

Vysoká škola: strojní a textilní..... Fakulta: strojní.....
Katedra: obrábění a montáže..... Školní rok: 1984/85.....

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU) č.324

pro Zdenka O b o r n í k a

obor 23-07-8 strojírenská technologie

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

Název tématu: Metodika určování charakteristických veličin lomové
mechaniky pro účely výzkumu obrábění

Zásady pro vypracování:

1. Význam studia lomové mechaniky pro výzkum procesu obrábění
2. Studium dosavadních poznatků z oblasti lomové mechaniky zaměřené k potřebám úkolu
3. Studium a rozbor dosavadních poznatků z procesu obrábění z hlediska aplikace lomové mechaniky
4. Návrh metodiky provádění experimentů
5. Konstrukce zařízení pro inic. lomu
6. Provedení experimentů a jejich vyhodnocení
7. Shrnutí poznatků, návrhy na pokračování řešení, závěry

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 5
PSČ 461 17

V250/85 5

Rozsah grafických prací: 6-8 výkresů

Rozsah průvodní zprávy: 40 stran

Seznam odborné literatury:

Zemánková, J.: Technická mechanika. Úvod do lomové mechaniky.
ČVUT Praha - skriptum, 1981.

Stříž, B.: Pružnost a pevnost I., II. VŠST Liberec - skriptum,
1981.

Buda, J. - Békés, J.: Teoretické základy obrábění kovů. 2. vydání.
ALFA Bratislava 1977.

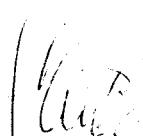
Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Jaromír G a z d a, CSc
konzultant: Ing. Vladimír Humen (KMP)
Doc. Ing. Miroslav Kořínek, CSc (KMM)

Datum zadání diplomové práce: 15. 10. 1984

Termín odevzdání diplomové práce: 24. 5. 1985

L. S.


Doc. Ing. Jaromír Gazda, CSc.
Vedoucí katedry


Doc. RNDr. Bohuslav Stříž, CSc
Děkan

v Liberci dne 20. 9. 1984

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

Obor: 23-07-8

Strojírenská technologie

Zaměření

Obrábění a montáže

Katedra obrábění a montáže

Metodika určování charakteristických veličin lomové
mechaniky pro účely výzkumu obrábění

Zdeněk Oborník

KOM-OM-324

Vedoucí práce: Doc. Ing. Jaromír Gazda, CSc.

Konzultant: Ing. Vladimír Humen

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	69
Počet příloh:	17
Počet obrázků:	36
Počet výkresů:	17

MDT:

Datum: 24. 5. 1985

Místopřísežně prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval
samostatně a uvedl veškerou použitou literaturu.

Stanislav V. Staneček

V Liberci dne 24. května 1985

OBSAH

SEZNAM NEJDULEŽITĚJŠÍCH SYMBOLU A ZNAČEK

1. ÚVOD

2. STUDIUM DOSAVADNÍCH POZNATKŮ O OBROBITELNOSTI MATERIÁLU

2. 1. Obrobitelnost kovových materiálů

2. 2. Hodnocení obrobitelnosti materiálu podle ČSN

2. 3. Hodnocení obrobitelnosti materiálu podle normativu

2. 4. Stanovení obrobitelnosti ocelí podle drsnosti povrchu

2. 5. Stanovení kinetické obrobitelnosti kovových materiálů pomocí aplikace magnetokorelační analýzy

2. 6. Tvorba třísky jako lomový proces a možnost hodnocení obrobitelnosti materiálu podle veličin lomové mechaniky

2. 7. Závěr kapitoly

3. ZÁKLADNÍ POJMY LOMOVÉ MECHANIKY

3. 1. Definice lomu

3. 2. Irwinovo kritérium křehkého porušení

3. 3. Energetické kritérium křehkého porušení

3. 4. Kritérium otevření trhliny

4. NÁVRH METODIKY PROVÁDĚNÍ EXPERIMENTU

4. 1. Výzkum závislosti lomová houževnatost - obrobitelnost materiálu

4. 2. Zkouška lomové houževnatosti K_{Ic} kovů při rovinné deformaci

5. NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO INICIACI ÚNAVOVÉ TRHLINY

5. 1. Návrh zařízení

5. 2. Kontrola zařízení

5. 3. Realizace

6. ZÁVĚR

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Seznam nejdůležitějších symbolů a značek

a	- Tloušťka vzorku
b	- Šířka vzorku
B	- Magnetická indukce
c	- Celková hloubka trhliny
E	- Youngův modul pružnosti
F	- Síla při zatěžování vzorku
F_5	- Síla odpovídající průsečíku záznamu síla - rozevření se sečnou, mající sklon, popř. tangentu o 5 % nižší než tečna v počátku záznamu
F_Q	- Síla pro výpočet K_Q
G	- Rychlost uvolňování elastické energie
G_{Ic}	- Kritická rychlost uvolňování energie
H	- Intenzita magnetického pole
$i_{(t)}$	- Magnetizační proud
J	- J - integrál
K_I	- Součinitel intenzity napětí při rovinné deformaci
K_{Ic}	- Lomová houževnatost
K_Q	- Provizorní hodnota K_{Ic}
$K_{f \max}$	- Součinitel intenzity napětí pro maximální sílu při vytvoření únavové trhliny
K_{chsl}, K_{chs2}	- Konstanty chemického složení
K_{mh}	- Konstanta mechanických vlastností
Re	- Mez kluzu
T	- Trvanlivost břitu
v	- Řezná rychlost - Rychlost šíření trhliny
α	- Úhel sklonu lineární části záznamu síla-rozevření

Úvod

Strojírenská výroba má v našem národním hospodářství klíčový význam. Je třeba stále více zvyšovat produktivitu práce na základě uplatňování vědeckotechnického rozvoje.

Obrábění patří mezi nejrozšířenější strojírenské technologie. S rozvojem strojírenství se i požadavky na obrábění neustále stupňují. Stále častěji se stává, že empirický způsob řešení základních problémů (např. určení obrobiteľnosti, zvyšování trvanlivosti nástrojů) nepřináší zásadní pokrok. Jsou obráběny materiály od dobře obrobiteľných po špatně obrobiteľné. Stále více se uplatňují nové řezné materiály, které si vynucují i nové konstrukce obráběcích strojů.

Význam teoretického výzkumu obrátění poroste především při uplatňování automatizace a NC techniky s adaptivním řízením. Z hlediska volby řezných podmínek, na jejichž velikost má velký vliv obrobiteľnost materiálů, je třeba rozlišovat jednak obráběcí stroje a linky s tvrdou automatizací, určené pro sériovou výrobu, jednak NC obráběcí stroje a výrobní systémy využívané pro kusovou výrobu. Zatímco u strojů s tvrdou automatizací jsou obvykle řezné podmínky postupně ověřovány a optimalizovány, není tento postup přijatelný a možný z hlediska ekonomického pro druhou skupinu strojů. V budoucnu bude tedy požadováno, aby obrobiteľnost každého materiálu měla velmi malé odchylky od stanovených hodnot. To je ale otázka výroby těchto materiálů. Z hlediska technologie obrábění půjde především o její zjišťování.

Smyslem této práce je vytvořit předpoklady pro měření lomové houževnatosti ocelí v laboratořích KMP resp. KOM a

uvést možnost aplikace zjištěných veličin na hodnocení obrobitelnosti materiálu. Práce je zaměřena především na teoretický rozbor poznatků z dané problematiky a konstrukční řešení zařízení pro iniciaci únavové trhliny. Experimentální část nebyla v předpokládaném rozsahu realizována, protože navržené zařízení nebylo ve vývojových dílnách VŠST vyrobeno s dostatečným předstihem před odevzdáním diplomové práce.

Kapitola druhá se zabývá poznatky o obrobitelnosti materiálu. Důraz je kladen na některé nové způsoby hodnocení obrobitelnosti materiálu (pomocí magnetokorelační analýzy) a zvláště na možnost hodnocení obrobitelnosti podle veličin lomové mechaniky.

Problematika lomové mechaniky je teoreticky náročná a nebyla na VŠST přednášena, proto je jí věnována třetí kapitola.

Ve čtvrté kapitole je proveden návrh experimentů na zjištění lomové houževnatosti excentrickým tahem. Tato kapitola vychází z návrhu normy na zkoušení lomové houževnatosti ČSN 42 03 47.

Konstrukce zařízení je uvedena v páté kapitole. Tato kapitola je doplněna výkresovou dokumentací a výsledky ověřovacích zkoušek zařízení pro tvorbu únavové trhliny, která je nutná pro zjištění lomové houževnatosti.

2. Studium dosavadních poznatků o obrobitelnosti materiálu

2. 1. Obrobitelnost kovových materiálů

Jednou ze základních vlastností strojírenských materiálů z hlediska technologie a ekonomiky obrábění je jejich obrobitelnost. Obrobitelnost materiálů není přesně definována, tzn. že nemůžeme určit ani její absolutní velikost.

Obrobitelnost lze chápat různým způsobem. Někteří teoretikové chápou obrobitelnost jako výsledek celkového řezného procesu [1]. Tomuto pojetí odpovídá návrh definice, kterou vypracovala komise ISO - TC 29/WG 22. "Obrobitelnost je definována jako souhrn vlastností materiálu, určující jeho vhodnost k obrábění konkrétním způsobem."

V tomto případě se obrobitelnost dále rozděluje podle faktoru, který se používá k jejímu hodnocení [2].

Tento faktor může být:

- Úroveň řezné rychlosti, při které je dosaženo požadované trvanlivosti řezného břitu.

Tento faktor určuje kinetickou obrobitelnost materiálu.

- Úroveň řezné síly, kroutícího momentu nebo výkonu potřebného na odřezání vrstvy - určuje dynamickou obrobitelnost materiálu.
- Jakost obrobené plochy a přesnost geometrických rozměrů obrobku - určuje mikrogeometrickou obrobitelnost.
- Jako doplňkové hodnocení obrobitelnosti se používá tvar třísky.

Obrobitelnost materiálu je však možno chápat jako materiálovou technologickou vlastnost. V tomto případě se

obrobitelností rozumí schopnost oddělování třísky z obrobku, která závisí zejména na materiálových parametrech. Chápeme-li obrobitelnost jako oddělování třísky a tedy jako mezní stav části tělesa v oblasti řezu, lze faktory, které obrobitelnost ovlivňují rozdělit do dvou hlavních skupin [3]:

- a) Interní faktory - obráběný materiál, jeho chemické a fázové složení, technologické a tepelné zpracování
- b) Externí faktory - řezné podmínky, časový průběh zátěžných sil, prostředí, geometrie nástroje atd.

V současném vývoji nabývají stále více na významu hypotézy, které se snaží hodnotit obrobitelnost podle materiálových vlastností a to tak, aby postihly proces tvorby třísky. Jestliže chápeme oddělování třísky jako plastickou deformaci s následujícím lomenem, pak je možno se domnívat, že vhodným kritériem obrobitelnosti by mohla být některá veličina lomové mechaniky (viz část 2. 6).

Některé možnosti hodnocení obrobitelnosti jsou uvedeny v dalších částech této kapitoly. Jsou to ta kritéria obrobitelnosti, která by mohla být využita při porovnání s naměřenými hodnotami lomové houževnatosti (hodnocení podle normy ČSN, podle normativu) a dále některé nové způsoby hodnocení obrobitelnosti podle materiálových vlastností (pomocí magnetokorelační analýzy, podle drsnosti povrchu).

2. 2. Hodnocení obrobitelnosti materiálu podle ČSN

Tato kapitola byla zpracována na základě studia literatury [10, 2]

Klasifikace obrobitelnosti se provádí dlouhodobou zkouškou, při které se zjišťuje závislost trvanlivosti nástroje na řezné rychlosti.

Výsledky jsou ovlivněny nejen vlastnostmi obráběného a řezného materiálu, ale i množstvím dalších faktorů jako jsou řezné podmínky, geometrie nástroje, prostředí, volba kritéria otupení nástroje atd., proto je třeba provádět zkoušku při standardních podmínkách.

Problematika zkoušky

Při určování obrobitelnosti se vychází z klasického Taylorova empirického vztahu mezi řeznou rychlostí a trvanlivostí. /2.1./

$$v \cdot T^{\frac{1}{m}} = c \quad (2.1)$$

kde v - řezná rychlost

T - trvanlivost

m - exponent určující citlivost řezného materiálu na řeznou rychlost

c - konstanta (její velikost je rovna řezné rychlosti při trvanlivosti $T = 1$ min.)

Taylorův vztah lze někdy použít ve tvaru

$$v^m \cdot T = c_T$$

V tomto případě je konstanta c_T rovna trvanlivosti nástroje

při řezné rychlosti $v = 1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Standardní podmínky

Pro zajištění objektivních výsledků zkoušky se musí používat standardní podmínky.

Jako etalonový materiál se používá ocel 12 050.1. Polotovár musí mít předepsanou velikost a musí být upraven podle ČSN. Jako nástroj je doporučeno používat břitové destičky z banky nástrojových materiálů. Geometrie řezné části nástroje je definována ČSN 220011.

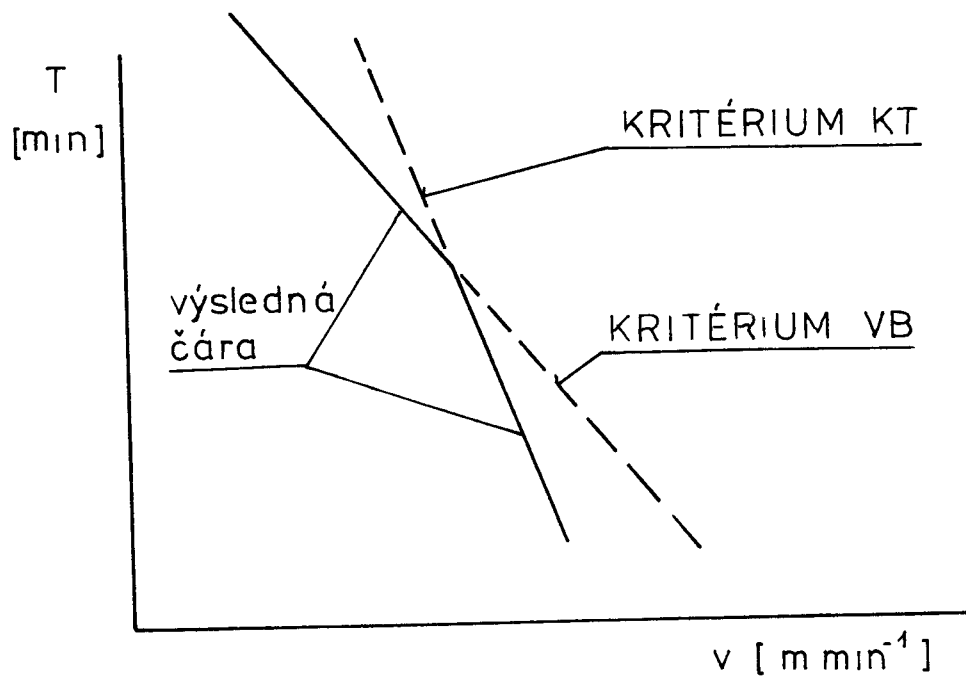
Soustruh, na kterém se zkouška provádí, musí být dostatečně tuhý a přesný a musí být vybaven plynulou změnou otáček, aby bylo možno udržovat konstantní řeznou rychlost při měnícím se průměru obrobku.

Kritérium trvanlivosti břitu

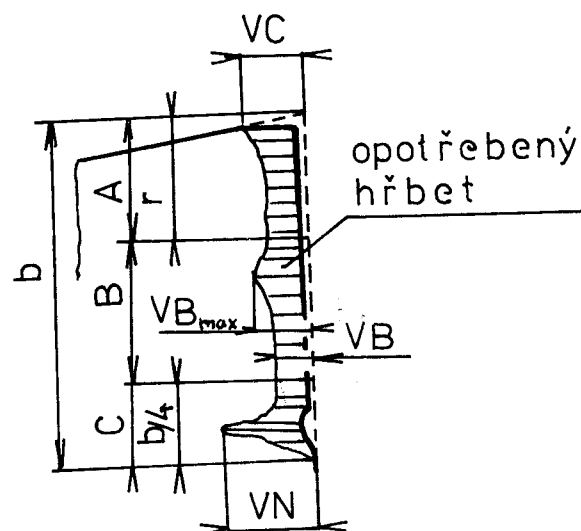
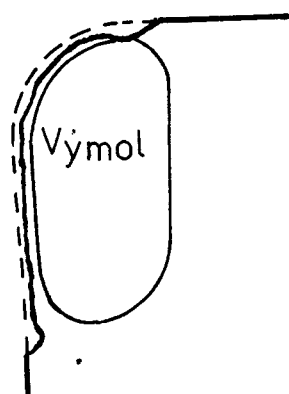
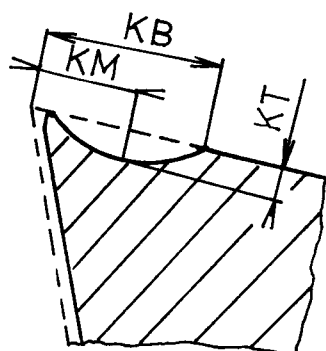
Jako kritérium trvanlivosti se volí určitá hodnota toho druhu opotřebení břitu, která bude nástroj nejvíce ovlivňovat. Pokud není zřejmé, které opotřebení bude převládat, volí se dvě kritéria a sestaví se dvě křivky $T - v$. Jako výsledné kritérium se pak volí to, které je dosaženo dříve. Pokud se křivky $T - v$ obou kritérií protínají, je výsledná křivka lomená (obr. 2.2.)

Doporučená kritéria trvanlivosti (obr. 2.3)

- a) Střední šířka opotřebení na hřbetě $VB = 0,3$, jestliže lze pokládat opotřebení v oblasti B za rovnoměrné
- b) Hloubka výmolu na čele KT . Velikost je závislá na posuvu $f [\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}]$
$$KT = 0,06 + 0,3f [\text{mm}]$$



Obr. 2.2 Lomená čára $T - v$



Obr. 2.3 Kritéria trvanlivosti

Pro účely měření je opotřebení na hřbetě rozděleno do oblastí A, B, C.

Oblast A je zakřivená část břitu

B - přímková část břitu, ve které se provádí měření

C - čtvrtina oblasti opotřebení nejdál od špičky

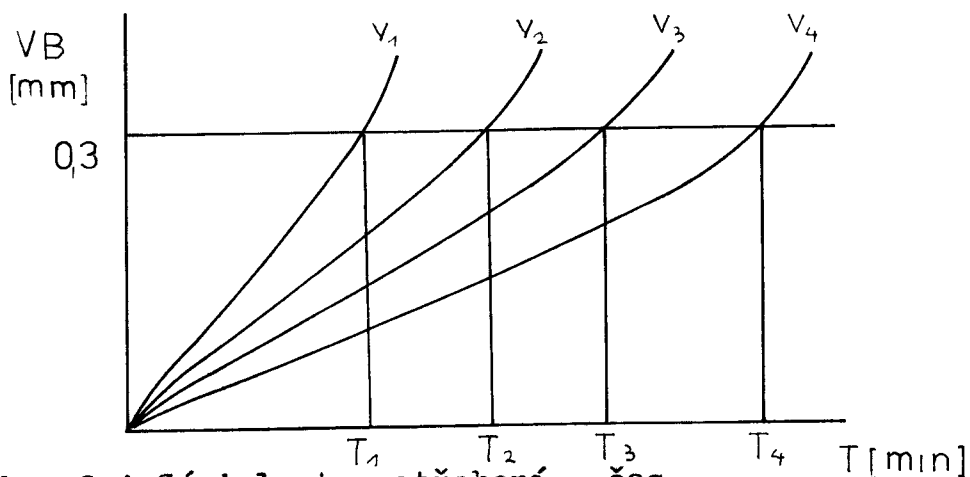
Ve většině případů je opotřebení rovnoměrné a měří se jako střední hodnota VB. Oblast A a C se z měření vylučuje. Měření se provádí při zvětšení 20 - 50x na dílenském mikroskopu.

Opotřebení na čele určuje hloubka výmolu KT. Jako pomocné hodnoty lze uvádět vzdálenost nejhlubší části výmolu od původní řezné hrany KM a šířka výmolu KB.

Zkoušky trvanlivosti

Při konstantních řezných rychlostech se provede měření opotřebení (VB nebo KT, případně VB i KT) ve zvolených intervalech tak, aby závislost opotřebení na čase byla tvořena dostatečným počtem bodů.

Měření se opakuje při ostatních zvolených řezných rychlostech. Hodnoty se zaznamenávají do diagramu opotřebení - čas (obr. 2.4)



Obr. 2.4 Závislost opotřebení - čas

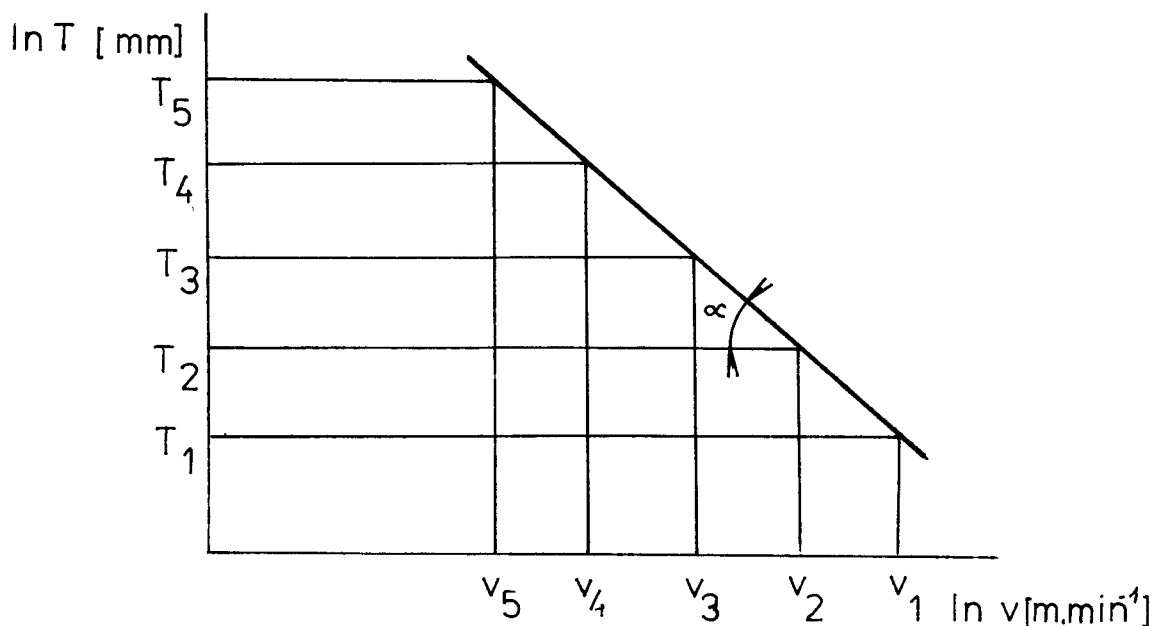
Body T_1, v_1, T_2, v_2 atd. získané pro zvolené kritérium z obr. 2.4 se vynesou do diagramu $T - v$ ve dvojité logaritmické síti se stejným modulem na obou osách - obr. 2.5. Tuto závislost je možno považovat v logaritmických souřadnicích za lineární a lze ji vyjádřit rovnicí:

$$T = \frac{c_T}{v^m} \quad \text{nebo v jiné formě} \quad v = \frac{c_v}{T^{\frac{1}{m}}}$$

kde v - řezná rychlost $m \cdot \text{min}^{-1}$

T - trvanlivost min

m - tg α (obr. 2.5)



Obr. 2.5 Závislost opotřebení - řezná rychlost

Vyhodnocení zkoušky

Vzhledem k časové a materiálové náročnosti je třeba, aby se do vyhodnocení nevnesly subjektivní chyby, které mohou být značné. Při laboratorním měření je statistické zpracování výsledků nezbytné. Pouze při provozních zkouškách nebo tam, kde alespoň přibližný výsledek je třeba znát hned,

se připouští vyhodnocení přibližné.

Při statistickém vyhodnocení se proloží přímkou $T - v$ experimentálně zjištěnými body metodou nejmenších čtverců.

Klasifikace obrobitelnosti

a) Smluvní hodnota obrobitelnosti materiálu je dána řeznou rychlostí v_{15} při doporučených řezných podmínkách. Je to řezná rychlost, při které je trvanlivost řezného nástroje 15 minut. Jako pomocné hodnoty se uvádějí exponenty m a konstanty c_v resp. c_T z Taylorova vztahu. Hodnoty v_{15} , m , c_v , c_T se určí z $T - v$ diagramu.

b) Relativní obrobitelnost je určena poměrem

$$i = \frac{v_{15}}{v_{15e}} \quad (2.2)$$

Obě měření závislosti trvanlivosti na řezné rychlosti je třeba provádět se stejným řezným materiálem, pokud možno etalonovým. Rychlost v_{15} a v_{15e} se odečtou z $T - v$ diagramu pro příslušný obráběný materiál. Podle velikosti poměru i se zařadí materiál do příslušné skupiny obrobitelnosti. Pro etalonový materiál (ocel 12 050.1) je $i = 1$ a materiál je zařazen do třídy obrobitelnosti 14 b.

2. 3. Hodnocení obrobitelnosti materiálu podle normativu

Určení skupin obrobitelnosti je časově velmi náročné a nákladné. Proto je účelné ve vztahu k rozsáhlému sortimentu materiálů podstatně odlišných vlastností stanovit skupiny obrobitelnosti pomocí normativu obrobitelnosti

Takto může být stanovena obrobitelnost i pro nové materiály a materiály podle cizí dokumentace.

Stanovení obrobitelnosti podle normativu je vhodné zvláště v hromadné výrobě.

Rozdělení materiálů do kategorií

Strojírenské materiály jsou rozděleny do devíti kategorií

- a- litina
- b- oceli
- c- těžké neželezné kovy (barevné kovy - mědi a slitiny mědi)
- d- lehké neželezné kovy (lehké kovy - hliník a slitiny hliníku)
- v- tvrzené litiny pro výrobu válců
- e- plastické hmoty
- f- přírodní nerostné hmoty
- g- vrstvené hmoty
- h- pryž

Oceli, litiny i těžké a lehké neželezné kovy jsou zařazeny do 20 skupin obrobitelnosti. Nejhůře obrobitelné materiály jsou zařazeny do skupiny obrobitelnosti 1 a nejlépe obrobitelné do skupiny 20. Rozdíl mezi jednotlivými skupinami je dán koeficientem $\sqrt[20]{10} = 1,26$.

V tabulkách normativu jsou uváděny skupiny obrobitelnosti pro soustružení, frézování a pro broušení.

Výpočet skupiny obrobitelnosti

Výpočet skupiny obrobitelnosti se provádí na základě chemického složení a mechanických vlastností. Konstanta K_{chs1} charakterizuje vliv každého prvku. Je vyčíslován vždy z maximálního obsahu prvku, který je uveden v materiálové normě. Konstanta K_{chs1} je uvedena v tabulce normativu. Součet dílčích konstant K_{chs1} je roven konstantě K_{chs2} .

Konstanta K_{mh} vyjadřuje vliv mechanických vlastností. Je vyčíslována vždy z maximální pevnosti nebo tvrdosti a je uvedena v tabulkách normativu.

Skupina obrobitelnosti je dána koeficientem, který se získá součinem K_{chs2} a K_{mh} . Podle velikosti tohoto součinu se zařadí materiál do příslušné skupiny obrobitelnosti.

Příklad na výpočet skupiny obrobitelnosti :

Materiál: ČSN 11 523.1

výkovek

tvrdost: 178 HB

Chemické složení v % (max)	Obrábění		Broušení	
	K_{chs1}	K_{mh}	K_{chs1}	K_{mh}
C = 0,22	1,05	0,64	1,20	0,83
Mn = 1,5	2,50		1,27	
Si = 0,55	0,80		0,90	
Cr = 0,3	0,13		0,52	

$$K_{chs2} = \sum K_{chs1} = 4,48$$

$$K_{chs2} = 3,89$$

Skupina obrobitelnosti

Obrábění: $K_{chs2} \cdot K_{mh} = 4,48 \cdot 0,64 = 2,87$

Pro velikost součinu 2,46 - 3,07 zařadíme ocel do skupiny obrobitelnosti 14 b - viz tabulka normativu. [9]

Broušení: $K_{chs2} \cdot K_{mh} = 3,89 \cdot 0,83 = 3,23$

Skupina obrobitelnosti 9 b.

2. 4. Stanovení obrobitelnosti ocelí podle drsnosti povrchu [11]

Teoretická drsnost povrchu (teoretický tvar nerovností) může být geometricky určena za těchto předpokladů:

- a) Obráběný materiál se považuje za absolutně nedeformovatelný
- b) Ostří nástroje tvoří geometrické čáry
- c) Systém stroj - nástroj - přípravek - obrobek je absolutně tuhý

Teoretickou drsnost povrchu resp. teoretickou maximální výšku nerovností je pak možno stanovit z výpočtových vzorců, odpovídajícím geometrickým schémátům kinematiky odebírání třísky.

Skutečná drsnost povrchu a skutečné nerovnosti se co do velikosti i tvaru odlišují od vypočtených teoretických hodnot. R_m teor. je mnohokrát menší než R_m skut.

R_m - maximální výška nerovností

Základní příčiny zvýšení skutečných nerovností oproti teoretickým jsou:

- a) Materiálové faktory
- b) Technologické faktory:
 - chvění rezného nástroje
 - tření hřbetu nástroje po obrobené ploše
 - nerovnosti ostří rezného nástroje a jejich změny v důsledku opotřebení
 - použití rezné kapaliny

Materiálové faktory jsou prvořadě pro změnu teoretické drsnosti povrchu ve zhoršenou skutečnou drsnost povrchu.

Zůstávají i po maximální eliminaci technologických faktorů, resp. i za předpokladu nulového účinku technologických faktorů. Materiálové faktory jsou tedy určující pro rozdílnost teoretické a skutečné drsnosti povrchu. Budou rovněž i určující při klasifikaci obrobitelnosti strojírenských materiálů podle drsnosti povrchu.

Rozdílnost teoretické a skutečné drsnosti povrchu nelze vysvětlovat tvarem tvořící se třísky. Tvar třísky je důsledek deformačního procesu stejně jako výsledná drsnost.

Vlastní příčinu rozdílnosti teoretické a skutečné drsnosti povrchu je třeba hledat v deformačním procesu tvorby třísky, resp. vytvoření nového povrchu. Deformační proces je závislý na materiálu, na jeho krystalické stavbě a na podmínkách, za kterých deformace probíhá, t. j. především na deformační rychlosti a teplotě.

Lze vytvořit hypotézu, že za předpokladu zhruba stejných deformačních podmínek je třeba hledat vlastní příčinu rozdílů teoretické a skutečné drsnosti povrchu v krystalické stavbě obráběného materiálu. Hypotézu lze potvrdit praktickým pozorováním při soustružení.

Oceli je možno rozdělit v podstatě na dvě skupiny. První skupina, jejíž představitelé jsou uhlíkové oceli je charakteristická velkou citlivostí na změnu deformační rychlosti resp. teploty. Při postupném zvětšování řezné rychlosti narůstají hodnoty R_m až několikanásobně a pak pozvolna klesají a přibližují se hodnotám teoretické drsnosti povrchu. Druhá skupina ocelí, např. korozivzdorné oceli, není citlivá na změnu deformační rychlosti resp. teploty. Obrobený povrch jeví stopy po uhlazení zplastizovaného materiálu.

Rozdíl obou skupin je v krystalické stavbě. První skupina má mřížku prostorově středěnou. Druhou skupinu tvoří oceli s krychlovou, plošně středěnou krystalickou mřížkou. Větší počet kluzových rovin umožňuje snadnější plastickou deformaci bez zvláštní citlivosti na změnu teploty a deformací rychlosti.

Vlastní klasifikace obrobitelnosti podle drsnosti povrchu

Ke klasifikaci obrobitelnosti je možné využít poměru teoretické a skutečné drsnosti povrchu přímo jako součinitele obrobitelnosti. Podmínky zkoušky obrobitelnosti (řeznou rychlost, posuv, hlavní a vedlejší úhel nastavení a poloměr zaoblení špičky nože) lze stanovit buď jako konstantní, nebo je lze libovolně obměňovat, aby se vlastní zkouška přiblížila praktickým podmínkám dokončovací operace. Třídy obrobitelnosti lze pak stanovit tak, že budou odpovídat n násobku teoretické drsnosti povrchu. V zařazení materiálů do příslušné třídy obrobitelnosti se při obrábění nástrojů s definovanou geometrií břitu stanoví nejdříve hodnota teoretické drsnosti povrchu $R_{\text{m teor.}}$, resp. $R_{\text{a teor.}}$ a pak se měří hodnota skutečné drsnosti povrchu. Poměr obou zjištěných hodnot určuje, kolikrát je skutečná drsnost povrchu větší než teoretická drsnost povrchu a podle číselné hodnoty zjištěného poměru se pak materiál klasifikuje do příslušné třídy obrobitelnosti podle drsnosti povrchu. Tento způsob klasifikace umožňuje zatřídění materiálů za různých podmínek, v různých intervalech řezné rychlosti, podle reálných podmínek dané dokončovací operace.

2. 5. Stanovení kinetické obrobitelnosti kovových materiálů pomocí aplikace magnetokorelační analýzy [6, 13, 14]

Magnetické vlastnosti feromagnetických materiálů jsou závislé na jejich fyzikálních vlastnostech, ze kterých je třeba vycházet při teoretickém a experimentálním studiu procesu řezání. Fyzikální vlastnosti feromagnetických látek určuje kromě jejich chemického složení též jejich krystalická stavba a typický druh vazby.

Obecně jsou tuhé roztoky, v nichž základní feromagnetický kov působí jako rozpouštědlo, feromagnetické. U tuhé roztoku je magnetické nasycení menší než u základního kovu a zpravidla se snižuje úměrně s relativním obsahem nemagnetické složky. Magnetické nasycení závisí na množství feromagnetických složek ve slitině a na jejím druhu.

Při opakované magnetizaci železa zůstává indukce proudu B za intenzitou magnetického pole H . Tento jev, zvaný hystereze materiálu, závisí na stupni nedokonalosti krystalické stavby kovu a v ideální mřížce by probíhal magnetizační proces bez hystereze.

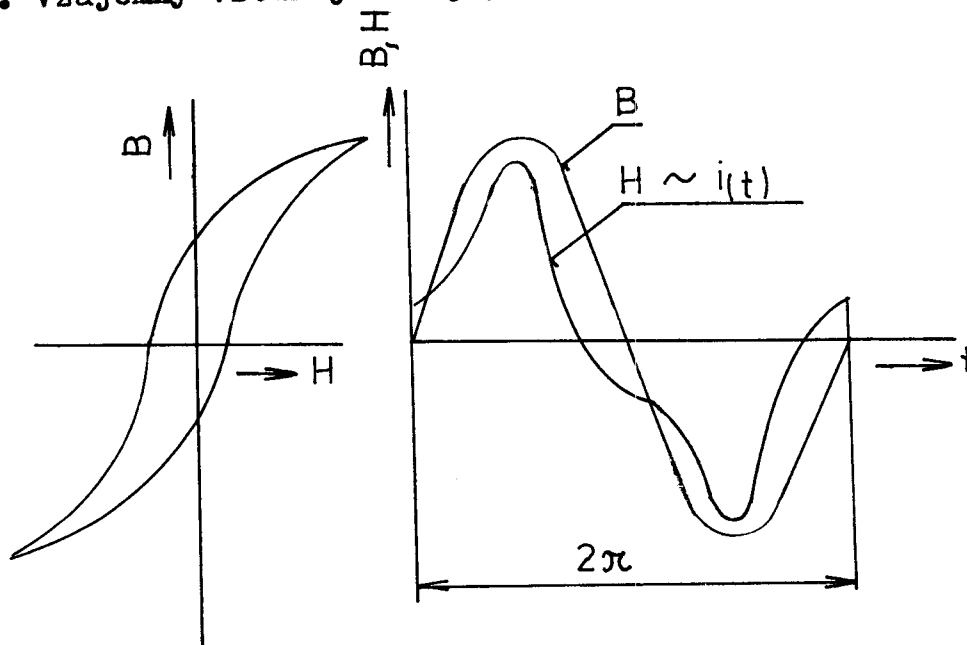
Každá porucha krystalické mřížky porušuje i homogenitu magnetického pole a dochází k nelineárnímu zkreslení průběhu intenzity magnetického pole.

Deformovaný průběh magnetujícího proudu je charakterizován okamžitými hodnotami intenzity magnetického pole a magnetizačním proudem. Mezi okamžitými hodnotami intenzity magnetického pole $H_{(t)}$ a magnetizačním proudem $i_{(t)}$ platí

obecný vztah

$$i(t) = K \cdot H(t) \quad (2.3)$$

Průběh magnetizačního proudu charakterizuje tvar hysterezní smyčky. Deformace průběhu magnetizačního proudu $i = f(t)$ a intenzity magnet. pole $H = f(t)$ jsou shodné, a proto lze na tvar hysterezní smyčky usuzovat i z průběhu magnetického pole. Vzájemný vztah je zřejmý z obr. 2.6



Obr. 2.6 Vztah hysterezní smyčky, průběhu intenzity magnetického pole a magnetizačního proudu

Průběh intenzity magnetického pole $H(t)$ lze rozvést ve Fourierovu řadu, obsahující liché členy

$$H(t) = \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \sin k t + B_k \cos k t) \quad (2.4)$$

kde A_k, B_k - koeficienty Fourierova rozvoje

Stav materiálu	Matematická formulace
12 051.1 12 051.3	$x = \frac{22,27}{A_3^{0,104} \cdot B_5^{0,024}}$
12 051.6 12 051.8	$x = 7,01 \frac{B_3^{0,13}}{A_5^{0,0152}}$
	$x = 7,85 \frac{B_3^{0,13}}{A_5^{0,037}}$
	$x = \frac{15,69}{A_3^{0,0152} \cdot A_5^{0,038}}$
	$x = 9,51 \frac{B_3^{0,087}}{A_3^{0,01} \cdot A_5^{0,0247}}$

Tabulka 2. 7 Závislost třídy obrobiteľnosti na jednotlivých složkách magnetokorelačních koeficientů

Změny tvarů hysterezních smyček způsobují změnu koeficientů matematických řad, jimiž jsou tvary smyček charakterizovány. Měření magnetokorelačních koeficientů a vyhodnocení zkoušek obrobiteľnosti bylo provedeno ve VUT Brno. Závislosti kinetické obrobiteľnosti na složkách magnetokorelačních koeficientů jsou uvedeny v tabulce 2.7.

2. 6. Tvorba třísky jako lomový proces a možnost hodnocení obrobiteľnosti materiálu podle veličin lomové mechaniky

2. 6. 1. Hypotéza vzniku křehkého lomu v oblasti oddělování třísky

Křehkým lomem obecně nazýváme mezní stav materiálu, ke kterému dochází při napětí nižším než je mez průtažnosti materiálu. Křehký lom je takové porušení soudržnosti materiálu, které nastane dříve, než může nastat makroskopická plastická deformace. Obecně je materiál vždy více nebo méně nehomogenní. Obsahuje mikroskopické nebo makroskopické koncentráty napětí, jako různé vměstky, strukturní fáze o různých plastických vlastnostech (grafit v litinách apod.). U kořenů těchto koncentrátorů napětí vznikají za působení vnějších sil lokální plastické deformace (lokální mez kluzu), které předcházejí křehkému lomu.

Křehký lom při oddělování třísky lze očekávat hlavně u následujících materiálů: [5]

- oceli o střední a vysoké pevnosti
- šedé litiny
- hliníkové slitiny o vyšší pevnosti
- titanové slitiny

Na rozdíl od tvárného lomu, který se vyznačuje vysokou spotřebou energie pro šíření lomu, je energie potřebná pro šíření křehkého lomu malá. Křehký lom se šíří vysokou rychlostí $0,2 - 2 \text{ km s}^{-1}$.

Výskyt křehkého lomu u nízkouhlíkových a nízkolegovaných ocelí je spojen s tranzitním chováním ocelí, tzn., že

s poklesem teploty, či s růstem deformačních rychlostí nastává změna mikromechanismu porušení -- tvárný lom se mění v kvazikřehký. Lom u ocelí střední a vysoké pevnosti je obvykle lomem křehkým, nastávajícím při napětí, které je menší než makroskopická mez kluzu.

Lom u hliníkových slitin vzniká při napětí, které je nižší než makroskopická mez kluzu. (Mikroskopicky je tento lom tvárného charakteru). U hliníkových slitin je výskyt křehkosti typický tím, že jejich křehkost není spojena s tranzitní teplotou.

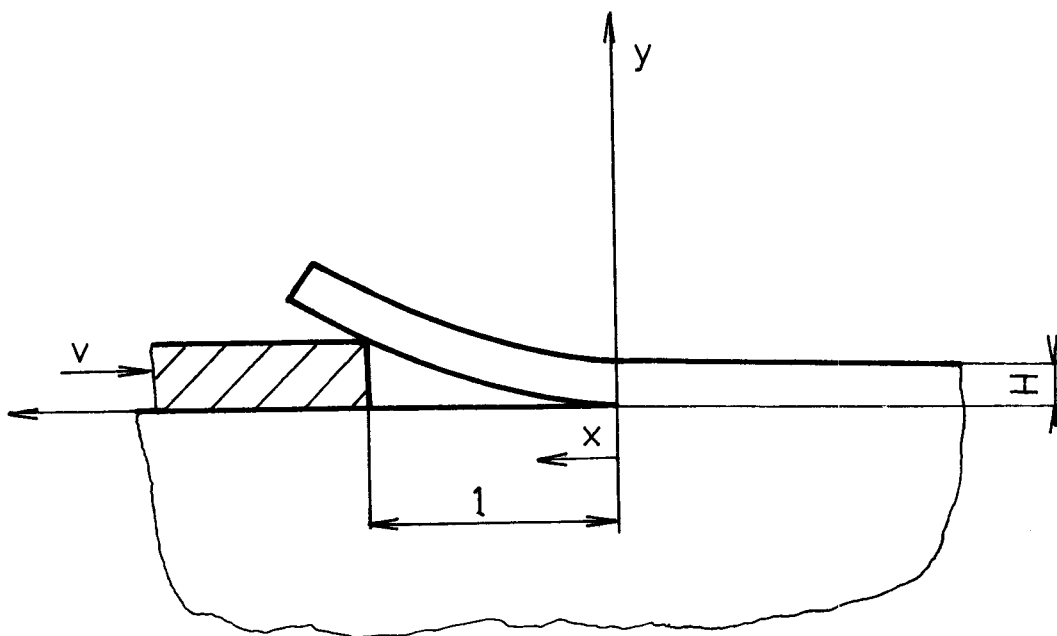
Křehký lom u slitin (zejména šedých litin) je charakterizován velkým množstvím koncentrátorů napětí (grafit). Lom vzniká při napětí, které je nižší než makroskopická mez kluzu.

2. 6. 2. Tvorba třísky podle Barenblata a Salganika

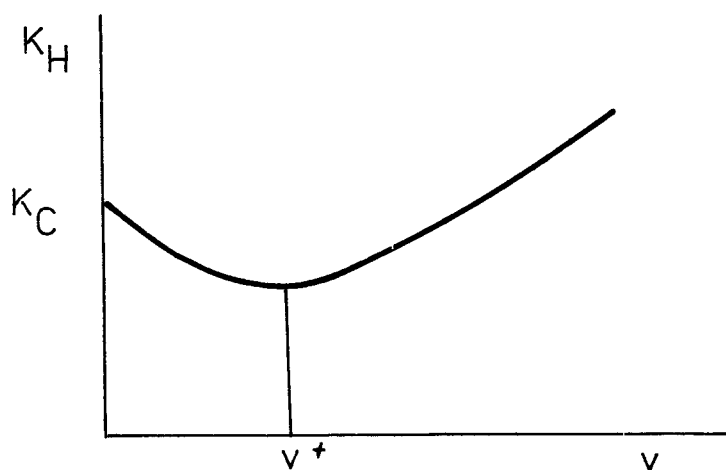
Uvedení autoři provedli výzkum tvorby třísky z hlediska lomové mechaniky. Tento problém řešili jako odřezávání tenké vrstvy materiálu z povrchu rozměrného tělesa. Jejich model je na obr. 2.8.

Autoři řešili úlohu za předpokladu, že od rozměrného tělesa v podmínkách rovinné deformace je odřezávána vrstva materiálu v výšce H absolutně tuhým klínem o výšce h , který se pohybuje konstantní rychlostí v .

Autoři uvážili, že materiál se chová nepružně v kořeni trhliny a zavedli modul kohesivních sil K_H a ukázali ve své práci, že K_H závisí na okamžité rychlosti konce trhliny V a to podle grafu, který je znázorněn na obr. 2.9.



Obr. 2.8 Model tvorby třísky podle B. a S.

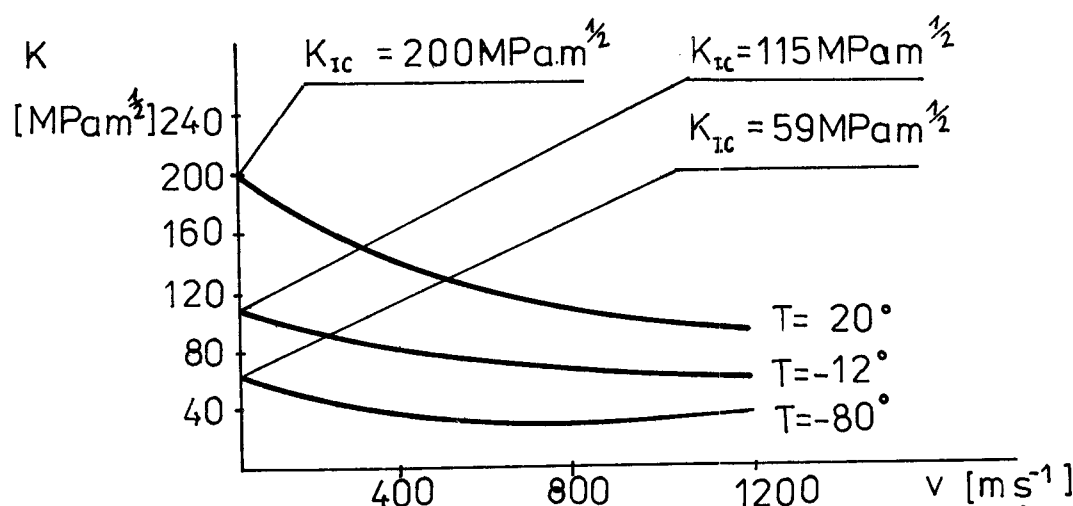


Obr. 2.9 Závislost modulu K_H na rychlosti šíření trhliny

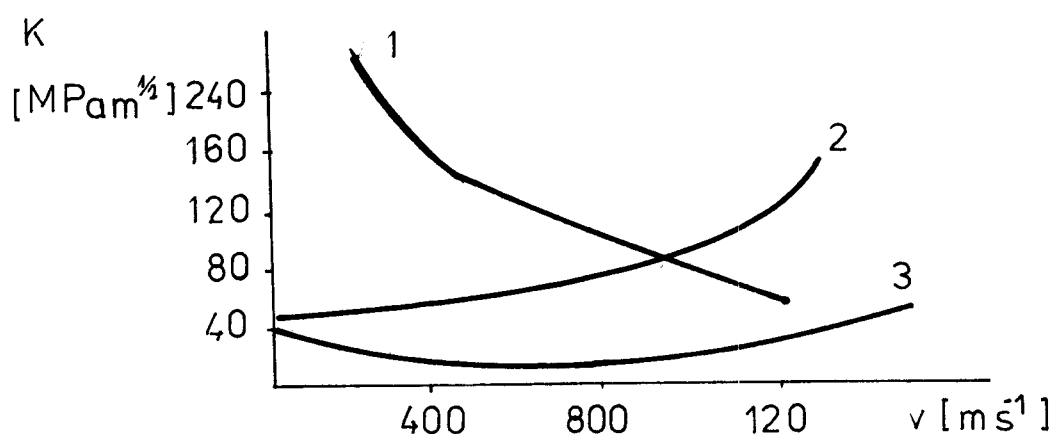
Autoři také ukázali, že při rychlosti klínu $v > v^+$ je proces odřezávání vrstvy stabilní a při $v < v^+$ je proces nestabilní, kořen trhliny se pohybuje po skocích, děj tvoření třísky je diskontinuální.

Modul kohenzivních sil je podle Ivleva obdobný v lomové mechanice běžněji používanému faktoru intenzity napětí K příslušného typu lomu.

Bílek Z. ve své práci [7] zkoumal závislost faktoru intenzity napětí K_I na rychlosti šíření trhliny pro různé kovové materiály při různých podmínkách. Z této práce plyne, že závislost $K_I - v$ není zcela jednoznačná a je různá pro různé materiály a závisí na podmínkách, při kterých je měření provedeno (rychlost, deformace, teplota - viz obr. 2.10). Autor ve své práci zobecnil závislost $K_I - v$ pro určitý typ materiálu (obr. 2.11).



Obr. 2.10 Závislost faktoru intenzity na rychlosti šíření trhliny při vybraných teplotách



Obr. 2.11 Zobecněná závislost dynamické lomové houževnatosti na rychlosti šíření trhliny u ocelí

- 1- konstrukční ocel
- 2- ocel o vysoké pevnosti
- 3- Konstrukční ocel při - 196° C

2. 6. 3. Možnost hodnocení obrobitelnosti

Oddělování třísky lze z hlediska fyziky kovů a lomové mechaniky definovat jako deformaci elementu třísky s následujícím lomem při vysokých deformačních rychlostech a zvýšených teplotách. Pro hodnocení obrobitelnosti je důležité zvolit veličinu, která by nejlépe odpovídala fyzikální podstatě obrábění. Pro některé materiály, zvláště pak pro ty, které mají zvýšenou náchylnost ke křehkému lomu tj. např. oceli o střední a vysoké pevnosti, šedé litiny, hliníkové slitiny o vyšší pevnosti a titanové slitiny, se vzhledem k charakteru obrábění je možno domnívat, že by touto veličinou mohl být kritický faktor intenzity napětí K_{Ic} resp. K_{IIc} (napětí a deformace, které při obrábění vznikají v okolí kořene třísky jsou obdobné jako deformace módu II - viz kapitola 3. 2. této práce). Je-li obrobitelnost materiálová vlastnost, pak bude také funkcí kritického faktoru intenzity napětí (lomové houževnatosti).

Pokus o nalezení závislosti lomové houževnatosti a obrobitelnosti materiálu provedl ve své práci [8] Banerjee A. J. Ke svým experimentům použil tři druhy modelových materiálů: celuloid, akrylon (PMMA) a Epoxy pryskyřici. Výzkum byl prováděn metodou fotoelasticimetrie. Banerjee určil ze snímků izochorát lomovou houževnatost K_{IIc} a napětí σ_{ox} pouze pro celuloid. Vypočtené hodnoty K_{IIc} a σ_{ox} jsou uvedeny v tabulce 2.12.

γ_0	$K_{II} [\text{MPa m}^{1/2}]$	$\sigma_{ox} [\text{MPa}]$
0	1,04	- 14,7
-20	0,67	- 7,3
+10	1,04	- 10,3

Tab. 2.12 Vypočtené hodnoty K_{II} a σ_{ox} pro celuloid
kde γ_0 - nástrojový úhel čela v ortogonální rovině

V práci [8] jsou také uvedeny hodnoty lomové houževnatosti fotocitlivých materiálů, které byly naměřeny podle zprávy SVÚM Praha. Tyto hodnoty jsou v tabulce 2. 13.

Materiál	Naměřené hodnoty lomové houževnatosti
Epoxy	0,508 $\text{Mpa m}^{1/2}$
PMMA	1,662 $\text{MPa m}^{1/2}$
Celuloid	2,392 $\text{MPa m}^{1/2}$

2.13 Hodnoty lomové houževnatosti naměřené podle zprávy SVÚM Praha

Hodnoty uvedené v tabulce 2.13 ve shodě s fotoelasticko-metrickým experimentem ukazují, že čím je materiál houževnatější, tím má vyšší lomovou houževnatost K_{Ic} .

Vzorek z celuloidu byl nejlépe obrobitelný, PMMA byl obrobitelný nožem se záporným nebo nulovým úhlem, vzorek z Epoxy pryskyřice byl špatně obrobitelný a to pouze noži se záporným úhlem čela γ . Tyto výsledky potvrzují hypotézu závislosti obrobitelnosti materiálu a lomové houževnatosti. Čím vyšší je lomová houževnatost, tím je materiál lépe obrobitelný. K potvrzení této hypotézy na kovových materiálech je třeba provést dostatečné množství experimentů.

2. 7. Závěr kapitoly

Najít kritérium obrobiteľnosti, ktoré by vyhovovalo neustále rastoucím požiadavkám na presnosť určenia obrobiteľnosti, bolo platné pre široký rozsah materiálov používaných ve strojárstve a jehož určenie by nebylo príliš komplikované a časovo náročné, je veľmi obtížne.

Určenie skupiny obrobiteľnosti pomocou dlhodobého skúšky je časovo a materiálovo veľmi náročné, hodnotenie podľa drsnosti povrchu sa hodí hlavne pre dokončovacie operácie. V normatíve obrobiteľnosti je stanovená obrobiteľnosť iba pre obrábění nástrojom P 20.

Vhodným kritériom pre hodnotenie obrobiteľnosti by mohli byť veličiny lomovej mechaniky, ktoré popisujú vlastnosti materiálu pri deformácii podobnej procesu rezání, napríklad faktor K_{Ic} - lomová houževnatost. Toto hodnotenie má také niektoré nevýhody. Stanovenie lomovej houževnatosti je časovo náročné a vyžaduje použitie špeciálnych zariadení. Lomová houževnatost K_{Ic} patrí medzi veličiny lineárnej lomovej mechaniky. Jej použitie je vhodné tam, kde plastická zóna je zanedbateľná vzhľadom k dĺžke trhliny. Vzhľadom k tomu lze se domnívat, že se lomová houževnatost K_{Ic} uplatní především u křehkých materiálov - viz část 2. 6. 1. U houževnatých materiálov bude patrne vhodné zvolit jako kritérium obrobiteľnosti niektorou veličinu nelineárnej lomovej mechaniky - napr. J - integrál.

3. Základní pojmy lomové mechaniky

3. 1. Definice lomu

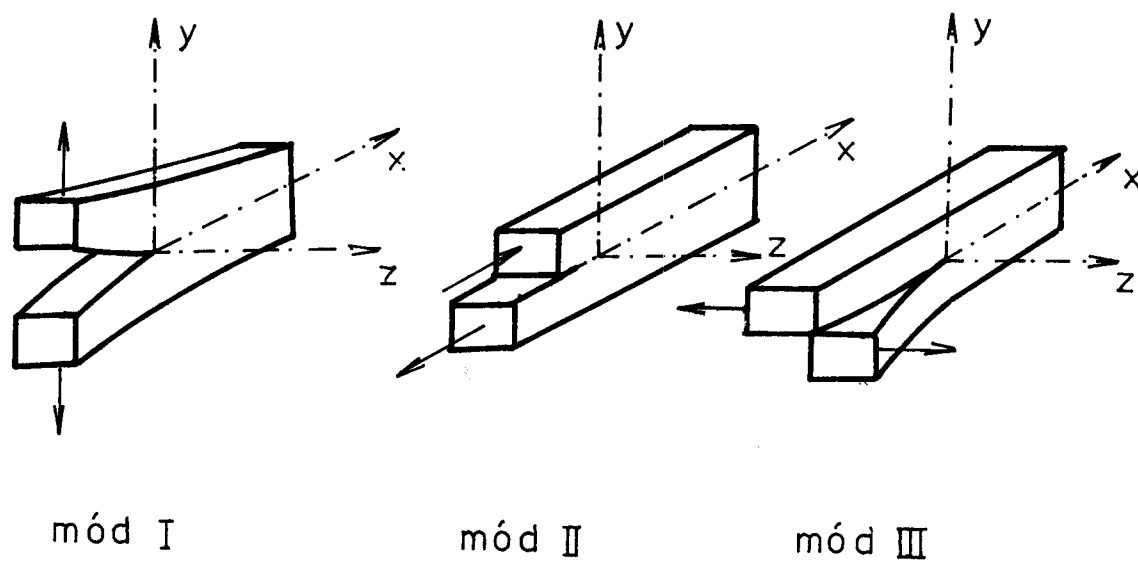
Lom tělesa je nespojitostí deformace v procesu deformování tělesa. Lom se vždy šíří z určitého místa. Lom je tedy proces vzniku a šíření trhliny.

Lomy se dělí na stabilní, u nichž je třeba k stabilnímu šíření trhliny zvýšení vnějšího zatížení a na lomy nestabilní, u nichž se trhlina šíří bez dalšího zvyšování zatížení.

Cílem lomové mechaniky je stanovit, jaké namáhání může materiál se známou trhlinou ještě snést bez dalšího růstu trhliny nebo jaká velikost trhliny je přípustná při daném zatížení.

Lomová mechanika se dělí na lineární a nelineární. Lineární lomová mechanika je používána především pro materiály s trhlínami, na jejichž čele vzniká plastická rána malého rozsahu v porovnání s délkou trhliny. Nelineární lomová mechanika se zabývá trhlínami, u nichž je plastická zóna srovnatelná s délkou trhliny. Nelineární lomová mechanika znamená sice prohloubení představ lineární lomové mechaniky, ztrácí však oproti lineární lomové mechanice univerzálnost a ekvivalentnost kritérií nestability.

V tělese nacházející se trhlina se může deformovat třemi základními způsoby (módy), které jsou naznačeny na obr. 3.1. U módu I se povrchy trhliny vzájemně oddalují symetricky k rovině x o z . Módy II a III jsou dány smykovými napětími, která způsobují vzájemné zklouzávání povrchů.

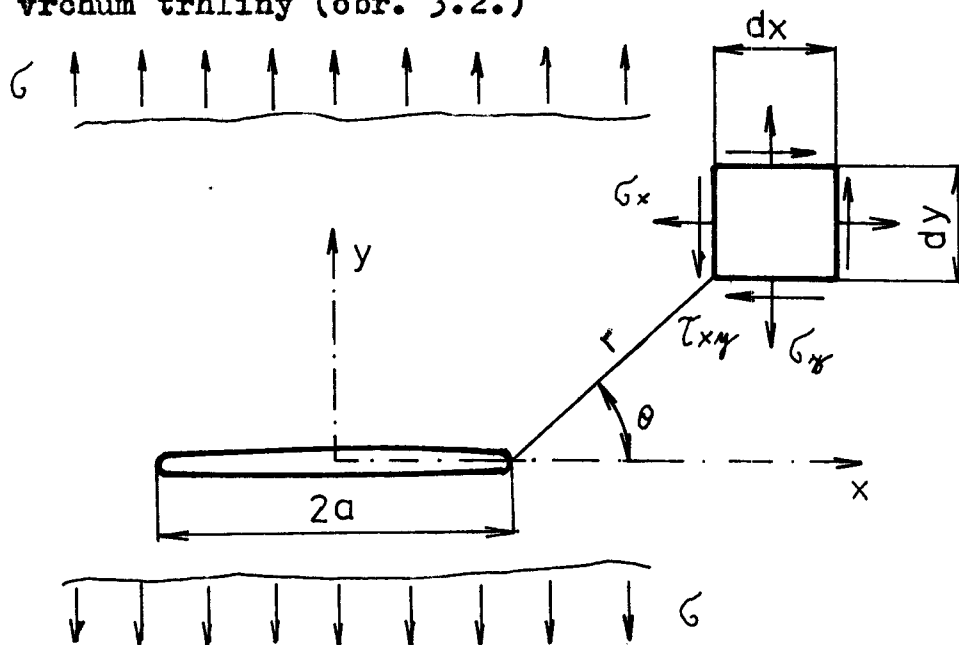


Obr. 3.1 Způsoby deformace trhliny

Superpozicí těchto tří modů popisujeme obecný případ trhliny v tělese.

3. 2. Irwinovo kritérium křehkého porušení

Uvažme trhlinu módu I délky $2a$, která prochází celou tloušťkou rozlehlé desky. Deska je zatížena ve značné vzdálenosti od trhliny tahovým napětím σ , které je kolmé k povrchům trhliny (obr. 3.2.)



Obr. 3.2. Trhlina na nekonečné desce

Element dx, dy , který se nachází ve vzdálenosti r od čela trhliny a pod úhlem θ od roviny trhliny je zatížen normálními napětími σ_x, σ_y ve směrech x, y a smykovými napětími τ_{xy} .

V případě rovinné napjatosti platí:

$\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$ a v případě rovinné deformace z podmínky $\epsilon_z = 0$ plyne, že $\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$

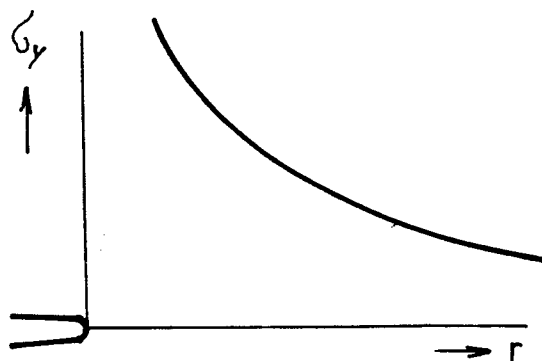
Metodami matematické pružnosti lze ukázat, že platí následující vztahy (3.1)

$$\begin{aligned}
\sigma_x &= \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\
\sigma_y &= \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\
\tau_{xy} &= \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}
\end{aligned} \tag{3.1}$$

nebo

$$\sigma_{ij} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} f_{ij}(\theta) \tag{3.2}$$

V elastickém případě jsou napětí úměrná vnějšímu napětí a mění se s druhou odmocninou délky trhliny. S poklesem vzdálenosti elementu od čela trhliny rostou napětí k nekonečně velkým hodnotám.



Obr. 3.3. Průběh napětí σ_y pro $\theta = 0$

Rovnice 3.2. se obvykle zapisuje ve tvaru:

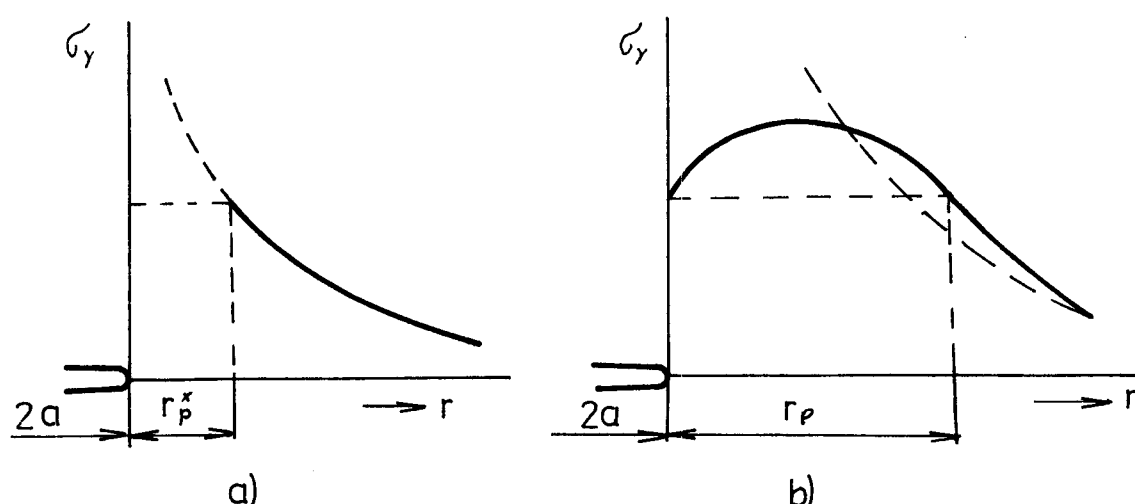
$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{2\pi r} f_{ij}(\theta) \tag{3.3}$$

$$\text{kde } K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \tag{3.4}$$

Veličina daná vztahem 3.4 byla Irwinem označena jako faktor intenzity napětí.

Index I se vztahuje k I módu deformace trhliny. Rozměr faktoru intenzity napětí je $\text{MPa m}^{1/2}$ ($\text{MN m}^{-3/2}$)

Elastické řešení napjatosti na čele trhliny dává v kořeni trhliny ($r = 0$) nekonečně velká napětí, která vzhledem ke vzniku plastické deformace v kořeni trhliny v každém reálném materiálu nemají fyzikální smysl. Velikost plastické zóny na čele trhliny lze určit pomocí vzdálenosti r_p^* od čela trhliny v níž elastické napětí σ_y dle rovnice (3.1) dosáhne hodnoty meze kluzu Re (obr. 3.4a)



Obr. 3.4

Dosazením $\sigma_y = Re$ pro $\theta = 0$ do rovnice 3.1 obdržíme

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r_p^*}} = Re \text{ tj. } r_p^* = \frac{K_I^2}{2\pi Re^2} \quad (3.5)$$

Ve skutečnosti je plastická zóna poněkud větší (Obr 3.4 b)

Z rovnice 3.5 je vidět, že velikost plastické zóny na čele trhliny lze přímo vyjádřit v závislosti na faktoru intenzity napětí a mezi kluzu Re daného materiálu.

K - faktor je měřítkem napětí a deformací na čele trhliny. Rozšíření trhliny se objeví, jestliže napjatost na čele trhliny dosáhne určitého kritického stavu. Vzhledem k tomu, že mírou napjatosti na čele trhliny je K - faktor, lze očekávat vznik lomu tehdy, jestliže K - faktor dosáhne kritické hodnoty K_c .

Kritická hodnota faktoru intenzity napětí v okamžiku porušení desky je dána vztahem

$$K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi a} \quad (3.6)$$

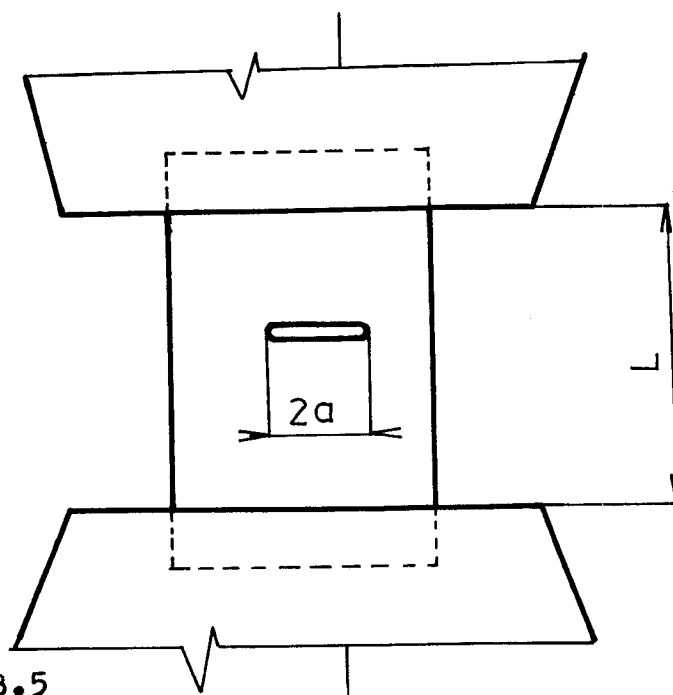
Experimentálně je zjištěno, že v určitém rozmezí mají vzorky stejného materiálu s různými velikostmi trhlín stejnou hodnotu K_{Ic} . Faktor K_{Ic} je tedy materiálovým parametrem a je měřítkem odporu materiálu proti šíření trhliny a nazývá se lomovou houževnatostí při rovinné deformaci.

Tloušťka desky má velký vliv na stav napjatosti v kořeni trhliny. Tloušťka musí být dostatečně velká pro dodržení rovinné deformace ve větší oblasti kořene trhliny.

3. 3. Energetické kritérium křehkého porušení

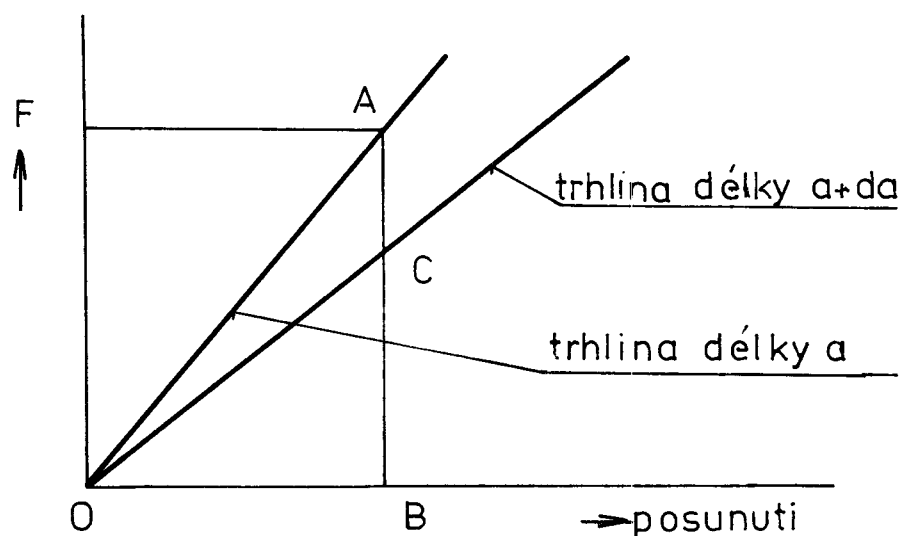
Jednu ze základních rovnic pro šíření trhliny vytvořil Griffith na základě uvolněné energie šíření trhliny.

Rozlehlá deska, jednotkové tloušťky s centrální průchozí trhlinou délky $2a$ je zatěžována až na napětí σ , pak jsou její okraje pevně zafixovány v čelistech zatěžovacího stroje (obr. 3.5)



Obr. 3.5

Elastická energie akumulovaná v desce je rovna ploše OAB (obr. 3.6). Jestliže se trhlina náhle rozšíří o délku poklesne tuhost desky a vzhledem k zafixovaným okrajům musí část napětí relaxovat. Akumulovaná elastická energie pak poklesne na veličinu rovnou ploše OCB. Trhlina rozšiřující se z délky a na délku $a + d$ uvolní tedy akumulovanou energii rovnou ploše OAC.



Obr. 3.6 Závislost zatížení - posunutí okrajů desky

Samovolné šíření trhliny v desce se objeví, jestliže akumulovaná elastická energie uvolněná při růstu trhliny je dostatečná k uhrazení celkové energie potřebné pro růst trhliny.

Podmínkou pro šíření trhliny je:

$$\frac{dU}{da} = \frac{dW}{da} = R$$

kde U je akumulovaná elastická energie, W energie spotřebovaná při růstu trhliny

Na základě výpočtu napětového pole pro eliptický otvor Griffith odvodil vztah:

$$\frac{dU}{da} = \frac{2\pi \sigma^2}{E} \cdot a \quad (3.9)$$

kde E je Youngův modul

$G = \frac{dU}{da}$ je rychlost uvolnění elastické energie, neboli hnací síla trhliny.

Energie spotřebovaná na šíření trhliny je označována jako $R = \frac{dW}{da}$ a nazývá se odpor proti šáření trhliny. S určitou aproximací lze předpokládat, že pro každý přírůstek da je energie potřebná ke vzniku trhliny stejná. To znamená, že R je konstanta. Z energetické podmínky nastane šíření tehdy, když G dosáhne kritickou hodnotu G_{Ic} , kde

$$G_{Ic} = \frac{\pi \sigma_c^2 a}{E} \quad (3.10)$$

Mezi G_I a K_I platí vztah

$$G_I = \frac{K_I^2}{E} \quad (3.11)$$

Tento vztah platí pro rovinnou napjatost. Upravený vztah pro rovinnou deformaci je

$$G_I = \frac{K_I^2}{(1 - \nu^2) E} \quad (3.12)$$

Griffith odvodil rovnici (3.10) pro sklo, které je velmi křehké. Předpokládal tedy, že R sestává pouze z energie potřebné k vytvoření nových povrchů trhliny. U houževnatých materiálů, jako např. u kovů, nastane v kořeni trhliny plastická deformace. To znamená, že pro kovy je R dáno především plastickou energií a povrchová energie je zanedbatelná.

3. 4. Kritérium otevření trhliny

Materiály s vysokou pevností v tahu mají obvykle nízkou lomovou houževnatost. Problematiku křehkého porušení lze u těchto materiálů řešit metodami lineární lomové mechaniky které jsou popsány v předcházejících částech této kapitoly. Těchto metod lze užít i v případě plastické zóny, která je však malá ve srovnání s délkovým rozměrem trhliny.

Materiály nízké pevnosti a nízké meze kluzu mají obvykle vysokou lomovou houževnatost. U těchto materiálů může být plastická zóna tak velká, že není možné užít metod lineární lomové mechaniky.

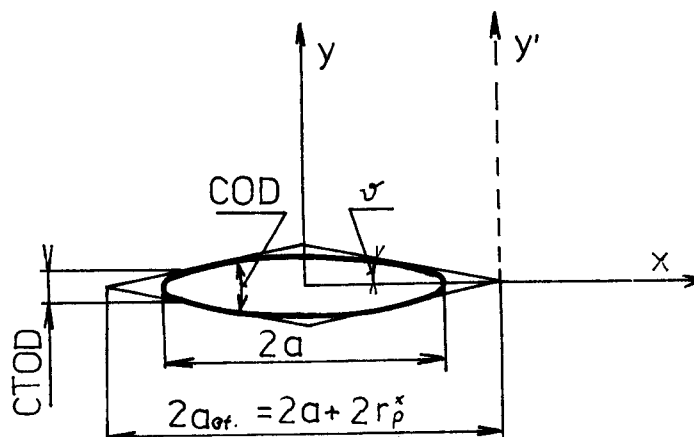
Pro tyto materiály byla zavedena empirická koncepce otevření trhliny (COD - crack opening displacement). Podle této koncepce rozšíření trhliny nastane, jestliže materiál na čele trhliny dosáhne maximálně přípustné plastické deformace. Tato deformace na čele trhliny může být vztažena k otevření trhliny. Šíření trhliny nastane tehdy, když COD dosáhne kritickou hodnotu. Toto kritérium je ekvivalentní K_{Ic} nebo G_{Ic} . Hodnota COD povrchu trhliny z obr. 3.7 je dána vztahem

$$COD = \frac{4\sigma}{E} \sqrt{a^2 - x^2} = 2 \nu \quad (3.13)$$

Vzhledem k opravě plastické zóny platí

$$COD = \frac{4\sigma}{E} \sqrt{(a + r_p^*)^2 - x^2} \quad (3.14)$$

kde $(a + r_p^*)$ je efektivní velikost plastické zóny, když počátek souřadného systému je v kořeni trhliny.



Obr. 3.7

Když $x = a$, pak $COD = CTOD$ a nazývá se otevření v kořeni trhliny a můžeme napsat

$$CTOD = \frac{4\zeta}{E} \sqrt{2a r_p}$$

protože $r_p^* \ll a$

Umístíme-li počátek souřadného systému do kořene trhliny, dostaneme obecné vyjádření

$$COD = \frac{4\zeta}{E} \sqrt{2 a_{ef} \cdot r}$$

Zobecněním kritéria $CTOD$ případně COD lze prokázat, že kritická hodnota $CTOD$ případně COD je materiálová konstanta.

Platí-li lineární elastická lomová mechanika, pak poměr uvolněné energie není ovlivněn plastickou deformací v kořeni trhliny a G vyplývá z napětového pole elastického. Jestliže lineární lomová mechanika neplatí, pak je poměr uvolněné

energie ovlivněn plastickou deformací v kořeni trhliny. Pro přesný výpočet vlivu plasticity na G je nutno odvodit přesné elasticko - plastické řešení.

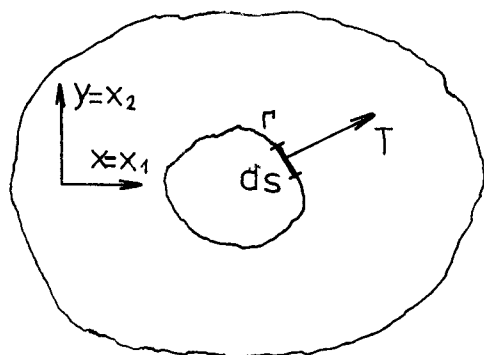
Protože taková řešení nejsou zatím známa, zavádí se J integrál definovaný vztahem

$$J = \int_{\Gamma} (W dy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds) \quad (3.15)$$

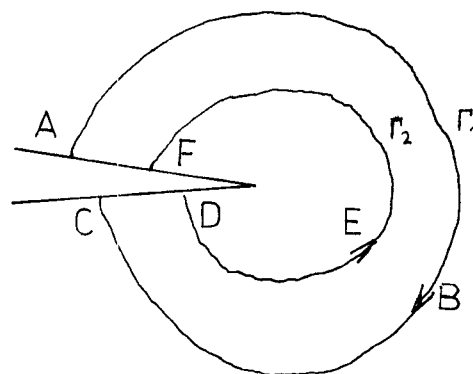
kde Γ je uzavřená křivka (obr. 3.8) následující ve směru hodinových ručiček okolo oblasti v napěťovém poli. T je tahový vektor kolmý na Γ , $T_i = \sigma_{ij} \cdot n_j$, u je posunutí ve směru x a ds je element křivky Γ

$$\text{Dále } W = W(x, y) = W(\epsilon) = \int_0^{\epsilon} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}$$

je deformační energie objemu.



Obr. 3.8



Obr. 3.9

Pro uzavřenou křivku je $J = 0$

Rice aplikoval J - integrál na lomovou problematiku obr. 3.9. Pro elastický případ lze J integrál vyhodnotit pomocí řešení elastického napěťového pole, které vede k rovnici (3.16)

$$J = G \quad (3.16)$$

J - integrál je pro elastický případ ekvivalentní s tokem uvolněné energie. Obecně platí

$$J = -\frac{\partial U}{\partial a} \quad (3.17)$$

kde U je potenciální energie. U elastického případu jsou rovnice 3.16 a 3.17 ekvivalentní.

J - integrál je obecný vztah pro uvolněnou energii vzniklou při řezání.

Protože je J - integrál nezávislý na cestě, lze ho určit jednoduše se zvolením cesty takové, při níž by bylo možno integrovat vhodným způsobem. J - integrál poskytuje tedy relativně jednoduchý způsob k určení toku uvolněné energie pro případ, kde existuje velká oblast plasticity v kořeni trhliny. Šíření trhliny nastane při kritické hodnotě J_{Ic} . V elastickém případě platí:

$$J_{Ic} = G_{Ic} \quad (3.18)$$

Rovnice (3.18) říká, že chování šířící se trhliny ve spojitosti s dostatkem plasticity, lze zjistit z kritéria J_{Ic} na základě hodnoty G_{Ic} , která byla určena pro případ zanedbatelné plasticity a naopak.

J - integrál je vhodným kritériem pro případ s výraznou plasticitou.

4. Návrh metodiky provádění experimentů

4. 1. Výzkum závislosti lomová houževnatost - obrobitelnost materiálu

Pro zjištění kritéria obrobitelnosti kovových materiálů pomocí lomové houževnatosti je možno použít tento postup:

1. Zvolit materiál vzorku

Výzkum je vhodné provést na materiálu 12 050.1, který je etalónem obrobitelnosti. Aby byla lomová houževnatost zjištěna objektivně, je nutné provést zkoušku dle ČSN 420347 a to na větším počtu vzorků.

Další materiály, které se liší skupinou obrobitelnosti a které se proto hodí pro tento výzkum jsou tyto (viz tabulka 4.1):

Ocel ČSN	Pevnost MPa (max)	Tvrdost HB (max)	Skupina obrobitelnosti
12010 resp. 12 014	550 440	158 127	16 b
12 020 resp. 12 030	580 650	169 186	15 b
12 050	780	224	14 b
12 051 resp. 12 060	840 880	240 252	13 b
12 061	920	265	12 b
12 042.8 r. 12 052.7	1 160 1 030	354 317	11 b 11 b
12 071.6 r. 12 090.6	1 580 1560	464 461	9 b 9 b
12 071.7 12 071.8	1 760 1 960	507 547	8 b 8 b

Tabulka 4.1.

Hodnoty uvedené v tabulce jsou převzaty z [9]. Skupiny obrobitelnosti jsou platné pro soustružení.

2. Zjistit lomovou houževnatost

- Vyrobit dostatečný počet vzorků (cca 12) od každého materiálu.
- Vytvořit na zkušebních vzorcích únavovou trhlinu pomocí zařízení, které je navrženo v kapitole 5.
- Upnout vzorek do trhačky a změřit závislost zatížení - rozevření. Zkoušku provádět za normální teploty (18 - 20°C)
- Ze závislosti zatížení - rozevření vyhodnotit velikost lomové houževnatosti podle části 4. 2. této kapitoly

3. Zjistit obrobitelnost materiálu

- Materiál 12 O50.1 je etalonem obrobitelnosti

Pro jiné materiály nebyla na KOM VŠST provedena dlouhodobá zkouška obrobitelnosti. Ke stanovení obrobitelnosti těchto materiálů je vhodné použít výpočtu obrobitelnosti, který je uveden v [9], popřípadě realizovat zkoušky obrobitelnosti pomocí některé krátkodobé zkoušky.

4. Porovnat zjištěnou lomovou houževnatost s obrobitelností daného materiálu

Na základě studia poznatků o lomové mechanice a obrobitelnosti materiálu lze vytvořit hypotézu, podle které by se měla obrobitelnost materiálu se zvyšující se lomovou houževnatostí zlepšovat. Tuto teorii je třeba podložit dostatečným množstvím experimentů, provedených na různých kovových materiálech.

4. 2. Zkouška lomové houževnatosti K_{Ic} kovů při rovinné deformaci

Tato kapitola byla zpracována na základě návrhu ČSN 42 03 47.

Podstata zkoušky

Zkouška spočívá v postupném zatěžování zkušební tyče tříbodovým statickým ohybem, případně excentrickým tahem (v tělese vzniká kombinace tahového a ohybového napětí) při dané teplotě až do lomu.

Podmínka lomové deformace je kontrolována piněním

$$c \geq 2,5 \left(\frac{K_{Ic}}{R_e} \right)^2 \quad (4.1 \text{ a})$$

$$a \quad a \geq 2,5 \left(\frac{K_{Ic}}{R_e} \right)^2 \quad (4.1. \text{ b})$$

kde a - tloušťka zkušebního tělesa (měřeno pod kořenem vrubu)

c - celková hloubka trhliny

R_e - mez kluzu v tahu

Zkušební tělesa jsou opatřena vrubem, prodlouženým únavovou trhlinou.

Součinitel intenzity napětí při rovinné deformaci K_I je mírou intenzity pole napjatosti v bezprostřední blízkosti čela trhliny při elastickém napětí, které vyvolává přemístění povrchu trhliny ve směru kolmém na její rovinu.

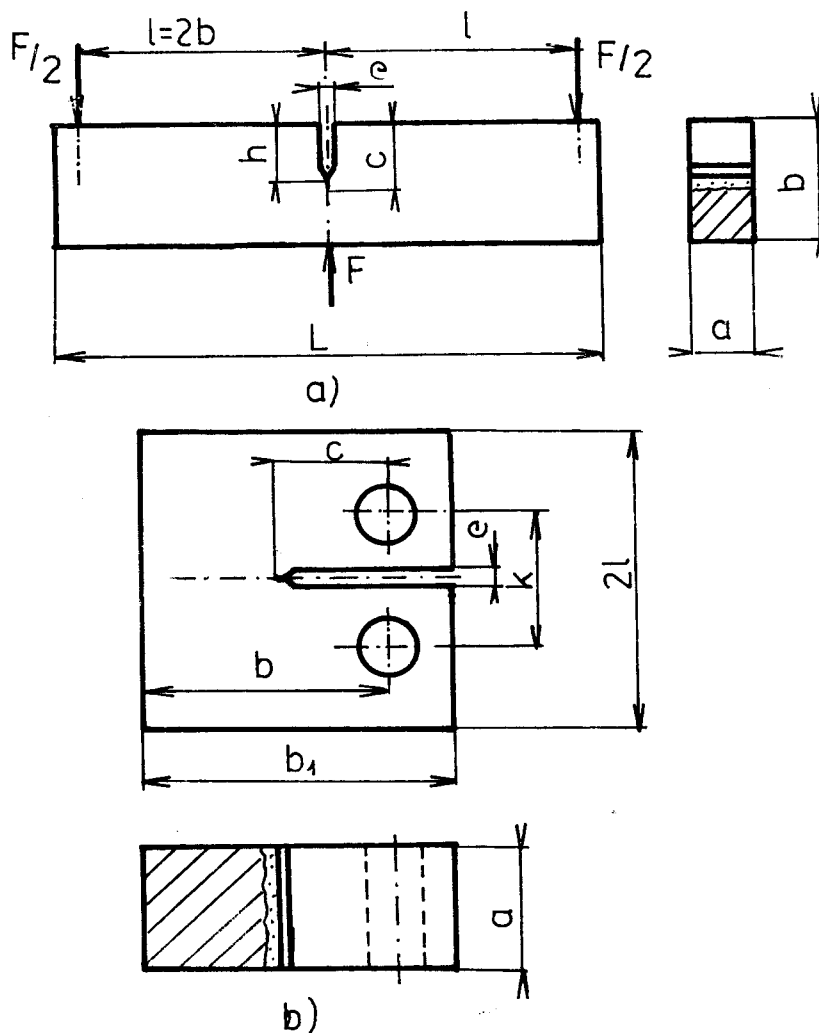
Lomová houževnatost je kritickou hodnotou součinitele intenzity napětí K_I v tom okamžiku, kdy nastane nestabilní šíření trhliny.

Zkušební tělesa a jejich příprava

K určení lomové houževnatosti se přednostně používají a označují tyto zkušební tělesa:

Typ A - zkušební těleso pro zkoušku statickým ohybem (obr.4.1)

Typ B - zkušební těleso pro zkoušku excentrickým tahem (4.1 b)



Obr. 4. 1 Typy zkušebních těles

Pro zkoušku lomové houževnatosti jsme zvolili zkušební těleso typu B, které se označí:

Těleso B / 25 ČSN 42 03 47 . 2

Číslo 25 znamená určení velikosti.

Zkušební tělesa musí být označena tak, aby se na nich i po vykonání zkoušky poznalo, odkud a jak byla odebrána vzhledem ke směru tváření a průřezu zkušebního kusu (vzorku).

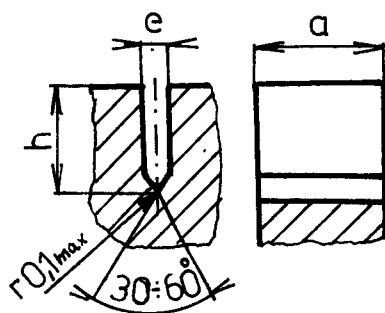
Pro první odhad velikosti zkušebního tělesa je nutno odhadnout lomovou houževnatost K_{IC} zkoušeného materiálu. Lépe je volit větší těleso a po zkoušce lomové houževnatosti z určené hodnoty K_{IC} a ze vztahu (4.1) určit velikost dalších těles.

Zkušební těleso musí být opracováno na rozměry podle normy ČSN. Nedojde-li k oduhličení povrchu tepelným zpracováním nebo k deformaci tělesa, může být tepelné zpracování prováděno na úplně opracovaném tělese. Jinak je nutné ponechat přídavek 0,5 mm na konečné opracování.

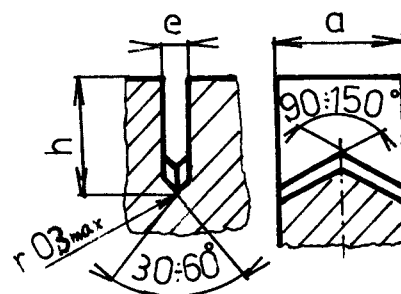
Vrub musí splňovat tyto podmínky pro poloměr kořene vrubu r :

přímý vrub $r \leq 0,1 \text{ mm}$ - obr. 4.2

lomený vrub $r \leq 0,3 \text{ mm}$ - obr. 4.3



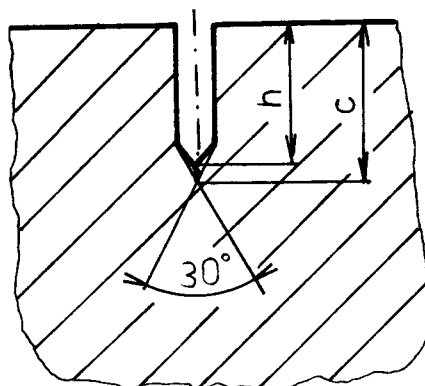
Obr. 4.2



Obr. 4.3

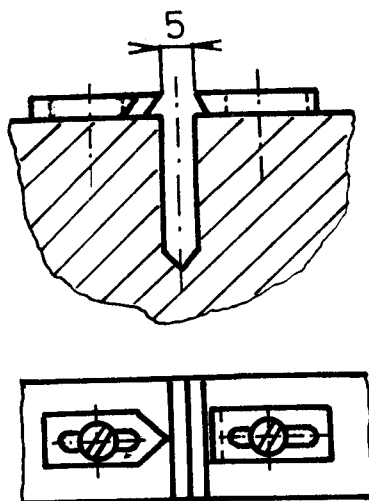
Lomený vrub se doporučuje použít nad tloušťku $a = 25 \text{ mm}$. Velikost a tvar vrubu jsou takové, aby vrub ležel mezi rovi-

nami, svírajícími úhel 30° a protínajícími se v čele únavové trhliny (obr. 4.4)



Obr. 4.4

Zkušební těleso je třeba upravit pro uchycení snímače rozevření trhliny. Možná úprava pro umístění sponového snímače je na obr. 4.5



Obr. 4.5

Při vytváření únavové trhliny na tělese typu B se použije excentrického pulsujícího tahového zatížení. Zatížení při vytváření únavové trhliny musí být takové, aby součinitel intenzity $K_f \max$ počítaný z maximální síly $F \max$ byl při vyvolání únavové trhliny $K_f \max \leq 0,75 K_Q$, kde K_Q je provizorní hodnota K_{Ic} .

Po vyvolání únavové trhliny se úroveň namáhání musí snížit tak, aby $K_f \max \leq 0,6 K_Q$. Při této úrovni namáhání se vytvoří únavová trhlina o hloubce větší než 2,5 % b (avšak větší než 1,25 mm), kde b - viz obr. 4.1 b

Hodnoty $K_f \max$ a K_Q se počítají pro zkušební tělesa typu B ze vztahu 4.2.

Při výpočtu $K_f \max$ se místo F_Q dosazuje maximální síla při výpočtu únavové trhliny

$$K_Q = \frac{F_Q}{ab^{1/2}} \left[29,6 \left(\frac{c}{b}\right)^{1/2} - 1185,5 \left(\frac{c}{b}\right)^{3/2} + 655,7 \left(\frac{c}{b}\right)^{5/2} - 1017 \left(\frac{c}{b}\right)^{7/2} + 638,9 \left(\frac{c}{b}\right)^{9/2} \right] \quad (4.2)$$

$$K_Q = \frac{F_Q \cdot Y_2}{ab^{1/2}}$$

kde Y_2 je funkcí $\frac{c}{b}$ a je uveden v [12]

V případě rozdílných teplot při vytváření únavové trhliny a vlastní zkoušky musí být splněn vztah:

$$K_f \max \leq 0,6 \left(\frac{Re \cdot t_1}{Re \cdot t_2} \right) K_Q \quad (4.3)$$

$Re \cdot t_1$ - mez kluzu při teplotě vytváření únavové trhliny

Re t_2 - mez kluzu při teplotě zkoušky

Zkušební zařízení

Pro vytvoření únavové trhliny může být použito zařízení, které je vybaveno ukazatelem síly a počtem kmitů.

Návrh zařízení je proveden v kapitole 5.

Pro vlastní zkoušku lomové houževnatosti je vhodné použít zařízení o velké tuhosti a konstantní rychlosti zatěžování. Nevylučuje se však použít obvyklých zkušebních zařízení.

Snímače síly a rozevření trhliny

Signál síly může být vyveden na zapisovač buď přímo z měřicího elementu zkušebního zařízení nebo může být zhotoven tenzometrický snímač na zatěžovací přípravku.

Snímač musí mít lineární charakteristiku s přesností 1 %.

Snímač rozevření je speciálně zkonstruované zařízení pro měření rozevření trhliny při zkoušce lomové houževnatosti. Důležité je, aby snímač byl upevněn na zkušební těleso před zkouškou a uvolněn při lomu tělesa, aby nedošlo k poškození snímače.

Snímač rozevření musí umožnit:

- a) Snímat rozevření až 5 mm
 - b) " " lineární části záznamu až do 2,5 mm
 - c) " " do 0,5 mm s úchylnkou menší než 0,003 mm
- od skutečného rozevření a při větším rozevření s úchylnkou menší než 1 %.

Zapísovač

Jako zapísovač je vhodné použít dvousouřadnicový zapísovač, na jehož jeden vstup (osa svislá) je veden signál zatížení a na druhý vstup (osa vodorovná) signál snímače rozevření.

Vlastní zkouška lomové houževnatosti

Před zkouškou je nutno změřit:

- a) Tloušťku zkušebního tělesa pod kořenem únavové trhliny s přesností 0,01 mm
- b) Rozměry zkušebního tělesa b , b_1 s přesností 0,1 mm (b , b_1 označeno na obr. 4.1 b)

Rychlost zatěžování je taková, aby časová změna součinitele intenzity napětí byla $K = (20 \text{ až } 85) \text{ MPa mm}^{1/2-1/5}$ při délce trvání zkoušky 30 sekund až 5 minut.

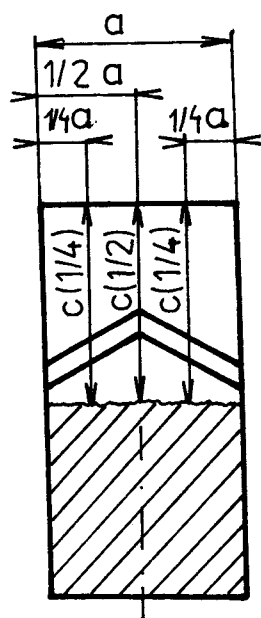
Snímač síly, snímač rozevření mají umožnit následující vlastnosti záznamu síla - rozevření trhliny:

- a) Tangenta úhlu sklonu lineární části záznamu - síla rozevření k ose rozevření musí být v mezích:

$$\text{tg } \alpha = 0,7 \text{ až } 1,5$$

- b) Zvětšení rozevření snímače minimálně stonásobné

Po zkoušce se změří celková hloubka trhliny c . Celková hloubka trhliny c se určí jako aritmetický průměr měření v $1/4$, v $1/2$ a ve $3/4$ tloušťky zkušebního tělesa - viz. obr. 4.6. Žádná dvě měření celkové hloubky trhliny se nesmějí lišit o více než 5 % b .

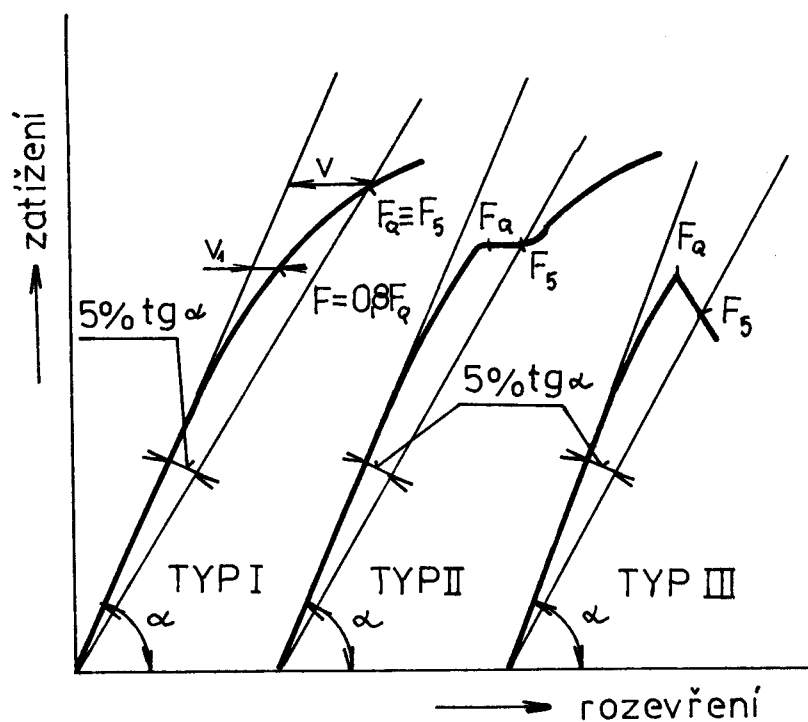


$$c = \frac{c\left(\frac{1}{4}\right) + c\left(\frac{1}{2}\right) + c\left(\frac{3}{4}\right)}{3}$$

Obr. 4.6

Vyhodnocení zkoušky

Síla F_Q se určí ze záznamu síla - rozevření trhliny následujícím způsobem (viz obr. 4.7):



Obr. 4.7

Nelineární začátek záznamu se zanedbá a z průsečíku prodloužené lineární části záznamu a osy rozevření se narýsuje sečna s tangentou o 5 % nižší než je tangenta lineární části záznamu.

V průsečíku sečny a záznamu síla rozevření je síla F_5 .

Síla F_Q , která je použita k výpočtu lomové houževnatosti K_Q , je určena podle typu záznamu (obr. 4.7).

Pro typ záznamu I je síla $F_Q = F_5$, pro typ II je síla F_Q rovna síle, při které dochází ke skoku na diagramu. V případě typu III je síla F_Q rovna síle při porušení tělesa.

Provizorní hodnota lomové houževnatosti K_Q je počítána pro zkušební tyče typu B podle vzorce 4.2.

Platí-li vztah 4.1., pak je hodnota lomové houževnatosti platná a označujeme ji jako K_{Ic} - lomovou houževnatost při rovinné deformaci. Není-li tomu tak, pak je nutno zvětšit rozměry zkušebního tělesa.

Lomová houževnatost je platná jedině tehdy, jsou-li splněny následující podmínky:

$$a) \quad c \geq 2,5 \left(\frac{K_Q}{R_e} \right)^2 ; \quad a \geq 2,5 \left(\frac{K_Q}{R_e} \right)^2$$

$$b) \quad K_{f \max} \leq 0,75 K_Q \quad (\text{před vyvoláním únavové trhliny})$$

$$K_{f \max} \leq 0,6 K_Q \quad (\text{po vyvolání únavové trhliny})$$

$$c) \quad \frac{v_1}{v} \leq 0,25 \quad (\text{pouze u záznamu síla rozevření typu I, kde } v_1 \text{ je přírůstek plastického rozevření při síle rovné } 80 \% F_Q)$$

v je přírůstek plastického rozevření při síle F_Q

$$d) \quad \text{Hloubka únavové trhliny musí být větší než } 2,5 \% b \quad (\text{v každém případě větší než } 1,25 \text{ mm})$$

- e) Celková hloubka trhliny na protilehlých površích zkušebního tělesa se může lišit max o 5 % b.
- f) Úhel mezi rovinou čela únavové trhliny a rovinou vrubu musí být menší než 5° .
- g) Nesmí dojít k rozvětvení únavové trhliny.
- h) Žádná dvě měření celkové hloubky ze tří měřených se nesmějí lišit o více než o 2,5 % b.
- i) Žádná dvě měření celkové hloubky trhliny se nesmějí lišit o více než 5 % b.

5. Návrh zařízení na iniciaci únavové trhliny

5. 1. Návrh zařízení

Pro vytvoření únavové trhliny bylo nutno zkonstruovat speciální zařízení.

Ke stanovení úrovně síly, jakou má být vzorek namáhán, je nutno znát hodnotu lomové houževnatosti. Byla zvolena předběžná hodnota lomové houževnatosti $K_Q = 150 \text{ MPa m}^{1/2}$. Z této hodnoty lze odhadnout pomocí vztahu 4.2 zátěžnou sílu F_m pro vytváření únavové trhliny.

$$F_m \leq \frac{a \cdot b^{1/2}}{Y_2} \cdot K_{fm} = \frac{25 \cdot 50^{1/2}}{11,26} \cdot 0,75 \cdot 150 = 1770 \text{ N}$$

$$K_{fm} \leq 0,75 K_Q$$

$$\frac{c}{b} = \frac{27,5}{50} = 0,55 = Y_2 = 11,26$$

Předpětí má být nastaveno tak, aby koeficient nesouměrnosti knitů byl v mezích $c = 0,1$ až $0,25$ (viz obr. 5.3)

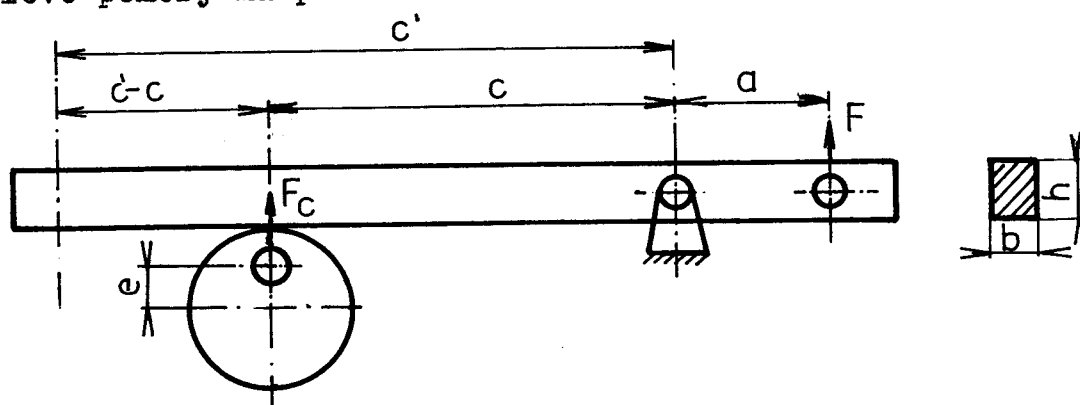
Tohoto předpětí bude dosaženo pomocí stahovací matice.

Při konstrukci zařízení bylo postupováno takovým způsobem, aby bylo možno celé zařízení rychle vyrobit a provést jeho odzkoušení. K dispozici byl na KMP VŠST pro toto zařízení motor s plynulou změnou otáček. Od tohoto motoru je přenášen krouticí moment klínovým řemenem na hřídel. Na tomto hřídeli je umístěn excentrický kotouč, z kterého se přenáší knity pomocí páky na zkušební vzorek.

Jako tlumicí člen je v přípravku umístěna tlačná pružina. Kontrola některých důležitých částí je provedena v části 5.2.

5. 2. Kontrola zařízení

Silové poměry na páce



Obr. 5.1 Síly působící na páku

$$a = 90 \text{ mm}$$

$$c = 700 - 84 - 260 + 40 - 176 - 90 = 130 \text{ mm}$$

$$c' = 700 - 84 - 40 - 176 - 90 = 310 \text{ mm}$$

$$e = 10 \text{ mm}$$

$$K = 100 \text{ N/mm} - \text{tuhost pružiny}$$

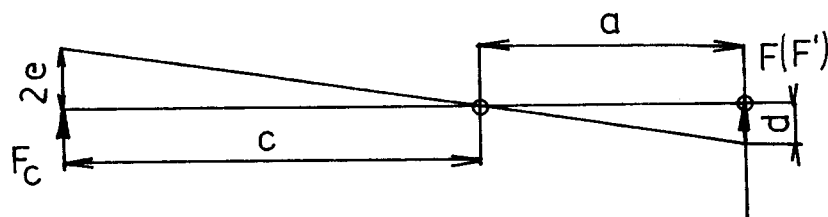
F - síla působící na páku; je to síla, která je potřebná ke stlačení pružiny

F_c - síla působící na páku od excentrického kotouče

c - minimální vzdálenost osy excentru od osy podpory

c' - maximální vzdálenost osy excentru od osy podpory

Výpočet síly F_a a F_c



$$\frac{c}{2e} = \frac{a}{d} = d = \frac{2ea}{c} = \frac{2 \cdot 10 \cdot 90}{130} = 13,85 \text{ mm}$$

kde d je stlačení pružiny při minimální vzdálenosti excentru od podpory.

$$d' = \frac{2ea}{c'} = \frac{2 \cdot 10 \cdot 90}{310} = 5,8 \text{ mm}$$

d' je stlačení pružiny při maximální vzdálenosti excentru od podpory.

Síly F resp. F' jsou dány součinem tuhosti pružiny K a stlačením pružiny d resp. d' .

$$F = K \cdot d = 100 \cdot 13,85 = 1385 \text{ N}$$

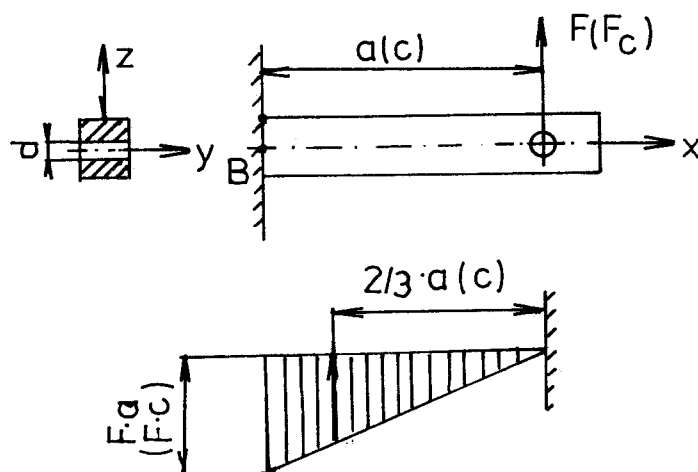
$$F' = K \cdot d' = 100 \cdot 5,8 = 580 \text{ N}$$

V dalších výpočtech je počítáno pouze se silou $F = 1385 \text{ N}$.

Z rovnosti sil na páce vyplýne:

$$F \cdot a = F_c \cdot c = F_c = \frac{F \cdot a}{c} = \frac{1385 \cdot 90}{130} = 960 \text{ N}$$

Výpočet napětí a deformací v páce Mohrovou metodou



Obr. 5.2 Výpočtové schéma

$$M_a = F \cdot \frac{a}{2} \cdot \frac{2}{3} a \cdot a = \frac{F a^3}{3}$$

$$M_c = \frac{F c^3}{3}$$

$$\omega = \frac{M}{E J_y}$$

$$\zeta_0 = \frac{M}{W_0} = \frac{M}{J_y} \cdot Z$$

$$J_y = \frac{b h^3}{12}$$

$$\omega_a = 4 \cdot \frac{F a^3}{E b h^3}$$

$$\omega_c = 4 \cdot \frac{F_c \cdot c^3}{E b h^3}$$

$$\omega = \omega_a + \omega_c = \frac{4}{E b h^3} (F \cdot a^3 + F_c \cdot c^3) =$$

$$= \frac{4}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 20 \cdot 26^3} (1385 \cdot 90^3 + 960 \cdot 130^3) = 0,17 \text{ mm}$$

Napětí v bodě B

$$W_{OB} = \frac{b (h^3 - d^3)}{6 h} = \frac{20 (26^3 - 14^3)}{6 \cdot 26} = 1900$$

$$M_B = F \cdot a = F_c \cdot c = 1385 \cdot 0,090 = 124 \text{ Nm}$$

$$\zeta_{OB} = \frac{M_B}{W_B}$$

$$\zeta_{OB} = \frac{124 \cdot 000}{1 \cdot 900} = 66 \text{ MPa}$$

Kontrola páky na ohyb

Materiál 12 061.6

$$R_m = 850 \text{ MPa}$$

$$R_e = 390 \text{ MPa}$$

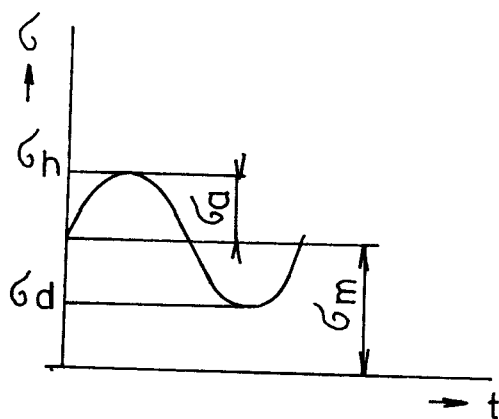
$$\sigma_{co} = R_m \cdot 0,43 = 365 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{hco} = \sigma_{co} \cdot 1,8 = 657 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ko} = R_e \cdot 1,15 = 415 \text{ MPa}$$

Zatížení s koeficientem nesouměrnosti kmitů

$$c = 0,1 - 0,25 \quad - \text{viz. obr. 5.3}$$



Obr. 5.3

$$c = \frac{\sigma_d}{\sigma_h} \approx 0,2$$

$$\sigma_h - \sigma_d = 66$$

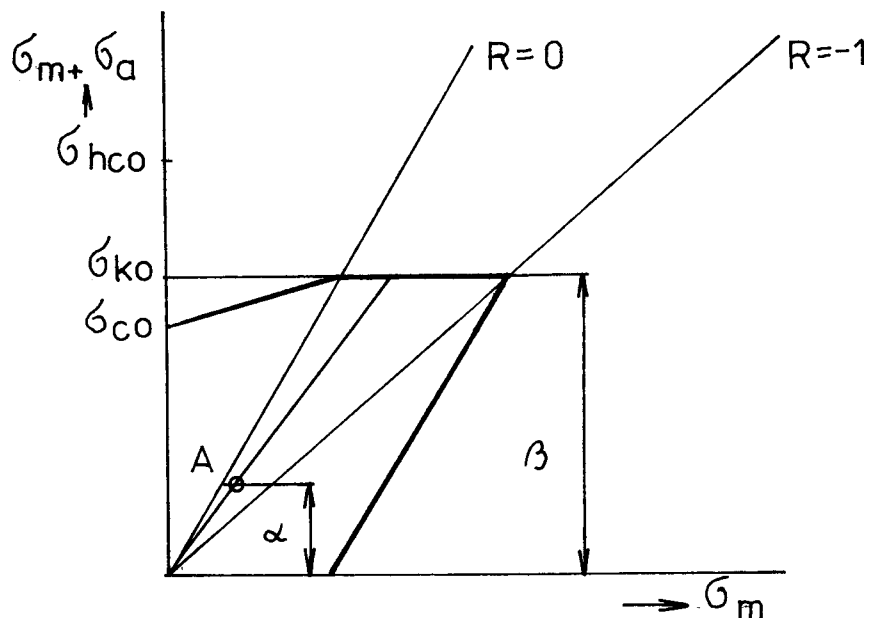
$$\sigma_h - 0,2 \sigma_h = 66$$

$$\sigma_h = \frac{66}{0,8} = 82,5 \approx 83 \text{ MPa}$$

$$\sigma_d = 16,2 \approx 17 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_h + \sigma_d}{2} = \frac{100}{2} = 50 \text{ MPa}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_h - \sigma_d}{2} = 33 \text{ MPa}$$



Obr. 5.4 Schmitův diagram

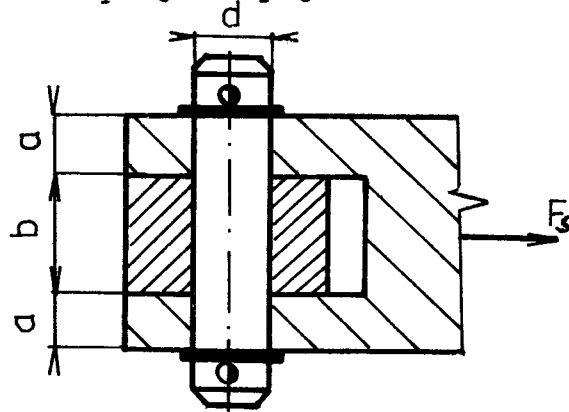
$$K = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{\sigma_{ko}}{\sigma_m + \sigma_a} = \frac{415}{83} = 4,7$$

K - bezpečnost pro porušení ohybovým napětím

Skutečná síla (maximální s uvažovaným předpětím)

$$F_s = F \frac{\sigma_h}{\sigma_{ob}} = 1383 \cdot \frac{83}{66} \approx 1750 \text{ N}$$

Kontrola čepových spojů



Obr. 5.5 Schéma uspořádání čepového spoje

Materiál kolíku 11 500

1) Kontrola čepu na otlačení

$$p = \frac{F}{b \cdot d} \leq p_D$$

$$p = \frac{1750}{20 \cdot 12} = 7,3 \text{ MPa} \quad p_D = 24 \text{ MPa}$$

2) Kontrola ohybového napětí v čepu

$$\sigma_o = \frac{4 F (b + 2a)}{\pi d^3} = \frac{4 \cdot 1750 \cdot 50}{\pi \cdot 12^3} \approx 65 \text{ MPa}$$

$$\sigma_o \leq \sigma_{Do} \quad \sigma_{Do} = 80 \text{ MPa}$$

Kontrolován čep nejmenšího průměru.

Kontrola pružiny

F_8 - síla vyvinutá pružinou ve stavu plně zatíženém

$$F_8 = 1750 \text{ N}$$

$$D = 51,5 \text{ mm}$$

$$d = 8,5 \text{ mm}$$

$$\tau_k = \frac{Mk}{Wk} \leq \tau_{Dk}$$

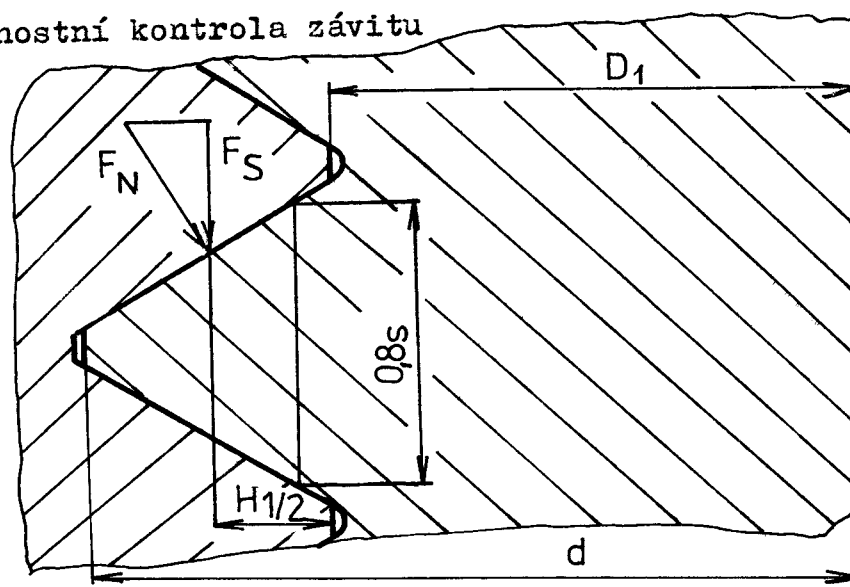
$$Mk = F_8 \cdot \frac{D}{2}$$

$$Wk = 0,2 d^3$$

$$\tau_k = \frac{F_8 D}{0,4 d^3} = \frac{1750 \cdot 51,5}{0,4 \cdot 8,5^3} = 370 \text{ MPa}$$

$$\tau_{Dk} = 1000 \text{ MPa}$$

Pevnostní kontrola závitu



Obr. 5.6 Závitový spoj

1) Kontrola na otlačení

$$p = \frac{F_S}{S}$$

$$F_S = 1750 \text{ N}$$

$$d = 24 \text{ mm}$$

$$D_1 = 22,372 \text{ mm}$$

$$s = 1,5 \text{ mm}$$

$$i = 8$$

$$S = \left(\frac{\pi d^2}{4} - \frac{\pi D_1^2}{4} \right) i =$$

$$S = \left(\frac{\pi \cdot 24^2}{4} - \frac{\pi \cdot 22,276^2}{4} \right) \cdot 8 = 473,2 \text{ mm}^2$$

$$p = \frac{1750}{473,2} = 4 \text{ MPa}$$

$$p_D = 60 \text{ MPa}$$

2) Kontrola na ohyb

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{H/2 \cdot F_S}{1/6 \pi D_1 i (0,8 s)^2} = \frac{6 \cdot 0,65 \cdot 1750}{\pi \cdot 22,376 \cdot 8 \cdot (0,8 \cdot 1,5)^2}$$

$$= 8,5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Do} = 85 \text{ MPa}$$

3) Kontrola na usmyknutí

$$\tau_s = \frac{F_s}{S_1} = \frac{F_s}{\pi D_1 \cdot i \cdot 0,80 \cdot s} = \frac{1750}{\pi \cdot 22,376 \cdot 8 \cdot 0,8 \cdot 1,5} =$$
$$= 2,5 \text{ MPa}$$

$$\tau_{Ds} = 51 \text{ MPa}$$

5. 3. Realizace

Zařízení bylo vyrobeno ve vývojových dílnách VŠST a sestaveno na katedře mechaniky pružnosti a pevnosti. Při výrobě některých součástí nebylo použito materiálu předepsaného na výkrese.

Ověřovací zkoušky:

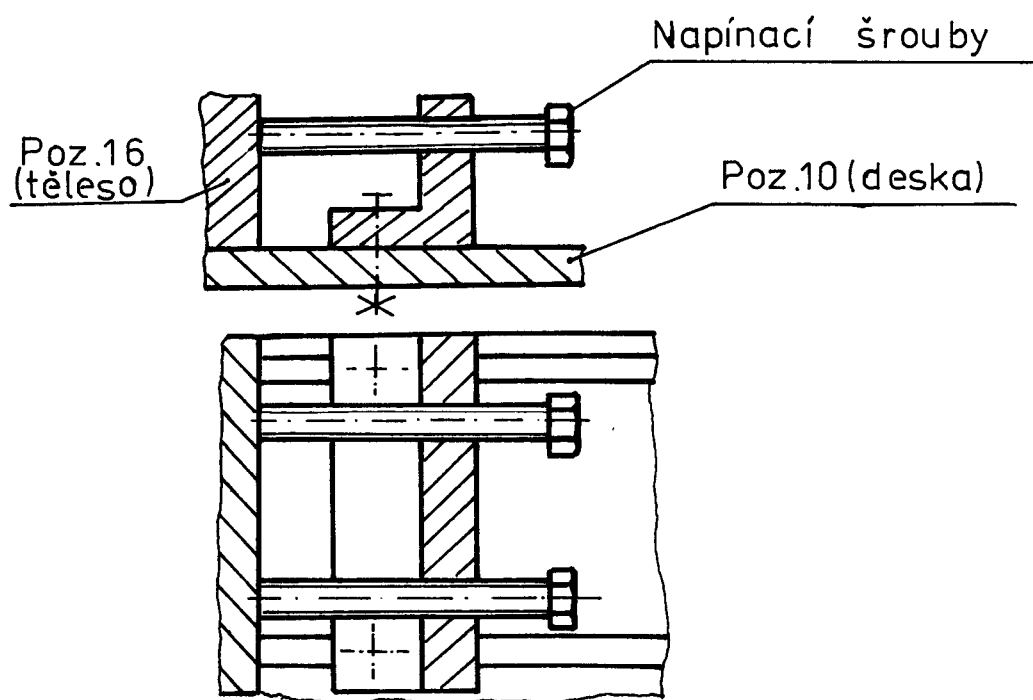
Z průběhu ověřovacích zkoušek vyplynuly tyto nedostatky:

- a) Mezi pákou a excentrickým kotoučem vzniká příliš velké tření, což má za následek rázy
- b) Přenos kroutícího momentu od motoru na hřídel s excentrickým kotoučem je zajištěn pouze jedním klínovým řemenem a to pro danou velikost kroutícího momentu nestačí.

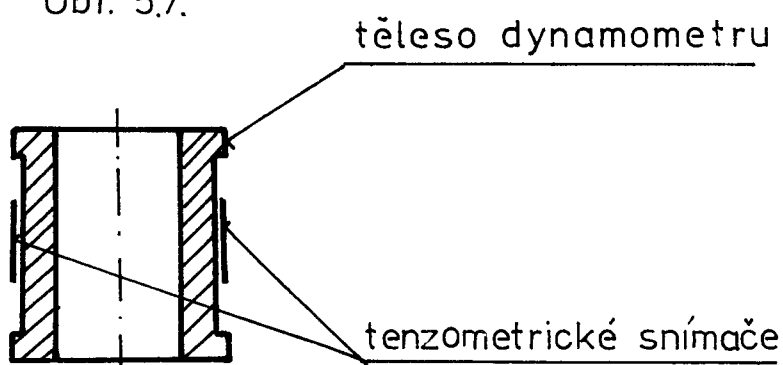
Navrhovaná opatření pro zlepšení činnosti:

- Místo excentrického kotouče použít vačku vhodně tepelně zpracovanou nebo zmenšit průměr excentru a nasadit na něho radiální ložisko, čímž se odstraní smykové tření mezi pákou a excentrem při chodu.
- Vyrobit nové řemenice a použít pro přenos kroutícího momentu dvou klínových řemenů.
- Pro stanovení potřebného předpětí klínových řemenů navrhnout a vyrobit přípravek podle obr. 5.7, který je umístěn v drážkách základní desky.
- Upravit táhlo (poz. 3 výkresu sestavy č. 1 - KOM - OM - 324 - 01) tak, aby se mezi vodící kroužek (poz. 9) a tlačnou pružinu (poz. 19) mohlo umístit těleso tlačného dynamometru (viz. obr. 5.8)

- Vyrobit páku z předepsaného materiálu místo použitého 11 500



Obr. 5.7.



Obr. 5.8.

6. Závěr

V této práci jsou shrnuty některé nové poznatky o obrobitelnosti materiálu a naznačena možnost hodnocení obrobitelnosti podle veličin lomové mechaniky.

Byl také proveden návrh zařízení pro vytváření únavové trhliny. Toto zařízení bylo vyrobeno ve vývojových dílnách VŠST a částečně odzkoušeno na katedře mechaniky, pružnosti a pevnosti. Při zkouškách se projevíly některé nedostatky, avšak byl učiněn návrh opatření na jejich odstranění.

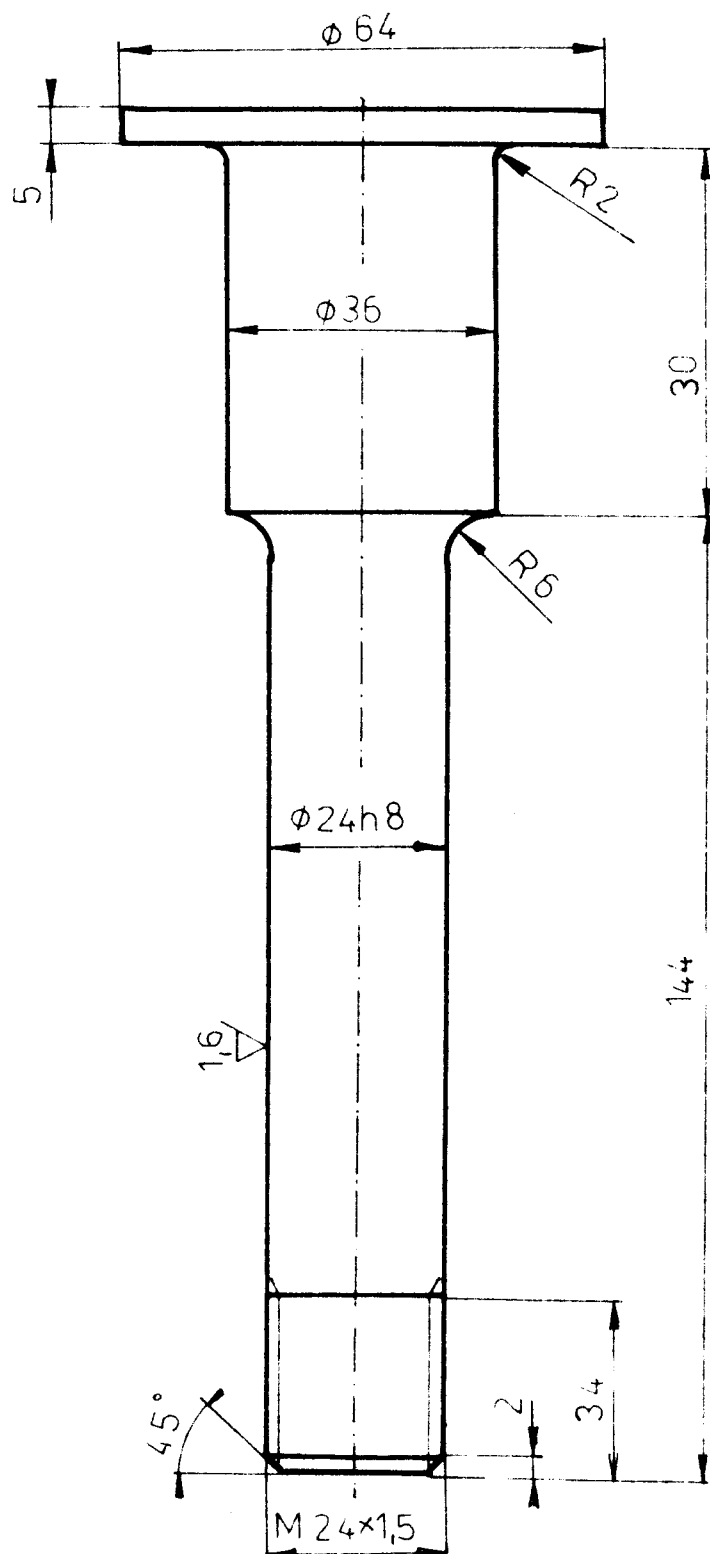
Závěrem bych chtěl poděkovat vedoucímu této práce Doc. Ing. Jaromíru Gazdovi, CSc. a Ing. Vladimíru Humenovi za všestrannou pomoc a odborné rady, čímž mi umožnili vypracování této diplomové práce.

Použitá literatura

1. Příkryl Z. - Musílková R.: Teorie obrábění, 3. vydání
Praha SNTL ALFA 1982
2. Buda J. - Békés J.: Teoretické základy obrábění kovov
2. vydání Bratislava ALFA 1977
3. Samotný M.: Fyzikální aspekty obrobitelnosti In: Predi-
kace mechanických vlastností kovových materiálů na zákla-
dě strukturních charakteristik, Nové Město na Moravě,
1981 str. 435
4. Bumbálek B.; Řešení obrobitelnosti kovových materiálů.
In: Predikce mechanických vlastností kovových materiálů
na základě strukturních charakteristik. Nové Město na Mo-
ravě 1981 str. 445
5. Kocman K., Samotný M.: Analýza procesu řezání ve vazbě
na fyzikální vlastnosti kovů včetně způsobu jejich stano-
vení nedestruktivními metodami Zpráva VUT - FS Brno 1976
6. Samotný M., Izáková M.; Klasifikace procesu tvorby
trísy z hlediska stupně obrobitelnosti. Zpráva VUT - FS
Brno 1983
7. Bílek Z.: Dynamika křehkého lomu kovových materiálů
Výzkumná zpráva Brno Ústav fyzikální metalurgie
ČSAV 1980
8. Banerjee A. J.: Aplikace metod fotoelasticimetrie na pro-
ces tvorby trísy Diplomová práce Liberec 1982 - VŠST
9. Obrobitelnost materiálů - Jednotný normativ
CNN 10 - 0 - I/II I.díl Praha 1977
10. Gabriel V.: Vypracování návrhu normy metodiky zkoušení
řezivosti jednobřitých nástrojů ze slinutých karbidů a
metodiky zkoušení obrobitelnosti kovových materiálů
nástrojem ze slinutých karbidů Zpráva KOM Liberec,
VŠST 1974
11. Ošťádal B.: Možnosti stanovení obrobitelnosti podle
drsnosti povrchu. Strojírenství 34, 1984 str. 115
12. ČSN 42 0347
13. Kocman K.: Stanovení kinetické obrobitelnosti kovových
materiálů pomocí aplikace magnetokorelační analýzy
Strojírenství 34, 1984 str. 568

14. Kocman K.: Nekonvenční zkoušky obrobitelnosti
Zpráva VUT - FS Brno VUT - FS 1983
15. Stríž J.: Pružnost a pevnost II. díl, VŠST Liberec -
- skriptum 1980
16. Zemánková J.: Technická mechanika Úvod do lomové mecha-
niky ČVUT Praha - skriptum 1981
17. Tschakertová R.: Studium vlivu řezné rychlosti na tvorbu
trísyky metodou fotoelasticimetrie Diplomová práce
Liberec 1983 - VŠST

32/ (▽)



$\phi 65-120$

ČSN42 55 10 11 700

001

3

elomir

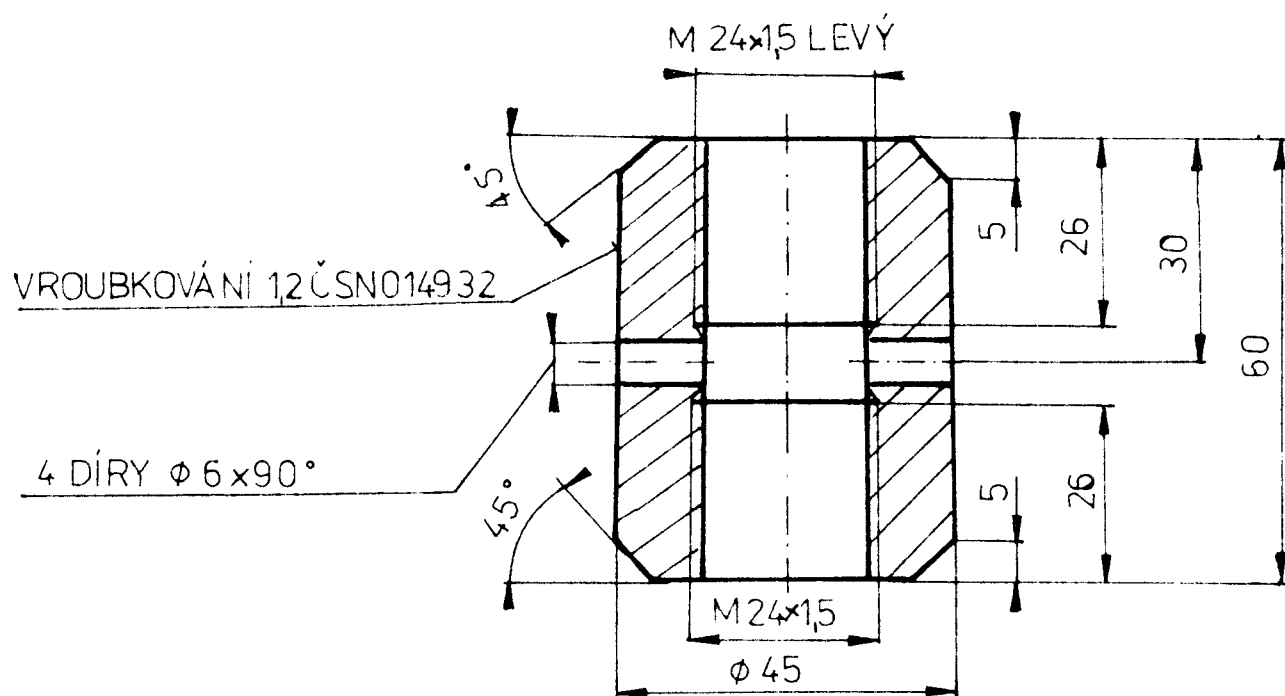
1.1

VSST

LIBEREC

TÁHLO

4-KOM-OM-324-01-03



Ø 48 x 60

ČSN 42 5510 11 500

001

4

eloxován

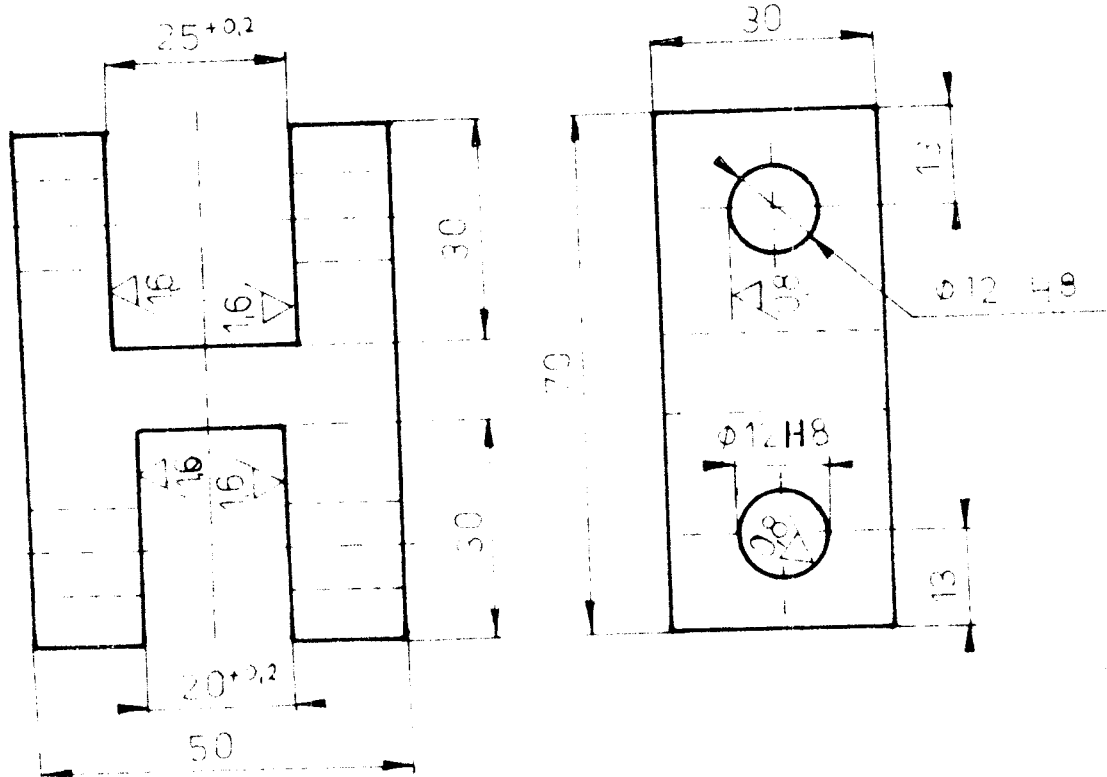
1:1

VŠST

LIBEREC

STÁHOVACÍ MATICE

4-KOM-OM-324-01-04



□ 50 - 70

ČSN 4255 20 11 700

001

5

černá

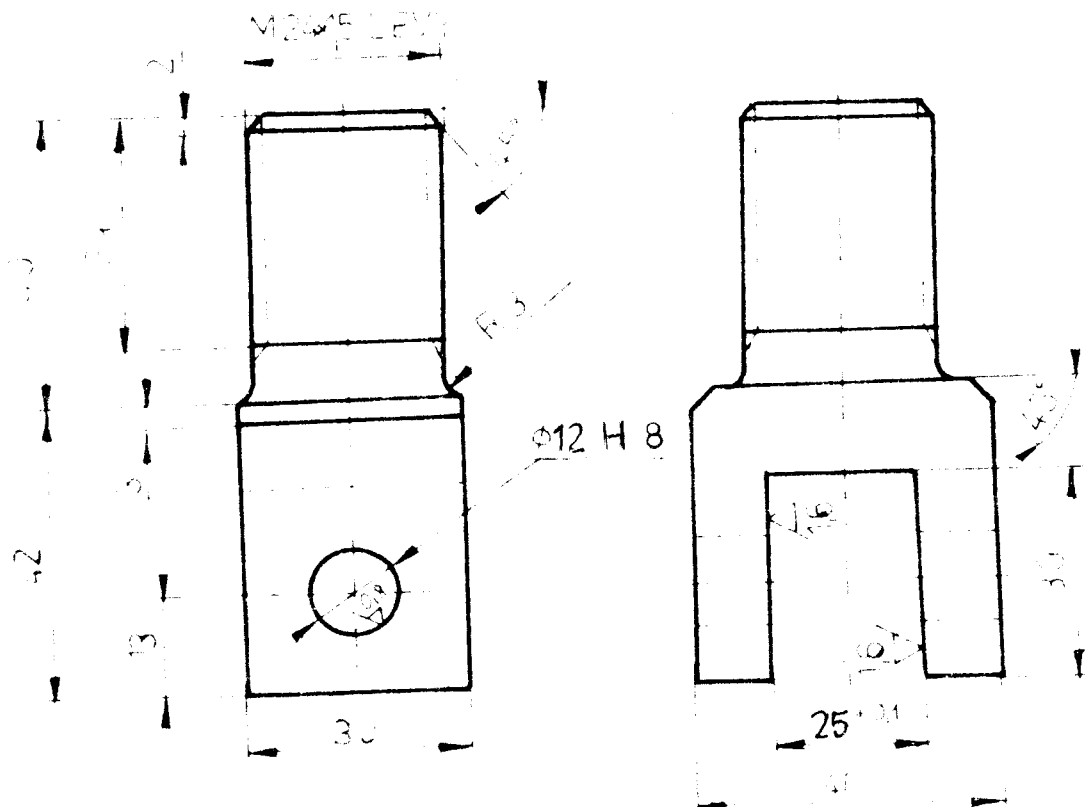
1 1

VŠST

LIBEREC

TÁHLO

4-KOM-OM-324-01-05



040-8

SN4285 L1 11 700

001

6

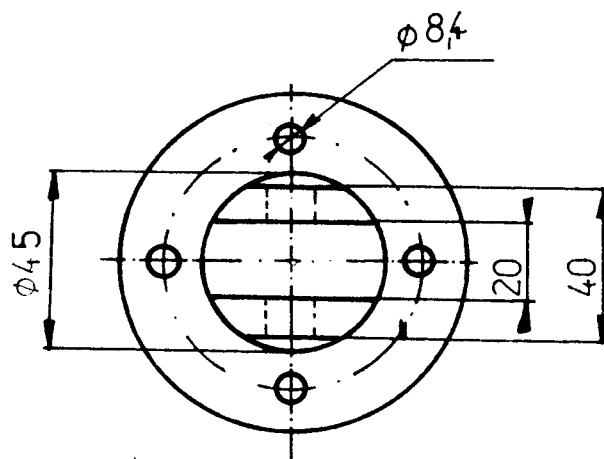
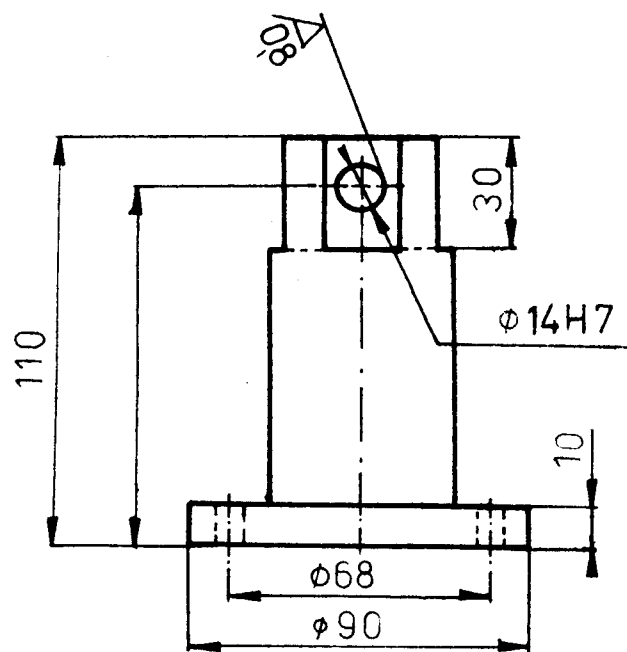
1.1

1.1

VŠST
LIBEREC

124410

4-KOM-OM-324-01-04



Ø100x120

12 050 1

001

7

celovník

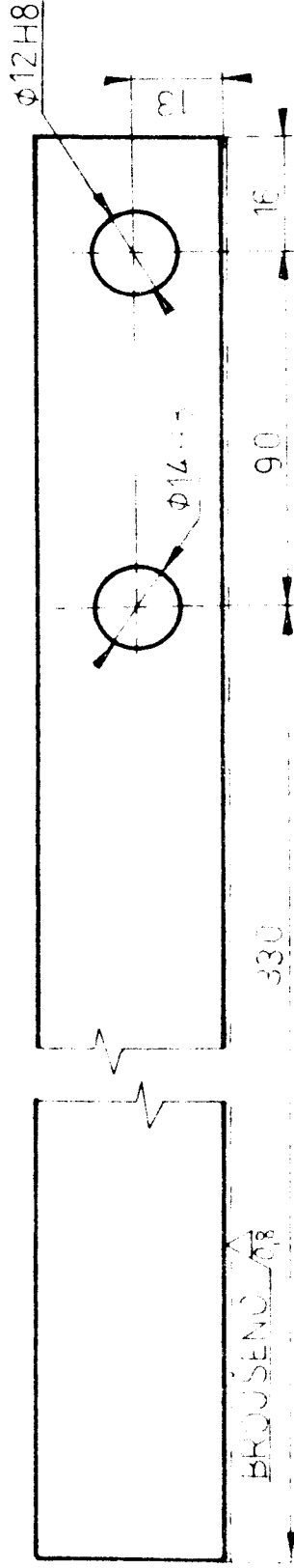
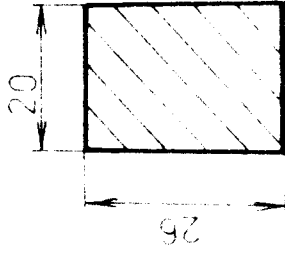
1:2

VŠST

LIBEREC

PODPĚRA

4-KOM-OM-324-01-07



32/Δ

□ 28-440 ČSN 425519 120618 12051 001

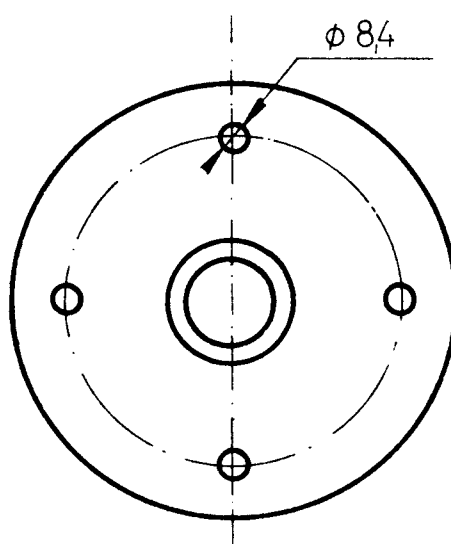
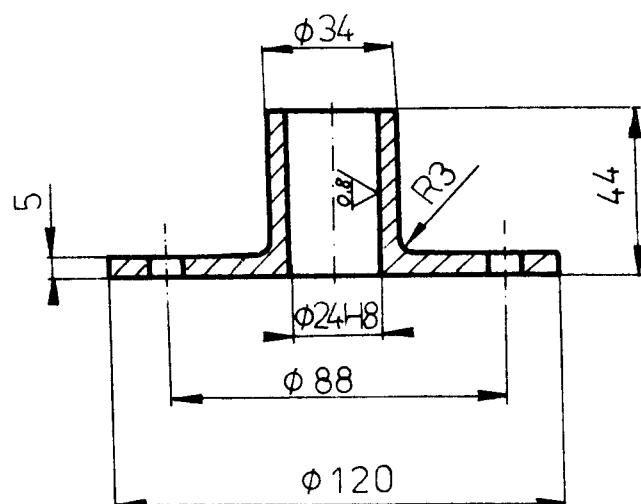
číslo

LIBEREC

PÁKA

4-KOM-UM-324-01-08

3,2 / (▽)



Ø125 50

ČSN425510 11373

001

9

Obornik

1:2

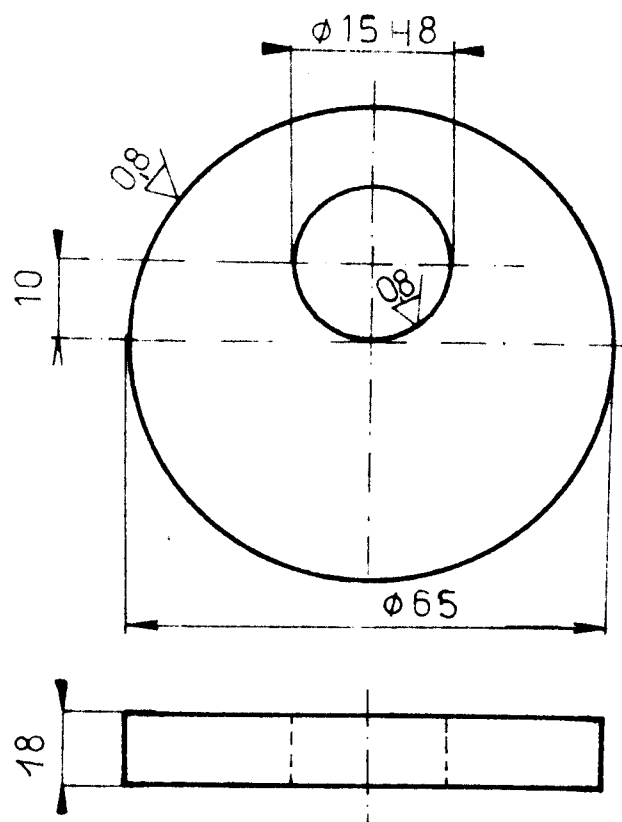
VŠST

LIBEREC

VODÍČÍ KROUŽEK

4-KOM-OM - 324-01-09

3.2 (▽)



Ø68x10 ČSN426510 12061.6 12061 001

11

černá

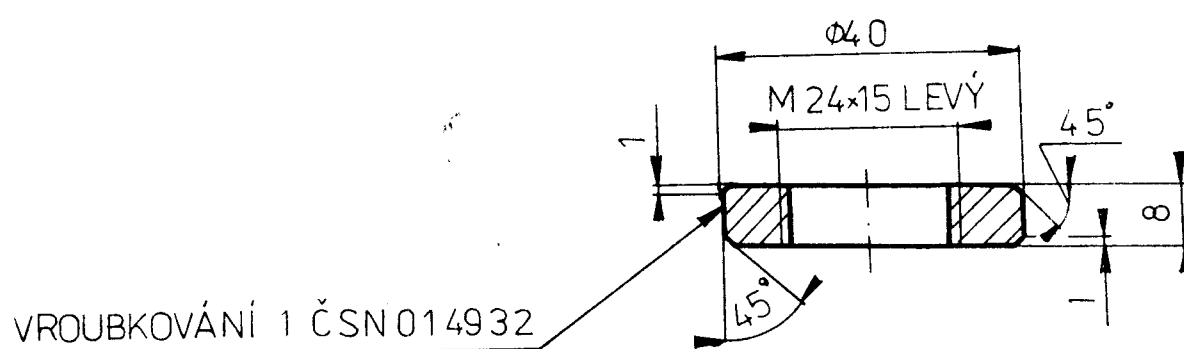
1.1

VŠST

LIBEREC

VÝSTŘEDNÍK

4-KOM-OM-324-01-11

 $\varnothing 42-10$

ČSN 42 55 10 11 373

001

12

členění

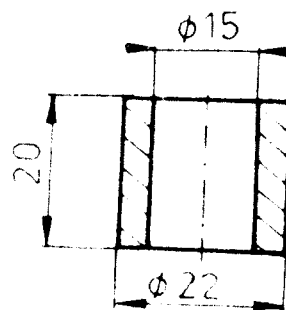
1:1

VSST

LIBEREC

MATÍCE L

4-KOM-OM-324-01-12



$\phi 22$ 2.0

ČSN 425510 11 500

001

13

zobrazení

1.1

VŠST

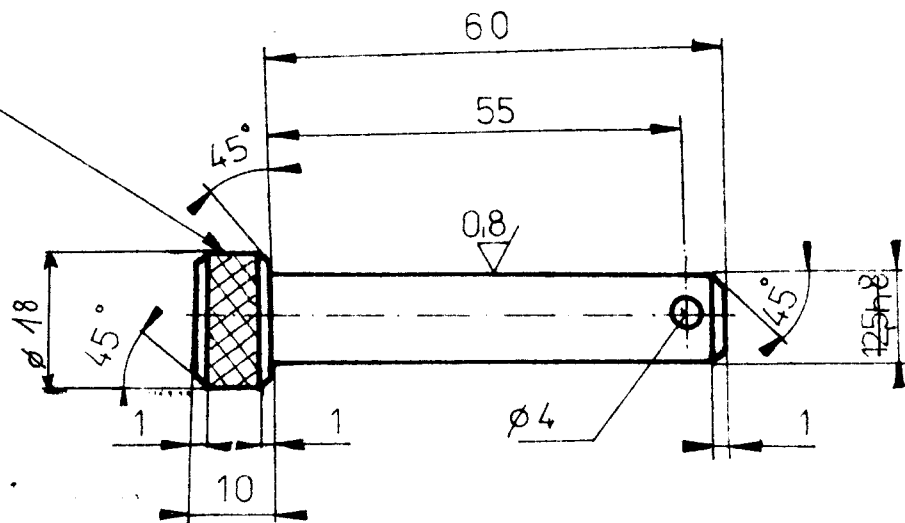
LIBEREC

TRUBKA

4-KOM-OM-3 24-01-13

3.2/ (A)

VROUBKOVÁNÍ 08 ČSN 0149 32



Opis: ϕ 12 f 8

2 ϕ 13 70

ČSN 42 55 10 11 500

001

14

Stavba

1:1

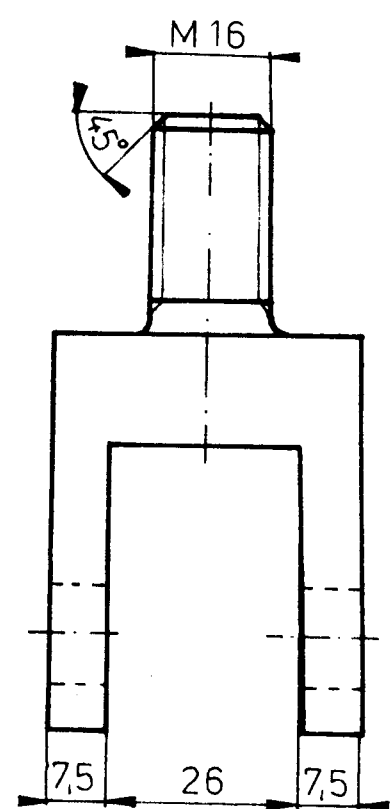
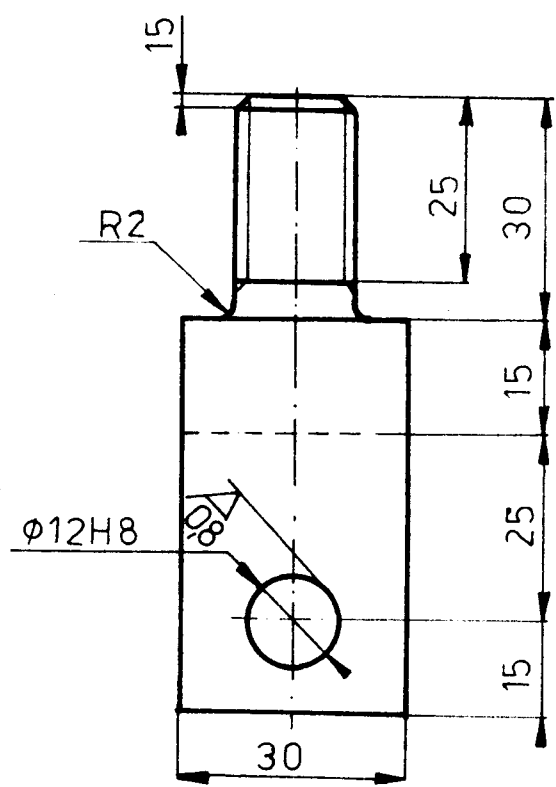
VŠST

LIBEREC

ČEP

4-KOM-OM-324-01-14

32 ()



2 □ 30×40

12 050 1

001

ovinná

1:1

VŠST

LIBEREC

UPÍNACÍ TŘMEN

4-KOM-OM-324-02