g/cm^3, σ_{pt} = 70 kp/cm^2, tažnost δ_{10} = min 375 %. Používá se pro těsnění, sdělovací techniku, spotřební zboží.

Tažené ploché sklo tabulové ČSN 70 9051 - tabulové sklo, které má měrnou hmotnost ρ = 2,5 g/cm^3.

5.2. Rozměry a povrchová úprava vzorků

Většina vzorků, které se otryskávaly, měly čtercový tvar 20 x 20 mm nebo kruhový tvar o průměru d = 20 mm. Při otryskávání pod nízkými impaktními úhly / 17°, 19°30', 22° / bylo nutné použít obdélníkové vzorky rozměrů 20 x 25 až 20 x 30 mm, neboť proud vzduchu s abrazivním práškem měl při těchto úhlech velký rozptyl. Tloušťka jednotlivých vzorků byla různá, pohybovala se v rozmezí 0,8 až 2 mm. Materiály, které měly vel-

ký úbytek, musely mít větší tloušťku, aby nedošlo k provrtání vzorku, neboť potom by došlo k ovlivnění naměřených hodnot.

Protože se vzorky na ustavovací přípravky lepily, bylo důležité, aby byly plochy řádně očištěny. Z kovových vzorků se mechanickým způsobem odstraňovala rez. Všechny vzorky se před nalepením na ustavovací přípravky vymyly v lihu.

5.3. Volba vhodného lepidla

Velkým problémem bylo najít vhodný způsob, jakým připevnit vzorek na ustavovací přípravek. Důležitá byla ta okolnost, aby povrch vzorku, na který dopadá abrazivní prášek, byl volný. Z tohoto důvodu se upustilo od mechanického upínání pomocí svěrek, nehledě na to, že jednotlivé části mechanického upínače by se velmi brzy působením abrazivního prášku opotřebovávaly.

Proto se vzorky na ustavovací přípravky lepily šelakovým lepidlem. Po vyzkoušení různých druhů lepidel a tmelů / arabská guma, supercemnt, epoxid, plastelina ap./ se ukázalo, že šelakové lepidlo je nejvýhodnější, neboť se lehce rozpouští v lihu. Určitou nevýhodou je okolnost, že lepidlo poměrně dlouho zasychá.

6. Otryskávání vzorků práškem karbidu křemíku

6.1. Podmínky při tryskání

Veškeré otryskávání práškem SiC 150 se provádělo na tryskacím zařízení znázorněném na fotografii 2.

Pracovní tlak nosného vzduchu byl konstantní a rovnal se 1 atp. Další konstantní veličinou byla vzdálenost ústí trysky od povrchu zkušebního vzorku. Tato vzdálenost byla ve všech případech rovna 8 mm. - pánský dýkant

Ve většině případů se používalo pro otryskání jednoho vzorku 100 g prášku SiC 150. Pouze u teflonu a plexiskla, kde byl velký objemový úbytek , se použilo k otryskání jednoho vzorku 60 g SiC 150. Po otryskání jedné série /tzn. 11ti vzorků / se vyměňovala tryska, neboť během jedné série se zvětšil průměr trysky ze 2 mm až na 2,5 mm, a tím se snižovala rychlost prášku. Rovněž se po otryskání jedné série vzorků používal nový prášek SiC 150.

Pozn. Jako jednotka tlaku je v práci užívaná 1 atp, tzn. technická atmosfera. Pro převod jednotek tlaku z TS soustavy do nově zavedené jednotkové soustavy SI je v práci uvedena tabulka 1.

6.2. Postup při tryskání

Vzorky, které byly řádně očištěny a zbaveny otřepů, se nejprve očíslovaly. Potom se zvážil každý vzorek na po-

1 kpcm^{-2} = 98 066,5 Pa

Tlak [kpcm^{-2}]	Tlak [Pa]	Tlak [kpcm^{-2}]	Tlak [Pa]
0,01	980,665	6	558 399,0
0,02	1961,330	7	686 465,5
0,03	2941,995	8	784 532,0
0,04	3922,660	9	882 598, 5
0,05	4903,990	10	980 665
0,06	5883,990	20	1 961 330
0,07	6864, 655	30	2 941 995
0,08	7845,985	40	3 922 660
0,09	8825,985	50	4 903 325
0,1	9806,650	60	5 883 990
0,2	19613,300	70	6 864 655
0,3	29419,35	80	7 845 320
0,4	39226,60	90	8 825 485
0,5	49033,25	100	9 806 650
0,6	58839,90	200	19 613 300
0,7	68646,55	300	29 419 950
0,8	78453,20	400	39 226 600
0,9	88259,85	500	49 033 250
1,0	98066,5	600	58 839 900
2,0	196133,0	700	68 646 550
3,0	294199,5	800	78 453 200
4,0	392266,0	900	88 259 850
5,0	490332,0	1000	98 066 500

Tabulka 1.

Převodní jednotka tlaků v jednotkách kpcm^{-2} na tlaky v jednotkách Pascal

loautomatických analytických vahách MEOPTA čsl. pat. ohl. 0302317. Tyto váhy váží s přesností 10^{-4} g. Po zvážení se vzorek nalepil na ustavovací přípravek a nechal zaschnout.

Vlastní tryskání probíhalo tím způsobem, že se ustavovací přípravek s nalepeným vzorkem vložil do hlavy tryskače a hlava se zašroubovala do tělesa tryskače. Následovalo nastavení trysky na vzdálenost 8 mm od povrchu zkušebního vzorku. Do směšovací nádoby se odváží potřebné množství prášku. Spuštěním expozičních hodin VIPOCOMBI uvádíme celé zařízení v činnost. V průběhu otryskávání se průběžně sledoval rotametr, jehož průměrná hodnota se pohybovala okolo 2 000 l/hod, a průtokoměr.

Po otryskání vyjmeme přípravek se vzorkem z hlavy tryskače a v lihu vzorek očistíme. Vzorek zbavený zbytku lepidla a prášku opět zvážíme na poloautomatických analytických vahách. Dále očistíme ustavovací přípravky a celý proces se opakuje.

6.3. Úbytek při tryskání

V diplomové práci jsme se zaměřili na získání závislosti ($m = m/\alpha$ /, tzn. závislosti úbytku materiálu na impaktním úhlu. Vážením jsme získali váhový úbytek, početně úbytek objemový. Tvar a velikost kráterů vznikajících při otryskání byly již sledovány v předešlých diplomových pracích / 2 /.

Autorské právo se řídí směrnicemi MŠK pro [illegible] č. j. 31 727/62-III/2 [illegible] 31. 8. 1962 § 19 autorského zákona č. 115/53 Sb.

7. Měření úbytku hmoty v závislosti na impaktním úhlu

K získání objektivních výsledků jsme pod každým impaktním úhlem otryskávali tři vzorky, ze kterých se aritmetickým průměrem získávala střední hodnota úběru. Pouze u kaučuku a teflonu jsme pro nedostatek zkušebních vzorků otryskávali pouze dvě série. Při některých měřeních docházelo k různým závadám / unikání prášku mimo tryskač, odlepení vzorku, netěsnost u závěru směšovací nádoby /, proto nebyly výsledky těchto měření zahrnuty mezi hodnoty ostatních měření.

7.1. Výsledky měření

V tabulkách naměřených hodnot se udávaly následující parametry: impaktní úhel, pod kterým se otryskávalo; váha zkušebních vzorků před otryskáním a po otryskání; váhový úbytek jednotlivých vzorků; aritmetický průměr váhových úbytků vzorků; aritmetický průměr objemových úbytků. Průměrná hodnota eroze je již v tabulce přepočítaná na úběr materiálů pomocí 1 kg abrazivního prášku mg/kg . Objemový úbytek je udáván v mm^3/kg.

Výsledky měření úbytku materiálů práškem SiC 150 jsou uvedeny v následujících tabulkách:

Tabulka 2 - Otryskání oceli 11 321

Tabulka 3 - Otryskání oceli 19 312.3

Tabulka 4 - Otryskání mědi

Tabulka 5 - Otryskání plexiskla

Tabulka 6 - Otryskání teflonu

Tabulka 7 - Otryskání pryže

Tabulka 8 - Otryskání tabulového skla

7.2. Hmotový úbytek v závislosti na impaktním úhlu

Váhový úbytek materiálů / Δ m / při otryskávání byl získán z rovnice

$$\Delta m = m_o - m \qquad /mg/$$

kde m_o je váha vzorku před otryskáním a m je váha vzorku po otryskání. Vypočtené váhové úbytky byly potom přepočítány na úbytky připadající na 1 kg tryskacího prášku, čili

$$E = \Delta m/M \qquad /mg/kg/$$

7.2.1. Hmotový úbytek kovových materiálů

Měď / graf 1 /, která je představitelem tažného plastického materiálu, vykazuje maximální úběr při impaktním úhlu 40°. Eroze mědi je podstatně vyšší než eroze ocelových vzorků.

Impaktní úhel [°]	Váha před otryskáním [g]	Váha po otryskání [g]	Váhový úbytek [mg]	Prům.váh. úbytek [mg/kg]	Objemový úbytek [mm^3/kg]
90°	2,6623	2,6523	10,0	88,0	11,1
	2,4483	2,4402	8,1		
	2,8591	2,8496	9,5		
87°	3,1631	3,1554	7,7	74,0	9,44
	3,4311	3,4238	7,3		
	3,1624	3,1542	8,2		
77°	3,3085	3,3005	8,0	76,7	9,75
	3,1307	3,1233	7,4		
	3,1913	3,1837	7,6		
67°	3,2238	3,2150	8,8	85,0	10,85
	2,9445	2,9365	8,0		
	3,1668	3.1581	8,7		
57°	3,4251	3,4157	9,4	92,7	11,8
	3,4441	3,4347	9,4		
	3,2128	3,2038	9,0		
47°	3,7916	3,7825	9,1	93,0	11,85
	3,5344	3,5249	9,5		
	3,6021	3,5928	9,3		
37°	3,7229	3,7130	9,9	98,7	12,6
	3,4814	3,4713	10,1		
	3,6005	3,5909	9,6		
27°	3,4830	3,4729	10,1	96,7	12,35
	3,7663	3,7565	9,8		
	3,7628	3,7537	9,1		
22°	3,6202	3,6111	9,1	90,7	11,55
	3,5945	3,5848	9,7		
	4,2209	4,2125	8,4		
19,5°	3,8173	3,8094	7,9	83,7	10,7
	3,9049	3,8956	9,3		
	3,7937	3,7858	7,9		
17°	4,1820	4,1745	7,5	79,5	10,15
	4,2805	4,2721	8,4		
	4,2590	-	-		

Tabulka 2

Impaktní úhel [°]	Váha před otryskáním [g]	Váha po otryskání [g]	Váhový úbytek [mg]	Prům. váh. úbytek [mg/kg]	Objemový úbytek [mm^3/kg]
90°	4,0867 4,5604 4,3031	4,0768 4,5498 -	9,9 10,6 -	102,5	11,75
87°	4,0005 4,4673 4,8563	3,9915 4,4591 4,8445	9,0 8,2 14,8	86,0	9,94
77°	4,4521 4,4502 4,7488	4,4428 4,4403 4,7392	9,3 9,9 9,6	96,0	11,1
67°	4,8236 4,8535 4,6917	4,8122 4,8443 4,6824	11,4 9,2 9,3	99,7	11,5
57°	5,1330 5,3476 4,9607	5,1225 5,3373 4,9507	10,5 10,3 10,0	100,3	11,5
47°	5,8737 5,2682 5,5197	5,8629 5,2554 5,5054	10,8 12,8 14,3	118,0	13,6
37°	5,8638 6,0318 6,5544	5,8501 6,0228 6,5425	13,7 9,0 11,9	115,3	13,3
27°	6,6462 7,0918 6,3819	6,6327 7,0823 6,3700	13,5 9,5 11,9	127,0	14,7
22°	7,0461 6,5020 6,9224	7,0350 6,4876 6,9127	11,1 14,4 9,7	117,3	13,5
19,5°	6,9554 6,7829 7,6645	6,9440 6,7673 7,6534	11,4 15,6 11,1	127,0	14,4
17°	7,1779 7,5368 7,4990	7,1644 7,5214 7,4858	13,5 15,4 13,2	140,3	16,2

Tabulka 3

Impaktní úhel [°]	Váha před otryskáním [g]	Váha po otryskání [g]	Váhový úbytek [mg]	Prům.váh. úbytek [mg/kg]	Objemový úbytek [mm³/kg]
90°	2,9466 3,0228 3,2422	2,9344 3,0067 3,2259	12,2 16,1 16,3	148,6	16,7
87°	3,0693 3,1235 2,8611	3,0553 3,1074 2,8454	14,0 16,1 15,7	152,6	17,1
77°	3,6449 3,7748 3,4612	3,6285 3,7584 3,5451	16,4 16,4 16,1	163	18,2
67°	3,6484 3,4729 3,2849	3,6281 3,4533 3,2656	20,3 21,6 21,3	210,6	23,6
57°	3,6953 3,4529 3,7744	3,6773 3,4310 3,7535	18,0 21,9 20,9	202,6	22,7
47°	3,9952 3,9242 3,8813	3,9756 3,9023 3,8590	19,6 21,9 22,3	212,6	23,8
37°	4,0821 4,0903 3,9440	4,0671 4,0671 3,9218	21,1 23,2 22,2	221,6	24,8
27°	3,8857 4,0582 3,7803	3,8647 4,0374 3,7578	21,0 20,8 22,5	214,3	24,0
22°	4,1733 4,4614 4,0177	4,1568 4,4283 3,9963	16,5 - 21,4	193,3	21,9
19,5°	3,7911 4,2250 3,9523	3,7721 4,2037 3,9370	19,0 21,3 15,3	185,3	20,8
17°	4,4067 4,1710 4,2698	4,3889 4,1496 4,2480	17,8 21,4 21,8	203,3	22,7

Tabulka 4

Impaktní úhel [°]	Váha před otryskáním [g]	Váha po otryskání [g]	Váhový úbytek [mg]	Prům.váh. úbytek [mg/kg]	Objemový úbytek [mm^3/kg]
87°	1,1522 1,1564 1,3755	1,1451 1,1480 1,3678	7,1 8,4 7,7	128,3	108
77°	1,3429 1,1463 1,2718	1,3364 1,1368 1,2642	6,5 9,5 7,6	131,0	110
67°	1,1700 1,1510 1,3346	1,1609 1,1406 1,3272	9,1 10,4 7,4	149,6	125
57°	1,2309 1,1816 1,1576	1,2195 1,1713 1,1477	11,4 10,3 9,9	175,6	147,6
47°	1,3999 1,3006 1,2726	1,3887 1,2888 1,2623	11,2 11,8 10,3	185,0	155,5
37°	1,3290 1,1585 1,3290	1,3163 1,1462 1,3146	12,7 12,3 13,1	198,9	167
27°	1,3277 1,2514 1,4254	1,3146 1,2395 1,4155	13,1 11,9 9,9	194,0	163
22°	1,2747 1,1433 1,3686	1,2631 1,1327 1,3587	11,6 10,6 9,9	178,1	147,7
19,5°	1,4551 1,2357 1,3182	1,4435 1,2250 1,3085	11,6 10,7 9,7	177,5	149
17°	1,1546 1,2866 1,1452	1,1410 1,2765 1,1363	- 10,1 8,9	158,0	133

Tabulka 5

Impaktní úhel [°]	Váha před otryskáním [g]	Váha po otryskání [g]	Váhový úbytek [mg]	Prům.váh. úbytek [mg/kg]	Objemový úbytek [mm^3/kg]
90°	2,2070 2,0049	2,2067 2,0049	0,3 0,0	2,5	1,18
87°	2,2127 2,1829	2,2114 2,1818	1,3 1,1	20,04	9,1
77°	2,1284 2,1307	2,1271 2,1292	1,3 1,5	23,4	10,6
67°	2,0868 2,0081	2,0843 2,0049	2,5 3,3	45,8	20,8
57°	2,2312 2,2232	2,2267 2,2171	4,5 6,1	88,6	40,2
47°	2,0520 2,1999	2,0418 2,1913	10,2 8,6	157,0	71,4
37°	2,1192 2,2149	2,1104 2,2044	8,8 10,5	161,3	73,5
27°	2,2017 2,1311	2,1899 2,1119	11,8 11,0	190,2	86,3
22°	2,2200 2,1505	2,2106 2,1397	9,4 10,8	168,8	76,7
19,5°	2,1116 2,0307	2,1012 2,0207	10,4 10,0	170,5	77,2
17°	2,0748 2,1489	2,0667 2,1396	7,9 9,3	144,4	65,7

Tabulka 6

Impaktní úhel [°]	Váha před otryskáním [g]	Váha po otryskání [g]	Váhový úbytek [mg]	Prům.váh. úbytek [mg/kg]	Objemový úbytek [mm^3/kg]
90°	1,5893 1,6064	1,5881 1,6063	1,2 0,1	0,75	0,5
87°	1,7578 1,6830	1,7564 1,6822	1,4 0,8	1,1	0,73
77°	1,6064 1,7322	1,5939 1,7311	2,5 1,1	1,8	1,2
67°	1,9172 1,8379	1,9137 1,8364	3,5 1,5	2,5	1,67
57°	1,7574 1,8694	1,7544 1,8679	3,0 1,5	2,25	1,5
47°	1,6888 1,6881	1,6827 1,6861	6,1 2,0	4,05	2,7
37°	1,6332 1,7845	1,6302 1,7821	3,0 2,4	2,7	1,8
27°	1,6803 1,7998	1,6758 1,7960	4,5 3,8	4,15	2,76
22°	1,5202 1,4820	1,5158 1,4776	4,4 4,4	4,4	2,92
19,5°	1,6963 1,6953	1,6885 1,6911	5,8 4,2	5,0	3,32
17°	1,7581 1,8261	1,7531 1,8227	5,0 3,4	4,2	2,8

Tabulka 7

Impaktní úhel [°]	Váha před otryskáním [g]	Váha po otryskání [g]	Váhový úbytek [mg]	Prům.váh. úbytek [mg/kg]	Objemový úbytek [mm^3/kg]
90°	3,0601	3, 0142	45,9	638,3	255
	3,0743	2,9925	81,8		
	3,1155	3,0517	63,8		
87°	3,0350	2,9827	52,3	644,3	258
	3,1002	3,0208	79,4		
	3,1064	3,0448	61,6		
77°	3,0371	2,9901	47,0	562,7	225
	3,0714	2,9496	67,8		
	3,1291	3,0751	54,0		
67°	3,0372	2,9944	42,8	521,7	209
	2,9973	2,9362	61,1		
	2,8357	2,7871	52,6		
57°	3,0581	3,0308	27,3	400,3	160
	2,9280	2,8762	51,8		
	2,8569	2,8159	41,0		
47°	3,1064	3,0713	35,1	381,7	153
	3,1510	3,1038	47,2		
	3,0610	3,0288	32,2		
37°	2,8900	2,8720	18,0	258,7	103,5
	3,0660	3,0371	38,9		
	3,0334	3,0227	20,7		
27°	3,0576	3,0470	10,6	135,3	54,1
	3,1191	3,1011	18,0		
	3,1071	3,0951	12,0		
22°	3,0376	3,0305	7,1	91,7	36,7
	3,0503	3,0379	12,1		
	3,1289	3,1209	8,0		
19,5°	3,0437	3,0379	5,8	73,3	29,4
	3,1040	3,0946	9,4		
	2,9782	2,9714	6,8		
17°	3,0846	3,0786	6,0	68,7	27,5
	3,0623	3,0543	8,0		
	3,0646	3,0580	6,6		

Tabulka 8

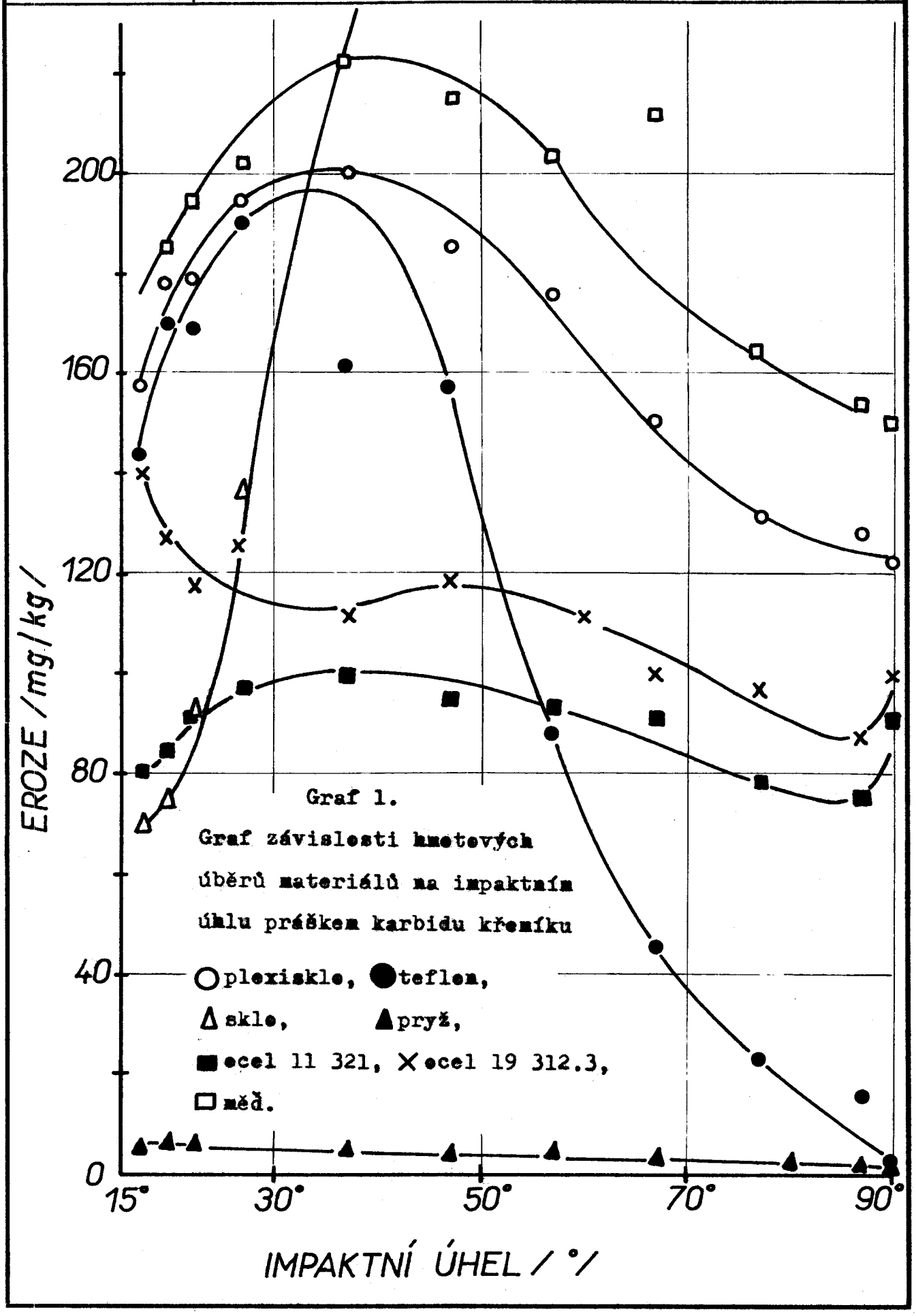
Závislosti jednotlivých ocelí již zdaleka netvoří jednoduchou křivku. Zvláště u oceli 19 312.3 vidíme, že průběh funkce je velmi složitý. Ocel 19.312.3 jako jediný materiál /kromě pryže/ vykazuje při nízkých impaktních úhlech zvýšenou erozi. Ocelové materiály se oproti jiným materiálům liší tím, že mají zvýšenou erozi při kolmém tryskání, tzn. kdy je impaktní úhel roven 90°.

7.2.2. Hmotový úbytek plastických materiálů

Porovnáme-li mezi sebou grafické závislosti plastických materiálů /graf 1/ vidíme, že pryž má nepoměrně menší úbytek než ostatní materiály. Lze z toho soudit, že pryž se jeví jako materiál velmi odolný vůči abrazi jiných materiálů. Teflon a plexisklo, které patří mezi tažné / duktilní/ látky, mají minimální úběr při kolmém tryskání, neboť nejprve dochází k zadírání prášku do povrchu vzorku a teprve po určité době nastává úběr materiálu. Maximální úběr těchto duktilních materiálů je v rozmezí 30° - 40°.

7.2.3. Hmotový úbytek tabulového skla

Srovnáním eroze tabulového skla, které je představitelem fragilních látek, s ostatními zkoušenými materiály vidíme, že průběh eroze je u skla zcela odlišný. Maximální úbytek je při impaktním úhlu 90°, minimální při nejnižším impaktním úhlu. Také kvantitativní množství úběru

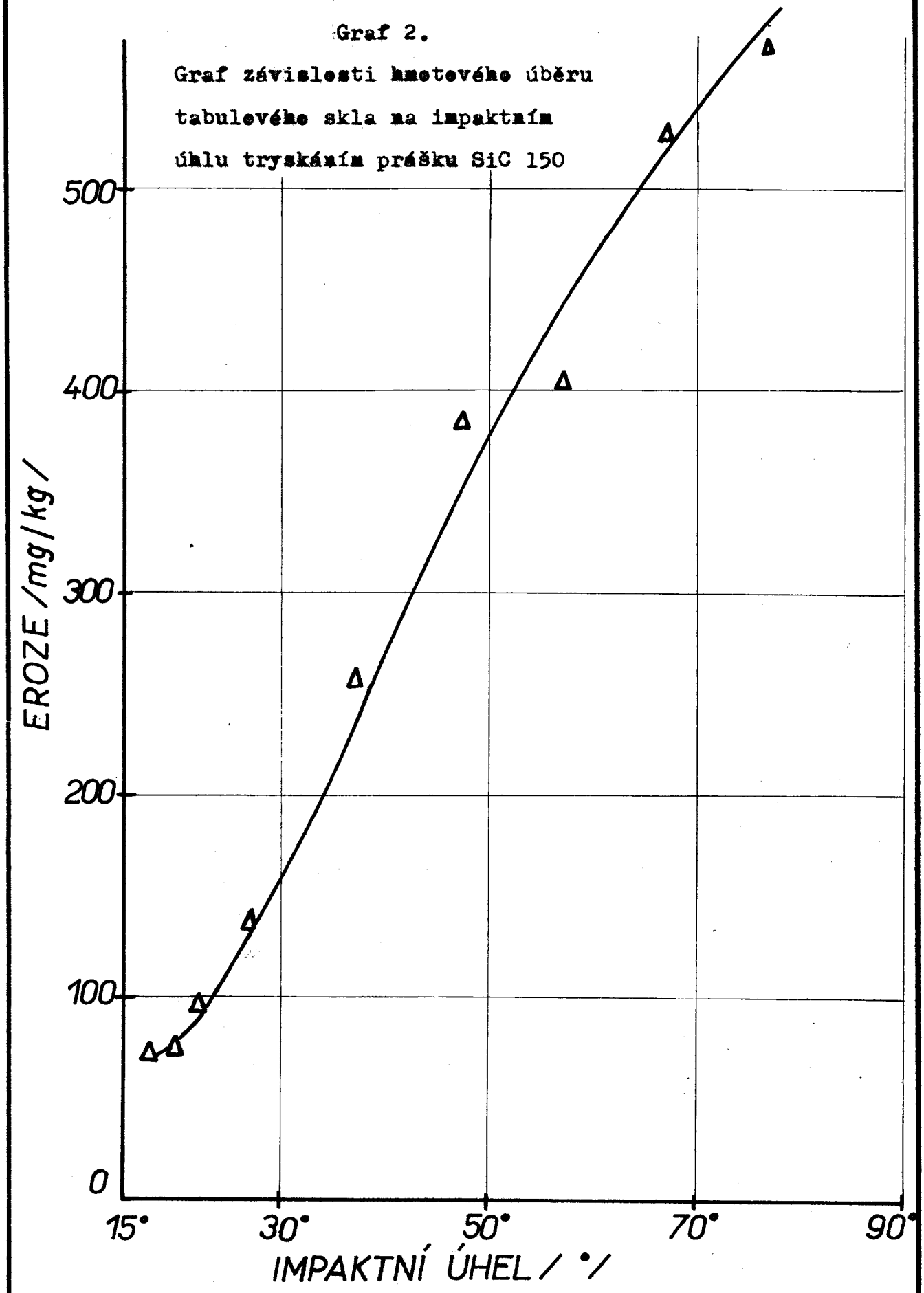


Graf 1.

Graf závislosti hmotových úběrů materiálů na impaktním úhlu práškem karbidu křemíku

Graf 2.

Graf závislosti hmotového úběru tabulového skla na impaktním úhlu tryskáním prášku SiC 150



je u skla podstatně vyšší.

Závislost eroze tabulového skla na impaktním úhlu je znázorněna v grafu 2.

7.3. Objemový úbytek v závislosti na impaktním úhlu

Při výpočtu objemového úběru materiálu vycházíme z hmotového úbytku, který podělíme příslušnou měrnou hmotností daného otryskaného materiálu, čili

$$\Delta V = \Delta m / \rho \qquad / \, mm^3 \, /$$

kde m je váhový úbytek materiálu / g /, je měrná hmotnost g / mm^3 .

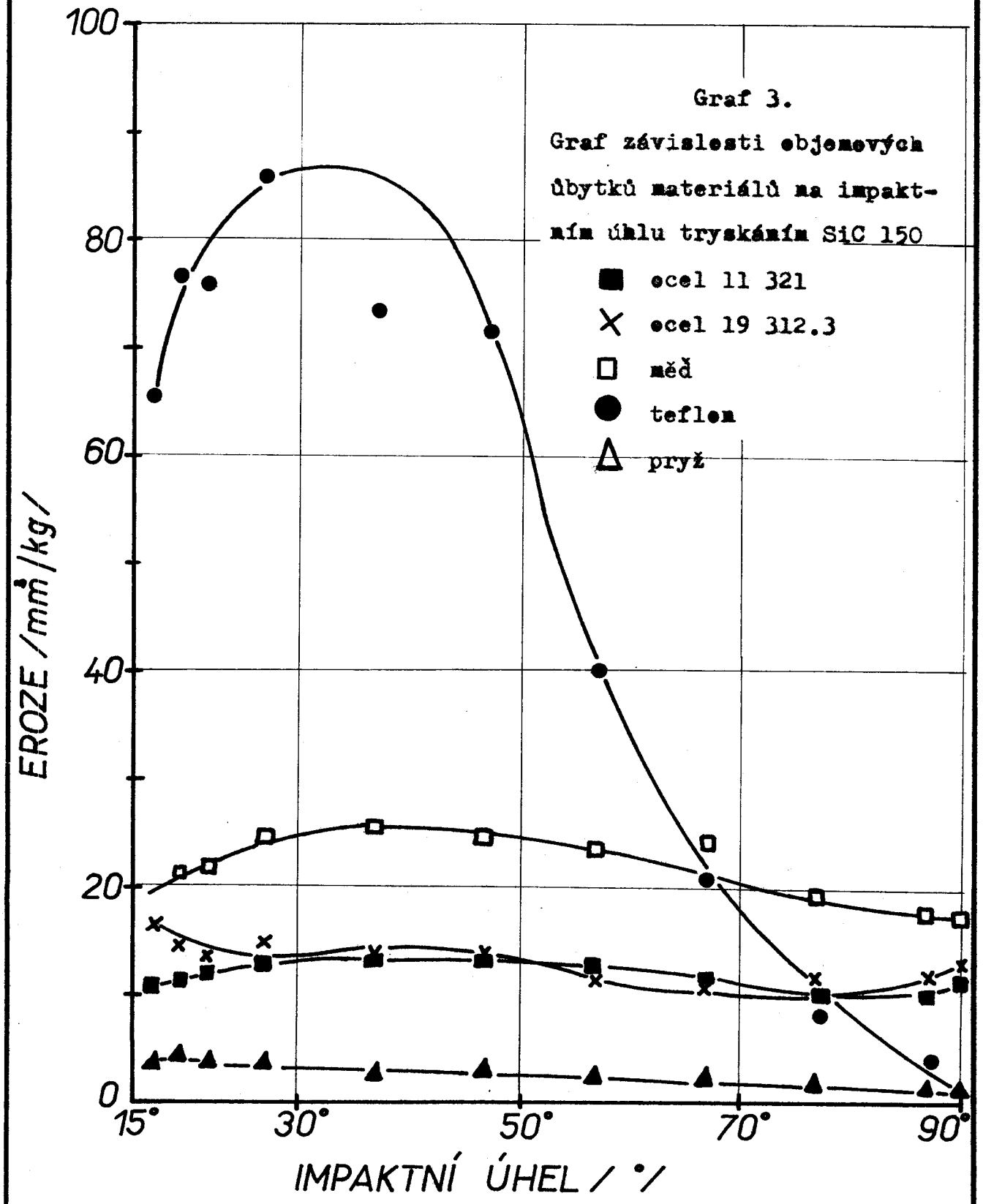
Grafy objemových úbytků se liší od grafů hmotových úbytků pouze kvantitativně. Tvar jednotlivých křivek zůstává zachován.

Závislost průběhu eroze na impaktním úhlu oceli 11 321, oceli 19 312.3, mědi, teflonu a pryže je znázorněna v grafu 3, zbývajících zkoumaných materiálů, tzn. tabulového skla a plexiskla, které měly podstatně větší objemové úbytky, v grafu 4.

Velikost objemového úbytku je závislá na měrné hmotnosti. Proto např. plexisklo, které má poměrně malé hmotové úbytky, se vykazuje velkými úbytky objemovými, neboť má velmi malou měrnou hmotnost.

7.4. Zhodnocení výsledků měření

Při porovnání grafů hmotového úběru lze dojít k několika důležitým závěrům. podle průběhu eroze lze totiž

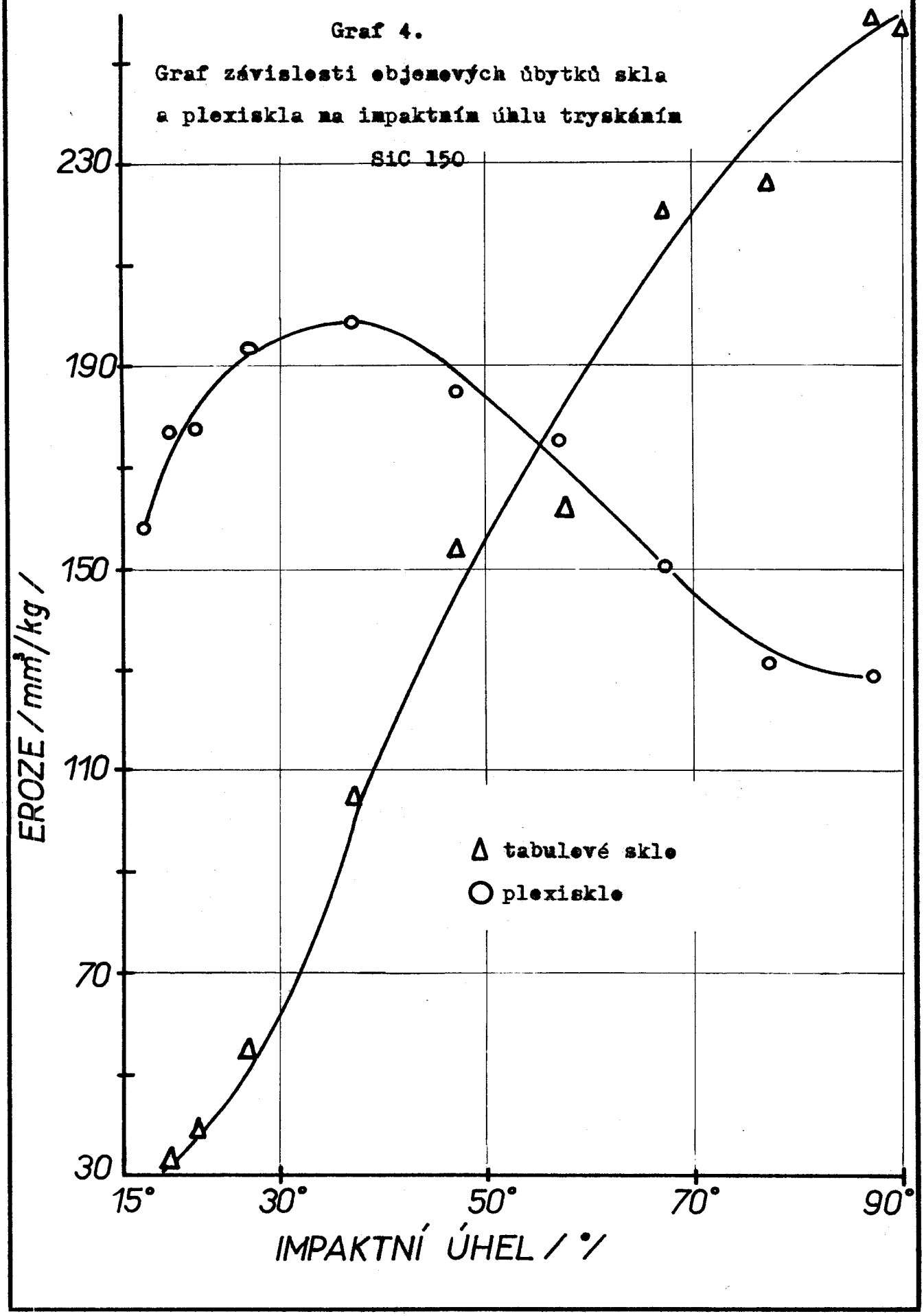


Graf 3.

Graf závislosti objemových úbytků materiálů na impaktním úhlu tryskáním SiC 150

Graf 4.

Graf závislosti objemových úbytků skla a plexiskla na impaktním úhlu tryskáním SiC 150



soudit na určité mechanické vlastnosti zkoumaných materiálů.

Je vidět, že materiály duktilní, jejichž představitely jsou v našem případě plexisklo, teflon i měď, mají největší úběr při impaktním úhlu 30° - 40°. Mimořádně odolným materiálem proti opotřebení je pryž, která má při všech impaktních úhlech pouze minimální úběr.

Naopak fragilní látky / sklo /, mají maximální úběr při kolmém otryskávání, tzn. v případě, kdy impaktní úhel je roven 90°. Sorbo s uhlíkem

Je vidět že všechny materiály mají plynulou křivku úběru v závislosti na úhlu dopadu. Křivka oceli 19 312.3, která je odlišná od ostatních křivek, může být ovlivněna tou skutečností, že povrchová vrstva tohoto materiálu může mít různé mechanické vlastnosti / 12 /. ?

Lze tedy dle průběhu eroze v závislosti na impaktním úhlu soudit na charakter materiálu, na jeho mechanické vlastnosti.

8. Konstrukce zařízení pro rázové otryskávání

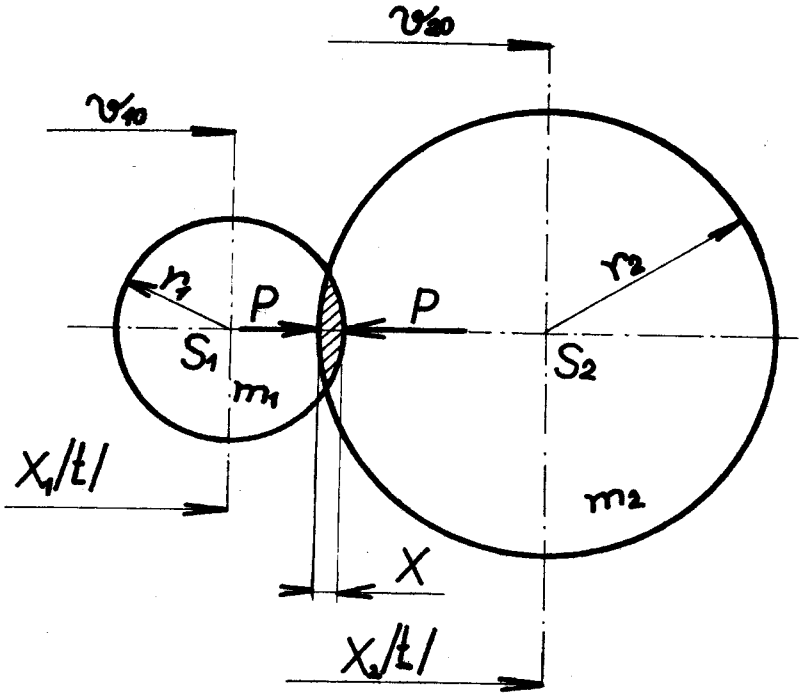
Při řešení rázu pevných látek, kdy vzniká mimo jiných jevů i luminiscence, se setkáváme neustále s požadavkem zjištění rychlosti tělesa, které dopadá na překážku. Kromě pevných látek je vhodné realisovat zařízení, které by umožňovalo atakovat vysokými rychlostmi překážku i kapalinou.

Úkolem konstrukční části této práce bylo tedy provést konstrukci vhodného zařízení, kterým by se daly uskutečnit rychlostní zkoušky projektilu řádově 10^3 m/s, a to jak pro pevné látky, tak i pro kapaliny, s možností eventuálního snímání na film.

8.1. Hertzova teorie rázu

Elementární teorie rázu umožňuje sice určit kinematický stav tělesa po skončeném rázu, není však možné učinit s její pomocí jakékoliv závěry o velikosti sil a jejich závislosti na čase / 9 /. Hertz se jako první pokusil alespoň přibližně vyšetřit silové poměry vznikající v místě styku těles. Vyšel ze Saint-Venantova principu a předpokládal, že deformace při rázu jsou statické a rychle mizí se vzdáleností od místa styku těles. Předpokládal, že doba trvání rázu je alespoň o řád delší než doba, kterou potřebují vlny k tomu, aby proběhly tělesem a vrátily se na místo kontaktu těles. Z tohoto předpokladu vyplývá, že energie

vlnění je jen malým zlomkem energie akumulované při statickém deformování v okolí místa styku. Tento předpoklad je skutečně splněn u rázu dvou koulí nebo při nárazu koule



Obrázek 4 - Styk koulí při rázu

na tuhý blok s rovným povrchem.

Hertz odvodil vztah mezi přítlačnou silou P a přiblížením středů koulí x :

$$x = \alpha \cdot P^{2/3}$$

kde koeficient je:

$$\alpha = \sqrt[3]{\left[\frac{9}{64} \Big/ \frac{r_1 + r_2}{r_1\, r_2} \quad \frac{1-\mu_1}{G_1} + \frac{1-\mu_2}{G_2} \Big/^{2}\right]} \; ;$$

G_1, G_2 - moduly pružnosti materiálu ve smyku N/m^2

μ_1, μ_2 - Poissonova čísla

r_1, r_2 - poloměry stykových koulí

Maximální síla je :

$$P_{max} = \left[\frac{5}{4} \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{/m_1 + m_2/\alpha} \Big/ v_{10} - v_{20} \Big/^2 \right]^{3/5},$$

m_1, m_2 - hmoty koulí /N/

v_{10}, v_{20} - rychlosti koulí při styku

Maximální měrný tlak, který při rázu vznikne, je dán vztahem:

$$p_{max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P_{max}}{2\pi a^2} ;$$

kde a je maximální poloměr kruhové stykové plošky, který je dán vzorcem:

$$a = \sqrt[3]{\left[\frac{3}{8} \cdot \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \Big/ \frac{1 - \mu_1}{G_1} + \frac{1 - \mu_2}{G_2} \Big/ \cdot P_{max} \right]} .$$

Pro případ nárazu koule na rovinnou stěnu předpokládáme, že $m_2 \to \infty$, $r_2 \to \infty$ a $v_{20} = 0$.

$$\alpha = \sqrt[3]{\left[\frac{9}{64} \cdot \frac{1}{r_1} \Big/ \frac{1 - \mu_1}{G_1} + \frac{1 - \mu_2}{G_2} \Big/^2 \right]} ;$$

$$P_{max} = \left(\frac{5}{4} \cdot \frac{1}{m_1 \cdot \alpha} \cdot v_{10}^2 \right)^{3/5} ;$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{8} \cdot \frac{1}{r_1} \left(\frac{1 - \mu_1}{G_1} + \frac{1 - \mu_2}{G_2} \right) \cdot P_{max}} ;$$

$$p_{max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P_{max}}{2\pi a^2} .$$

V našem případě známe tyto hodnoty:

$G_1, G_2 = 8{,}05 \cdot 10^{10}\ N/m^2$,	$m_2 \rightarrow \infty$
$\mu_1, \mu_2 = 0{,}30$	$r_2 \rightarrow \infty$
$v_{10} \doteq 1000\ m/s$	$v_{20} = 0$
$m_1 = 0{,}01\ N$	$r_1 = 0{,}002\ m$

Potom dostáváme :

$$\alpha = \sqrt[3]{\left[\frac{9}{64} \cdot \frac{1}{0{,}002} \cdot \left(\frac{1 - 0{,}30}{8{,}05 \cdot 10^{10}} + \frac{1 - 0{,}30}{8{,}05 \cdot 10^{10}} \right)^2 \right]} =$$

$$= \underline{1{,}32 \cdot 10^{-7}}$$

$$P_{max} = \left(\frac{5}{4} \cdot \frac{1}{0{,}01 \cdot 1{,}32 \cdot 10^{-7}} \cdot 1000^2 \right)^{3/5} =$$

$$= \underline{1{,}145 \cdot 10^9\ kp}$$

$$a = \sqrt[3]{\left[\frac{3}{8} \cdot \frac{1}{0{,}002} \Big/ \frac{1 - 0{,}30}{8{,}05 \cdot 10^{10}} + \frac{1 - 0{,}30}{8{,}05 \cdot 10^{10}} \Big/ \cdot 1{,}145 \cdot 10^{9}\right]} = \underline{3{,}34}$$

a maximální měrný tlak při styku koule s rovinnou stěnou je v našem případě

$$p_{max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1.145 \cdot 10^{9}}{2\pi \cdot 3{,}34^{2}} = \underline{4{,}9 \cdot 10^{7} \ N/m^{2}}$$

Tyto hodnoty vypočtené z Hertzovy teorie jsou pouze pro ideální teoretické případy, neuvažující např. mez pevnosti materiálu ap. Slouží pouze k informativnímu zjištění jednotlivých parametrů při styku dvou těles. Ve skutečnosti jsou tyto hodnoty nižší.

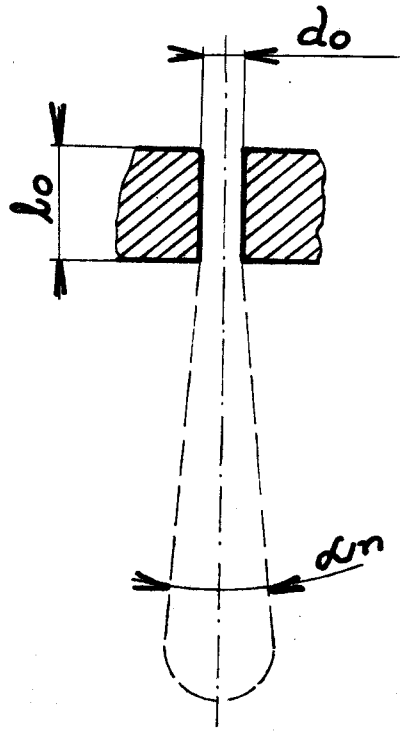
8.2. Otryskávání kapalinami nebo pevnými látkami

Jak již bylo řečeno, uváděné zařízení nám má pomoci objasnit pochody, které vznikají při nárazu, respektive vniknutí abrazivního materiálu do materiálu základního. Vystřelený projektil má reprezentovat jednu částici abrazivního prášku.

nikde se nehovoří o

V případě, že na konci reduktoru neumístíme zkušební projektil, můžeme zařízení používat pro otryskávání pomocí kapalin. Kapalina, na kterou působí tlak, vychází z ústí reduktoru značnou rychlostí a rozprašuje se. Průměr

rozprášených kapiček je závislý na tlaku, který působí na kapalinu, v průměru to bývá 0,01 až 0,02 mm. Paprsek kapaliny vystupující z rozstřikovacího otvoru se rozprášením rozšiřuje a má proto obvykle přibližný tvar kužele končící polokoulí. Vrcholový úhel kužele je závislý na



Obrázek 5 - Průchod kapaliny rozstřikovacím otvorem d_o - průměr rozstřikovacího otvoru; l_o - délka rozstřikovacího otvoru; α_n - úhel paprsku kapaliny

hustotě prostředí, vlastnostech kapaliny a na poměrné délce vstřikovacího otvoru /obrázek 5/. Je-li např. délka l_o 2 až 4 x delší než průměr d_o, pak je úhel paprsku α_n asi 15° až 18°.

8.3. Princip činnosti zařízení

Celé zařízení slouží k tomu, abychom docílili co možná nejvyšší rychlosti náboje na konci reduktoru, která by se měla pohybovat kolem 1000 m/s. K získání takovéto rychlosti vycházíme ze základního zdroje, kterým je v našem případě vzduchovka SLAVIA 630 standart, která má v ústí hlavně rychlost náboje 170 m/s. Po vystřelení působí náboj na pístek reduktoru a ten zapříčiní tlak kapaliny v reduktoru. Vlastní reduktor je řešen tak, aby se dalo využít rovnice spojitosti $c_1 . S_1 = c_2 . S_2$. Máme-li průměry otvorů redukční dutiny 10 mm a 2 mm, vychází konečná teoretická rychlost 4250 m/s. Vlivem ztrát se tato rychlost nepoměrně zmenší. Na konci reduktoru je volně uložen projektil, který vystřelí na zkušební vzorek. Na vzorku můžeme sledovat velikost deformace, její tvar, pomocí filmu i průběh deformace i vedlejší účinky / např. luminiscenci/. Zajímat nás může i tvar zdeformovaného projektilu.

Schema zařízení je na obrázku 6.

8.4. Konstrukční řešení zařízení

Celý tryskač se skládá ze skříně / pos.2/, na kterou jsou našroubovány matice / pos.3, 4/. Pomocí matic ustavujeme vložky, z nichž jedna slouží jako vodící část vzduchovky /pos.6/, druhá / pos.5 / k ustavení zkušebního vzorku a tubusu.

Vlastní skříň tryskače se skládá ze dvou komor, které jsou spojeny reduktorem /pos.7/. Dutina reduktoru, ve které je kapalina, je zakončena pístkem /pos.8/ a nýtkem /pos.14/, který již přímo působí na zkušební vzorek. Přípravek, který slouží k upevnění zkušebního vzorku, je konstruován tak, že tloušťka vzorku se může pohybovat od několika deseti milimetru až do 15 mm, průměr vzorku od 16 mm do 30 mm. Lze použít i čtvercové vzorky. Upevňovací zařízení se skládá z vodící tyče /pos.10/ a úpinky /pos.11/, na kterou je připevněno pružné perko. Posice 9 nám představuje tubus, do kterého vkládáme film.

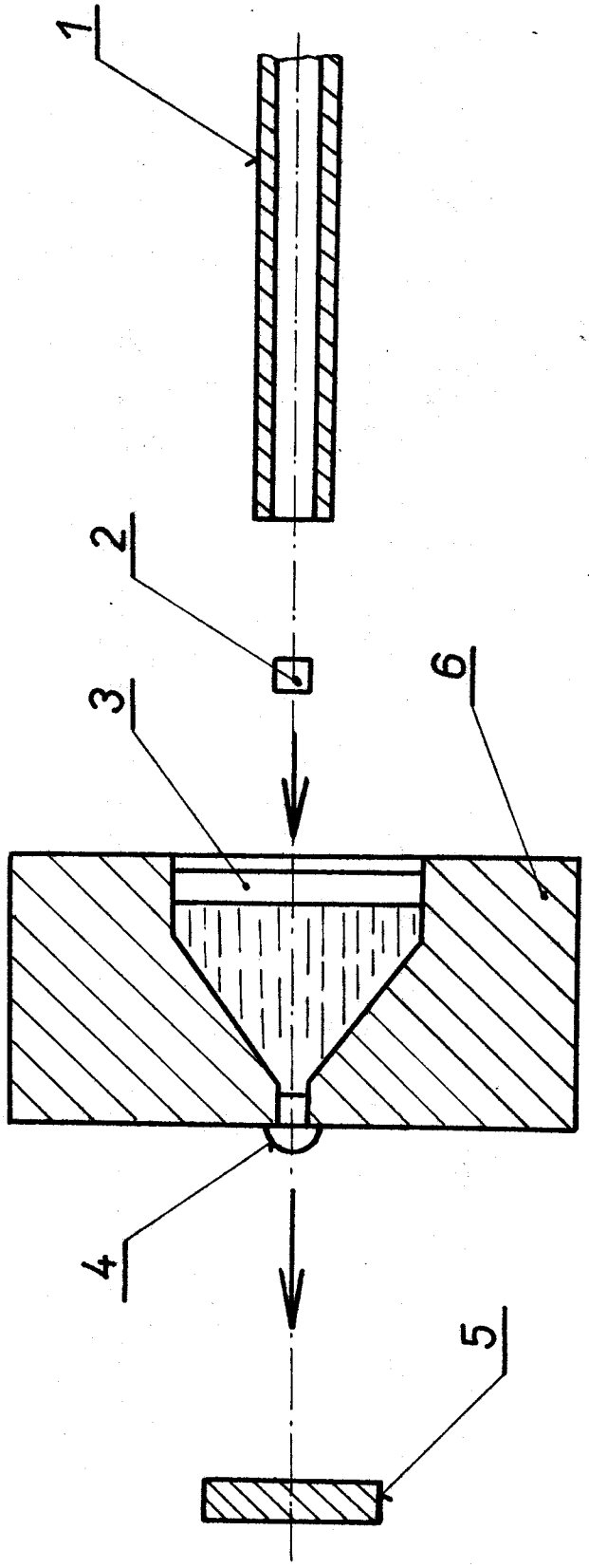
Aby nedošlo vlivem silného nárazu k vypadnutí reduktoru, který je uložen s určitou vůlí , je zajištěn šroubem / pos.16/ a úpinkou /pos.13/. Ve skříni je dále umístěn šroub /pos.15/, jehož vyšroubováním dostaneme odvzdušňovací otvor, který by byl třeba v případě, že bychom místo vzduchovky použili malorážky.

Celé zařízení je doplněno prizmatem, které slouží k souosému ustavení vzduchovky vzhledem k vlastnímu tryskacímu zařízení.

Pozn. Popsané posice jsou v příloze 1.

8.5. Konstrukční řešení reduktoru

Při působení pístku na kapalinu dochází k nestacionárnímu proudění, vzniká hydraulický ráz /7/. Bezprostředně



Obrázek 6 - Schéma zařízení pro rázové otryskávání

1 - vzduchovka; 2 - střela ráže 4,5 mm; 3 - pístek; 4 - projektil;

5 - zkušební vzorek; 6 - reduktor

po nárazu / prvním působení tlaku na kapalinu/ pístku na kapalinu se uvede kapalina do pohybu. Ta začne působit na náboj, kde se pohyb změní v pružné stlačení sloupce kapaliny, které způsobí vystřelení. Stlačená kapalina přitom působí jako stlačené pružné péro a začne se odpružovat. Částice kapaliny se vlivem setrvačnosti při zpětném pohybu nezastaví v rovnovážné poloze, ale pohybují se dál, čímž zpětně působí na pístek. Změna tlaku je provázena jí odpovídající změnou rychlosti. Těmito pochody vznikají značné ztráty, jejichž výpočet na základě teorie rázu je velmi složitý. Je zjištěno, že čím spojitější je tvar reduktoru, tím jsou ztráty nižší.

Proto pro značné zjednodušení vycházíme v našem případě z rovnice spojitosti a z ní vypočtenou výstupní rychlost opravujeme o koeficient, který zahrnuje všechny ztráty /máme na mysli např. odpor vzduchu při letu projektilu, pružení materiálu, tření pístku o stěny reduktoru, ap./.

$$c_{2\cdot skut} = c_{2\cdot teor} \cdot k$$

Pístek, na který působí náboj vystřelený ze vzduchovky, je vyrobený z tvárného materiálu / silon/, aby nedošlo k prudkému odražení náboje, čímž by se snížil účinek působení na kapalinu.

8.6. Zhodnocení navržené konstrukce

Při vlastní konstrukci zařízení se vycházelo z několika návrhů. Nakonec bylo přihlédnuto k maximální jednoduchosti a hlavně levnosti. Proto je vlastní tryskání zdlouhavé, neboť se musí nejprve odšroubovat obě matice, vytáhnout vzduchovka, nabít a vložit zpátky do přípravku,opět zašroubovat matice. Místo závitových matic by se mohly použít např. matice s bajonetovým uzávěrem, ovšem jejich výroba je komplikovanější a dražší.

Při konstrukci zařízení bylo přihlédnuto k tomu, že by se v budoucnosti mohlo použít k docílení vyšších rychlostí místo vzduchovky malorážky. proto je ve skříni odvzdušňovací otvor. Rovněž průměr otvoru matice /pos.4/ je navržen tak, aby se tato dala použít při práci s malorážkou.

Po posouzení všech požadavků se zdá byt toto řešení zařízení pro otryskávání rázem vyhovující požadavkům na prototyp, teprve po jeho vyzkoušení budeme moci zjistit skutečné parametry.

9. Zhodnocení a závěr

Při studiu eroze a abrazivity je třeba uskutečnit pokusy za různých podmínek tryskání a studovat vliv fyzikálních parametrů různých prášků a úběr materiálů v závislosti na rychlosti částic, dopadajících na povrch pod různými úhly.

Ukazuje se, že důležitou charakteristikou materiálu a prášku při otryskávání je závislost eroze na úhlu dopadu částic / impaktním úhlu /. Tyto závislosti jsou odlišné pro křehké, plastické a elastické materiály.

Předmětem studia v této práci bylo právě zjistit závislost eroze na impaktním úhlu pro různé technicky významné materiály abrazivním práškem SiC 150.

V budoucnosti je třeba se zaměřit na další faktory, které ovlivňují průběh tryskání, jako je např. velikost zrn abrazivního prášku, opotřebení prášku, poměr nosného prostředí a prášku, atd.

Zařízením, které bylo v této práci navrženo, by se daly realizovat měření kavitační, problémy eroze, které jsou důležité při provozu vodních turbín, leteckých motorů, rázovém namáhání materiálů, atd.

Závěrem bych chtěl poděkovat RNDr. Lubomíru Sodomkovi CSc za cenné rady a připomínky, Aleši Kleprlíkovi za všestrannou pomoc.

L I T E R A T U R A

/ 1 / Sodomka, L. : Eroze materiálu proudem částic, připraveno k publikaci

/ 2 / Jetleb, P. : Studium opracování materiálů tryskáním prášků, DP 1971, VŠST Liberec

/ 3 / Plný, V. : Abrazivita prášků karbidu křemíku, DP 1973, VŠST Liberec

/ 4 / Brunner, J. : Abrazivita prášků korundu, DP 1973, VŠST Liberec

/ 5 / ČSN 01 5050 : Opotřebení materiálu

/ 6 / Černý, J. : Brusivo a brusné nástroje, SNTL Praha 1967

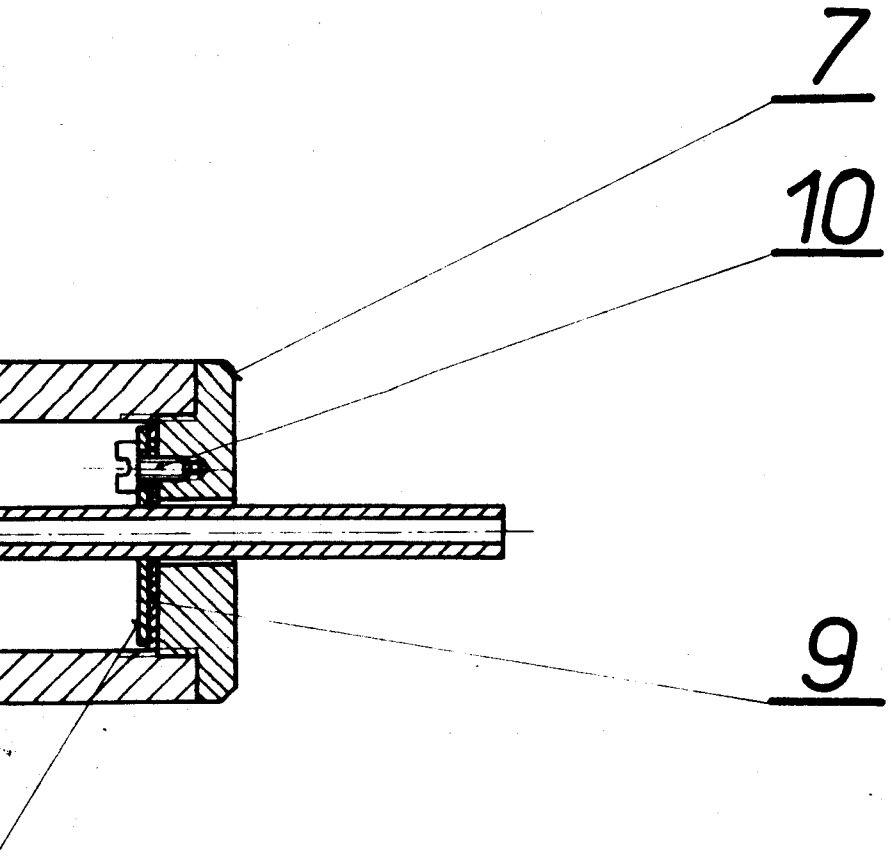
/ 7 / Haimel, K. : Hydraulický ráz ve vodovodních a průmyslových potrubích, SNTL Praha 1963

/ 8 / Brechta, R. a kol. : Šíření napěťových vln a rázy v tělesech, Academica Praha 1972

/ 9 / Koštál, J. : Spalovací motory, SNTL Praha 1954

/ 10 / Černoch, S. : Strojně technická příručka, SNTL Praha 1968

/ 11 / Vrzal, B. : Strojnické tabulky, SNTL Praha 1972



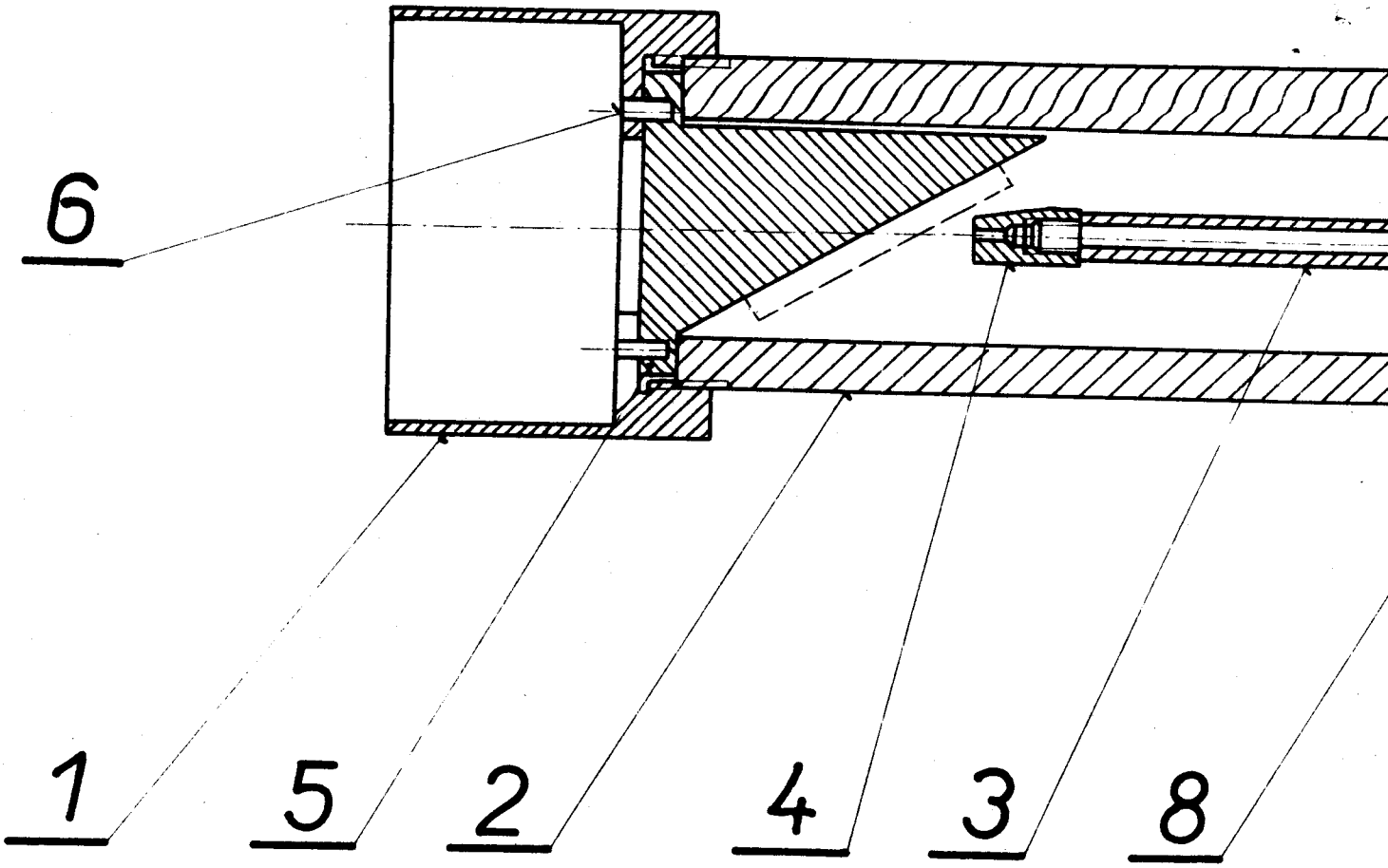
3	ŠROUB M2×5	ČSN021131							10
1	TĚSNĚNÍ	ČSN022038	PRYŽ038						9
1	VLOŽKA	ČSN425301	11343					DP-02-08	8
1	MATICE	ČSN42 5510	11 370					DP-02-07	7
2	KOLÍK	ČSN42 6403	11340					DP-02-01	6
10	USTAV. PŘÍPR.	ČSN425510	11 340					DP-02-05	5
20	TRYSKA	ČSN42 5524	19 220.4	19220.1				DP-02-04	4
1	DRŽÁK	ČSN42 5715	11 350					DP-02-03	3
1	TĚLESO	ČSN644422	TEXTIT E					DP-02-02	2
1	HLAVA	ČSN425510.1	11 370					DP-02-01	1

BÖNISCH

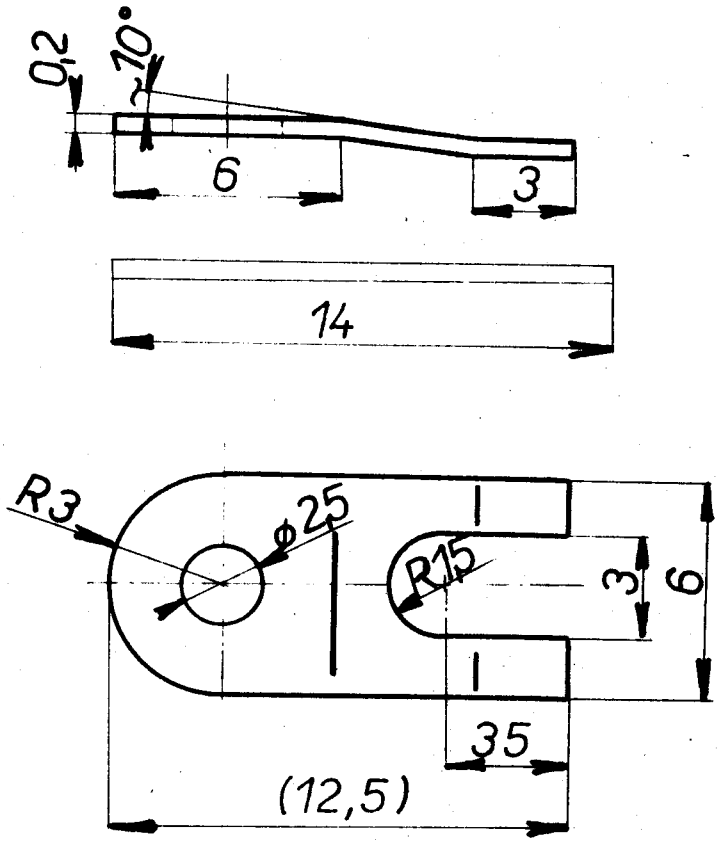
1:1

28. IV. 74

TRYSKAČ DP-02-00


6
1
5
2
4
3
8

6,3 / 1,6 /



ZUŠLECHTĚNO NA 115 - 135 kp/mm²

2	PLECH 0,2×15×7	ČSN 425303	13 260.7	13 260.2			DP-01-0012
2	TYČ ø11×10	ČSN 426510	11500				DP-01-0011

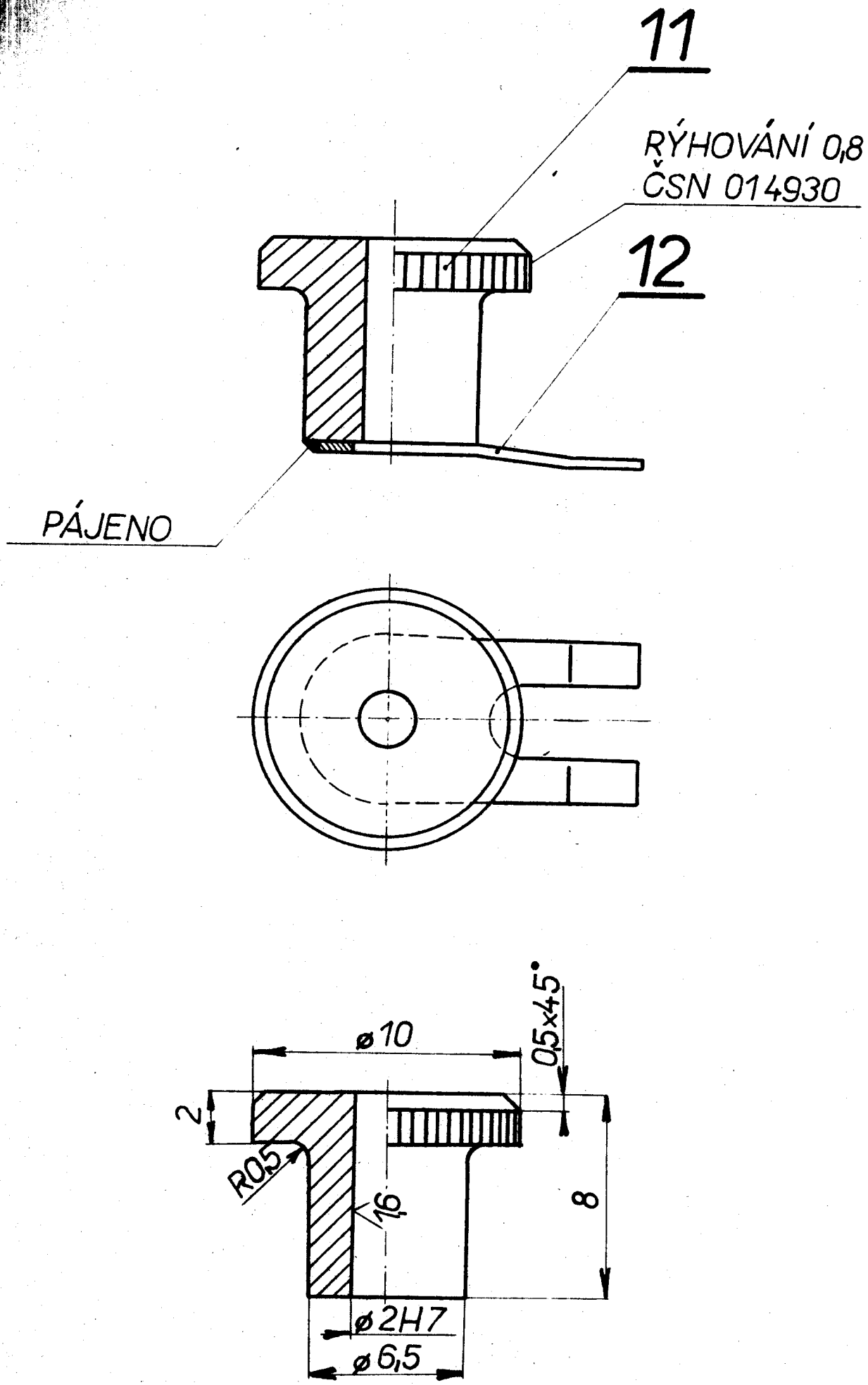
BÖHSCH

5:1

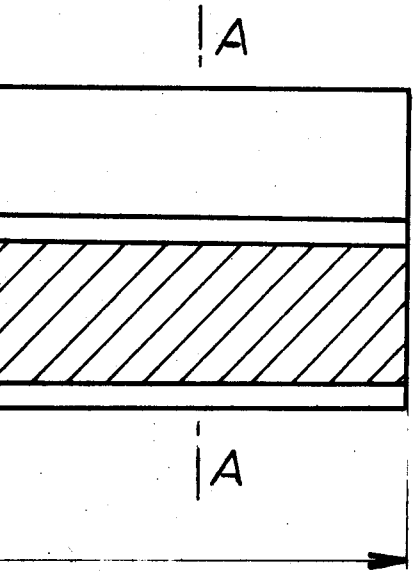
27.3.74

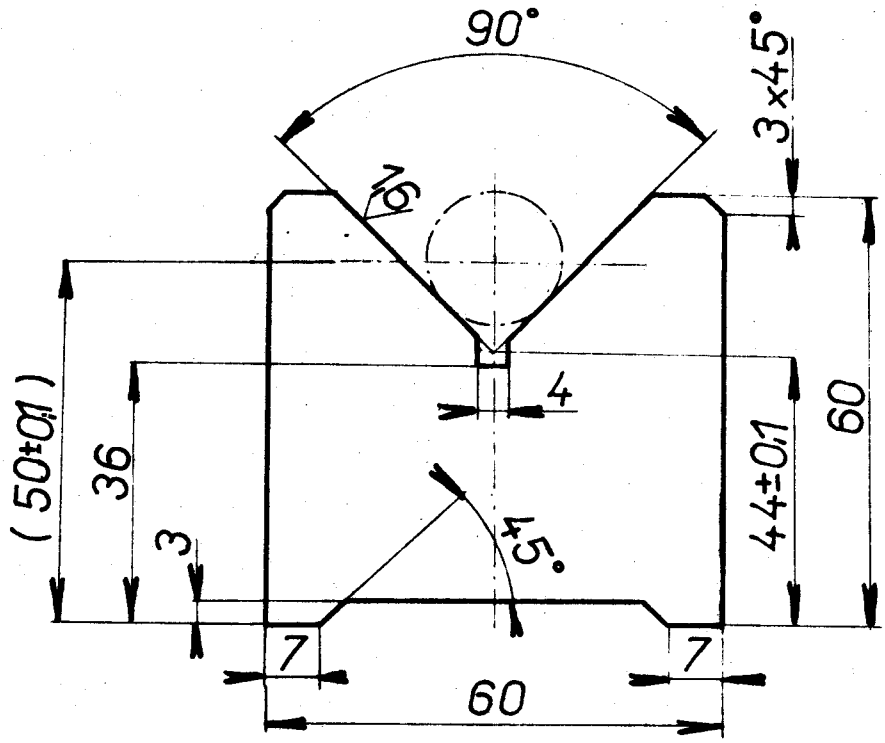
ÚPINKA

DP-01-11


11
RÝHOVÁNÍ 0,8
ČSN 014930
12
PÁJENO
ø10
0,5x45°
2
R0,5
1,6
8
ø2H7
ø6,5

63 / 16 /





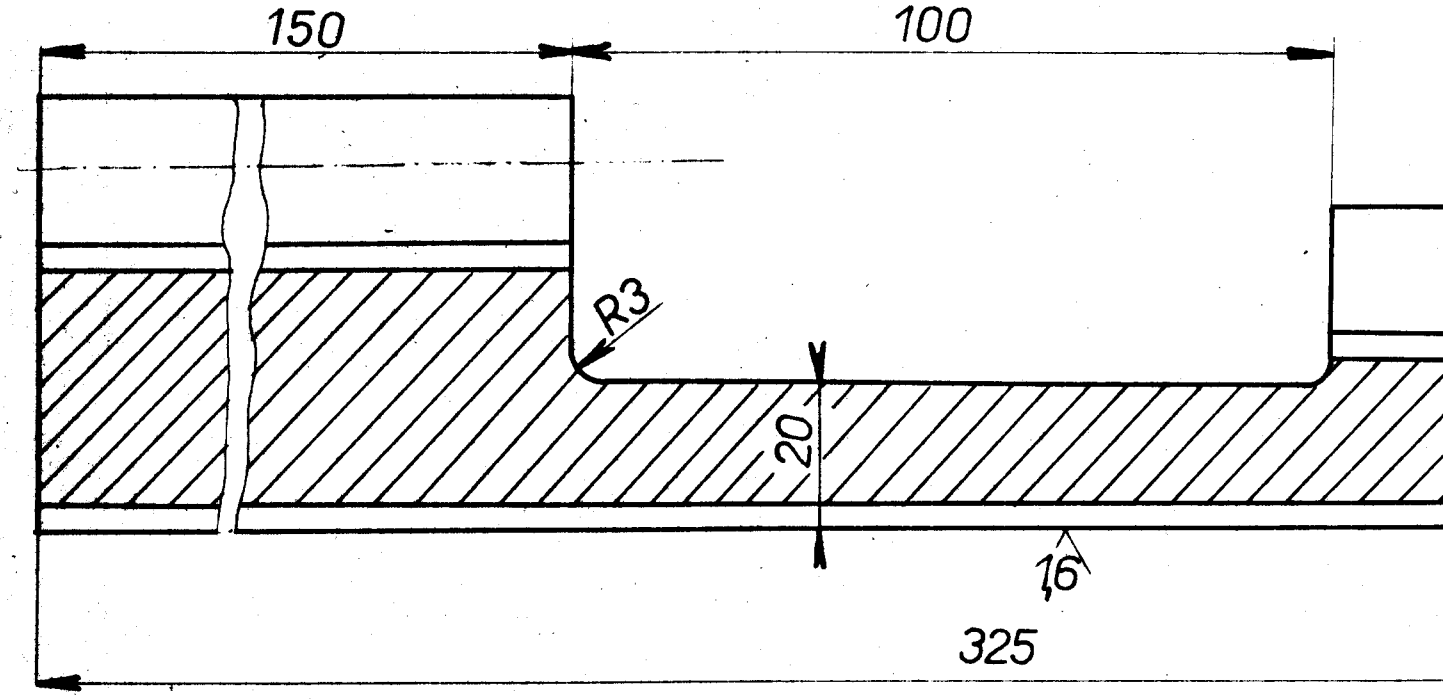
1 TYČ 60×330 ČSN426510 11 500.0 DP-01-00 1

BÖHISCH

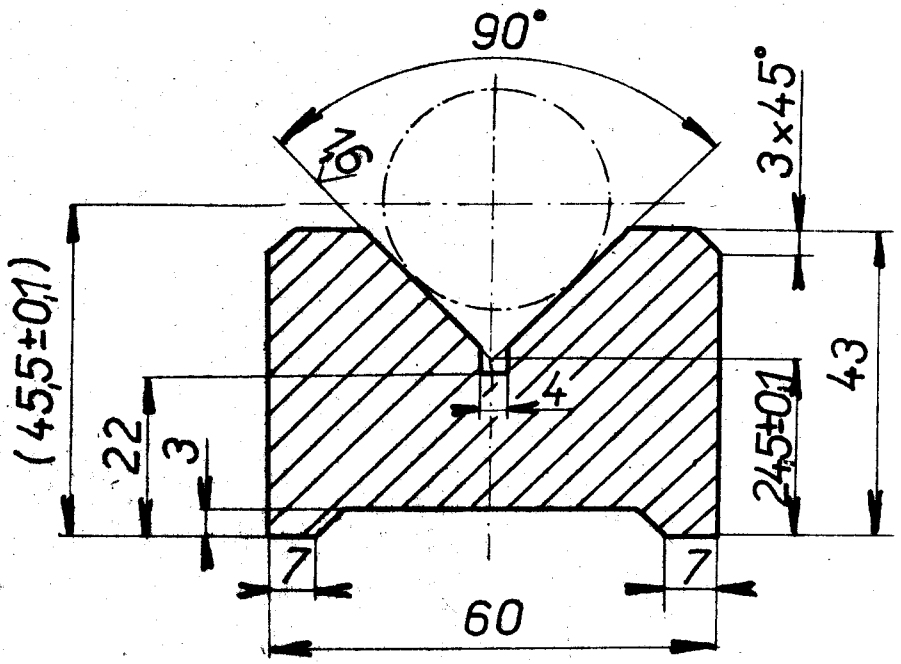
1:1

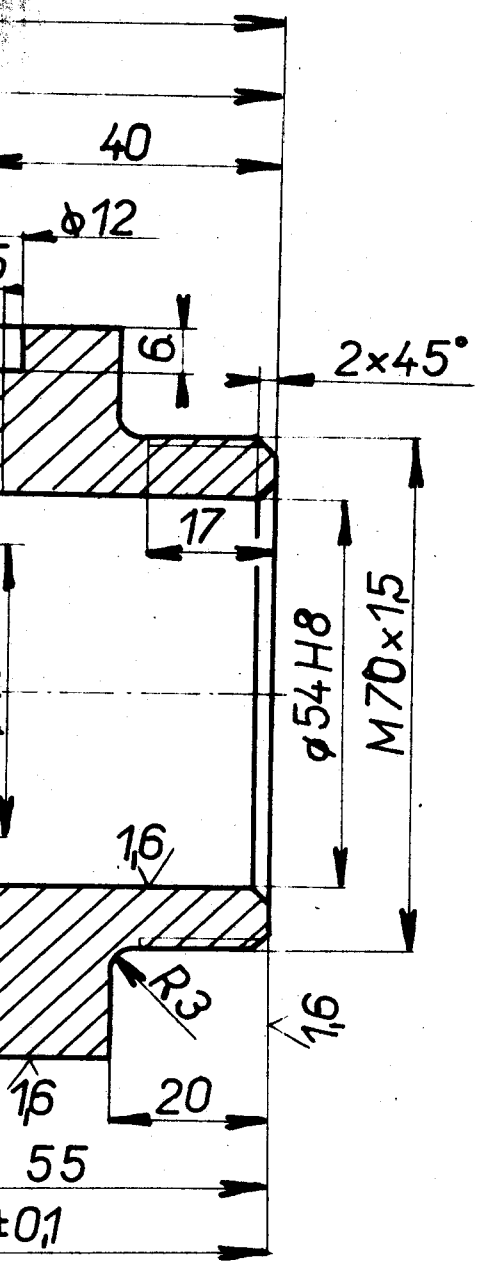
27.3.74

PRIZMA DP-01-01



ŘEZ A-A





3,2 / 0,8 , 1,6 /

1 TYČ 100×130 ČSN426520 11500.0

DP-01-00 2

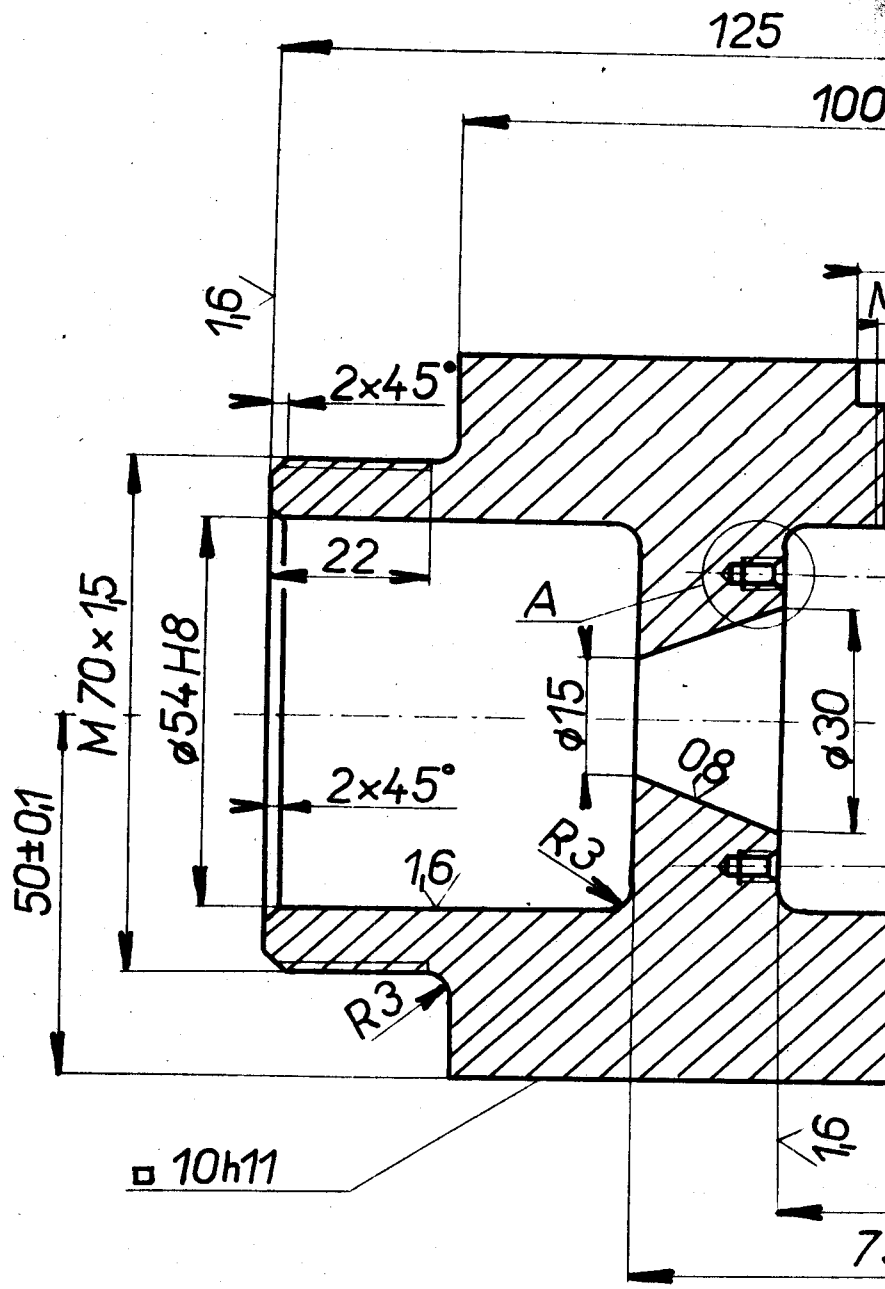
Bořisch

1:1

27.3.74

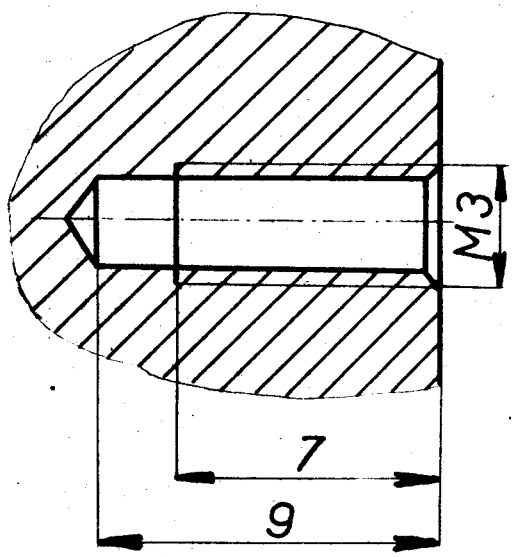
SKŘÍŇ

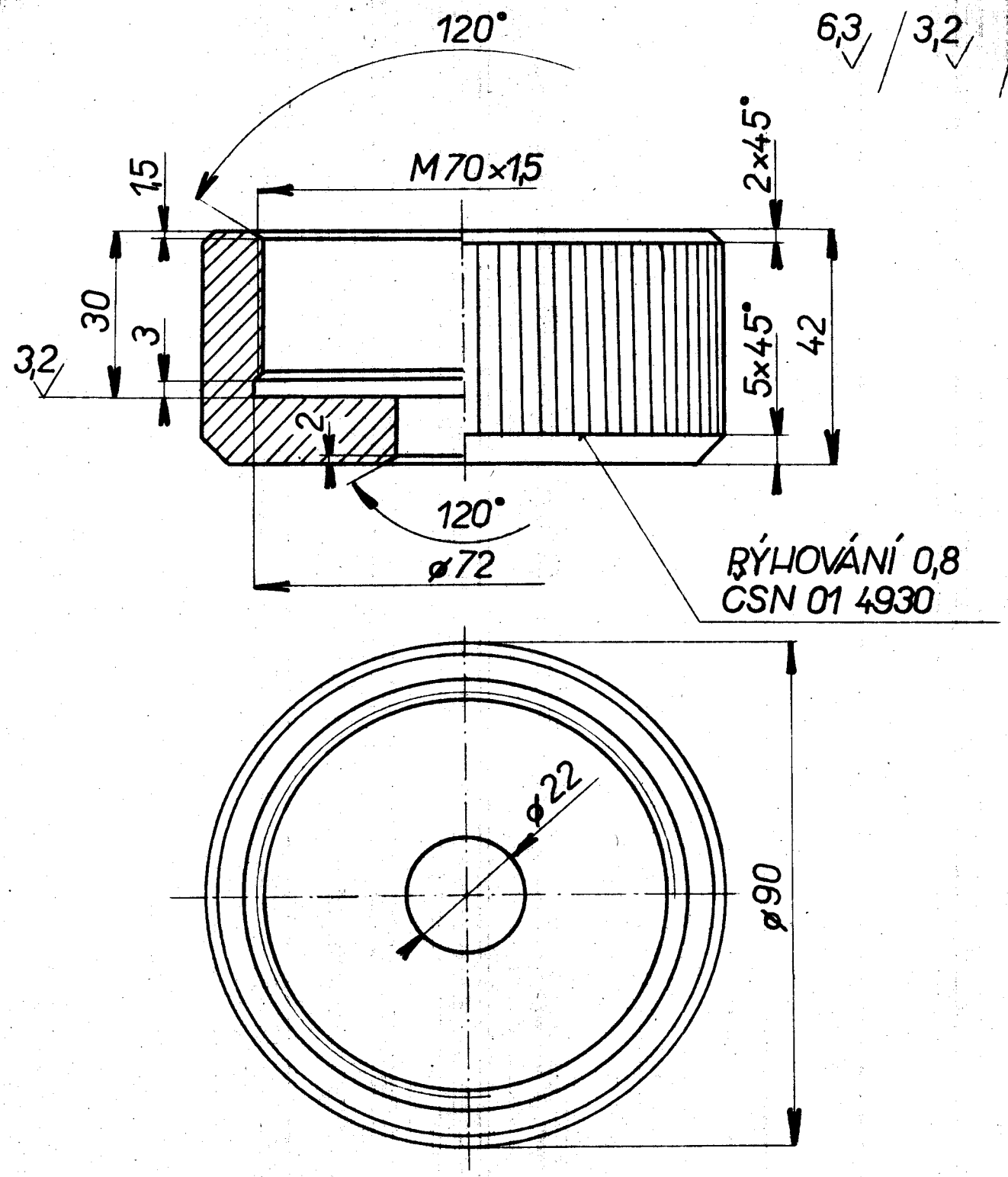
DP-01-02


125
100
1,6
2×45°
22
A
M 70×1,5
ø54H8
ø15
ø30
0,8
2×45°
R3
1,6
50±0,1
R3
□ 10h11
1,6

DETAIL A

M 5:1


M3
7
9



1 TYČ ø95×45 ČSN425510 11500 DP-01-00 4

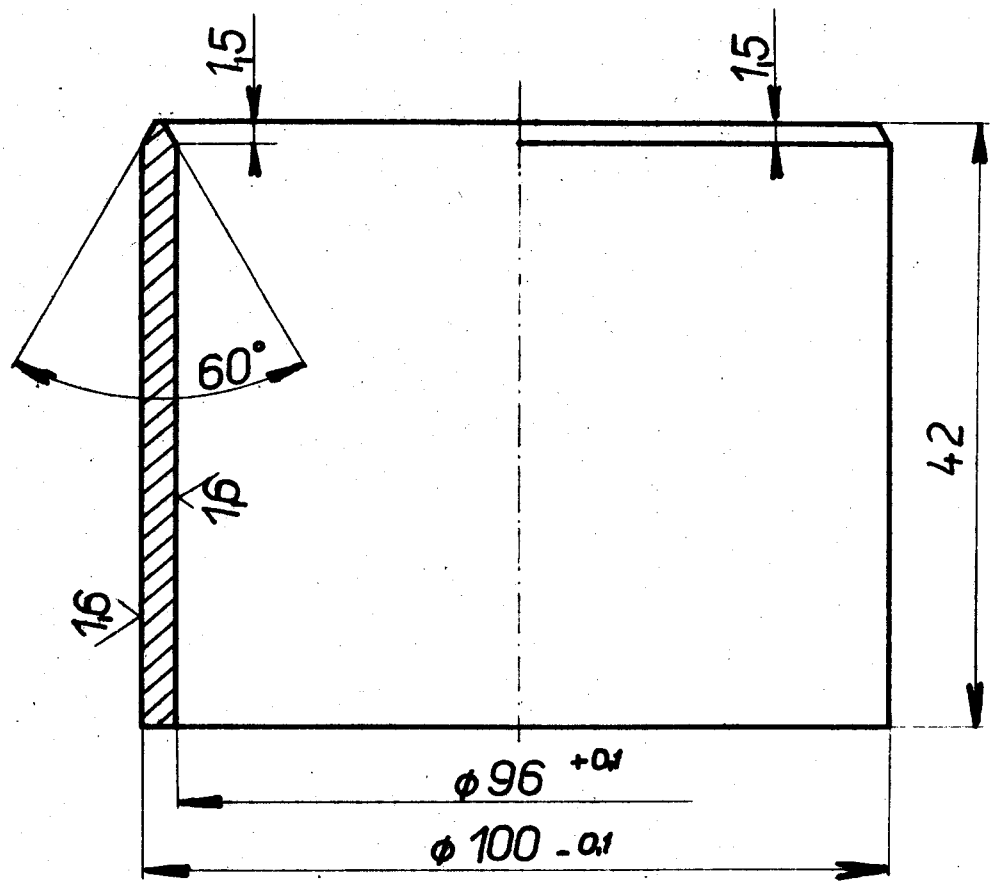
BÓNISCH

1:1

27.3.74

MATICE DP-01-04

3,2 / 1,6 /



1 ø102×95-45 ČSN425715 11350

DP-01-00 9

Poznámka

Měřítko 2:1

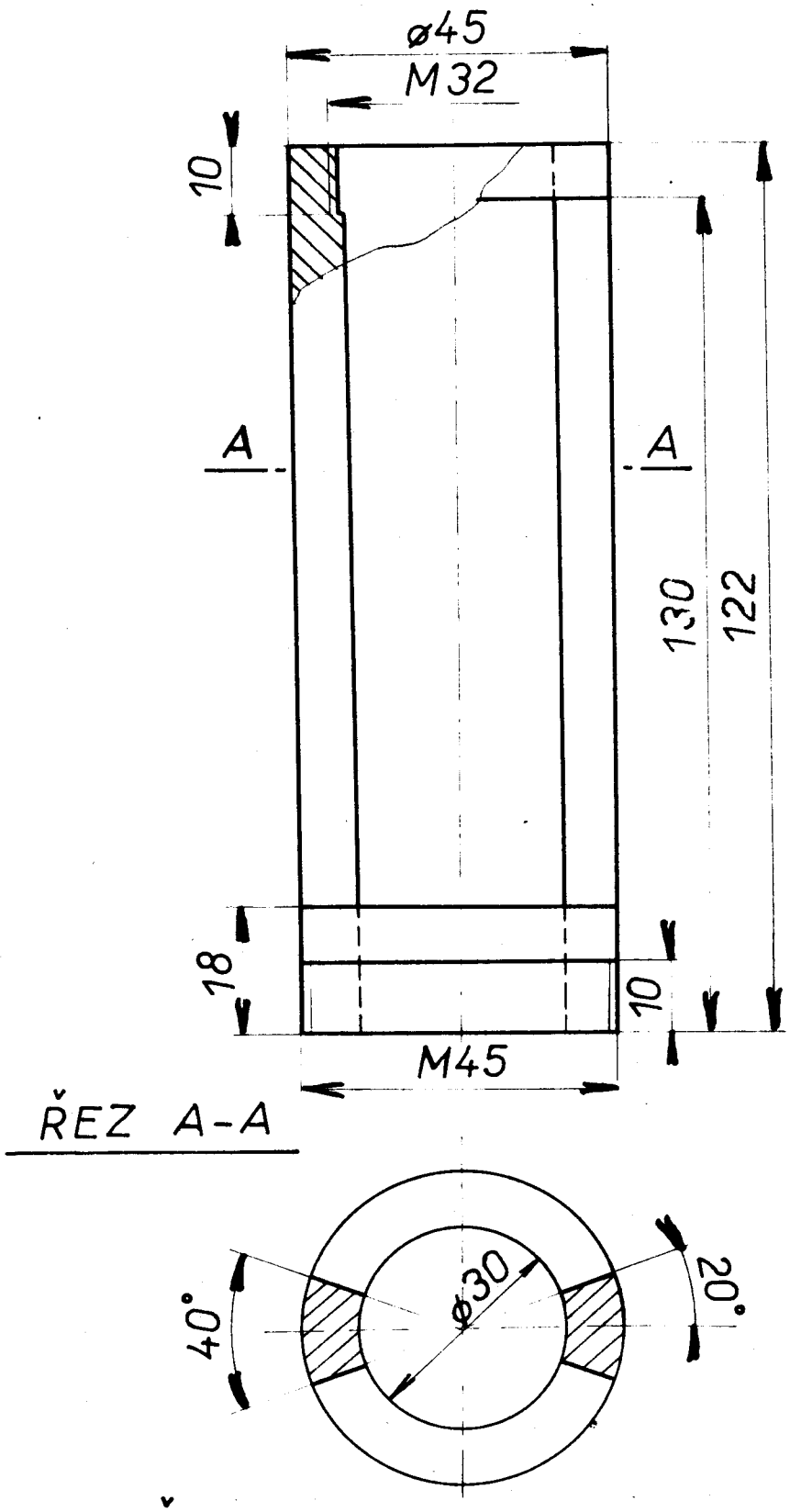
Kresl. BÖHLSCH

27.3.74

TRUBKA

DP-01-09

3,2



1	TRUBKA ø45x7,5-132	ČSN644422TEXTIT E	DP-02-00 2

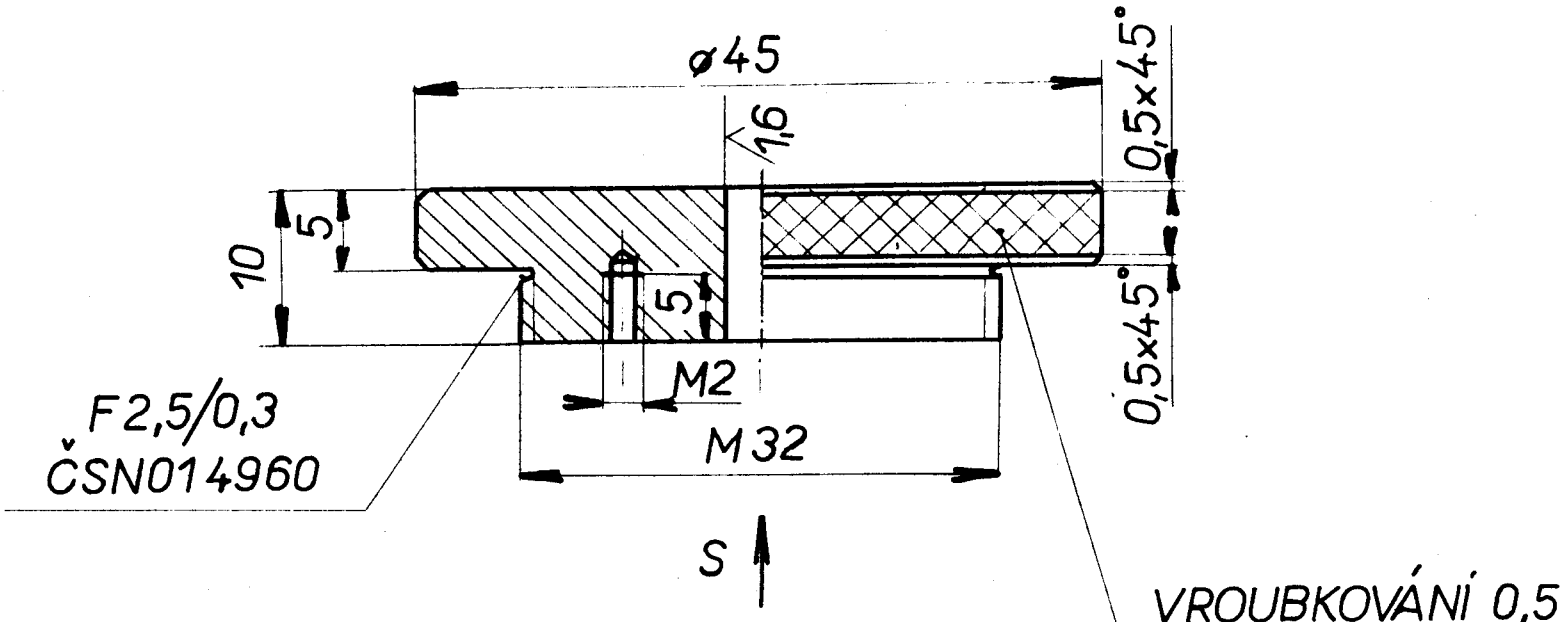
BÖNISCH

1:1

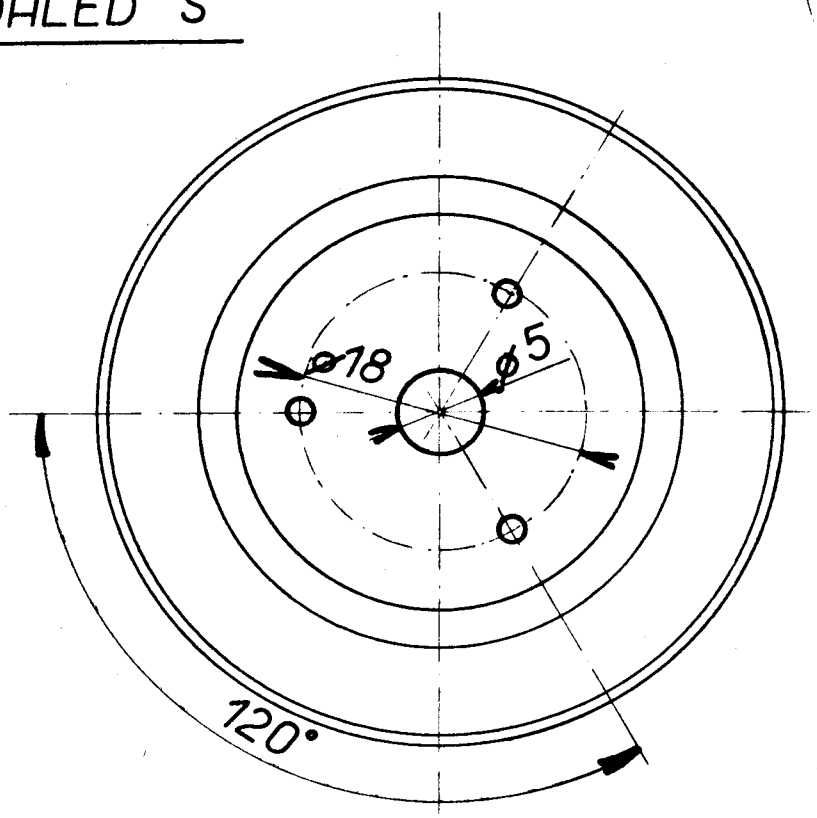
28.IV.74

TĚLESO DP-02-02

3,2 / 1,6



POHLED S



1 TYČ ø45×12 ČSN425510 11370 DP-02-00 7

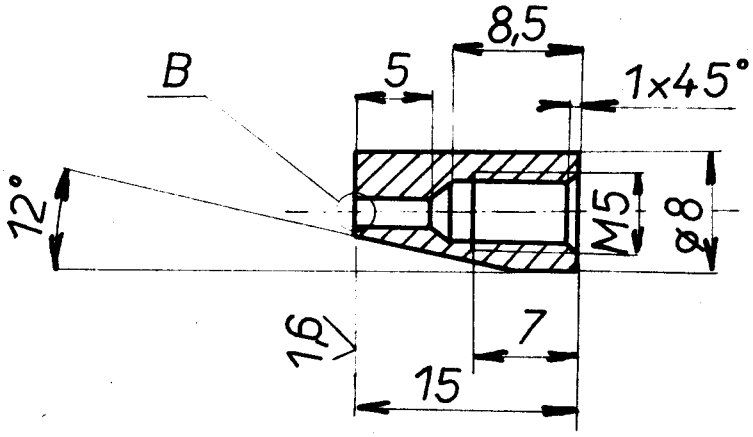
BÖNISCH

2:1

28.IV.74

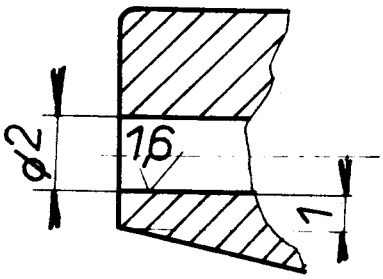
MATICE DP-02-07

3,2 1,6



DETAIL B

M 5:1



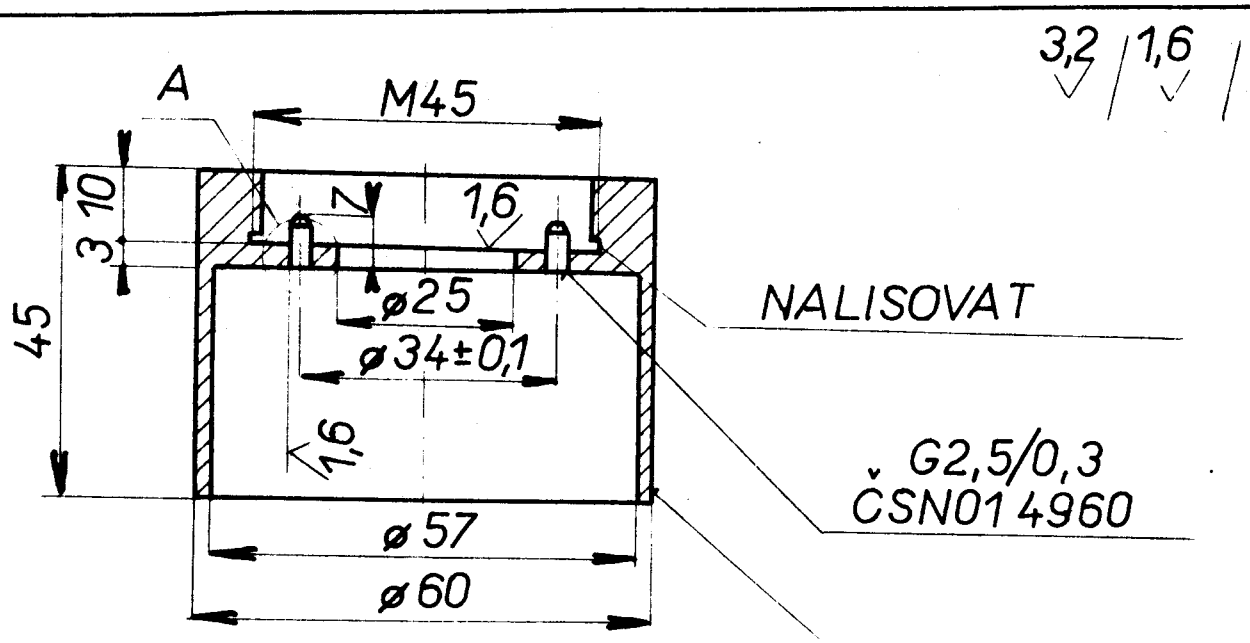
20 TYČ ø8 × 17 ČSN42552419220.4 19220.1 DP-02-00 4

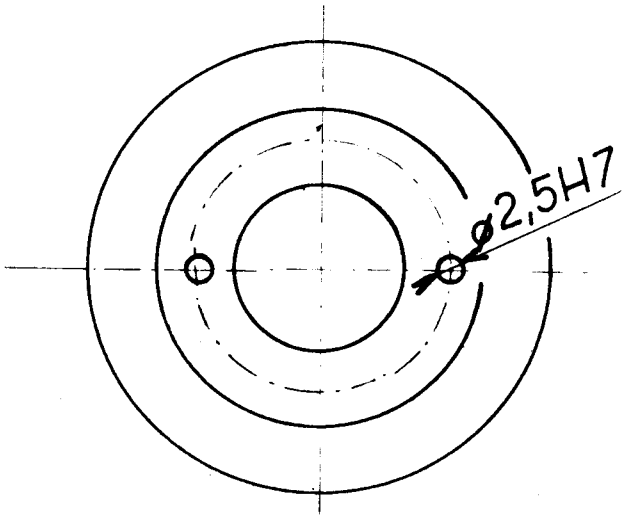
BÖNISCH

2:1
(5:1)

28.IV.74

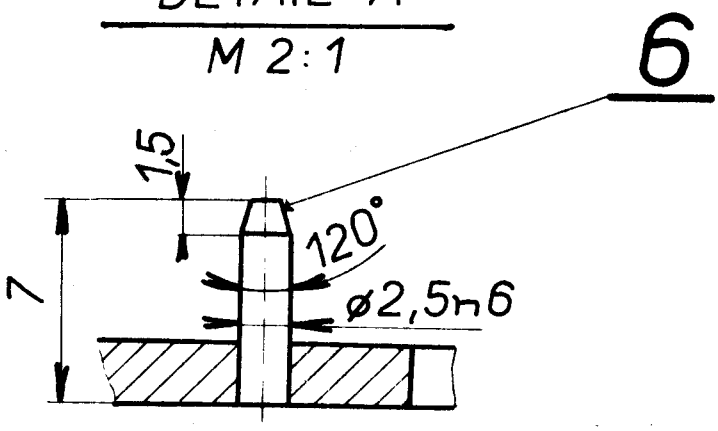
TRYSKA DP-02-04





DETAIL A

M 2:1



1 TYČ ø 60×47 ČSN425510.1 11370 DP-02-00 1

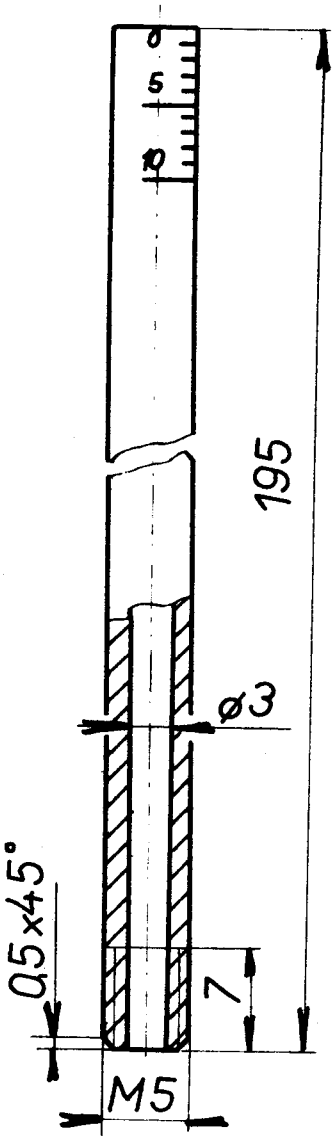
BÖHISCH

1:1

28.IV.74

HLAVA DP-02-01

3,2



PO CELÉ DÉLCE VYRAZIT MILIMETROVOU STUPNICI

1	TRUBKA ϕ 5 × 1 - 200	ČSN425715 11350	DP-02-00 3

BÖNISCH

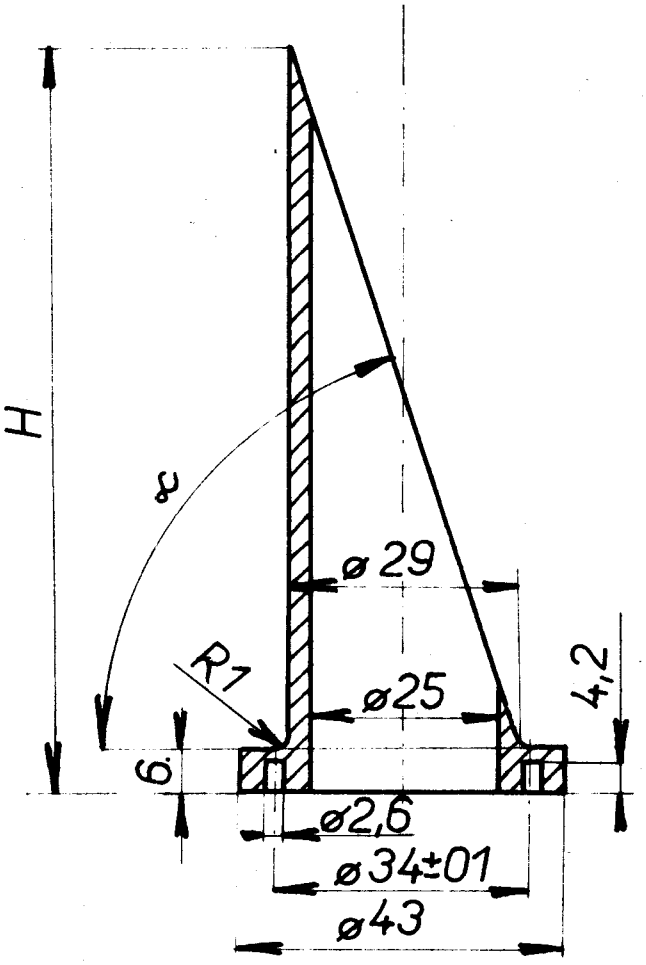
2:1

28.IV.74

DRŽÁK

DP-02-03

3,2



α /°/	H /mm/
73°	94,9
70°30	82,0
68°	71,8
63°	55,9
53°	37,0
43°	27,0
33°	17,9
23°	12,3
13°	6,7
3°	1,5

OBĚ SÉRIE Z PLNÉHO MAT., JEDNA SÉRIE
S VNITŘÍM OTVOREM øD = 25 mm

20 TYČ ø45 x 96 ČSN425510 11340 DP-02-00 5

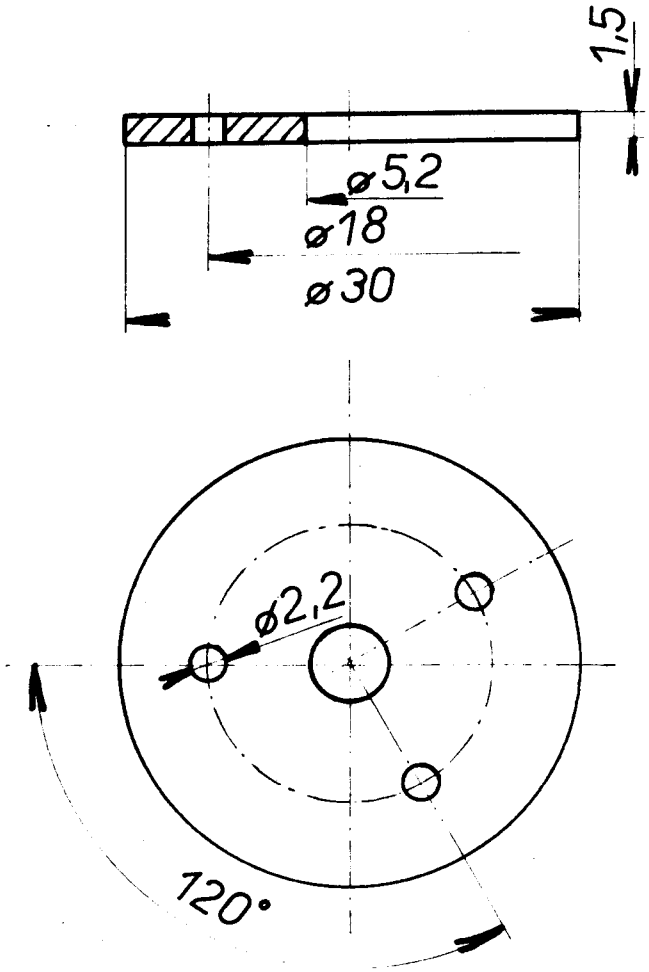
BÖNISCH

1:1

28.IV.74

UST. PŘÍPR. DP-02-05

3,2



1 PLECH 1,5 ČSN425301 11343 DP-02-00 8

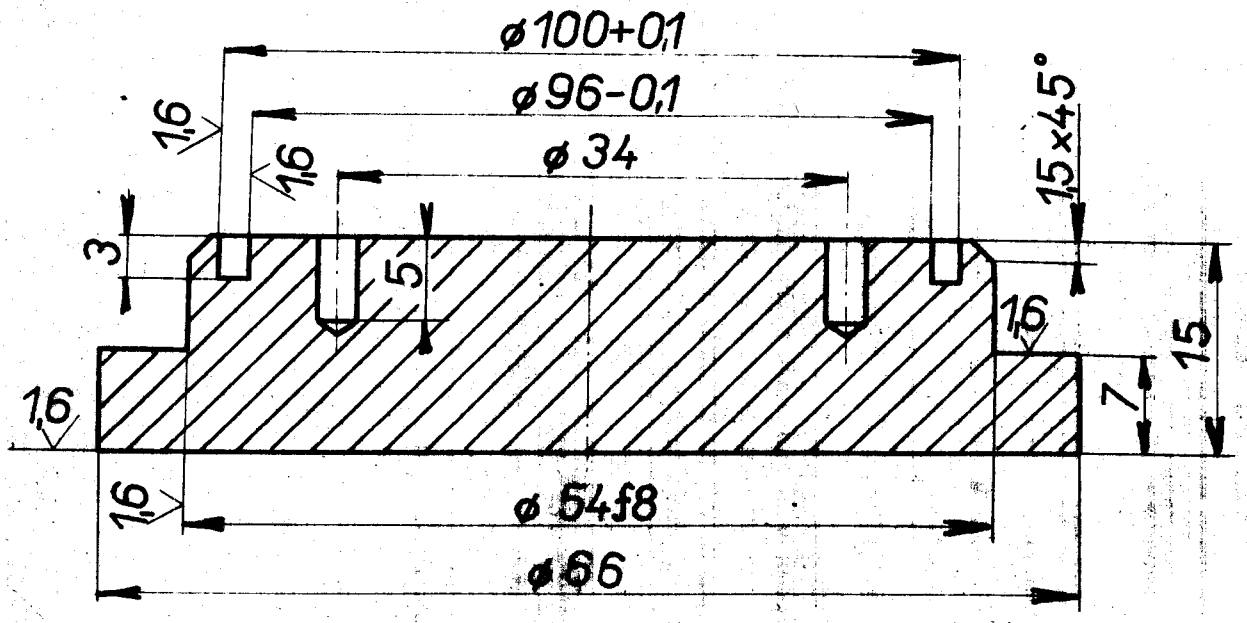
BÖMISCH

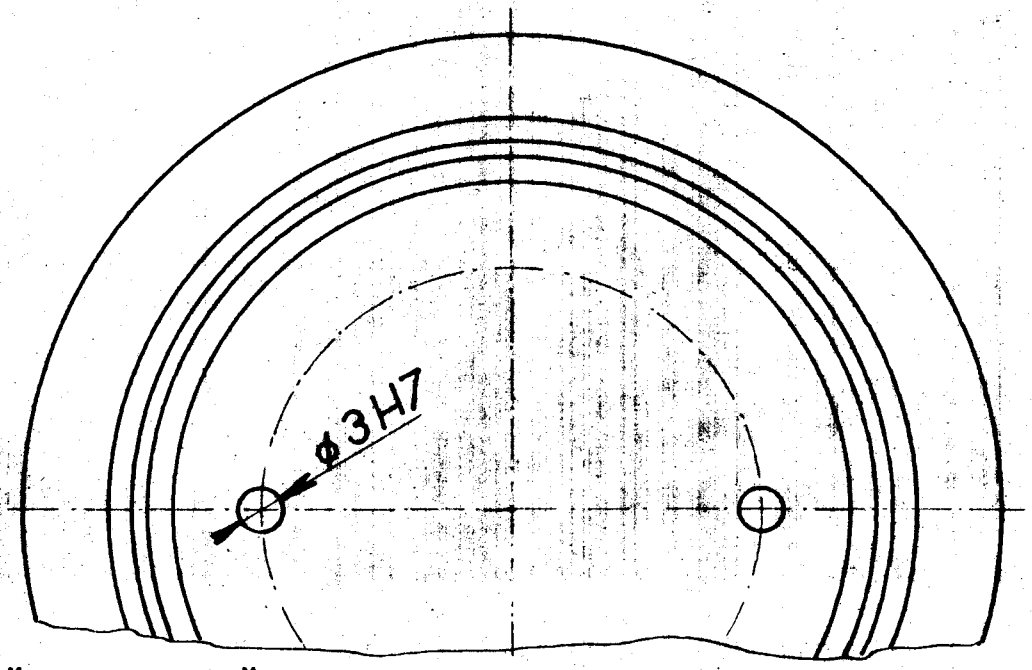
2:1

28.IV.74

VLOŽKA DP-02-08

6,3 / 1,6





1	TYČø68×18 ČSN425510	11370.0					DP-01-00	5
		Mat. konečný	Mat. výchozí	Tepelné zpr.	Č. výkr.	Hl. rozm.	Číslo výkresu	Pos.

BÖNISCH

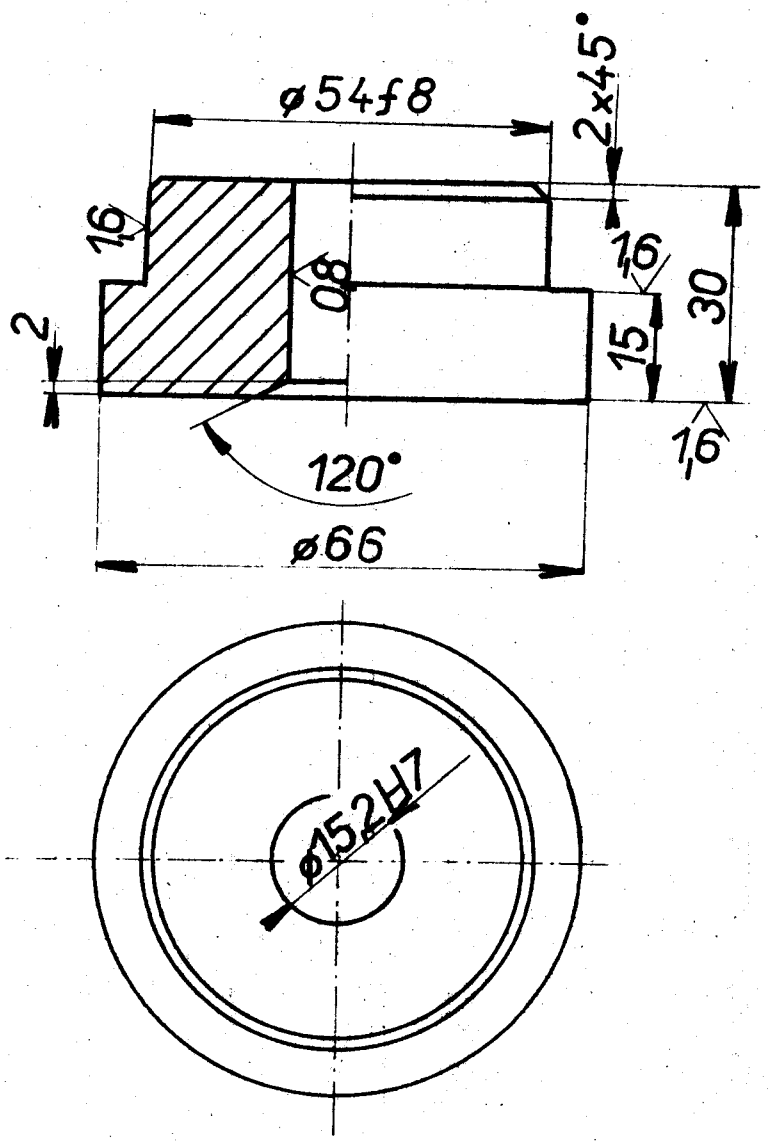
2:1

27-3-74

VLOŽKA

DP-01-05

6,3 / 0,8 1,6



1 TYČø68×33 ČSN425510 11370.0

DP-01-00 6

BÖHISCH

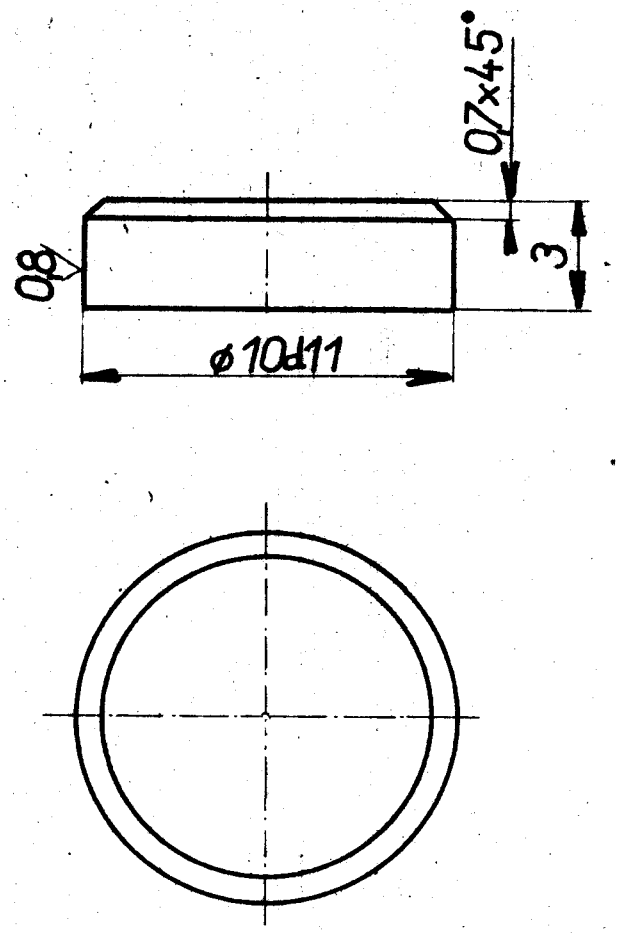
1:1

27.3.74

VLOŽKA

DP-01-06

32 / 08



100 ø12 x 5 ČSN423003 MED99,85 DP-01-00 8

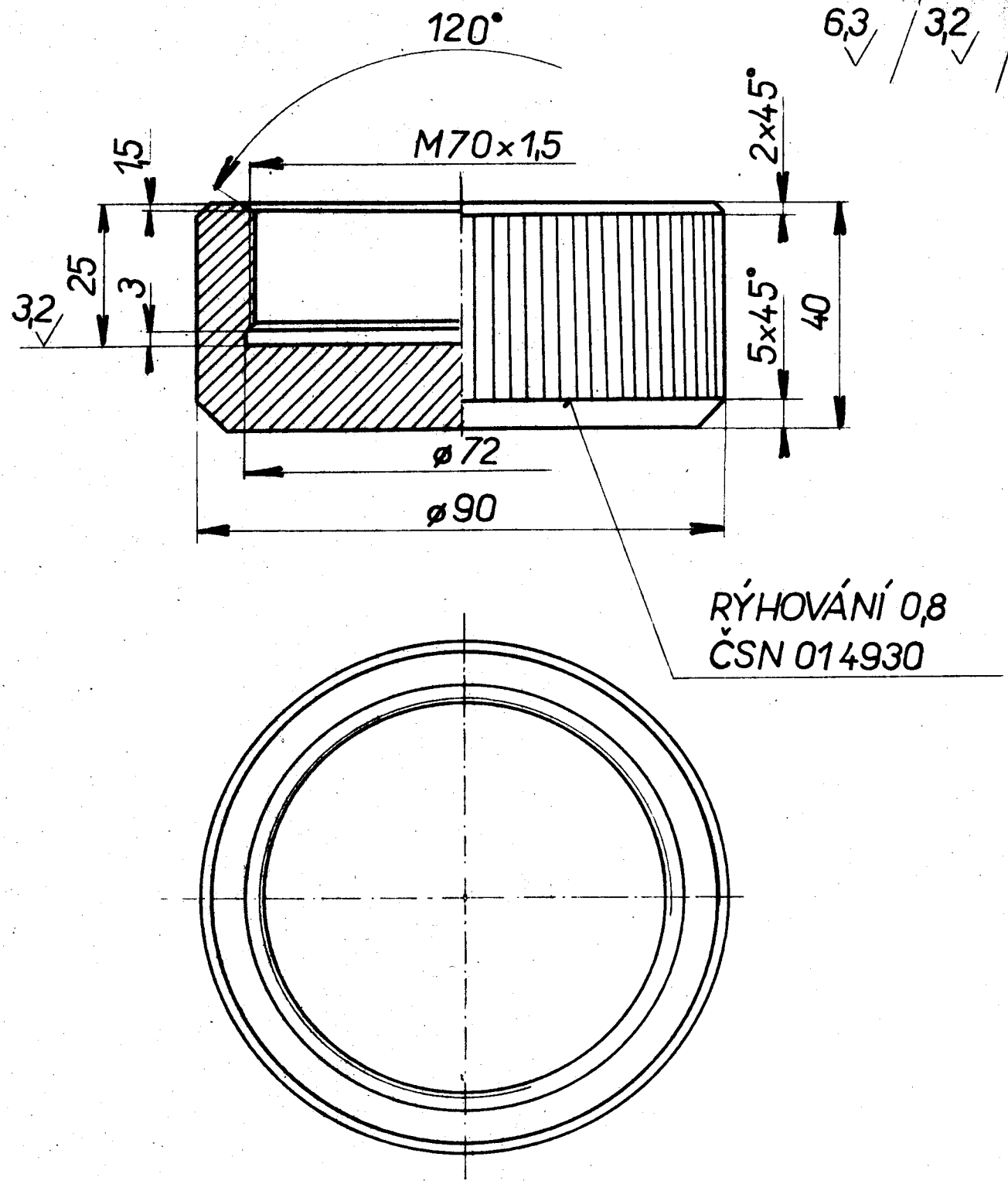
BOHISCH

5:1

27.3.74

Skupina

PÍSTEK DP-01-08



1 TYČ ø95×43ČSN425510 11500 DP-01-00 3

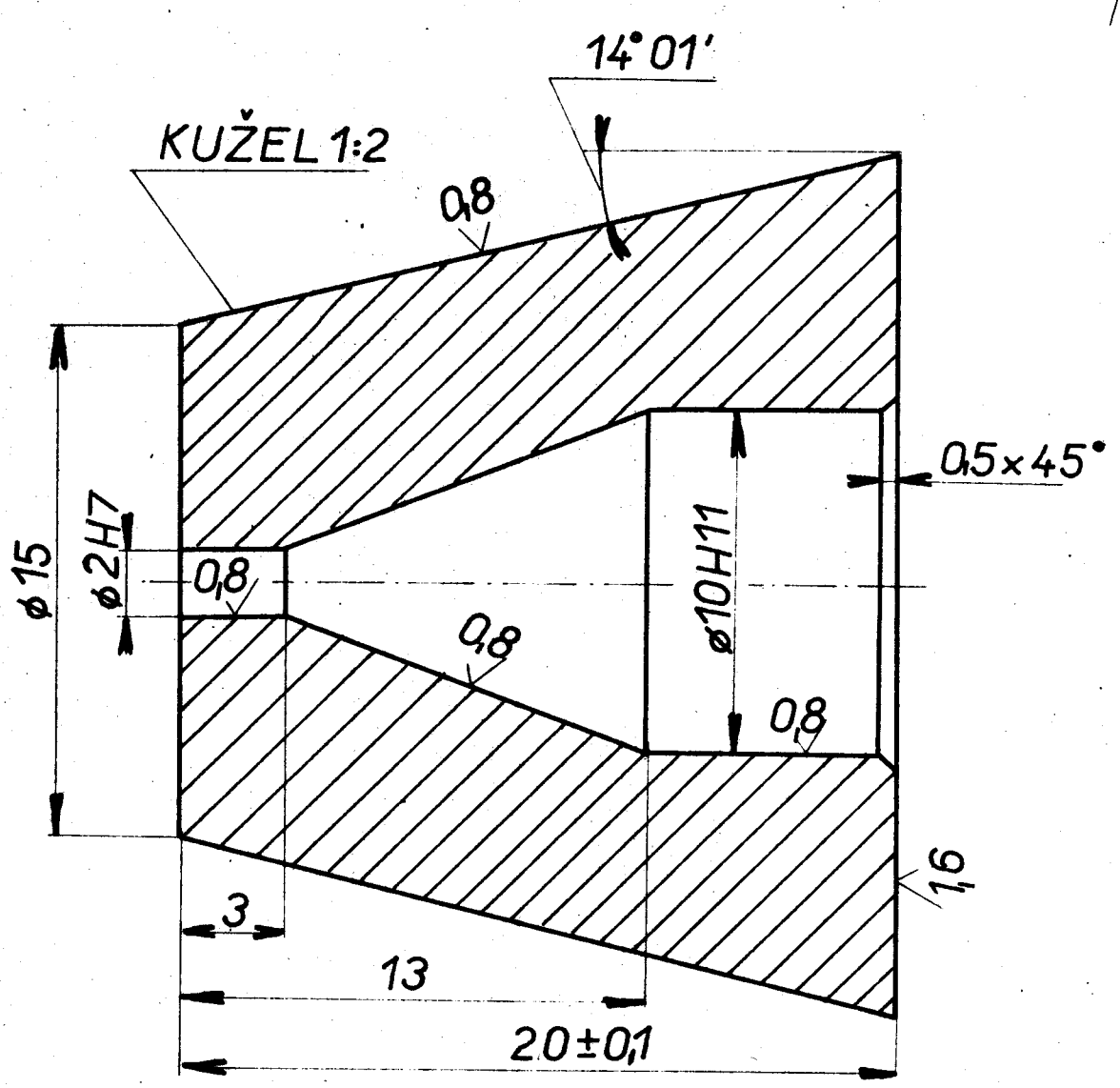
BÖNISCH

1:1

27.3.74

MATICE DP-01-03

3,2 / 0,8 , 1,6



1 TYČ ø28×25 ČSN026510 11600

DP-01-00 7

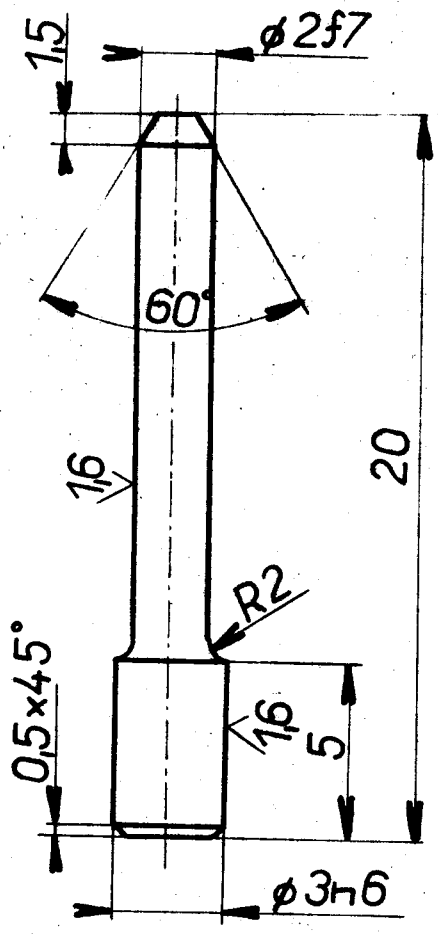
BÖHISCH

5:1

27.3.74

REDUKTOR DP-01-07

3,2 / 16 /



2 DRÁT ø4 × 25 ČSN426403 11 500

DP-01-0010

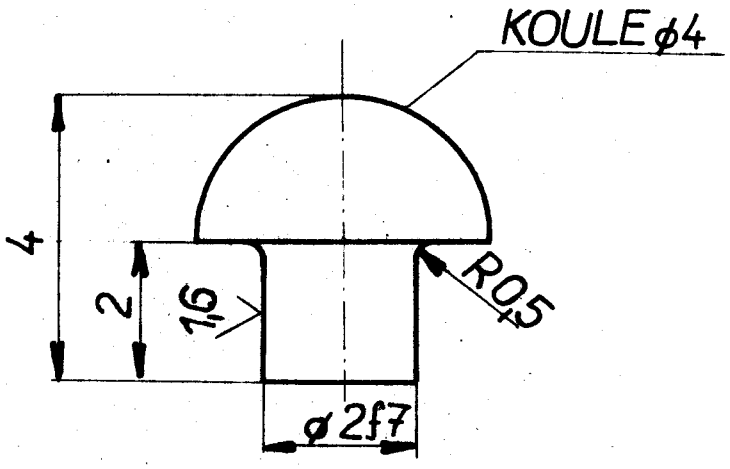
BÖHISCH

5:1

27.3.74

VODÍCÍ TYČ DP-01-10

3,2 / 1,6



100 VÝLISEK ČSN425510 11500 DP-01-00 14

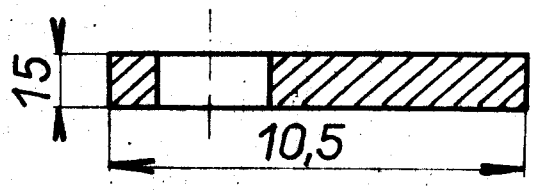
BONISCH

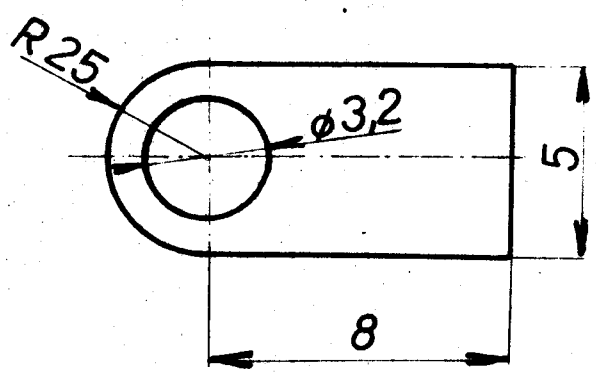
10:1

27.3.74

NÝTEK DP-01-14

3,2





2 PLECH15x12x10 ČSN425301 11500							DP-01-00	13

Měřítko BOHISCH

5:1

27.3.74

ÚPINKA

DP-01-13