

Vysoká škola strojní a textilní v Liberci  
nositelka Řádu práce  
Fakulta strojní

Obor 23 - 07 - 8

Strojírenská technologie  
zaměření  
strojírenská metalurgie

Katedra materiálů a strojírenské metalurgie

Výběr optimálního materiálu pro rotory šroubových  
kompresorů z hlediska zvýšení sériovosti výroby

KMM - 219

Pavel H a f n e r

Vedoucí diplomové práce: Doc. ing. Jiří Horyna, CSc  
VŠST Liberec

Konzultant: ing. Antonín Vaculík  
ČKD Praha, závod Kompresory

Rozsah práce a příloh:

|                |    |
|----------------|----|
| Počet stran:   | 40 |
| Počet tabulek: | 9  |
| Počet obrázků: | 18 |
| Počet příloh:  | -  |
| Počet výkresů: | -  |

11. května 1987

Vysoká škola: strojní a textilní Fakultas: strojní  
V Liberci Skolní rok: 1986/87  
Katedra: materiálu a strojírenské  
metalurgie

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro Pavel H A F N E R  
obor strojírenská technologie

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

Název tématu: Výběr optimálního materiálu pro rotory šroubových  
kompresorů z hlediska zvýšení seriovosti výroby

### Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou výroby šroubových kompresorů v n.p. ČKD závod kompresory. Zvláštní pozornost věnujte materiálům určeným k výrobě uvedených zařízení.
2. Specifikujte požadavky na materiál rotorů šroubových kompresorů.
3. Experimentálně ověřte nově navržené materiály včetně návrhu tepelného zpracování.
4. Vyhodnoťte experimenty a formulujte závěry.

V 151 187 S

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ  
Ústřední knihovna  
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 8  
PSČ 461 17

Rozsah grafických prací:

Rozsah průvodní zprávy: 50 - 60 stran

Seznam odborné literatury:

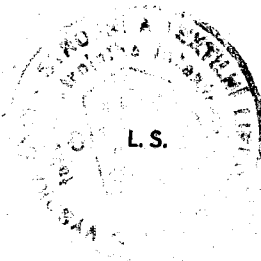
- /1/ PLUHAŘ, KORITTA : Strojírenské materiály
- /2/ Firemní literatura ČKD

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Jiří Horyna, CSc

Konzultant : Ing. Antonín Vaculík

Datum zadání diplomové práce: 15.9.1986

Termín odevzdání diplomové práce: 10.5.1987



*J. Alaxin*  
Doc. Ing. Ján Alaxin, CSc

Vedoucí katedry

*J. Alaxin*  
Doc. Ing. Ján Alaxin, CSc

Děkan

v Liberci dne 10.9. 1986

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

*Pavel Hefner*

V Liberci dne 11. května 1987

# OBSAH

|                                               |    |
|-----------------------------------------------|----|
| 1. Úvod                                       | 3  |
| 2. Výroba rotorů                              | 6  |
| 3. Materiálové požadavky                      | 9  |
| 4. Navrhovaný materiál                        | 11 |
| 5. Vlastnosti materiálu                       | 14 |
| 5.1. Mechanické a technologické<br>vlastnosti | 15 |
| 5.2. Použité pomůcky a zařízení               | 30 |
| 5.3. Naměřené a vypočtené hodnoty             | 32 |
| 6. Vyhodnocení výsledků                       | 36 |
| 7. Závěr                                      | 39 |
| Seznam použité literatury                     | 40 |

# 1. ÚVOD

Ve výrobním programu ČKD Praha, závodu Kompresory je také výroba šroubových /také závitových/ kompresorů. Tyto stroje patří do skupiny objemových strojů. Jejich používání je rozšířené a prakticky neexistuje obor či druh stlačovaného média, pro který by šroubový kompresor nebyl používán.

Šroubové kompresory mají oproti pístovým kompresorům řadu předností. Jsou v širokém rozsahu výkonů provozně výhodnější, jejich hmotnost v porovnání se srovnatelnými typy je až o 30 % nižší a zastavěná plocha se zmenšuje o čtvrtinu. Vzhledem k dokonalému vyvážení není pro ně nutný složitý a pevný základ, mají nižší nároky na údržbu i opravy, nemají součásti, které by se rychle opotřebovávaly.

Konstrukce šroubových kompresorů je jednoduchá. Stroj se sestává z malého počtu detailů, které jsou však náročné na přesnost výroby a montáž. Stroj je složen z těchto hlavních částí:

- z hlavního rotoru
- z vedlejšího rotoru
- z litinové skříně.

V litinové skříně jsou uloženy oba rotory vedle sebe otáčející se v opačných směrech.

Na hlavním rotoru jsou vytvořeny čtyři ozuby ve šroubovici a na vedlejším rotoru je vyrobeno šest drážek také ve šroubovici se stejným úhlem stoupání. Na obr. 1. jsou nakresleny oba rotory v poloze, v jaké jsou uloženy ve skříni.

Při chodu stroje zapadá ozub do drážky rotoru a vytváří se komůrky ohraničené boky spoluzabírajících zubů a vývrtu skříně. V těchto komůrkách dochází k postupnému stlačování plynu. Při práci stroje je nutné zajistit těsnost v pracovním prostoru, která podmiňuje účinnost práce. Tato těsnost je zajišťována nepatrnými vůlemi.

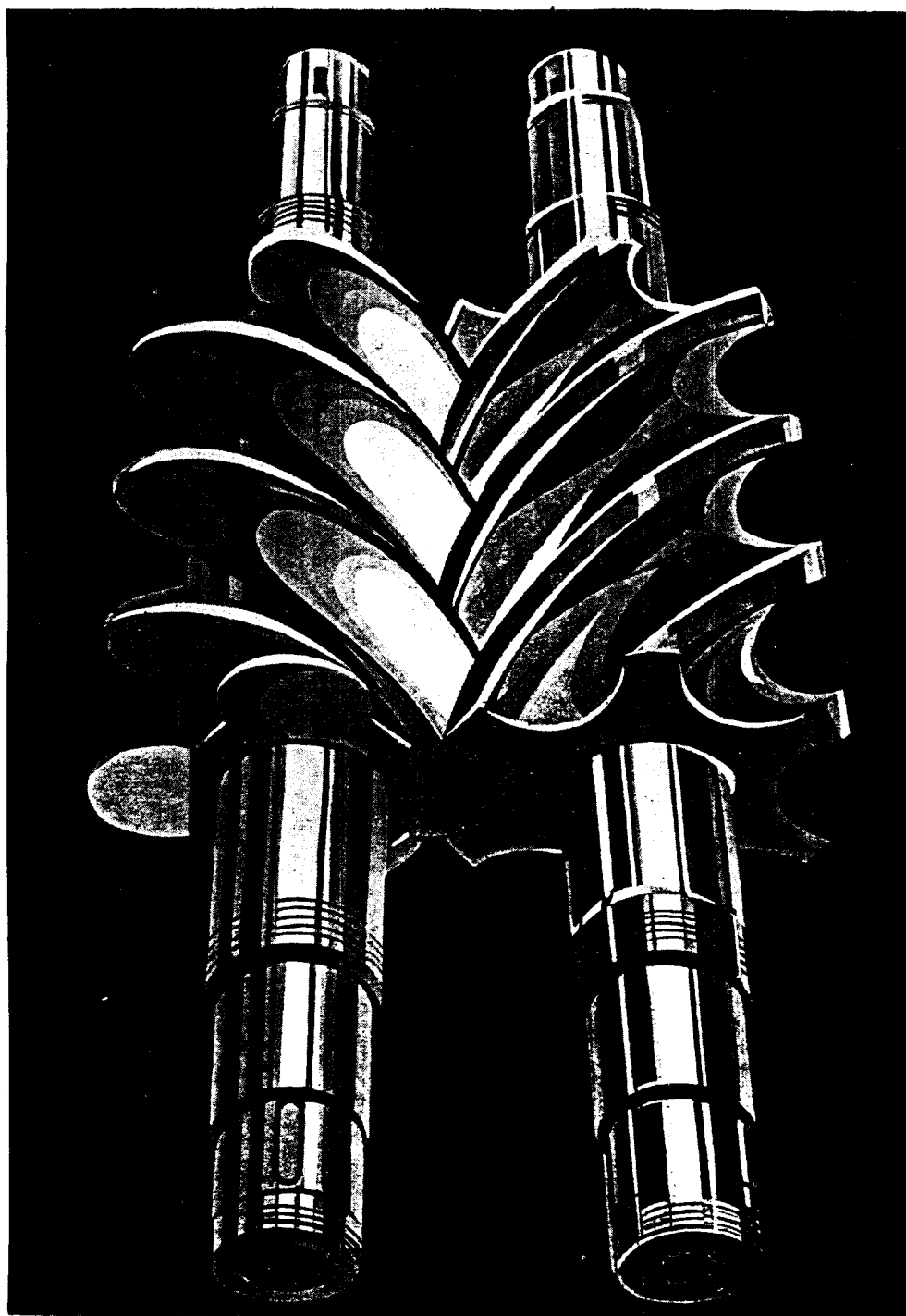
Pro pohon kompresoru se používá asynchronního elektromotoru, který pohání hlavní rotor. Pohyb vedlejšího rotoru je zajišťován od hlavního rotoru podle vyráběné verze.

U mazného provedení se rotory navzájem odvalují. Mazání je zajišťováno vstřikem oleje a jeho odsávání ve spodní části skříně.

U bezmazného provedení je pohyb rotoru zajištěn od hlavního rotoru pomocí synchronizačního soukolí, které je vyrobeno s mimořádnou přesností. Rotory se nesmějí navzájem dotýkat a vůli mezi nimi zajišťuje synchronizační soukolí. Proti nežádoucímu náhodnému dotyku jsou rotory opatřeny teflonovou ochrannou vrstvou o tloušťce 0,2 až 0,3 mm.

Toto provedení se používá pro stlačování plynů, které nesmějí být znečištěny mazacím olejem, např. v chemickém a potravinářském průmyslu.

Velikost vnitřního stlačení se řídí nastavením hran výtlačného otvoru. V jednostupňovém provedení se vyrábějí



Obr. č. 1. Hlavní a vedlejší rotor.

kompresory pro tlaky do 0,4 MPa a s výkony od 400 do 25 000 m<sup>3</sup>/hod. a ve dvoustupňovém provedení pro tlaky do 1 MPa a s výkony od 630 do 25 000 m<sup>3</sup>/ hod.

Převážná část produkce závodu Kompresory se exportuje, zejména do Sovětského svazu. Při své návštěvě v Československu navštívil generální tajemník ÚV KSSS Michail Gorbačov také závod Kompresory, kde si se zájmem prohlédl výrobu kompresorů a ocenil kvalitní práci naší dělnické třídy.

## 2. VÝROBA ROTORŮ

Rotory šroubových kompresorů /dále jen RŠK/ jsou vyráběny ze dvou různých materiálů a to z ocele ČSN 41 2050 a ČSN 41 3132. Charakteristiky těchto materiálů z hlediska chemického složení a mechanických hodnot udávají tabulky 1 a 2 pro ocel 12 050.1 a tabulky 3 a 4 pro ocel 13 123.

Tab. 1. Chemické složení ocele 12 050.1

|                             | C       | Mn             | Si             | Cr   | Ni   | Cu   | P     | S     |
|-----------------------------|---------|----------------|----------------|------|------|------|-------|-------|
| Chem. slož.                 | 0,42    | 0,50           | 0,17           | max  | max  | max  | max   | max   |
| %                           | až 0,50 | až 0,80        | až 0,37        | 0,25 | 0,30 | 0,30 | 0,040 | 0,040 |
| Dovol. úchyl. chem. slož. % | +0,03   | -0,05<br>+0,10 | -0,03<br>+0,05 | -    | -    | -    | -     | -     |

Tab. 2. Mechanické hodnoty ocele 12 050.1

|                                    |              |
|------------------------------------|--------------|
| Nejnižší mez kluzu $R_p$           | 285 MPa      |
| Pevnost v tahu $R_M$               | min. 590 MPa |
| Nejnižší tažnost $A_5$             | 14 %         |
| Nejvyšší tvrdost podle Brinella HB | 225          |

Tab. 3. Chemické složení ocele 13 123

|                          | C       | Mn      | Si      | V       | Cr   | Ni   | Cu   | Cr+Ni+Cu | P     | S     |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|------|------|------|----------|-------|-------|
| Chem. slož.              | 0,17    | 1,00    | 0,15    | 0,10    | max  | max  | max  | max      | max   | max   |
| %                        | až 0,23 | až 1,40 | až 0,40 | až 0,25 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,70     | 0,040 | 0,040 |
| Dov. úchl. chem. slož. % | ±0,02   | ±0,10   | ±0,05   | ±0,01   | -    | -    | -    | -        | -     | -     |

Tab. 4 Mechanické hodnoty ocele 13 123

|                                    |                             |
|------------------------------------|-----------------------------|
| Nejnižší mez kluzu $R_p$           | 285 MPa                     |
| Pevnost v tahu $R_M$               | 490 až 640 MPa              |
| Nejnižší tažnost $A_5$             | podél 18 %                  |
|                                    | tang. 16 %                  |
| Nejnižší vrubová houževnatost KCU3 | podél. 70 J/cm <sup>2</sup> |
|                                    | tang. 50 J/cm <sup>2</sup>  |
| Tvrdost podle Brinella HB          | 141 až 183                  |

Technologický postup výroby RŠK z ocele 12 050.1 lze rozdělit do tří hlavních fází:

- 1) mechanické obrábění - předhrubování materiálu na polotovary
- 2) tepelné zpracování polotovaru - žíhání na odstranění vnitřního pnutí

### 3) dokončovací obráběcí operace polotovaru na finální výrobek

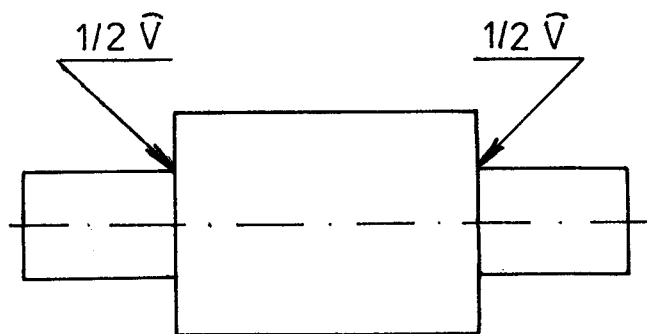
V první fázi se provádí kování materiálu z hutního polotovaru a hrubování stopek na soustruhu. Potom se hrubuje na frézce profil drážky šroubovice. Toto hrubování je charakterizováno velkým úběrem materiálu na jeden průchod frézy.

Proto po hrubování šroubovice následuje tepelné zpracování - žíhání na odstranění vnitřních pnutí. Vysoká vnitřní pnutí by mohla být příčinou tvarových deformací rotorů, což by mělo za následek havárii stroje.

Vnitřní pnutí se odstraňuje žíháním při teplotách 600 až 650°C. Rotory jsou při žíhání v plynových pecích umístěny ve speciálních přípravcích. Při žíhacích teplotách je mez kluzu i mez tečení ocele tak nízká, že pnutí se z velké části vyrovnají - relaxují místní plastickou deformací. Výdrž na teplotě závisí na velikosti součástí a při výrobě RŠK je výdrž na teplotě 6 hodin. Aby při ochlazování nevznikly v materiálu nová teplotní pnutí, je nutné součást ochlazovat maximální rychlostí 40 až 60°C/hod. do teploty 200°C a dochlazení na volném vzduchu.

Jako poslední fáze výroby RŠK se provádějí obráběcí operace - frézování konečného tvaru drážky šroubovice tvarovými frézami.

Technologický postup výroby RŠK z ocele 13 123 je obdobný jako je výše uvedeno s tím rozdílem, že stopky a válcová část rotoru se před prvním mechanickým obráběním svařují (obr. 2). Svařování se provádí elektrickým obloukem.



Obr. 2. Svařovaný polotovar pro výrobu RŠK

Při svařování je nutný místní předehřev na teplotu 200 až 250 °C. Při svařování je osa rotoru vertikálně. Po svařování se provádí dohřev 200 až 250 °C po dobu 2 hodin.

Další výrobní operace jsou shodné jako při výrobě RŠK z ocele 12 O50.1.

Kompresory vyráběné touto technologií mají sníženou konkurenční schopnost na trzích v kapitalistických státech, protože výrobní náklady jsou vyšší než u zahraničních výrobců obdobného zařízení.

Proto se v ČKD Kompresory vytvořily snahy používat pro výrobu RŠK materiály používané zahraničními výrobci a tím zlepšit postavení československých výrobků na světových trzích.

### 3. MATERIÁLOVÉ POŽADAVKY

Při výběru materiálu pro strojírenskou výrobu je nutné vycházet z konstrukčního řešení výrobku. Konstrukteur se při výběru materiálu řídí většinou mechanickými a pevnostními hodnotami materiálu. Tyto jsou určovány většinou

druhem a způsobem namáhání součástí během provozu.

V druhém stadiu výběru materiálu se přihlíží k technologickým vlastnostem materiálu. Tyto vlastnosti jsou určovány technologickým způsobem výroby součásti (např. pro svarek je požadována svařitelnost, pro odlitek slévateľnost apod.)

Obě tyto hlediska je nutné skloubit, i když se některé požadavky vycházející z konstrukčního řešení vylučují s technologickými požadavky. Toto je nutné řešit kompromisem, a to buď na úkor technického nebo technologického řešení výrobku.

Také ekonomické hledisko vybraného materiálu se nesmí opomíjet, neboť cena materiálu je zahrnuta v ceně finálního výrobku.

Požadavky kladené na materiál RŠK vyplývající z popisu jejich funkce v úvodu. Nejdůležitější požadavek z konstrukčního hlediska je přesnost výroby profilu drážky šroubovice, která je podmínkou správného a bezporuchového chodu kompresoru a jeho rozměrová stálost během doby životnosti stroje.

Mechanické hodnoty jako je pevnost, tvrdost ap. nejsou požadovány v konkrétních hodnotách. Jejich hodnoty jsou dány materiálem, který je v současné době používán pro výrobu RŠK.

Z hlediska výrobní technologie je požadována dobrá obrobiteľnost materiálu. Tento požadavek znamená zajistit u materiálu maximální velikost zrna a zrnitý perlit.

Z požadavku rozměrové stálosti z konstrukčního hlediska je nutné po obrábění zajistit nízká vnitřní pnutí,

která by během provozu stroje mohla způsobit deformaci rotoru a poškození kompresoru.

Při výrobě RŠK je konstrukční hledisko prvotní a konstrukční požadavky (přednost výroby a rozměrová stálost) nelze je ovlivňovat požadavky technologickými.

## 4. NAVRHOVANÝ MATERIÁL

V zahraničí se používají pro výrobu kompresorů materiály s označením AISI 11 37, AISI 11 41 a AISI 11 44. Tyto materiály mají podle zahraničních zkušeností lepší obrobiteľnosť než materiály používané v Československu. Vzhľadom k tejto dobrej obrobiteľnosti sa predlžuje životnosť nástrojů až o 100 %. Při obrábění je jakostnější povrch a dobrá drobivost umožňuje používat vyšší řezné rychlosti.

Lze také vyloučit mezioperační žihání ke snížení vnitřního pnutí. Odstraněním této operace by se snížily výrobní náklady v úspoře energie při žihání manipulaci a dopravě materiálu apod.

Podle zahraniční dokumentace byla ve VŽKG provedena speciální tavba materiálu AISI 11 41. Chemické složení tohoto materiálu uvádí tabulka 5 podle /4/.

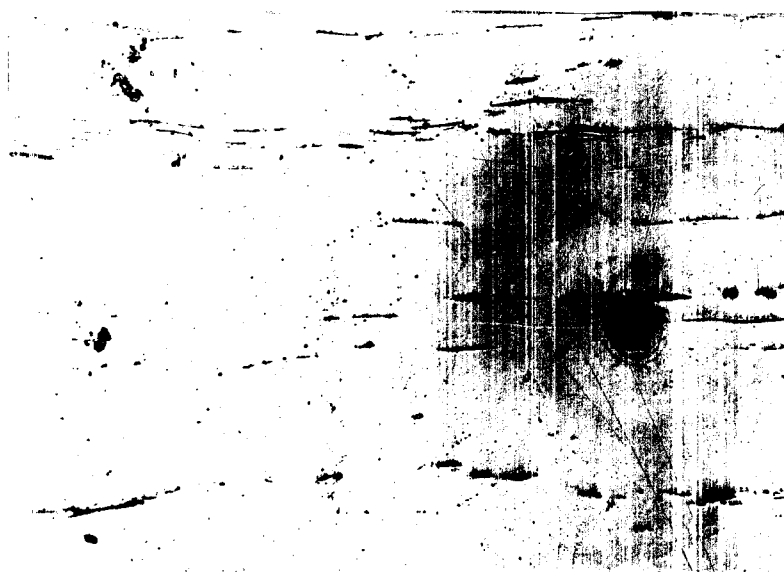
Tab. 5. Chemické složení materiálu AISI 11 41

| Chemické<br>složení<br>% | C    | Mn   | Si   | P     | S    | Ni   | Cr   | Cu   |
|--------------------------|------|------|------|-------|------|------|------|------|
|                          | 0,44 | 1,70 | 0,37 | 0,013 | 0,11 | 0,08 | 0,10 | 0,05 |

Svým chemickým složením, kromě obsahu síry odpovídá přibližně oceli podle ČSN 41 3250.

Síra je považována za škodlivý prvek v ocelích, ale příznivě působí na obrobitelnost. Při obsahu síry v oceli 0,035 % se tříška stává lámavější. Speciální automatové ocele mají obsah síry 0,1 % a u méně namáhaných součástí bývá 0,15 až 0,30 %. Rozpustnost síry v železe  $\gamma$  je 0,05 % při 1 365 °C a v železe  $\alpha$  0,02 % při 913 °C. Rozpustnost při pokojové teplotě není přesně známa, uvádí se 0,025 až 0,03 %. Proto při vyšších obsazích je síra v oceli obsažena jako sirníky. Síra také stabilizuje perlitickou strukturu.

Ze získaného materiálu byl zhotoven vzorek a provedeno mikroskopické pozorování. Nenaleptanou mikrostrukturu ukazuje obr. 3



Neleptáno

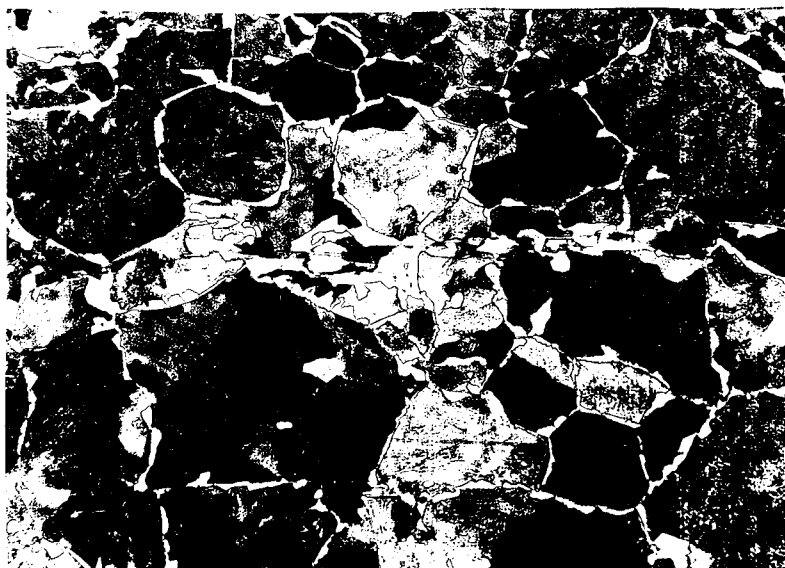
100 x

Obr. 3. Materiál AISI 11 41

Z obrázku je vidět řádkovitou strukturu protaženou ve směru tváření materiálu. Jde pravděpodobně o tvárne sirníkové vměstky. Tato řádkovitost může způsobovat anizotropii mechanických vlastností,

Jak vyplynulo z předcházející kapitoly, je pro dobrou obrobitelnost materiálu nutná maximální velikost zrna. Velikost zrna se zjistí na naleptaném vzorku, který ukazuje obr. 4.

Velikost zrna odpovídá stupni 2-3 podle ČSN 42 0462.



Nital

100 x

Obr. 4. Materiál AISI 11 41

Tento materiál z dodávky válcovaných tyčí byl podroben tepelnému zpracování. Homogenizační žíhání při teplotě  $1\ 050\ ^\circ\text{C}$  a po prohřátí výdrž na této teplotě podle průměru materiálu (25 mm = 1 hodina). Následující

chladnutí v peci maximální rychlostí  $50^{\circ}\text{C/hod.}$  do teploty asi  $400^{\circ}\text{C}$  a chladnutí v otevřené peci.

Potom následuje žíhání na odstranění pnutí. Ohřev materiálu na teplotu  $600$  až  $620^{\circ}\text{C}$  a výdrž na teplotě podle průměru materiálu ( $25\text{ mm} = 1\text{ hodina}$ ), chladnutí v peci maximální rychlostí  $20^{\circ}\text{C/hod.}$  do  $200^{\circ}\text{C}$  a dále v otevřené peci.

Toto popsané tepelné zpracování je náročné zejména na dodržení maximální ochlazovací rychlosti  $50^{\circ}\text{C/hod.}$  z  $1050^{\circ}\text{C}$  na  $400^{\circ}\text{C}$ . Při ochlazování je obtížné zajistit tuto ochlazovací rychlost v celém objemu pece a doba ochlazování by trvala 13 a více hodin.

Vhodnost zavedení a používání tohoto materiálu pro výrobu RŠK je nutné ověřit nejenom mechanickými a technologickými zkouškami, ale také provozními zkouškami.

## 5. VLASTNOSTI MATERIÁLU

Kovy mají určité typické vlastnosti, které umožňují jejich široké uplatnění v praxi. Je to např. dobrá elektrická vodivost, magnetické vlastnosti, ale zejména jejich mechanické vlastnosti. Proto mají kovy nezastupitelné místo ve strojírenské výrobě jako konstrukční materiál.

Vlastnosti kovů lze rozdělit podle toho, jsou-li ovlivňovány strukturou kovu na strukturně citlivé a necitlivé. Strukturně necitlivé jsou např. měrná hmotnost, měrné teploty atd. Strukturně citlivé vlastnosti jsou dány dokonalostí krystalové mřížky, tepelným zpracováním, velikostí

zrna aj. V technické praxi se častěji používá dělení vlastností na:

- a) fyzikální
- b) fyzikálně-chemické
- c) mechanické
- d) technologické

Vhodnost materiálu k použití ve strojírenské výrobě je ovlivňována především mechanickými vlastnostmi a technologickými vlastnostmi, které nám ovlivňují způsobilost materiálu pro danou technologii výroby.

## 5.1. MECHANICKÉ A TECHNOLOGICKÉ VLASTNOSTI

Základní mechanické vlastnosti nám popisují chování materiálu při mechanickém zatížení, to znamená odolnost proti deformaci a porušení.

Jde o tyto čtyři vlastnosti:

- pružnost
- plasticitu
- pevnost
- houževnatost

Zkušební metody jsou založeny na principu působení vnějších sil na zkoušený materiál za účelem zjištění a kvantitativního vyjádření zkoušené vlastnosti. Vnější zatěžující síly mají mechanickou podstatu.

Výsledek je dán vzájemným vztahem čtyř základních činitelů:

- zatížení
- zkušební tělesa
- materiálu zkušební tělesa
- ostatními podmínkami zkoušky

Zkušební těleso se zatěžuje zpravidla až do porušení působením stálých nebo pomalu spojitě se měnících síl a sleduje se závislost napětí a deformace.

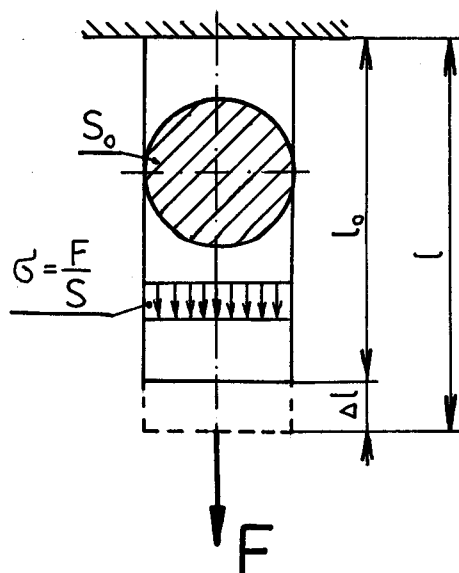
Podle druhu namáhání rozeznáváme zkoušky tahem, tlakem ohybem, kroucením a stříhem.

Reálné kovy nejsou dokonale homogenní a proto výsledky některých zkoušek jsou ovlivněny místem a způsobem odběru vzorku z výchozího materiálu. Nejčastěji požadujeme od vzorku, aby charakterizoval průměrné vlastnosti materiálu, nebo aby vzorek zachycoval vlastnosti výrobku, které jsou nejvíce namáhány při technologickém zpracování nebo při provozu. Místa odběru vzorku jsou předepsány normou a k reprodukovatelnosti výsledků je nutné dodržet podmínky zkoušky předepsané normou.

Jednou z nejzákladnějších zkoušek je zkouška jednoosým tahem. Princip zkoušky spočívá v přetržení zkušební tyče s cílem zjistit základní napěťové a deformační charakteristiky zkoušeného materiálu:

- pevnost v tahu
- mez kluzu
- tažnost
- kontrakci

Tyč zatěžovaná silou  $F$  se prodlouží o délku  $\Delta l$  (obr. 5)



Obr. 5. Schematické znázornění zkoušky tahem  
a v tyči je napětí o velikosti

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

Diagram, který zaznamenává trhací stroj ukazuje průběh odporu materiálu proti deformaci a označuje se jako tahový diagram.

Tento diagram může být zobrazený v souřadnicích:

- zatěžující síla  $F$  a prodloužení  $\Delta l$
- napětí  $\sigma$  a poměrné prodloužení  $\epsilon$

Oba diagramy jsou tvarově totožné.

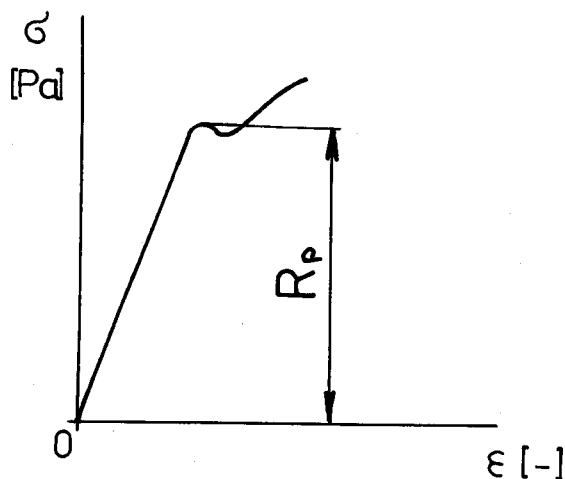
Mez pevnosti v tahu  $R_m$  se určí podle vztahu

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

kde  $F_M$  je maximální síla určená z tahového diagramu  
v N a

$S$  je původní průřez zkušební tyčky v  $\text{mm}^2$ .

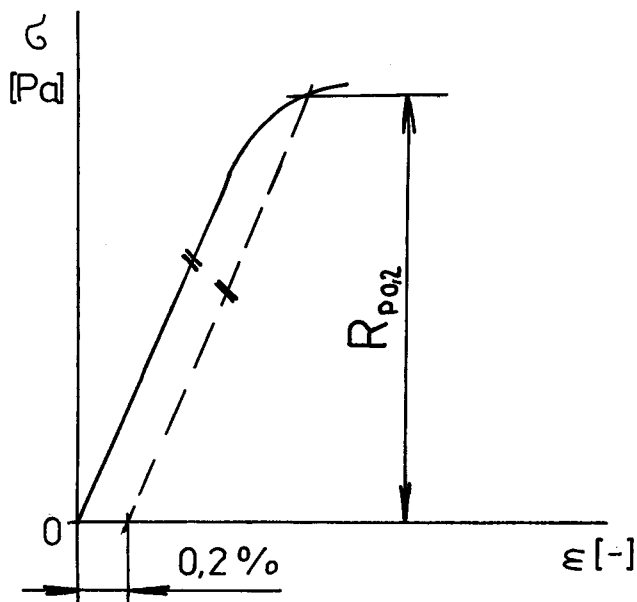
Mez kluzu se u diagramu určí u výrazné meze kluzu  
(obr. 6)



Obr. 6. Určení meze kluzu u diagramu s výraznou mezí kluzu.

U diagramu s nevýraznou mezí kluzu se na tahovém diagramu neobjevuje žádná nespojitost. Proto se mez kluzu vyjadřuje jako smluvní hodnota. Určí se graficky z tahového diagramu. Ve vzdálenosti 0,2 % poměrného prodloužení  $\epsilon$  od počátku se vede rovnoběžka s přímkovou částí tahového diagramu (obr. 7).

Místo protnutí této rovnoběžky s tahovým diagramem nám udává smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$



Obr. 7. Určení sluvní meze kluzu.

Další hodnota, která se určuje při tahové zkoušce je tažnost, která se vyjadřuje vztahem

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3)$$

Kde  $L_0$  je původní délka zkušební tyče v mm a

$L_u$  je délka tyče po přetržení v mm.

Při zapisování výsledku tažnosti se ke značce A připisuje index, který označuje původní délku tyče.

Jako další se určuje kontrakce vztahem

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4)$$

kde  $S_0$  je plocha původního průřezu zkušební tyče v  $\text{mm}^2$  a

$S_u$  je plocha nejmenšího průřezu zkušební tyče v místě přetržení v  $\text{mm}^2$ .

Zkušební tyče pro zkoušku tahem se zpravidla používají hladké tyče kruhového průřezu s rozměry uvedenými v normách.

Jako další zkouškou je zkouška tvrdosti podle Brinella. Tvrdost je vyjadřována jako odpor materiálu proti deformaci jeho povrchu vyvolané působením geometricky definovaného tělesa.

Tvrdost je možno vyjádřit jako funkci

$$H = f(R, P, F, T, t, v) \quad (5)$$

kde  $R$  jsou pružné vlastnosti zkoušeného kovu,

$P$  jsou plastické vlastnosti zkoušeného kovu,

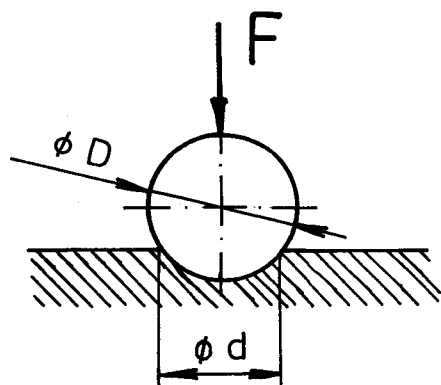
$F$  je velikost působící síly

$T$  je tvar a rozměr vnikajícího tělesa

$t$  je tření mezi vnikajícím tělesem a povrchem zkoušeného materiálu

$V$  je rychlost pohybu vtlačovaného tělesa.

Při zkoušce podle Brinella je zatlačovaná kulička o průměru  $D$  do povrchu zkoušeného materiálu silou  $F$ . Po odlehčení se měří průměr vtisku  $d$  (obr. 8)



Obr. 8. Princip měření tvrdosti podle Brinella.

Potom lze určit tvrdost, je-li síla  $F$  vyjádřena v N podle vztahu

$$HB = \frac{0,102 \cdot 2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (6)$$

Tvrdost má ve skutečnosti rozměr napětí, ale udává se jako bezrozměrné číslo.

Tvrdost se v praxi neurčuje ze vztahu (6), ale pro příslušný průměr vtisku a zatěžující sílu se odečítá z tabulek.

Jako vnikací těleso se používají kuličky z kalené chromové ocele nebo ze slinutých karbidů o průměru  $D = 10$  mm. Používají se i menší kuličky, obvykle o průměru  $D = 5; 2,5; 1,25$  a  $0,625$  mm.

Velikost zátěžné síly se volí ze vztahu

$$F = kD^2 \quad (7)$$

Konstanta  $k$  určena druhem zkoušeného materiálu (např. pro železo, ocel  $k = 30$ , pro měď, nikl a jejich slitiny  $k = 10$ , pro hliník a jeho slitiny  $k = 5$  a pod.).

Doba, po kterou se udržuje zatížení je stanovena normou a pro ocel do tvrdosti 140 HB je 30 s, pro tvrdší ocele je 10 s a pro neželezné kovy 60 s.

K údajím o tvrdosti se zapisují podmínky o zkoušce v pořadí:

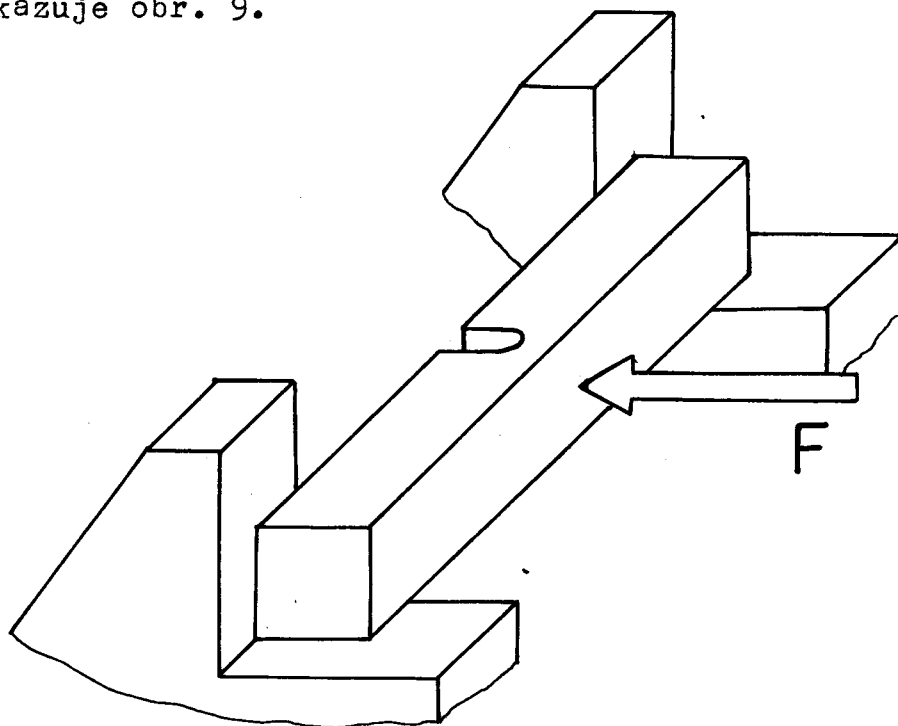
průměr kuličky, velikost a doba zatížení.

Jsou-li tyto podmínky zkoušky normální, t.j.  $D = 10$  mm,  $F = 29.400$  N (3 000 kp) a doba zatížení je 10 s, se tyto údaje neuvádějí.

V běžném provozu nejsou součásti strojů namáhány pouze neměnnými nebo zvolna se měnícími silami, ale častěji zátěžné síly se mění skokem nebo se cyklicky mění. Součást je tedy namáhána dynamicky. Posouzení vlastností materiálu za působení dynamických sil nám určují rázové zkoušky. Nejrozšířenější je rázová zkouška v ohybu. Měřítkem houževnatosti materiálu při rázovém zatížení je energie (práce) spotřebovaná k porušení zkoušeného tělesa. Vzhledem k vysoké houževnatosti ocelí by nedošlo k porušení vzorku, opatřují se tyto vrubem. Jde potom o vrubovou rázovou zkoušku.

Nejběžnější vrubovou rázovou zkouškou je Charpyho zkouška.

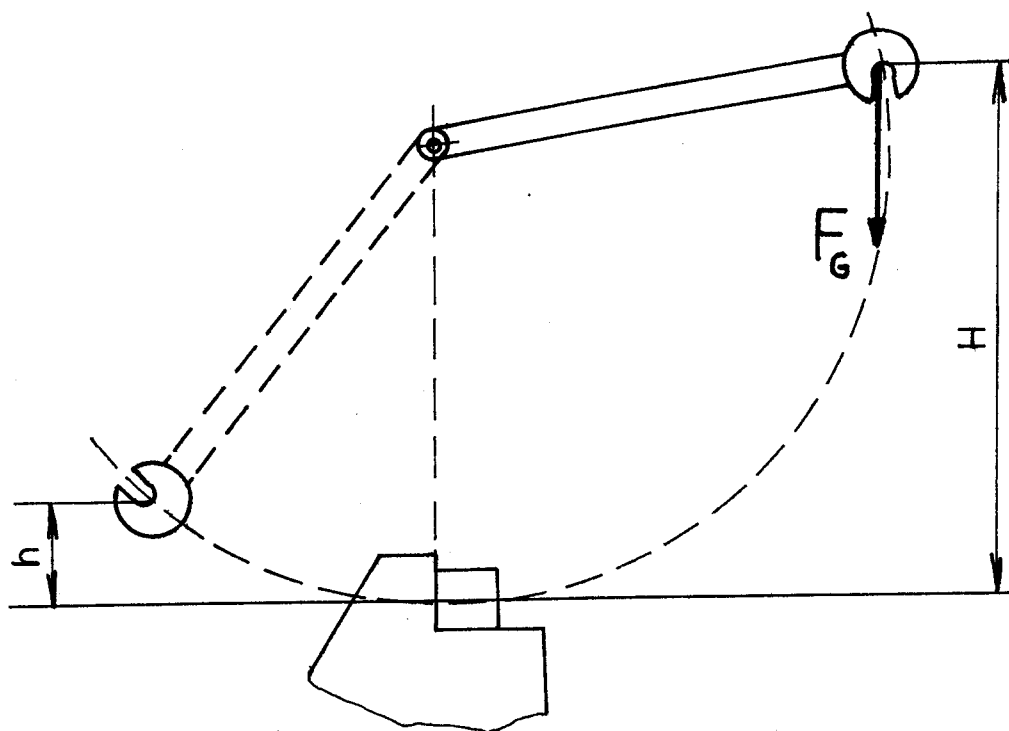
Princip zkoušky spočívá v rázovém zatížení zkušebního tělesa na opačné straně tělesa, než kde je vytvořen vrub. Těleso je zachyceno na podporách tak, jak celou situaci ukazuje obr. 9.



Obr. 9. Princip Charpyho zkoušky vrubové houževnatosti

Při zkoušce se zjišťuje práce spotřebovaná na přerážení vzorku. Náraz na vzorek se vyvodí kyvadlovým kladivem, které se pohybuje po kruhové dráze (obr. 10).

Nárazová rychlost kladiva na vzorek by měla být v rozsahu 4 až 7 m/s.



Obr. 10. Princip kyvadlového kladiva.

Velikost vrubové houževnatosti je dána podílem spotřebované práce  $K$  a plochy zkušebního tělesa v místě vrubu

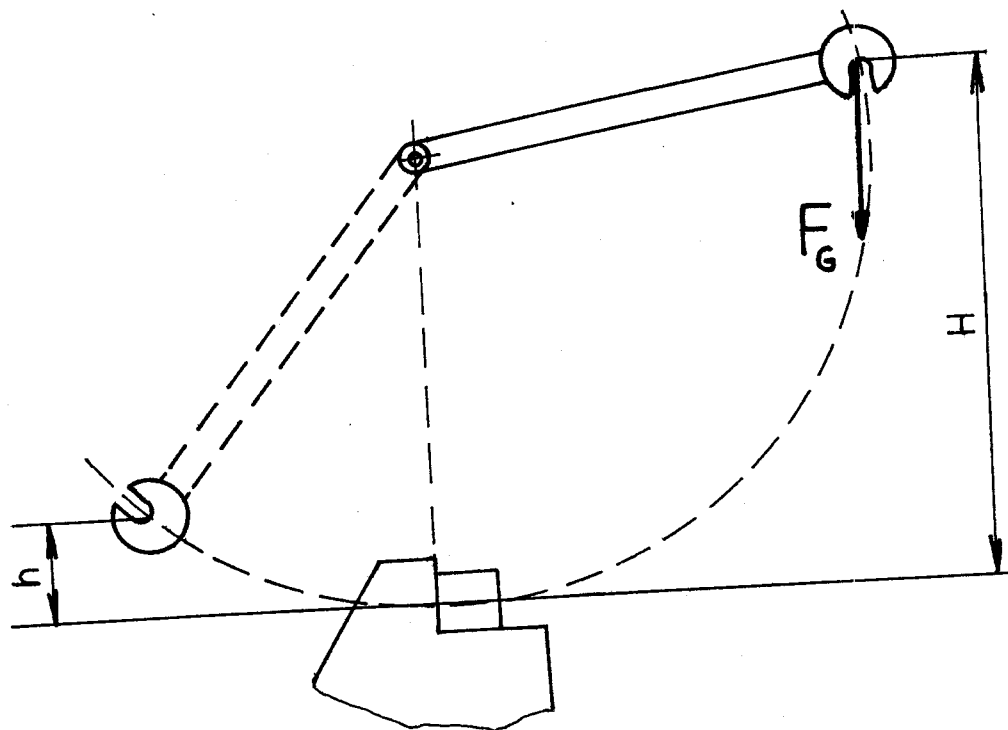
$$KC = \frac{K}{S_0} \quad [\text{J/cm}^2] \quad (8)$$

Spotřebovaná práce  $K$  je určena rozdílem potenciálních energií.

$$K = W - W' = F(H - h) \quad [\text{J}] \quad (9)$$

Při zkoušce se zjišťuje práce spotřebovaná na přerážení vzorku. Náraz na vzorek se vyvodí kyvadlovým kladivem, které se pohybuje po kruhové dráze (obr. 10).

Nárazová rychlost kladiva na vzorek by měla být v rozsahu 4 až 7 m/s.



Obr. 10. Princip kyvadlového kladiva.

Velikost vrubové houževnatosti je dána podílem spotřebované práce  $K$  a plochy zkušebního tělesa v místě vrubu

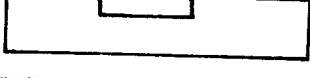
$$KC = \frac{K}{S_0} \quad [\text{J/cm}^2] \quad (8)$$

Spotřebovaná práce  $K$  je určena rozdílem potenciálních energií.

$$K = W_p - W'_p = F_G (H - h) \quad [\text{J}] \quad (9)$$

kde veličiny  $H$  a  $h$  jsou zřejmé z obr. 10.

Při uvádění výsledku zkoušky vrubové houževnatosti je nutné uvést druh vrubu, neboť má vliv na velikost vrubové houževnatosti (obr. 11). Nejpoužívanější jsou vruby tvaru U nebo V. Potom se vrubová houževnatost označuje KCU nebo KCV, popř. se za značku přidává číslo, které nám uvádí hloubku vrubu.

| VZOREK                                                                              | ÚHEL<br>VRUBU | KC [J/cm <sup>2</sup> ] |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-------------------------|
|    | 30°           | 67                      |
|    | 60°           | 64                      |
|    | 90°           | 71                      |
|   | 120°          | 115                     |
|  | 150°          | 183                     |
|  | 180°          | 174                     |

Obr. 11. Vliv tvaru vrubu na velikost vrubové houževnatosti.

Technologickými vlastnostmi nazýváme soubor fyzikálních a mechanických vlastností materiálu umožňující za definovaných podmínek určitý způsob zpracování materiálu na polotovary a konečné výrobky. Mezi nejdůležitější technologické vlastnosti patří:

- svařitelnost
- tvárnost
- slévateľnost
- obrobiteľnosť

Jak bylo již uvedeno v předcházející kapitole, je u nového materiálu předpokládána lepší obrobiteľnosť než u dosud používaných materiálů. Ověření tohoto předpokladu bude provedeno zkouškou obrobiteľnosti.

Obrobiteľnosť jako technologická vlastnosť nezávisí jen na fyzikálních a mechanických vlastnostech obráběného materiálu, ale je také ovlivňována řezným nástrojem a řeznými podmínkami.

Obrobiteľností rozumíme míru schopnosti materiálu být opracován obráběním.

Z fyzikálních vlastností nejvíce ovlivňuje obrobiteľnosť tepelná vodivost materiálu  $\lambda$ , protože na ní závisí odvádění tepla z místa řezu a tím i teplotu řezání.

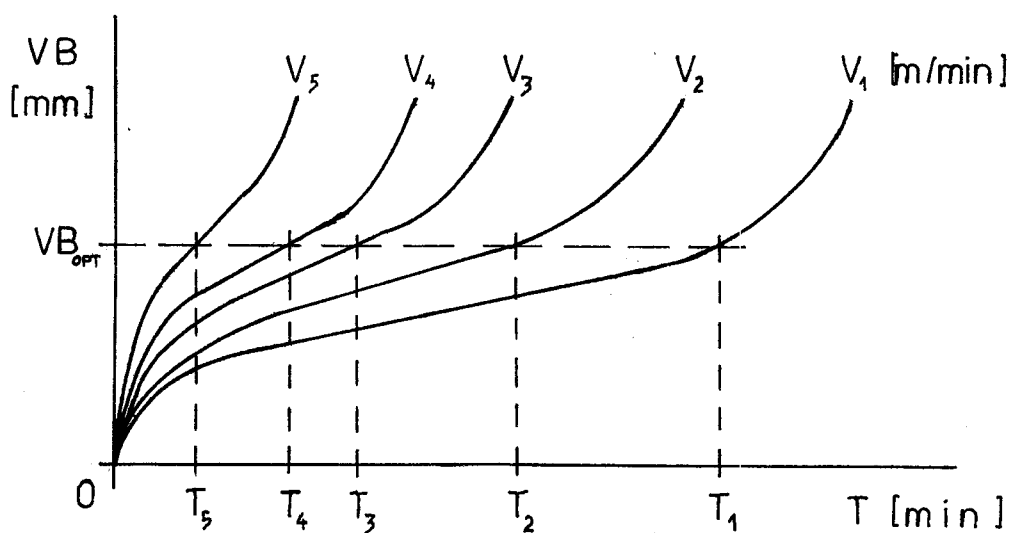
Z mechanických vlastností ovlivňuje obrobiteľnosť pevnost, houževnatost a tvrdost. Se zvyšující se pevností a tvrdostí se obrobiteľnosť kovu zpravidla zhoršuje. Tyto údaje však nejsou jednoznačným kritériem obrobiteľnosti, je nutné vzít v úvahu vždy další charakteristiky kovu jako je chemické složení, mikrostruktura, velikost zrna apod.

Technologická vlastnost obrobitelnost se hodnotí zkouškami obrobitelnosti. Zkousky obrobitelnosti dělíme podle doby trvání na :

- zkoušky dlouhodobé
- zkoušky krátkodobé

Dlouhodobé zkoušky probíhají za přibližně stejných podmínek, při nichž bude materiál v provozu obráběn a umožňují nám zařadit materiál do třídy obrobitelnosti.

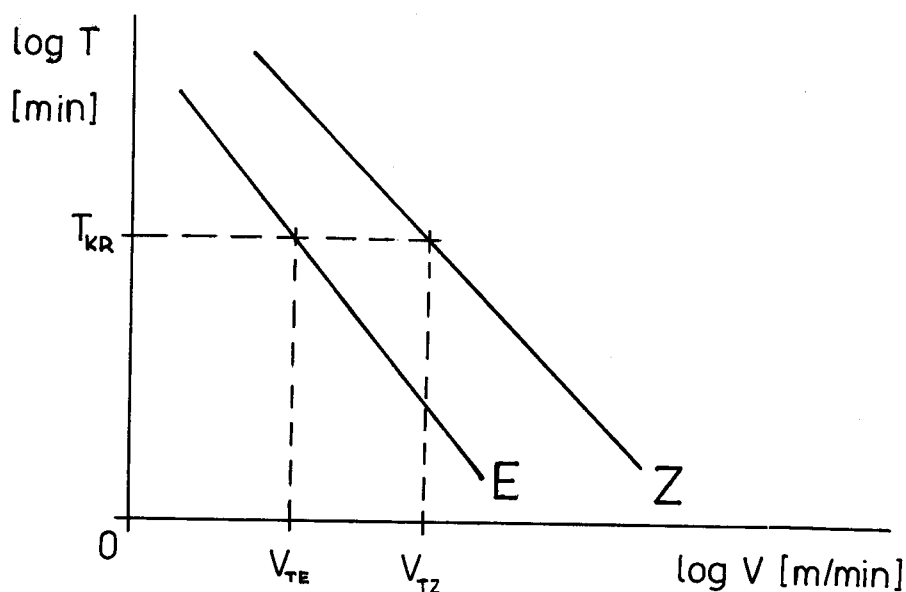
Při dlouhodobé zkoušce obrobitelnosti zjišťujeme závislost opotřebení řezného nástroje na čele  $VB$  v závislosti na čase  $T$  při pěti různých řezných rychlostech  $V_1$  až  $V_5$  (obr. 12). Tato závislost se určí u etalonového materiálu  $E$  a u zkoušeného materiálu  $Z$ . Etalonovým



Obr. 12. Závislost opotřebení řezného nástroje na čele na čase

materiálem je ocel 12 050.1, která je zařazena do třídy obrobitelnosti 12. Pro oba materiály (etalonový i zkoušený) jsou stejné řezné podmínky (stejná rychlosti, stejný posuv i hloubka řezu). Jako optimální opotřebení břitu  $VB$  se volí  $VB_{opt} = 0,4$  mm. Tomuto optimálnímu opotřebení odpovídají trvanlivosti  $T_1$  až  $T_5$ .

Z těchto údajů se sestojí závislost trvanlivosti  $T$  na řezné rychlosti  $V$  v logaritmických souřadnicích (obr.13). Do toho grafu se zanesou závislosti pro etalonový mate-



Obr. 13. Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti.

riál E a zkoušený materiál Z a zvolí se kritériální trvanlivost řezného nástroje  $T_{KR}$ . Této trvanlivosti odpovídají řezné rychlosti  $V_{TE}$  a  $V_{TZ}$ .

Potom je index obrobitelnosti dán poměrem těchto rychlostí.

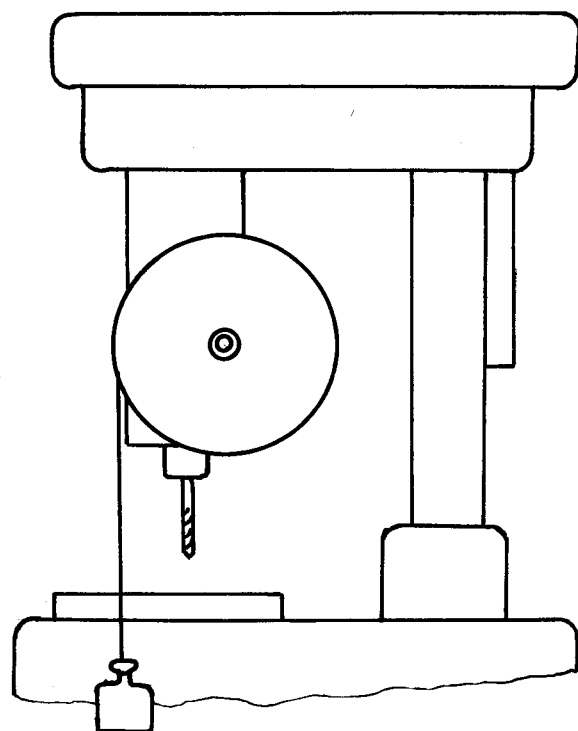
$$i = \frac{V_{TZ}}{V_{TE}} \quad [-] \quad (10)$$

Podle velikosti indexu obrobitelnosti se z tabulek přiřadí zkoušenému materiálu třída obrobitelnosti. Je-li  $i > 1$ , potom má zkoušený materiál lepší obrobitelnost než etalonový, je-li  $i < 1$ , pak je zkoušený materiál hůře obrobitelný.

Vzhledem k dlouhé době trvání zkoušky a velké spotřebě materiálu byly zavedeny tzv. krátkodobé zkoušky obrobitelnosti. U těchto zkoušek se však nezjistí třída obrobitelnosti jako u dlouhodobé zkoušky, ale pouze se porovná obrobitelnost zkoušeného a etalonového materiálu. Těchto krátkodobých zkoušek existuje celá řada např. jako kritérium obrobitelnosti je teplota řezání, krátkodobá zkouška čelním soustružením aj.

Vzhledem k možnostem provádění krátkodobé zkoušky obrobitelnosti jsem volil zkoušku obrobitelnosti vrtáním při konstantní posuvové síle.

Princip zkoušky spočívá ve zjišťování doby potřebné k vyvrtání díry při konstantní posuvové síle působící na vrták. Na vrtačku se namontuje zařízení se závažím působící na pohyb vřetene, které vyvolává konstantní posuvovou sílu (obr. 14). Při zkoušce se vyvrtá díra o délce  $l$  do zkoušeného materiálu silou vyvozenou závažím a elektrickými stopkami se zjistí potřebná doba  $t$  k vyvrtání díry. Spuštění a zastavení elektrických stopek zajišťuje mikrospínač umístěný na vřetenu vrtačky a je seřízen tak, že při záběru vrtáku do materiálu je spustí a po vyvrtání díry je opět vypne.



Obr. 14. Zařízení pro zkoušku obrobitelnosti vrtáním.

Po vyvrtání díry v zkoušeném materiálu se vyvrtá díra do etalonového materiálu a opět se zjistí potřebná doba k vrtání. Toto se opakuje  $n$  krát.

Index obrobitelnosti se zjistí poměrem řezných rychlostí zkoušeného materiálu  $V_{fz}$  a etalonového materiálu  $V_{fE}$

$$i = \frac{V_{fz}}{V_{fE}} \quad [-] \quad (11)$$

Řezná rychlost se určí podle vztahu

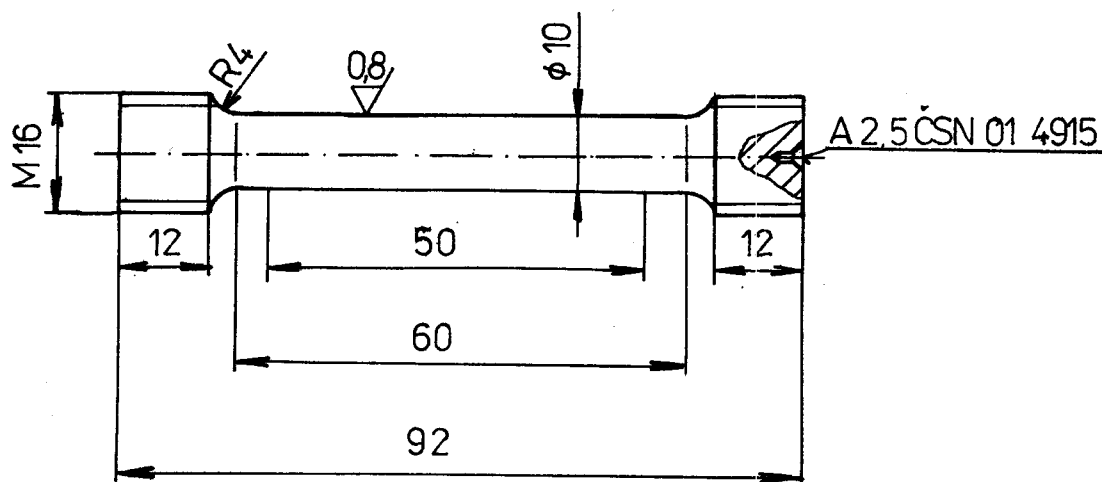
$$V_f = \frac{n l}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad [\text{m/min}] \quad (12)$$

Je-li index obrobiteľnosti  $i > 1$ , potom zkoušený materiál má lepší obrobiteľnost než etalonový, je-li  $i = 1$ , potom mají oba materiály stejnou obrobiteľnost a je-li  $i < 1$ , potom zkoušený materiál má horší obrobiteľnost než etalonový materiál.

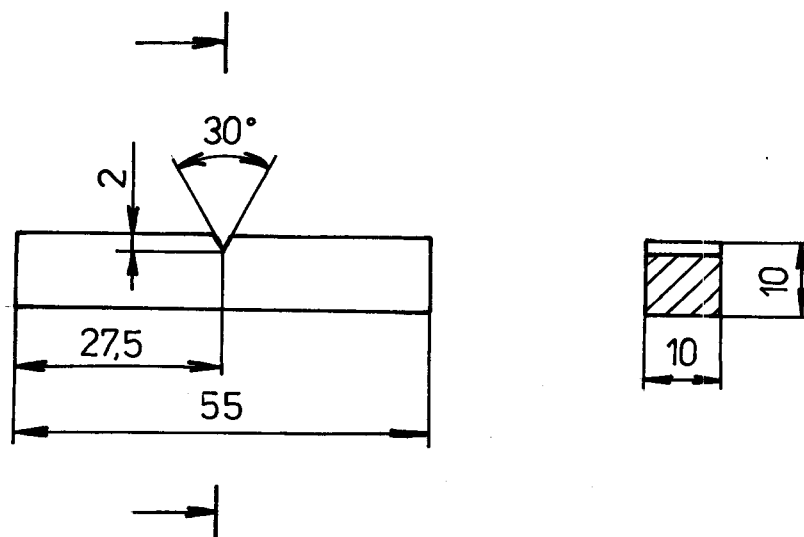
## 5.2. POUŽITÉ POMŮCKY A ZAŘÍZENÍ

Pro zhotovení zkušebních těles pro zkoušky byl získán materiál z tyčového polotovaru o průměru 150 mm a délce 40 mm.

Z tohoto materiálu byly zhotoveny tři tyčinky pro zkoušku v tahu podle obr. 15 a pět zkušebních tělísek pro rázovou zkoušku podle obr. 16.



Obr. 15. Zkušební tyčinka pro zkoušku tahem.



Obr. 16 Zkušební těleso pro rázovou zkoušku

Vzhledem k malé délce výchozího materiálu je směr tváření výchozího plotovaru kolmý na osu tyčinky pro tahovou zkoušku.

Zbytek materiálu byl použit pro měření tvrdosti a pro zkoušku obrobitelnosti:

Pro tahovou zkoušku byl použit trhací hydraulický stroj, typ FZP 100, výrobce VEB Industriewes, Rauenstein NDR.

Základní parametry:

|                       |                 |
|-----------------------|-----------------|
| zkušební síla         | max. 100 kN     |
| pracovní prostor      | výška 950 mm    |
|                       | šířka 410 mm    |
| rychlost pohybu pístu | 1 m/min         |
| přesnost měření       | $\leq \pm 1 \%$ |

Pro rázovou zkoušku použito Charpyho kladivo,  
rozsah práce 0 + 300 J.

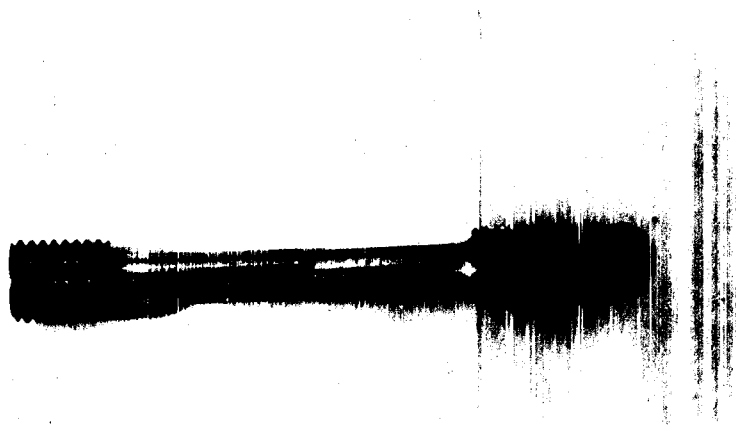
K měření tvrdosti byl použit tvrdoměr s vnikací ku-  
líčkou o průměru 2,5 mm.

Ke zkoušce obrobitelnosti byla použita sloupová  
vrtačka výrobce TOS s rozsahem otáček 112 až 1120 ot/min.  
a elektrické stopky s měřícím rozsahem na stotiny sekundy  
s mikropsínačem.

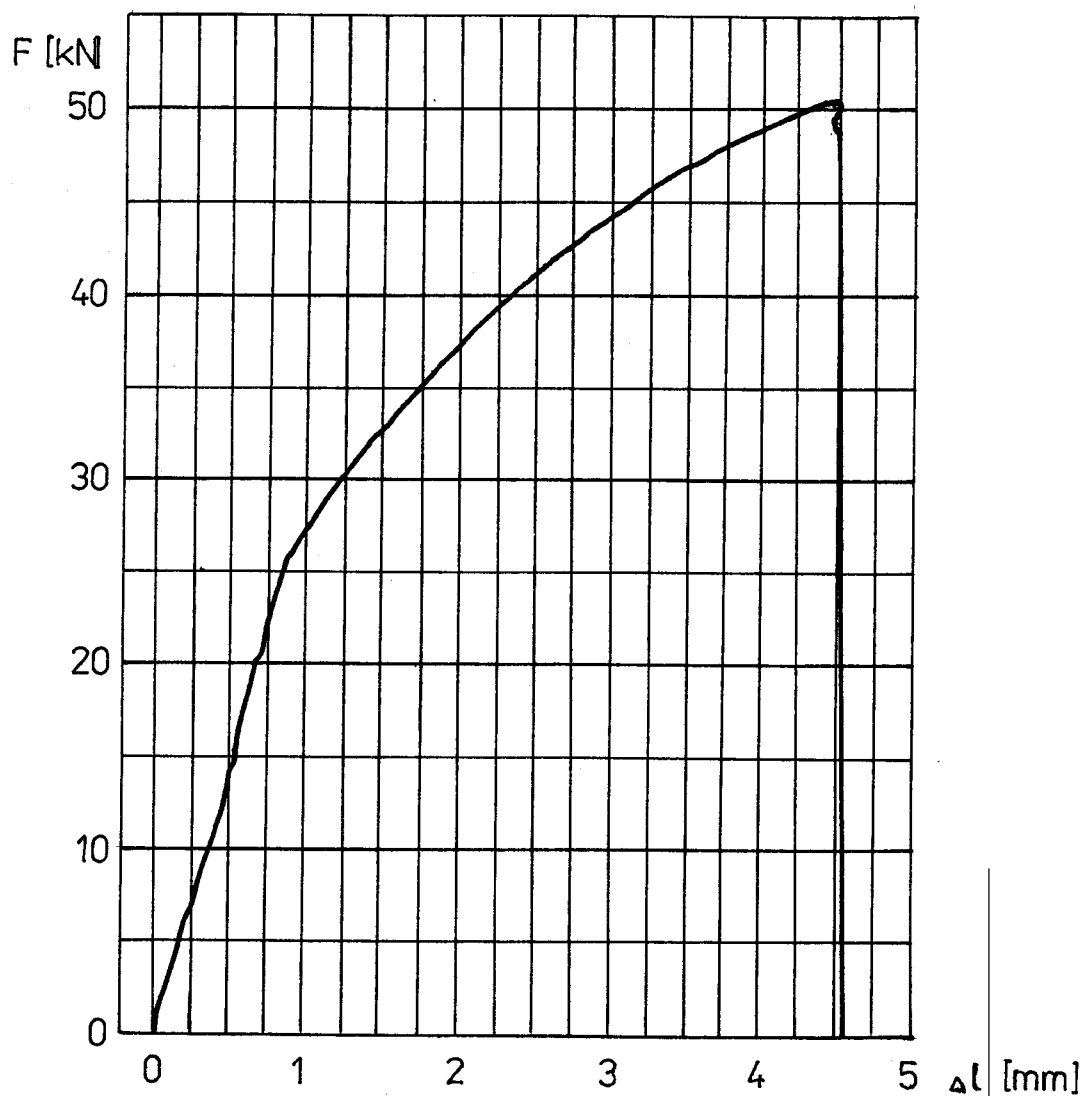
### 5.3. NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY

Výsledkem tahové zkoušky je tahový diagram zachycený  
zapisovačem v trhacím stroji a přetržený zkušební vzorek.

Obr. 17 ukazuje přetržený vzorek č. 3 a obr. 18  
ukazuje záznam tahového diagramu pro tentýž vzorek.



Obr. 17. Přetržená tahová tyčinka



Obr. 18. Tahový diagram.

Hodnoty odměřené ze vzorku, odečtené z tahového diagramu a vypočítané podle vztahů (2), (3) a (4) udává tabulka 6.

| Vzorek<br>číslo | $L_o$<br>[mm] | $S_o$<br>[mm <sup>2</sup> ] | $L_u$<br>[mm] | $S_u$<br>[mm <sup>2</sup> ] | $F_{p0.2}$<br>[kN] | $F_M$<br>[kN] | $R_{p0.2}$<br>[MPa] | $R_M$<br>[MPa] | A<br>[%] | Z<br>[%] |
|-----------------|---------------|-----------------------------|---------------|-----------------------------|--------------------|---------------|---------------------|----------------|----------|----------|
| 1               | 50            | 78,54                       | 54,5          | 76,98                       | 27,6               | 50,7          | 351                 | 646            | 9,0      | 2,0      |
| 2               | 50            | 78,54                       | 54,0          | 76,98                       | 28,4               | 50,4          | 362                 | 642            | 8,0      | 2,0      |
| 3               | 50            | 78,54                       | 54,5          | 75,43                       | 28,2               | 50,6          | 359                 | 644            | 9,0      | 4,0      |

Zkouška tvrdosti byla provedena zatěžující silou 187,5 kg.

Byly zjištěny tyto hodnoty tvrdosti HB: 207  
195  
207  
205

Při rázové zkoušce na Charpyho kladivu byly odečteny hodnoty spotřebované práce, která udává tabulka 7. Tato tabulka udává i vypočtené hodnoty vrubové houževnatosti vypočtené podle vztahu (8).

Tab. 7. Výsledky rázové zkoušky

| Vzorek<br>číslo | $S_o$<br>[mm <sup>2</sup> ] | A<br>[J] | KCV<br>[J/cm <sup>2</sup> ] |
|-----------------|-----------------------------|----------|-----------------------------|
| 1               | 80                          | 6        | 7,5                         |
| 2               | 80                          | 8        | 10,0                        |
| 3               | 80                          | 7        | 8,8                         |
| 4               | 80                          | 7        | 8,8                         |
| 5               | 80                          | 6        | 7,5                         |

Pro krátkodobou zkoušku obrobiteľnosti bylo použito závaží k vyvolání konstatní posuvové síly o tíže G=900 N. Hloubka vrtné díry byla l = 10 mm a použitý vrták měl průměr 6 mm.

Velikost otáček jsem volil ze vztahu

$$n = \frac{1000 V}{\pi D} \quad [\text{ot/min}] \quad (13)$$

kde  $V$  je řezná rychlost v m/min a

$D$  je průměr vrtáku v mm.

Pro ocel o pevnosti nad 600 MPa udává /5/ řeznou rychlost pro vrtání 8 až 20 m/min. Rozsahu těchto rychlostí odpovídají otáčky v rozpětí od 425 do 1061 ot/min. Pro zkoušku obrobitelnosti jsem volil otáčky 710 ot/min.

Naměřené doby vrtání jsou uvedeny v tabulce 8.

Tab. 8 naměřené časy při krátkodobé zkoušce obrobitelnosti

| Díra číslo | Materiál<br>AISI 11 41 | Materiál<br>12 050.1 |
|------------|------------------------|----------------------|
| 1          | 16,80                  | 18,22                |
| 2          | 16,65                  | 18,38                |
| 3          | 16,57                  | 18,82                |
| 4          | 16,86                  | 19,02                |
| 5          | 17,16                  | 19,07                |
| 6          | 17,46                  | 18,56                |
| 7          | 17,60                  | 18,48                |
| 8          | 17,34                  | 18,98                |
| 9          | 17,42                  | 18,76                |
| 10         | 17,77                  | 19,12                |
| 11         | 17,85                  | 18,94                |
| 12         | 17,80                  | 19,02                |
| 13         | 17,74                  | 19,12                |
| 14         | 17,74                  | 18,52                |
| 15         | 17,43                  | 18,70                |
| 16         | 17,95                  | 19,10                |

| Díra<br>číslo         | Materiál<br>AISI 11 41 | Materiál<br>12 050.1 |
|-----------------------|------------------------|----------------------|
| 17                    | 18,24                  | 19,08                |
| 18                    | 18,26                  | 19,46                |
| 19                    | 18,16                  | 20,42                |
| 20                    | 17,98                  | 20,34                |
| $\sum_{i=1}^{20} t_i$ | 350,78                 | 380,11               |

Index obrobiteľnosti bude potom vypočítaný ze vzťahu (11) při použití vzťahu (12).

$$V_{fz} = \frac{20 \cdot 10}{350,78} = 0,570$$

$$V_{fE} = \frac{20 \cdot 10}{380,11} = 0,526$$

$$i = \frac{0,570}{0,526} = 1,084$$

## 6. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Jak bylo již uvedeno v předcházející stati, jsou vzorky odebírány radiálně ve směru tváření tyčového výchozího polotovaru. Proto budou zjištěné hodnoty nižší, než kdyby

byly vzorky odebírány axiálně ve směru tváření.

Při zjišťování vhodnosti nového materiálu pro výrobu RSK je nutné porovnat základní mechanické hodnoty s mechanickými hodnotami materiálů doposud užívanými.

Mechanické hodnoty (mez pevnosti a mez kluzu) jsou srovnatelné s oceli 12 050.1 a 13 123. Srovnání nám ukazuje tabulka 9.

Tab. 9. Srovnání mechanických hodnot

| Materiál   | $R_P$<br>[MPa] | $R_M$<br>[MPa] |
|------------|----------------|----------------|
| 12 050.1   | 285            | min 590        |
| 13 123     | 285            | 490 až 640     |
| AISI 11 41 | 357            | 644            |

Plastické hodnoty - tažnost a kontrakce - jsou na velmi nízké úrovni. Toto bude zřejmě ovlivněno způsobem odběru vzorku a výraznou řádkovitou strukturou materiálu.

Hodnota vrubové houževnatosti je velice nízká ( $8,5 \text{ J/cm}^2$ ). Nízká hodnota vrubové houževnatosti je typická pro ocel s hrubozrnnou strukturou.

Výsledky zkoušky tvrdosti nejsou ovlivněny místem měření a velikost tvrdosti je na přibližně stejné hodnotě jako u dosud používaných materiálů.

Zkouška obrobitelnosti byla prováděna pouze jako krátkodobá, protože jak bylo uvedeno výše je dlouhodobá zkouška náročná nejenom časově, ale i na spotřebu materiálu při zkoušce. Touto krátkodobou zkouškou nelze ovšem zařadit zkoušený materiál do třídy obrobitelnosti, ale pouze se porovná zkoušený a etalonový materiál a zjistí se, který má lepší obrobitelnost.

Při krátkodobé zkoušce vrtáním s konstantní posuvovou silou byl zjištěn index obrobitelnosti  $i = 1,084$ .

Jelikož je  $i > 1$ , potom je materiál AISI 11 41 lépe obrobitelný než ocel 12 050.1.

V dalších pracech by bylo nutné provést odlouhodobou zkoušku obrobitelnosti, která by zařadila materiál do konkrétní třídy obrobitelnosti.

Vzhledem k velmi náročnému požadavku maximální ochlazovací rychlosti při tepelném zpracování materiálu AISI 11 41, by mohlo být odzkoušeno zvýšení této rychlosti. Tuto skutečnost by bylo nutno ověřit dlouhodobými provozními zkouškami kompresorů.

## 7. ZÁVĚR

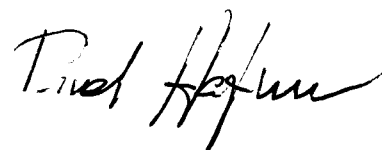
Cílem této práce bylo porovnat nově navrhovaný materiál pro výrobu RŠK s materiály dosud užívanými.

Mechanickými zkouškami byly zjištěny základní mechanické hodnoty navrhovaného materiálu, které jsou na srovnatelné výši s materiály dosud používanými.

Zkouška obrobitelnosti nám potvrdila předpoklad lepší obrobitelnosti materiálu AISI 11 41 vzhledem k obsahu síry.

Pro posouzení vhodnosti materiálu AISI 11 41 pro výrobu RŠK je nutné ještě vykonat provozní zkoušky kompresorů.

Na závěr bych chtěl poděkovat všem, kdo se podíleli na vypracování této práce, zejména Doc. ing. J. Horynovi, CSc. a ing. A. Vaculíkovi za cenné připomínky a podněty.



# SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- /1/ RYŠ, P. - CENEK, M: Nauka o materiálu I, svazek 4.,  
Železo a jeho slitiny, 2. vydání, Praha 1975
- /2/ PLUHAŘ, J. - KORITTA, J.: Strojírenské materiály  
3. vydání, Praha 1981
- /3/ VELES, P.: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov,  
1. vydání, Bratislava 1985
- /4/ VÚ ČKD Praha: Chemické složení tavby - protokol  
č. 376/86 ze dne 26.11.1986
- /5/ VIGNER, M. - PŘIKRYL, Z.: Obrábění, 3 vydání,  
Praha 1984
- /6/ ČKD Praha: Šroubové kompresory. 1964