

UNIVERZITA PARDUBICE  
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2010

Michal Zelenda

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera

Únavový lom klikové hřídele osobního automobilu  
Michal Zelenda

Bakalářská práce

2010

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Katedra dopravních prostředků a diagnostiky  
Akademický rok: 2008/2009

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal ZELENDA**

Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**

Studijní obor: **Dopravní prostředky-Silniční vozidla**

Název tématu: **Únavový lom klikové hřídele osobního automobilu**

**Z á s a d y   p r o   v y p r a c o v á n í :**

Osnova: Úvod Příčiny porušování součástí Druhy porušení za mechanického namáhání Rozbor poškozené součásti Výsledky měření

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. Puškár, A.: Mikroplastickosť a porušenie kovových materiálov, Veda Bratislava, 1986
2. Ptáček, L. a kol.: Nauka o materiálu I.-II. CERM, s.r.o. Brno 1999, ISBN 80-7204-193-2

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Pavel Švanda, Ph.D.**

Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání bakalářské práce: **20. února 2009**

Termín odevzdání bakalářské práce: **1. června 2009**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.

vedoucí katedry

dne

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 26. 3. 2009

Michal Zelenda

## ANOTACE

Tato práce se zabývá příčinami porušování součástí. Jsou zde rozebírány poruchy krystalické mřížky a druhy trhlin, se kterými se setkáváme v běžné praxi. Další část práce je zaměřena na mechanické zkoušky materiálu. Praktická část práce se věnuje rozboru a vyhodnocení lomu klikové hřídele.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Krystalová mřížka, lom, vrub, mechanické zkoušky, tvrdost, ultrazvuk, kliková hřídel

## TITLE

Fatigue fracture of crank – shaft car

## ABSTRACT

This work deals with causes of an infringement of parts. There are analysed defects of crystal lattice and kinds of cracks, we meet in current profession. Next part of the work is centred on mechanical tests of materials. Practical part of the work attends to analysis and evaluate fracture of crankshaft.

## KEY WORDS

crystal lattice, fracture, nick, mechanical tests, hardness, ultrasonic, crankshaft

## Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat Ing. P. Švandovi Ph.D, za příkladné vedení, podmětné rady a připomínky, které mi poskytl při zpracování bakalářské práce.

# OBSAH

<b>ÚVOD:</b> .....	- 7 -
<b>1 PŘÍČINY PORUŠOVÁNÍ SOUČÁSTÍ</b> .....	- 8 -
1.1 NEJČASTĚJŠÍ DRUHY KRYSTALICKÝCH MŘÍŽEK .....	- 8 -
1.2 PORUCHY KRYSTALICKÉ MŘÍŽKY .....	- 10 -
1.2.1 BODOVÉ PORUCHY .....	- 11 -
1.2.2 ČÁROVÉ PORUCHY .....	- 12 -
1.2.3 PLOŠNÉ PORUCHY .....	- 13 -
1.2.4 PROSTOROVÉ PORUCHY .....	- 13 -
1.3 PŘÍČINA A VZNIK LOMU V MATERIÁLU .....	- 14 -
1.3.1 KŘEHKÝ LOM .....	- 14 -
1.3.2 HOUŽEVNATÝ LOM .....	- 15 -
1.3.3 ÚNAVOVÝ LOM .....	- 16 -
<b>2 DRUHY PORUŠENÍ ZA MECHANICKÉHO NAMÁHÁNÍ</b> .....	- 20 -
2.1 MECHANICKÉ ZKOUŠKY MATERIÁLU - STATICKÉ .....	- 20 -
2.1.1 ZKOUŠKA TAHEM .....	- 20 -
2.1.2 ZKOUŠKA TLAKEM .....	- 24 -
2.1.3 ZKOUŠKA OHYBEM.....	- 25 -
2.2 ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	- 26 -
2.2.1 ZKOUŠKA TVRDOSTI PODLE BRINELLA.....	- 26 -
2.2.2 ZKOUŠKA TVRDOSTI PODLE VICKERSE.....	- 27 -
2.2.3 ZKOUŠKA TVRDOSTI PODLE ROCKWELLA .....	- 28 -
2.3 NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY MATERIÁLU .....	- 29 -
2.3.1 ZKOUŠKA RENTGENOVÝM ZÁŘENÍM.....	- 30 -
2.3.2 ZKOUŠKA ULTRAZVUKEM .....	- 31 -
<b>3 ROZBOR POŠKOZENÉ SOUČÁSTI</b> .....	- 34 -
3.1 PŘÍPRAVA VZORKU K ROZBORU .....	- 34 -
3.2 MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI.....	- 36 -
<b>4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ</b> .....	- 37 -
4.1 VYHODNOCENÍ METALOGRAFIE .....	- 37 -
4.2 VYHODNOCENÍ MIKROTVRDOSTI.....	- 38 -
4.3. ZHODNOCENÍ ANALÝZ.....	- 39 -
<b>5 ZÁVĚR</b> .....	- 40 -
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ:</b> .....	- 41 -
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	- 42 -
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	- 43 -



## Úvod:

Úkolem této bakalářské práce je analýza příčin, které vedly k lomu klikové hřídele osobního automobilu. Kliková hřídel je nedílnou součástí jak vznětového, tak zážehového motoru. Prostřednictvím klikové hřídele se přenáší posuvný pohyb pístu na rotační. Tento rotační pohyb se pomocí převodů přenáší na kola vozidla, proto každé porušení klikové hřídele může vést k porušení motoru a nedozírným následkům. Z tohoto důvodu je potřeba se zabývat příčinou porušení součástí. To vyžaduje objevovat, poznávat, objasňovat a správně využívat poznatky o jevech a procesech probíhající v kovových materiálech.

Velký důraz se klade na osvojení si fyzikální podstaty mechanických, elektrických, magnetických a chemických vlastností látek jejich strukturních a substrukturách charakteristik, které mají velký význam na užitkové vlastnosti technických materiálu.

Základní informace o vlastnostech technických materiálů nám poskytují mechanické zkoušky, které mají velký význam, neboť nám dávají číselné hodnoty jednotlivých vlastností, a teda údaje a hodnoty, s kterými se počítá při konstruování.

# 1 Příčiny porušování součástí

Pod pojmem porušení součásti rozumíme změny jeho vlastností materiálu během jeho používání, díky nimž se tato součást stává nepoužitelná. Původem a šířením poruch je třeba se zabývat, neboť nám umožní, správně předvídat životnost výrobku a rovněž předcházet škodám, které by tyto poruchy mohli způsobit.

Procesy, které mají za důsledek porušení materiálu je celá řada. Některé jsou způsobeny čistě mechanickým zatěžováním materiálu (plastická deformace, opotřebení, lom, únava), u jiných se vedle mechanické síly uplatňuje i působení zvýšené teploty. Tento proces známe pod názvem tečení neboli creep. Jestliže k porušování materiálu dochází vlivem chemické reakce se složkami okolního prostředí, pak se tento děj, nazývá koroze. [4,5]

## 1.1 Nejčastější druhy krystalických mřížek

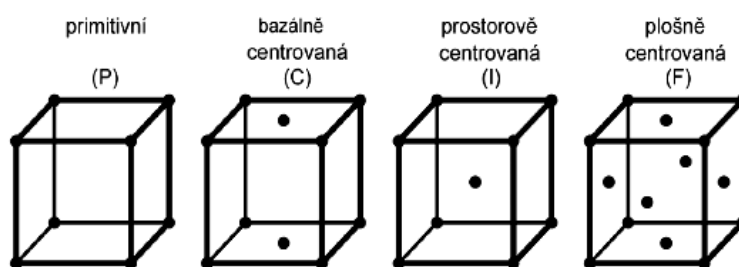
Téměř tři čtvrtiny prvků v periodické soustavě řadíme mezi kovy. Jako kovy uvažujeme prvky s typickou kovovou vazbou.

Kovovou vazbu si lze představit jako soubor kationtů, které jsou spolu sjednoceny delokalizovanými elektrony tvořící elektronový plyn. Tato vazba umožňuje obvykle velmi těsnou vnitřní stavbu tuhých kovů a podmiňuje tak rovněž dobrou plasticitu a houževnatost.

Uspořádání atomů v krystalové struktuře kovu popisujeme pomocí krystalové mřížky, která je množinou bodů z nichž každý reprezentuje jeden atom. Nejmenší část krystalické mřížky, která obsahuje nemenší možný počet uzlových bodů, se nazývá elementární buňka. [4,5]

Podle počtu mřížkových bodů rozlišujeme elementární buňky (obr. 1.1):

- Primitivní (P)
- Bazálně centrované (C)
- Prostorově centrované (I)
- Plošně centrované (F)



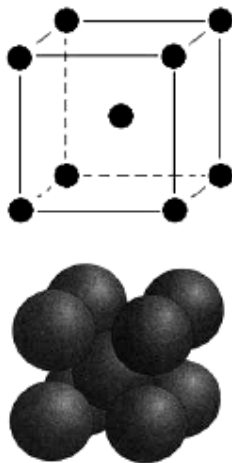
Obr. 1.1 – Druhy elementárních buněk [4]

Dále podle způsobu centrování krystalové mřížky rozeznáváme 14 typů prostorových mřížek:

- Triklinická (trojklonná) → jednoduchá
- Monoklinická (jednoklonná) → jednoduchá, bazálně centrovaná
- Rombická (kosočtverečná) → jednoduchá
- Tetragonální (čtverečná) → jednoduchá, prostorově centrovaná
- Trigonální → jednoduchá, bazálně centrovaná, prostorově centrovaná, plošně centrovaná
- Hexagonální (šesterečná) → bazálně centrovaná
- Kubická (krychlová) → jednoduchá, prostorově centrovaná, plošně centrovaná

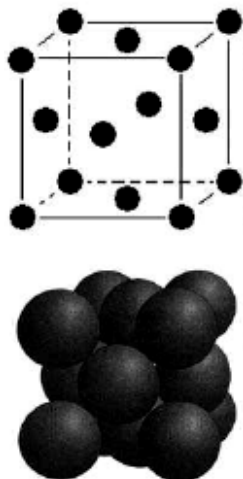
Nejčastěji se u kovových soustav vyskytují krystalové mřížky kubické prostorově centrované a kubické plošně centrované:

*Kubická prostorově centrovaná* – označována K8. Elementární buňkou je krychle která má parametry  $a=b=c$  a  $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ . Atomy jsou umístěné ve vrcholech mřížky a v průsečíku tělesových úhlopříček (obr. 1.2). Tato mřížka nepatří mezi struktury s maximálním zaplněním částic, proto kovy které v ní krystalizují, nejsou příliš tvárné za studena. Výskyt této struktury je charakteristický např. pro  $\alpha$ - Fe, Mo, Cr, W, V atd. [4]



Obr. 1.2 – Krystalická mřížka kubická prostorově centrovaná [4]

*Kubická plošně centrovaná* – označována K12. Elementární buňkou je krychle, jejíž parametry jsou  $a=b=c$  a  $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ . Atomy má rozmístěné ve vrcholech a ve středech všech stěn (obr. 1.3). Kovy krystalizující v tomto typu mřížky mají lepší tvárnost za tepla i za studena. Výskyt této struktury je typický pro kovy např. Al, Cu, Ni,  $\gamma$ -Fe, Ag, Pt atd. [4]



Obr. 1.3 – Krystalická mřížka kubická plošně centrovaná [4]

## 1.2 Poruchy krystalické mřížky

Představa stavby čistého kovu nebo slitiny jako pravidelně se opakující ideální uspořádání krystalografických buněk je zidealizovaná. Ve skutečnosti v krystalické mřížce existují odchylky od tohoto ideálního uspořádání, které nazýváme mřížkové poruchy. Existence poruch má velký vliv na řadu technicky důležitých vlastností kovových materiálů. [4,5]

Mřížkové poruchy obvykle dělíme podle prostorového hlediska na:

- Bodové poruchy
- Čárové poruchy
- Plošné poruchy
- Prostorové poruchy

### 1.2.1 Bodové poruchy

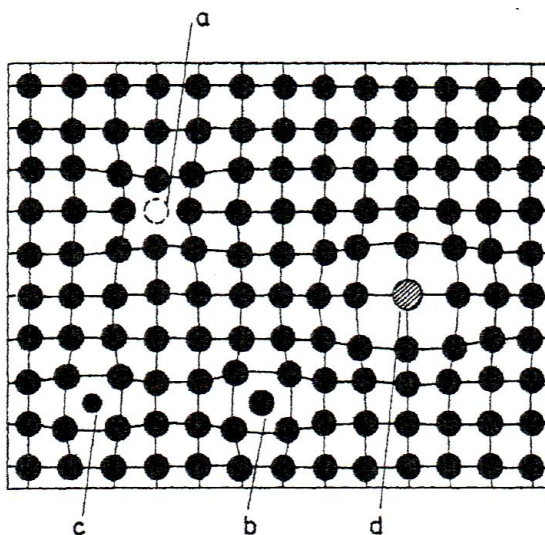
Mezi základní bodové poruchy řadíme vakance a intersticiály. Velikost bodové poruchy je porovnatelný s rozměrem jednoho mřížkového uzlu. Jsou-li v základním kovu přítomny příměsové atomy jiného prvku, tak tyto atomy tvoří intersticiál příměsi nebo substituci. Bodové poruchy výrazně ovlivňují průběh difúze v tuhém stavu v kovech.

*Vakance* – porucha vzniklá, jestliže atom v mřížkové poloze chybí (obr.1.4a). Koncentrace vakancí v kovu s rostoucí teplotou roste. Příčinou vakance může být např. tepelný pohyb, který způsobí, že se některým částicím podaří uniknout ze svého místa a toto místo zůstane neobsazeno.

*Intersticiály* – atomy, které jsou umístěné v mezimřížkové poloze (obr. 1.4b).

*Intersticiál příměsi* – vzniká vmezeřením atomu příměsi do dutin mezi atomy základního kovu (obr. 1.4c). Tyto poruchy vznikají, jestliže je atom příměsi mnohem menší než atom základního kovu

Substituce – tato porucha vzniká, jestliže atom příměsi nahradí atom základního prvku v krystalické mřížce (obr. 1.4d). Přednostně vzniká, jestliže jsou si velikosti atomů základního kovu a příměsi blízké.[4]



Obr. 1.4 - Druhy bodových poruch: a – vakance, b – intersticiál, c – intersticiál příměsi, d – substituce [4]

## 1.2.2 Čárové poruchy

Nejvýznamnějšími čárovými poruchami jsou dislokace. Dislokace jsou poruchy, které probíhají mřížkou podél určité čáry a lze je považovat za jednorozměrné.[4]

Existují dva základní druhy dislokací:

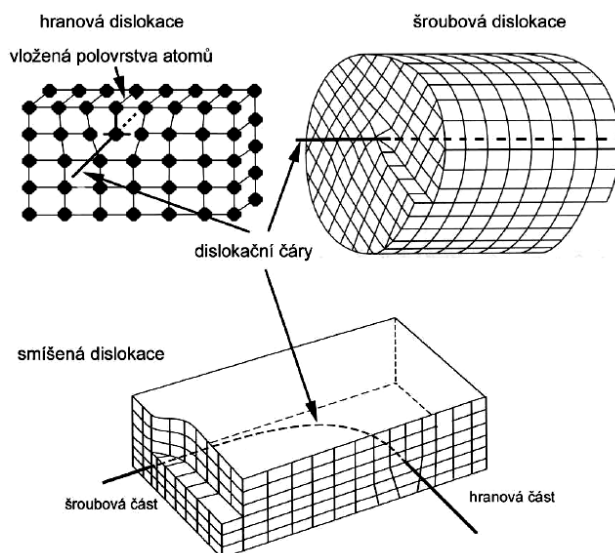
- Dislokace hranové
- Dislokace šroubové

O charakteru dislokací rozhoduje vektor vzájemného posunutí tzv. Burgersův vektor  $\mathbf{b}$  a jeho poloha vůči tomuto rozhraní, tedy vůči dislokační čáře. Podle uhlu, který svírá Burgersův vektor s dislokační čarou poznáme, zda jde o dislokaci hranovou nebo šroubovou. Burgersův vektor je roven nejkratší vzdálenosti atomů v neporušené mřížce. Pohyb dislokací je důležitý, protože je spojen s plastickou deformací kovu.

*Dislokace hranová* – kterou si představujeme jako polorovinu vloženou mezi dvě rovnoběžné strukturální roviny (obr. 1.5).

*Dislokace šroubová* – tuto poruchu si můžeme představit tak, že krystal ve tvaru válce nařizneme rovnoběžně s osou až k jeho středu. Obě části poté vzájemně posuneme o jednu meziatomovou vzdálenost (obr. 1.5).[4]

V reálných krystalech se jen málokdy vyskytují tyto dislokace samostatně, většinou bývají smíšeného tvaru, to znamená, že obsahují jak hranovou dislokaci tak šroubovou (obr. 1.5).



Obr. 1.5 – Hranová, šroubová a smíšená dislokace [4]

### 1.2.3 Plošné poruchy

Mezi plošné poruchy řadíme:

- Hranice zrn
- Hranice subzrn
- Vrstevné poruchy

*Hranice zrn* – existují v důsledku polykrystalické povahy většiny kovových materiálů.[4]  
Hranice zrn odděluje zrna téže fáze s různou orientací mřížky nebo zrna různých fází, lišící se navíc typem a parametry mřížky.

*Hranice subzrn* – hranice mezi oblastmi s pravidelnou orientací krystalické mřížky. Subzrna jsou části zrna natočené navzájem o malé úhly. Představujeme si jich jako dislokace uspořádané nad sebou tzv. dislokační stěny.[5]

*Vrstevné poruchy* – jedná se o plochu tvořenou atomy slaběji vázanými ve struktuře krystalu, než odpovídá jeho vnitřku. Z tohoto důvodu probíhá na povrchu proces difúze rychleji než v objemu krystalu. Povrch krystalu bývá také často znečištěn adsorbovanými a chemisorbovanými molekulami plynu. Vlastnosti povrchu materiálu jsou rozhodující pro průběh takových procesů jako je koroze, únava materiálu, opotřebení atd.[4]

### 1.2.4 Prostorové poruchy

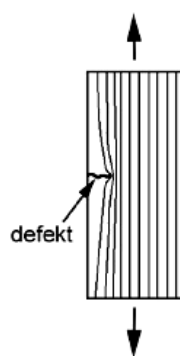
Mezi prostorové poruchy řadíme především dutiny a trhliny v materiálu.

Dutiny mohou vzniknout např. v důsledku rozdílu mezi měrným objemem roztavené a ztuhlé slitiny nebo výskytem rozpuštěných plynů v tavenině. Kdy při tuhnutí se díky nižší rozpustnosti plynů v tuhé fázi tyto plyny vylučují do struktury jako bubliny.

Trhliny mohou být důsledkem, např. vnitřního pnutí v materiálu, která vznikají při nestejném ochlazení.

### 1.3 Příčina a vznik lomu v materiálu

Při mechanickém zatěžování součásti mohou vznikat defekty. Výskyt těchto defektů může za určitých podmínek zatěžování způsobit havárii nebo selhání konstrukce. Defekty typu trhlin mohou vznikat i během provozu zařízení a to únavovým mechanismem nebo korozí. Škodlivý vliv defektů je výsledkem výrazné koncentrace napětí v jejich blízkosti (obr. 1.6). I přestože je celkové napětí působící na materiál nízké, může napětí v blízkosti defektu přesáhnout mez nutnou k porušení chemických vazeb. Za těchto podmínek defekt začne růst a dojde k lomu materiálu.[4,7]



Obr. 1.6 – Rozložení napětí v materiálu: vlevo – bez defektu, vpravo – s defektem [4]

Podle podmínek zatěžování a podle druhu materiálu může nastat porušení součásti buď křehkým, houževnatým nebo únavovým lomen.

#### 1.3.1 Křehký lom

Z hlediska metalurgického jsou velmi dobře známí činitelé, kteří ovlivňují vznik křehkého lomu. Jedním z těchto činitelů je např. existence intersticiálních atomů v tuhém roztoku železa  $\alpha$ , které jsou důvodem zvýšené citlivosti ke křehkému lomu. Naproti tomu je všeobecnou známou skutečností, že zjemnění zrna oceli posouvá kritické rozmezí křehkosti k nižším teplotám, a tím se zmenšuje náchylnost oceli ke vzniku křehkého lomu.[1]

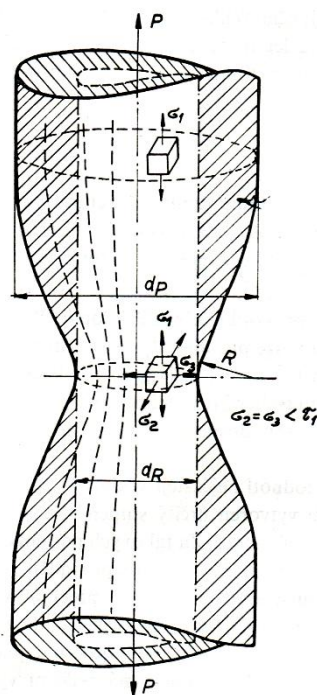
Ukázalo se, že náklonnost Thomasových ocelí ke vzniku křehkého lomu je zapříčiněna vyšším obsahem dusíku. Dále bylo zjištěno, že křehkost souvisí s prodlevou na mezi kluzu, a proto je spojena s přítomností intersticiálních atomů v materiálu. Z rozborů jevu prodlevy na



mezi kluzu vystupuje do popředí předpoklad, že hlavním faktorem pro vznik křehkého lomu u těchto kovů je náhlé uvolnění „laviny“ dislokací při vzniku plastické deformace. Dislokace pohybující se ve skluzových rovinách, vytvářejí vzájemnou reakcí nukleační zárodek mikrotrhliny. Šíří-li se trhlina velmi rychle, nemůže se projevit uvolnění napětí v sousedních oblastech a vznikne křehký lom.

### 1.3.2 Houževnatý lom

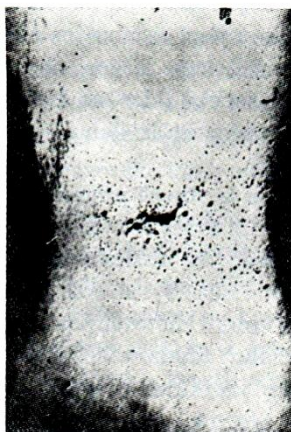
Houževnatý lom, který vzniká při tahovém zatížení, je charakterizován vznikem lokálního zúžení tzv. krčku (obr. 1.7). Změnou tvaru tyče vzniká v tomto místě víceosá napjatost, kde největší napětí je v tomto případě uprostřed tyče. Z tohoto důvodu je nejčastější iniciace přetvárného lomu uprostřed zkušební tyče.



Obr. 1.7 - Napjatost v oblasti krčku tyče při běžném tahu [2]

Lom se nejdříve šíří kolmo k ose tyče, až poslední fáze lomu je charakterizována vznikem lomové plochy ve tvaru kužele na okraji tyče. Střední část povrchu se skládá z nepravidelných výstupků, vzájemně nakloněných dávajících lomu jeho vláknitý charakter. Tato část lomu se rozvíjí postupně a je doprovázena značnou plastickou deformací.

V materiálu v oblasti krčku vzniká současně několik malých dutin (obr. 1.8). Jednotlivé dutiny potom rostou ve všech směrech, mírně se prodlužují ve směru podélné osy a koalescují posléze se sousedními dutinami, aby společně vytvořily část velké dlouhé dutiny.[1]



Obr. 1.8 – Příklad dutiny v průřezu krčku měděné tyče [2]

Dutinky vzniklé plastickou deformací se vytvářejí u cizích částic např. vměstků, a to buď oddělením kovové hmoty od cizí částice, nebo při porušení cizí částice. V případě že tyto částice nebudou přítomny, porušení vzorku by nastalo pouze růstem vnějšího krčku, takže zúžení by bylo téměř 100%. [1]

### 1.3.3 Únavový lom

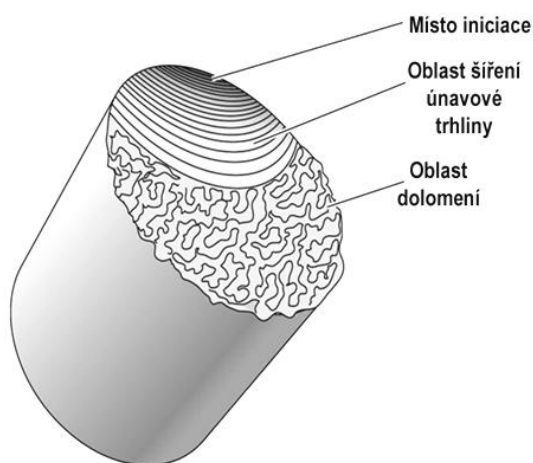
Únavový lom vzniká při cyklickém namáhání součástek. Změny ve struktuře účinkem cyklické deformace jsou závislé na složení namáhaného materiálu. Stárnucí slitiny, které jsou v praxi zastoupeny zejména ocelmi, vykazují při cyklickém zatěžování některé odlišné vlastnosti od čistých kovů. Tyto odlišné vlastnosti jsou zapříčiněny přítomností intersticiálních atomů C+N v  $\alpha$  železe.

Únavový proces poškození se skládá z několika hlavních období:

- 1 – období, ve kterém se objevují na povrchu vzorku únavové skluzové čáry
- 2 – období, ve kterém vznikají a rozšiřují se trvalé skluzové čáry, představující silně krystalograficky porušená pásma základní kovové hmoty

3 - období, ve kterém vznikají v trvalých skluzových čarách mikrotrhliny šířící se při dalším zatěžování napříč nosným průřezem a vedoucí ke konečnému porušení vzorku

Výsledná lomová plocha únavového lomu se skládá pak ze dvou výrazně rozdílných oblastí (obr. 1.9). Oblast, která odpovídá postupnému šíření únavové mikrotrhliny a oblasti dolomení odpovídající statickému porušení, které nastane v okamžiku, kdy v oslabeném průřezu napětí dosáhne pevnosti namáhaného kovu.[1]



Obr. 1.9 – Únavový lom [7]

Vliv složení se projevuje v rozdílné změně mechanických vlastností v jednotlivých úsecích únavového pochodu. U čistých kovů probíhá v prvním stádiu zpevňování vlivem cyklické deformace. U oceli pak cyklická deformace v prvním stádiu únavového pochodu způsobuje změkčení původního materiálu.

Výrazný vliv na únavové chování má kvalita povrchu materiálu, neboť na povrchu obvykle vznikají únavové trhliny. Proto pro zvýšení únavové životnosti je třeba co nejvíce omezit místa na povrchu, kde by takové trhliny mohly vzniknout. Takovými místy jsou např. ostré vruby, závity, nedokonalé svary.

Rovněž je žádoucí jemnozrná struktura, neboť hranice zrn jsou překážkou pro šíření únavové trhliny.

Únavovou životnost ovlivňuje také teplota. Zvýšení teploty má za následek pokles únavové životnosti, neboť se zmenšuje mez kluzu materiálu a tudíž se zvyšuje velikost cyklické plastické deformace.[4]

### *Vliv konstrukčního vrubu na únavový lom*

Náhlé změny průřezu strojních součástí vynucené funkčními a konstrukčními požadavky, jako např. drážky, otvory, zápichy, osazení, závity apod. se nazývají konstrukční vruby. Všechny konstrukční vruby způsobují, že napětí je v jejich blízkosti lokálně zvýšené a tedy se nazývají koncentrátory napětí. Důsledek lokálně zvýšeného napětí v těchto místech je vznik únavových trhlin.

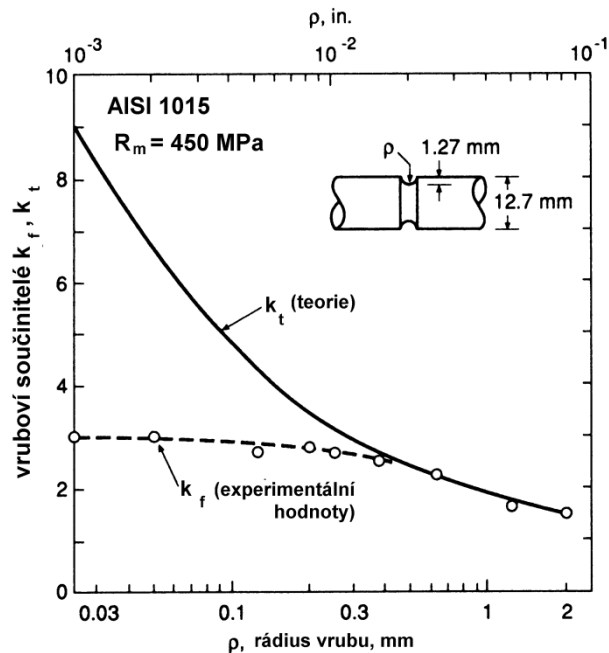
Hodnoty elastického faktoru koncentrace napětí  $k_t$  se používají k charakterizaci vrubů, kde  $k_t = \sigma / S$  je poměr lokálního (bodového) napětí  $\sigma$  k nominálnímu (střednímu) napětí  $S$ . Hodnoty  $k_t$  jsou dostupné v nejrůznějších učebnicích a příručkách. Nejznámějším katalogem hodnot  $k_t$  je katalog vytvořený Petersonem. Nominální napětí  $S$  může být dvojnásobné. Častější je výpočet  $S$  ve vztahu k čisté ploše (v místě vrubu), nebo  $S$  ve vztahu k ploše celkové (mimo vrub). Způsob určení  $S$  ovlivňuje hodnotu  $k_t$ . Při použití únavových  $S$ - $N$  křivek je konvence definovat  $S$  ve vztahu k čisté ploše, tj. ploše, z níž byl vrub odstraněn. Také, rovnice  $\sigma = k_t \times S$  platí ve vrubech pouze v případech, že nedochází k plastické deformaci.

V případě velice zjednodušeného pohledu můžeme očekávat, že hladká součást a součást s vrubem budou mít stejnou únavovou životnost, jestliže napětí  $\sigma = S$  v hladké součásti je stejné jako napětí  $\sigma = k_t \cdot S$  v součásti s vrubem. Proto v závislosti  $S$  versus počet cyklů do lomu  $N_f$ , vliv vrubu je možné stanovit vynásobením amplitudy pro libovolnou životnost faktorem  $k_f$ . Skutečný redukční faktor pro dlouhé intervaly únavového života, zvláště pro  $N_f = 10^6$  až  $10^7$  cyklů nebo větší, se jmenuje únavový vrubový faktor a označuje se jako  $k_f$  (1.1).

$$k_f = \frac{\sigma_{ar}}{S_{ar}} \quad (1.1)$$

kde  $k_f$  je formálně definováno pouze pro symetrický cyklus,  $\sigma_{ar}$  pro hladké zkušební těleso a  $S_{ar}$  pro tělesa s vrubem.

Má-li vrub v kořeni velký rádius  $\rho$ , pak  $k_f$  může být číselně rovno  $k_t$ . Naproti tomu pro malé  $\rho$  výše zmíněná diference může být významná a tedy  $k_f$  je výrazně menší než  $k_t$ . Některé hodnoty  $k_f$ , jež ilustrují vliv rádiusu  $\rho$  vrubu pro ocel o středním obsahu uhlíku, jsou uvedeny na obr. 1.10. Z důvodů složitosti tohoto problému se v konstrukčním návrhu zpravidla používá empirických odhadů k získání hodnoty  $k_f$ .



Obr. 1.10 – Závislost vrubových součinitelů  $k_f$ ,  $k_t$  na velikost rádiusu vrubu [10]

Jedním z úspěšných konceptů, který se zabývá vlivem vrubů je vrubová citlivost  $q$  (1.2)

$$q = \frac{k_f - 1}{k_t - 1} \quad (1.2)$$

Kde

$k_f$  – únavový vrubový faktor

$k_t$  - elastický faktor koncentrace napětí

V případě, že vrub má maximální možný vliv, to jest  $k_f = k_t$  pak  $q = 1$ . Hodnota  $q$  nabývá hodnot menších než 1, jestliže  $k_f < k_t$  a nabývá minimální hodnoty  $q = 0$  pro případ  $k_f = 1$ , to jest vrub nemá vliv. Hodnota  $q$  závisí jak na materiálu, tak i tvaru vrubu. Pro výpočet hodnoty  $k_f$  z hodnoty  $q$  se používá rovnice (1.3) ve tvaru

$$k_f = 1 + q(k_t - 1) \quad (1.3)$$

Kde

$k_t$  - elastický faktor koncentrace napětí

$q$  – vrubová citlivost

## **2 Druhy porušení za mechanického namáhání**

Mechanické vlastnosti materiálů vyjadřují schopnost materiálu odolávat mechanickému namáhání způsobujícímu deformaci zatěžovaných těles, a proto je mnoho mechanických charakteristik dáno hodnotami fyzikálních veličin napětí a deformace odpovídajícími určitému napět'ově – deformačnímu stavu vzorku daného materiálu.

Testování mechanických vlastností materiálů hraje nezastupitelnou roli při kontrole technologie výroby, při kontrole jakosti a při přejímkách polotovarů či výrobků a také při vývoji nových materiálů. Existuje celá řada materiálových zkoušek. Některé mají uplatnění obecně pro testování jak křehkých tak houževnatých materiálů (zkoušky tvrdosti, tahová zkouška) a jiné se používají jen ve speciálních případech. Tyto tzv. technologické zkoušky se využívají pro posouzení vhodnosti materiálu k určitému speciálnímu způsobu zpracování.

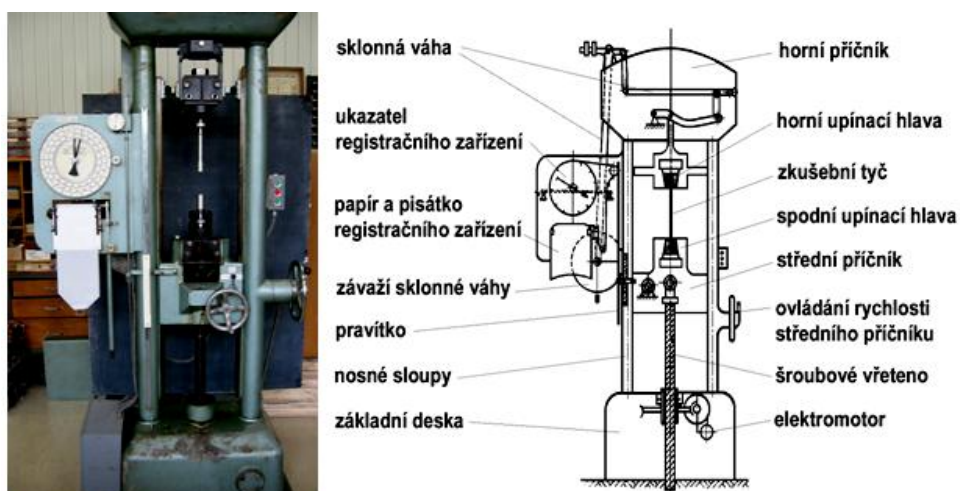
Základní mechanické vlastnosti vyjadřují obecné požadavky na kvalitu materiálu a jsou měřeny klasicky definovanými charakteristikami, které se určují na konvenčně definovaných vzorcích jednotných velikostí a tvarů

### **2.1 Mechanické zkoušky materiálu - statické**

Tyto zkoušky jsou základem mechanického zkoušení materiálu. Materiál zatěžujeme postupně bez rázu, a to buď jenom jednou, nebo zatěžování několikrát opakujeme. Základem těchto zkoušek jsou zkoušky pevností. Podle způsobu působení zatěžující síly dělíme tyto zkoušky na zkoušky pevnosti v tahu, tlaku, ohybu, krutu a stříhu. V této práci bude rozebrána zkouška v tahu, tlaku a ohybu. Zkoušky krutu a stříhu zde nebudou rozebrány, neboť se používají velice zřídka.

#### **2.1.1 Zkouška tahem**

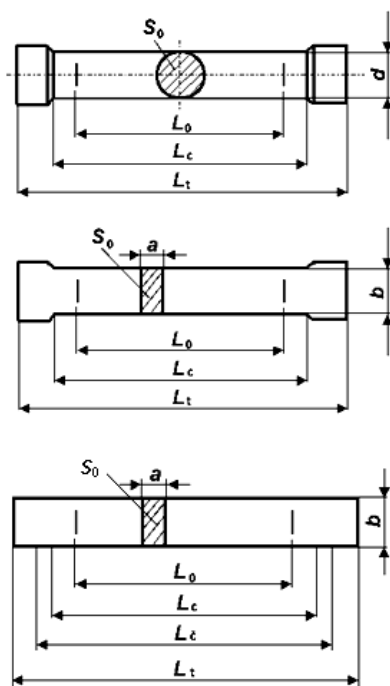
Zkouška tahem je zcela základní a nejběžněji prováděnou zkouškou mechanických vlastností u většiny konstrukčních materiálů. Zkouška spočívá v deformaci zkušební tyče pomocí zkušebního stroje (obr. 2.1) jednoosým tahovým zatížením obvykle do přetržení pro stanovení jedné nebo více napět'ových a deformačních charakteristik zavedených v normě. Obvykle se zkouší při okolní teplotě v rozmezí od 10 °C do 35 °C, pokud není stanoveno jinak. [8]



Obr. 2.1 – Mechanický zkušební stroj [11]

### Zkušební tyč

Tvary zkušebních tyčí jsou stanoveny normou. V zásadě se používají tyče kruhového průřezu nebo tyče ploché o určité zkoušené délce. Zkušební tyč je obvykle připravena obráběním vzorku odebraného z výrobku, i když vzorky o stálém příčném průřezu (profily, dráty, tyče) mohou být podrobeny zkoušce bez obrobení. Na obr. 2.2 jsou uvedeny základní charakteristické rozměry zkušebních tyčí.



#### Výklad použitých symbolů a označení:

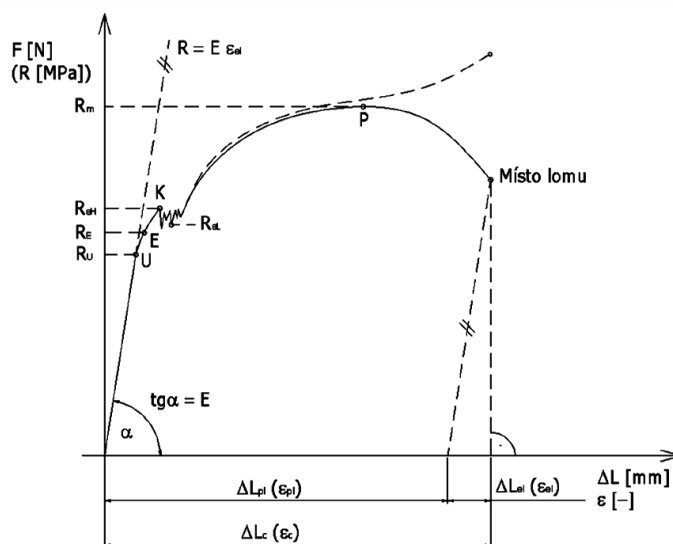
- $L_0$  [mm] počáteční měřená délka
- $L_c$  [mm] zkoušená délka
- $L_e$  [mm] vzdálenost mezi upínacími čelistmi zkušebního stroje
- $L_t$  [mm] celková délka zkušební tyče
- $S_0$  [mm<sup>2</sup>] počáteční plocha příčného průřezu zkušební tyče
- $d$  [mm] průměr zkoušené délky válcové zkušební tyče
- $a$  [mm] tloušťka ploché zkušební tyče
- $b$  [mm] šířka zkoušené délky ploché zkušební tyče

Obr. 2.2 – Charakteristické rozměry zkušebních tyčí [11]

### Smluvní diagram napětí (síla) – prodloužení

Nejprve je potřeba vysvětlit důležitou skutečnost. U zkoušky tahem se setkáváme s dvěma pojmy, a to skutečný pracovní diagram a smluvní pracovní diagram. Rozdíl mezi skutečným a smluvním je, že smluvní diagram vztahujeme k výchozímu průřezu  $S_0$ . Kdežto skutečný diagram vztahujeme k reálnému průřezu. Proto pro zjednodušení budeme používat smluvní pracovní diagram.

Smluvní diagram zkoušky znázorňuje průběh odporu zkoušeného materiálu proti jeho deformaci a porušení má proto, charakteristický tvar pro každý materiál. V průběhu zkoušky je zaznamenávána závislost velikosti působící zatížení na prodloužení tyče tzv. smluvní diagram (obr. 2.3), ve kterém je možno v klasickém případě obvyklé konstrukční oceli popsat následující pevnostní charakteristiky.[3]



Obr. 2.3 – Smluvní diagram zkoušky tahem [11]

Mez úměrnosti  $R_U$  – ihned po začátku působení zatížení vzrůstá síla v závislosti na deformaci v podstatě lineárně až do tzv. meze úměrnosti. Počátečný přímkový úsek přísluší pružné deformaci a vyjadřuje úměrnost napětí a deformace podle Hookova zákona (2.1).

$$R_U = E \times \varepsilon \quad (N \times m) \quad (2.1)$$

Kde

$E$  – modul pružnosti v tahu (Pa)

$\varepsilon$  – poměrné prodloužení (%)



Mez pružnosti  $R_E$  - Mez pružnosti se obvykle od meze úměrnosti příliš neliší. Při zvýšení zatížení nad mez pružnosti dochází po odstranění zatížení k tomu, že deformace nezmizí úplně, ale zůstává jistá trvalá (plastická) deformace.

Mez kluzu  $R_e$  - Mez kluzu se definuje buď jako napětí, při kterém zkoušený materiál začíná plasticky deformovat, nebo jako napětí, které způsobí trvalé prodloužení 0,2% měřené délky. Charakter přechodu mezi elastickou a plastickou deformací je dán typem materiálu

V některých případech se výrazná mez kluzu neobjeví. V těchto případech se určuje tzv. smluvní mez kluzu.

Smluvní mez v kluzu  $R_{p0,2}$  je napětí, které zapříčiní trvalé prodloužení s velikostí  $\Delta l = 0,2\%$  původní délky  $l_0$  zkušební vzorku. Určuje se podle vztahu (2.2)

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \quad (MPa) \quad (2.2)$$

Kde

$F_{p0,2}$  – síla na smluvní mezi kluzu (N)

$S_0$  – původní průřez zkušební vzorku ( $mm^2$ )

Mez pevnosti  $R_m$  – zvyšuje-li se zatížení dále nad mez kluzu, začne se tyč rovnoměrně po celé délce prodloužovat. Během zatěžování vzrůstá prodloužení rychleji než napětí, až křivka dosáhne svého maxima v bodě P. V tomto bodě je dosaženo největšího zatížení před přetržením zkušební tyče a na základě tohoto zatížení se stanovuje mez pevnosti v tahu (2.3).

$$R_m = \frac{F_{MAX}}{S_0} \quad \left( \frac{N}{mm^2} \right) \quad (2.3)$$

Kde

$F_{MAX}$  – maximální zatížení (N)

$S_0$  – původní průřez zkušební tyče ( $mm^2$ )

### 2.1.2 Zkouška tlakem

Zkouška tlakem má význam především u materiálů křehkých a polokřehkých (šedá litina, kompozice, stavební materiály, atd.) - u těchto materiálů dochází k porušení. V případě tvárných materiálů k porušení nedochází.

Zkušební vzorky mají válcovitý tvar (průměr  $d_0 = 20$  až  $30$  mm a výšku  $h = 20$  až  $30$  mm) a postupně se zatěžují až do rozdrčení anebo se stlačí na určitou hodnotu. Zaznamenávají se podobné pracovní diagramy jako při zkoušce tahem a zjišťují se stejné veličiny (viz. Kapitola 2.1.1 Zkouška tahem). Pevnost v tlaku se vypočítá podle následujícího vzorce (2.4). [5]

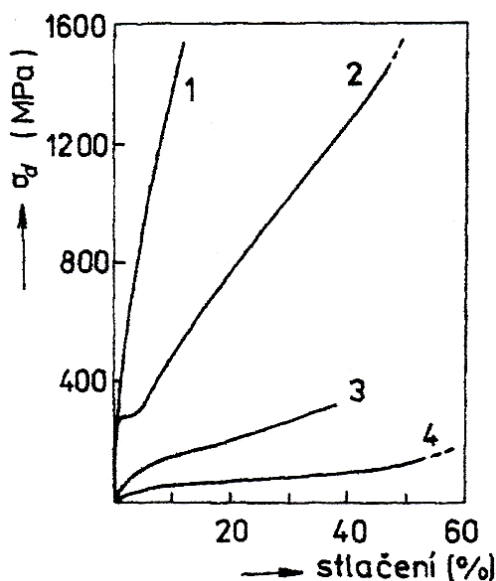
$$R_{mt} = \frac{F_{MAX}}{S_0} \quad (MPa) \quad (2.4)$$

Kde

$F_{MAX}$  – maximální zatížení (N)

$S_0$  – původní průřez zkušební tyče ( $mm^2$ )

Na příkladech smluvních diagramů zkoušky tlakem (obr. 2.4) můžeme vidět, že litina se poruší bez trvalé deformace (těleso se rozdrtí), kdežto u tvárných kovů se přetvoření zkušební tělesa trvale zvětšuje a k porušení vůbec nedojde

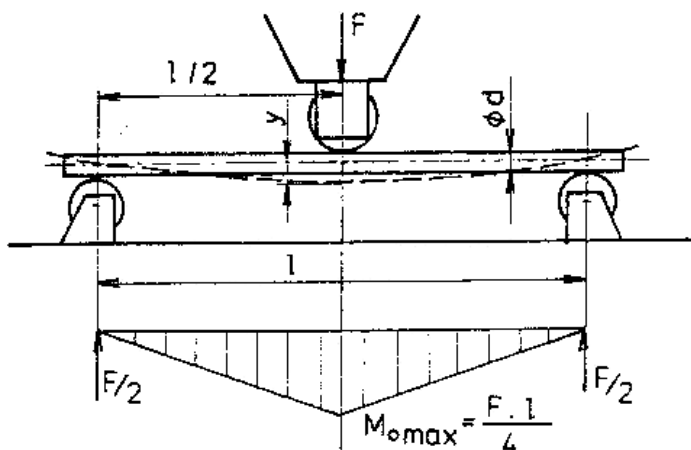


Obr. 2.4 – Příklady smluvních diagramů zkoušky tlakem: 1 – šedá litina, 2 – měkká ocel, 3 – zinek, 4 – olovo [3]

### 2.1.3 Zkouška ohybem

Zkouška ohybem má význam pro zkoušení křehkých materiálů, u kterých se dá z průhybu určit deformační schopnost. Hodí se pro zkoušky šedé litiny, pro ocele se prakticky nepoužívá.

Ohybem se obvykle zkouší zkušební tyč kruhového, čtvercového nebo obdélníkového průřezu, na obou koncích podepřena na válečkových podporách, aby bylo možné volné posouvání při průhybu, uprostřed zatížená silou (obr. 2.5). [3]



Obr. 2.5 – Schematické znázornění zkoušky ohybem [3]

Cílem zkoušky je zjistit maximální pevnost v ohybu  $R_{mo}$  která je dána vztahem (2.5).

$$R_{mo} = \frac{M_{oMAX}}{W_o} \quad (MPa) \quad (2.5)$$

Kde

$M_{oMAX}$  – maximální moment v ohybu ( $N \times mm$ )

$W_o$  – průřezový modul v ohybu ( $mm^3$ )

Ohybovou zkouškou se dá určit modul pružnosti  $E$  i u křehkých materiálů, musí však být dodržena podmínka, že naměřený průhyb je výhradně pružný.

## 2.2 Zkoušky tvrdosti

Tvrdot je definovaná jako odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa. Měřítkem tvrdosti je konkrétní velikost trvalé plastické deformace. Hlavní předností zkoušek tvrdosti je jejich poměrná jednoduchost, opakovatelnost a dále také skutečnost, že v mnoha případech není pro měření tvrdosti nutné zhotovovat zvláštní zkušební tělesa a měření lze realizovat buď přímo na výrobku a jeho polotovarech, nebo na zkušebních tělesech vyrobených a určených pro jiné druhy mechanických zkoušek.

Zkoušky tvrdosti lze rozdělovat podle různých hledisek: Podle principu rozlišujeme zkoušky vrypové, vnikací, nárazové a odrazové, podle rychlosti působení zatěžující síly dělíme zkoušky tvrdosti na statické a dynamické, rozeznáváme zkoušky makro i mikrotvrdosti. Nejčastějšími metodami měření tvrdosti jsou statické metody podle Brinella, Rockwella a Vickerse. [3,8]

### 2.2.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Zkouška podle Brinella se řadí ke zkouškám vnikacím. Podle použitého zařízení může být statická nebo dynamická. Zkušebním tělískem je ocelová kalená kulička průměru  $D$  vtlačovaná do zkoušeného předmětu silou  $F$ . Po odlehčení kuličky zůstane ve zkoušeném předmětu vtisku průměru  $d$  s hloubky  $h$  (obr. 2.6). Velikost tvrdosti podle Brinella se potom vypočte jako podíl zátěžné síly a povrchu kulového vrchlíku vtisku v materiálu po odlehčení (2.6).

$$HB = 0,102 \times \frac{F}{A} \quad (2.6)$$

Plocha vtisku  $A$ :

$$A = \frac{\pi \times D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

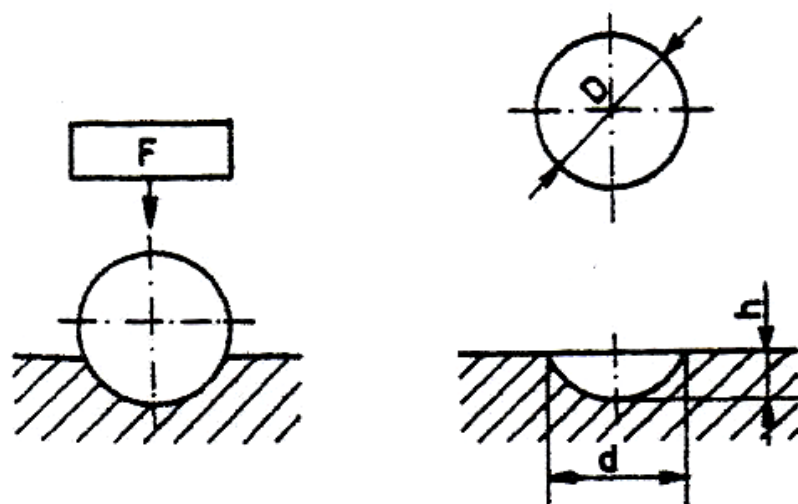
Kde

$F$  – zatěžující síla (N)

$A$  – plocha vtisku ( $\text{mm}^2$ )

$D$  – průměr kuličky (mm)

$d$  – průměr vtisku (mm)



Obr. 2.6 – Schéma zkoušky tvrdosti podle Brinella

Ačkoli je tvrdost podílem síly a plochy, nemá tvrdost jednotky napětí, ale jedná se o porovnávací číslo, protože vzhledem k charakteru vtisku není napětí po ploše vtisku rozmístěno rovnoměrně, a výpočet tvrdosti tak nemá reálný fyzikální podklad. V běžné praxi se velikost tvrdosti nepočítá, ale stanovuje se z tabulek sestavených pro normované zatížení  $F$ , průměry kuliček  $D$  a změřené průměry vtisku  $d$ . [3]

### 2.2.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

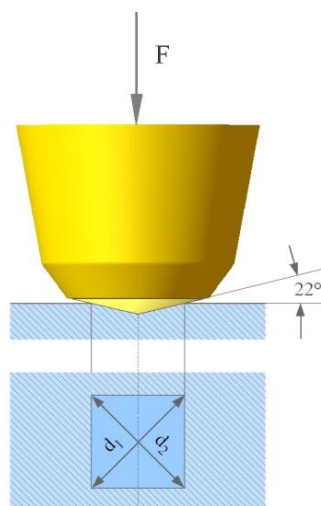
Při zkoušce tvrdosti podle Vickerse je zkušebním tělískem čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu  $136^\circ$  (obr. 2.7). Jehlan, je vtlačován do zkoušeného předmětu silou  $F$ . K určení tvrdosti se měří po odlehčení úhlopříčka vtisku. Délka úhlopříčky vtisku se měří mikroskopicky s přesností  $\pm 1\%$ . Měří se délky obou úhlopříček a pro vyhodnocení se bere aritmetický průměr. Rozdíl v délce obou úhlopříček by neměl přesáhnout  $5\%$  naměřené hodnoty. Z daného zatížení  $F$  a změřené úhlopříčky vtisku se vypočítá tvrdost (2.7).

$$HV = 0,189 \times \frac{F}{d^2} \quad (2.7)$$

Kde:

$F$  – zatěžující síla (N)

$d$  – Aritmetický průměr délky úhlopříček vtisku (mm)



Obr. 2.7 – Schéma zkoušky tvrdosti podle Vickerse [12]

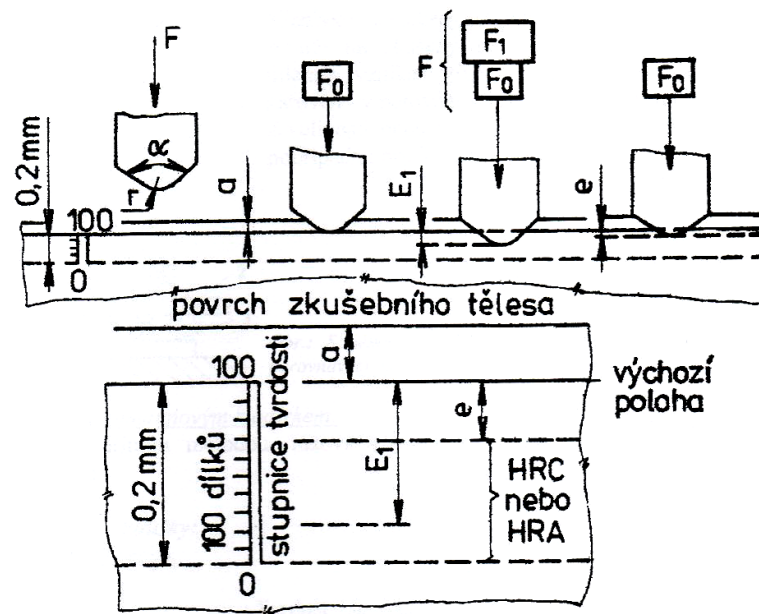
Při měření tvrdosti může být výsledek ovlivněný chybami způsobenými jednak vlastnostmi zkoušeného předmětu, jednak samotným zařízením. Jako u všech vnikacích metod, objevují se rozdíly ve vtisku u materiálu nezpevněného a materiálu zpevněného. U nezpevněných materiálů jsou strany obrazu následkem odpružení vyduté a u zpevněných naopak, vypuklé. [3,8]

### 2.2.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Rockwellova zkouška je také zkouškou vnikací, podklad pro určení tvrdosti je zde hloubka vtisku. Tato zkouška dovoluje měřit tvrdost v širším rozsahu. Pro tvrdší materiály se používá diamantový kužel o vrcholovém úhlu  $120^\circ$  s poloměrem zaoblení hrotu 0,2 mm. Pro měkčí materiál se používá ocelová kalená kulička. [3,8]

*Postup měření (obr. 2.8)*

- 1 – Vnikací těleso se nejprve zatíží základním předběžným zatížením  $F_0$ . Stupnice hloubkoměru se nastaví v zatíženém stavu do počáteční polohy
- 2 – Poté se uplatní přídatné zatížení  $F_1$
- 3 – Po odlehčení na zatížení  $F_0$  se na hloubkoměru odečte přímo tvrdost v příslušné stupnici. Tvrdost je dána hloubkou vtisku  $E_1$ , které se dosáhlo aplikací plného zatížení, měřenou od hloubky odpovídající předběžnému zatížení a zmenšenou o zpětnou pružnou deformaci.



Obr. 2.8 – Schéma postupu měření tvrdosti podle Rockwella

Podle vnikacího tělesa a velikosti zatížení jsou jednotlivé stupnice tvrdosti podle Rockwella označeny:

Tabulka 1 – Stupnice tvrdosti podle Rockwella

Symbol tvrdosti	Předběžné zatížení [Kg]	Přídavné zatížení [Kg]	Celkové zatížení [Kg]	Použití
HRA	10	50	60	tenké vrstvy a křehké materiály
HRB	10	90	100	měkké materiály
HRC	10	140	150	tvrdé materiály

### 2.3 Nedeštruktivní zkoušky materiálu

Nedeštruktivní zkoušení materiálu zahrnuje metody používané pro zkoušení určitého produktu nebo materiálu, aniž by se narušila jejich budoucí použitelnost nebo ovlivnila schopnost plnit předpokládanou funkci. Nedeštruktivní zkoušky jsou v hojné míře používány proto, aby odhalovaly výkyvy ve struktuře, drobné změny v jakosti povrchu, přítomnost trhlin, nebo jiných fyzikálních nesouvislostí. Mezi nejběžnější nedeštruktivní zkoušky, které se využívají v praxi, jsou rentgenografická, ultrazvuková, elektromagnetická a kapilární.

### 2.3.1 Zkouška rentgenovým zářením

Rentgenové záření je elektromagnetické vlnění s vlnovou délkou  $10^{-9}$  až  $100^{-12}$  m. Zkouška je založena na schopnosti krátkovlnného záření prostupovat materiálem, na jeho zeslabení absorpcí v materiálu a na jeho působení na citlivou vrstvu fotografického filmu. Zeslabení intenzity záření záleží na hustotě zkoušeného předmětu a na jeho tloušťce. Je-li v předmětu vnitřní vada je v tomto místě skutečná tloušťka kovu menší o rozměr vady ve směru záření. Hustota materiálu v místě vady je také menší, a proto je intenzita záření v místě vady zeslabována méně než v jejím okolí. Na film umístěný na opačné straně předmětu dopadne v místě vady záření o větší intenzitě. Vada se tedy ukáže na vyvolaném snímku jako tmavá vrstva na světlejším pozadí. [9]

Rentgenové záření má tyto charakteristické vlastnosti a účinky:

- Šíří se přímočaře a nevychyluje se v magnetickém poli
- Proniká pevnými i neprůhlednými látkami, za současného poklesu intenzity
- ionizuje vzduch, vyvolává zčernání fotografické desky, vyvolává fluorescenci
- působí na živé organismy a podle dávky je buď prospěšné, nebo škodlivé

Zkouška rentgenovým zářením se využívá pro:

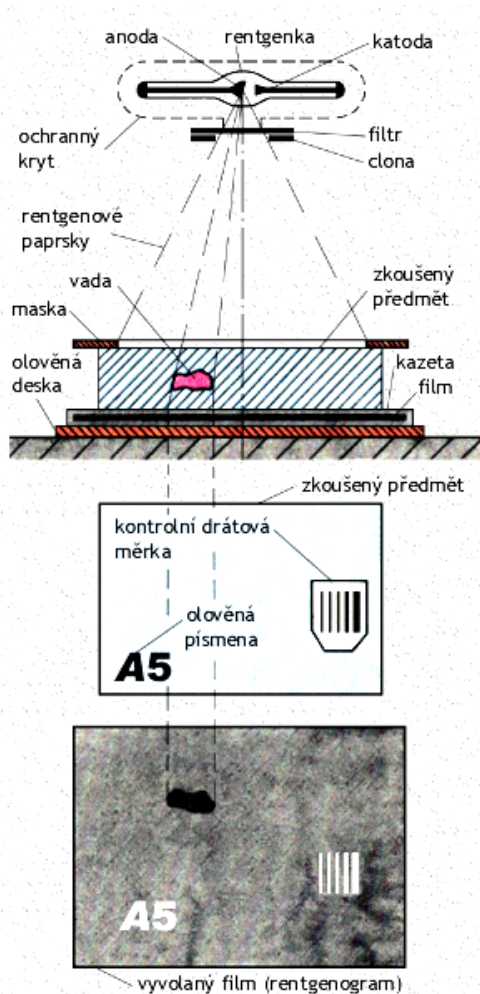
- zkoušení makrostruktury, kde se využívá zeslabené záření při průchodu materiálem
- zkoušení makrostruktury, kde se využívá vlnového charakteru záření a jeho interakce s atomy prostorové mřížky
- zkoušení chemického složení materiálu, založena na charakteristickém rentgenovém záření, které je pro každý prvek jiný

*Základní princip zkoušky (obr 2.9)*

Rentgenový zařízení vysílá svazek paprsků přes filtr a clonu na zkoušený předmět. Za zkoušeným předmětem je kazeta s filmem. Aby bylo možno vadu zjištěnou na snímku najít také na zkoušeném předmětu, používáme olověných písmen nebo značek. Jejich poloha se na předmětu trvale označí a na snímku je lze velmi dobře přečíst, neboť jsou proti ostatnímu obrazu velmi světlé. Kromě toho na stranu předmětu přivrácenou ke zdroji záření přikládáme



měrku s různě odstupňovanými průměry k určení dosažené rozeznatelnosti vad. Dosaženou rozeznatelnost udáváme v procentech prozařované tloušťky a bývá od 1 do 2%. [9]



Obr. 2.9 – Základní princip zkoušky rentgenovým zářením [9]

### 2.3.2 Zkouška ultrazvukem

Ultrazvuk je pružné vlnění hmotných částic o kmitočtu vyšším než 16 kHz. Zkoušky se dají realizovat rychle a lze je použít i pro materiál až několik metrů silný. Při těchto zkouškách používáme impulsní defektoskopy. Tyto defektoskopy mají buď jednu sondu, nebo dvě sondy.

Důležitou veličinou při zkouškách ultrazvukem je vlnová délka  $\lambda$  (2.8). Její velikost má vliv na citlivost metody. Když je  $\lambda$  větší jak příčný rozměr vady, vznikne ohyb ultrazvukových vln a chyba se nezjistí. Při zkoušce se zjistí jenom ty vady, u kterých je příčný rozměr větší nebo rovný jako vlnová délka  $\lambda$ .

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{m}) \quad (2.8)$$

Kde

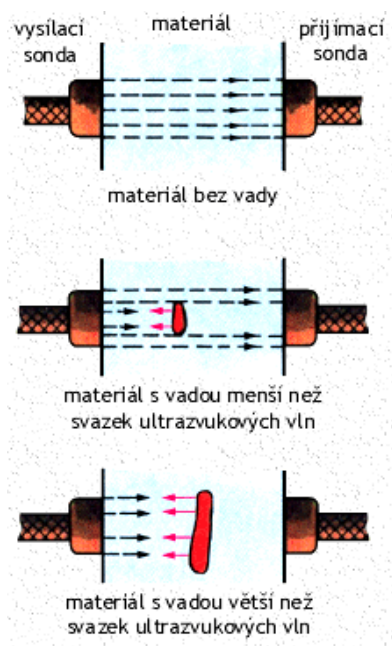
c – rychlost šíření vzduchu (m/s)

f – frekvence (Hz)

V praxi se používají dvě základní metody a to průchodová a odrazová metoda.

#### *Průchodová metoda*

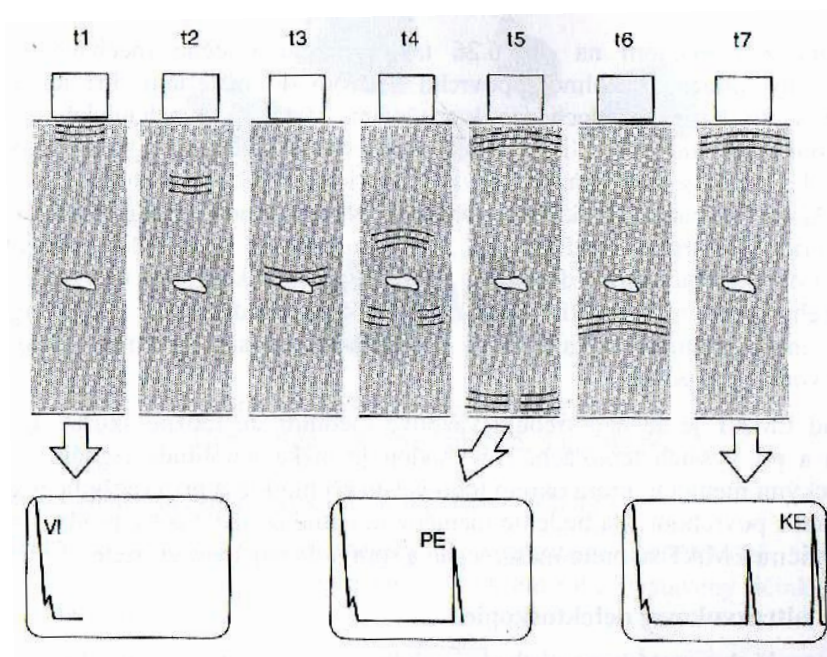
Tato metoda vyžaduje dvě sondy umístěné proti sobě tak, že jedna vysílá ultrazvukové vlnění a druhá přijímá jeho část prošlou materiálem (obr. 2.10). Je-li v materiálu vada, na její ploše se odráží ultrazvukové vlny, takže za vadou vzniká ultrazvukový stín. Citlivost metody je závislá od nastavení souososti sond, velikosti sond, přitlačné síly na povrch zkoušeného materiálu a jakosti povrchu. Je zřejmé, že použití této metody je omezené na součástky s vhodnými protilehlými povrchy. Další nevýhodou je nutnost přístupu k předmětu z obou stran. Velkou výhodou průchodové metody je fakt, že ultrazvuk prochází v porovnání s odrazovou metodou poloviční dráhu a tedy se méně zeslabuje. Proto tato metoda je vhodná při zkouškách těžko prozvučitelných materiálů, jako je např. guma.



Obr. 2.10 – Průchodová metoda zkoušky ultrazvukem [9]

### Odrazová metoda

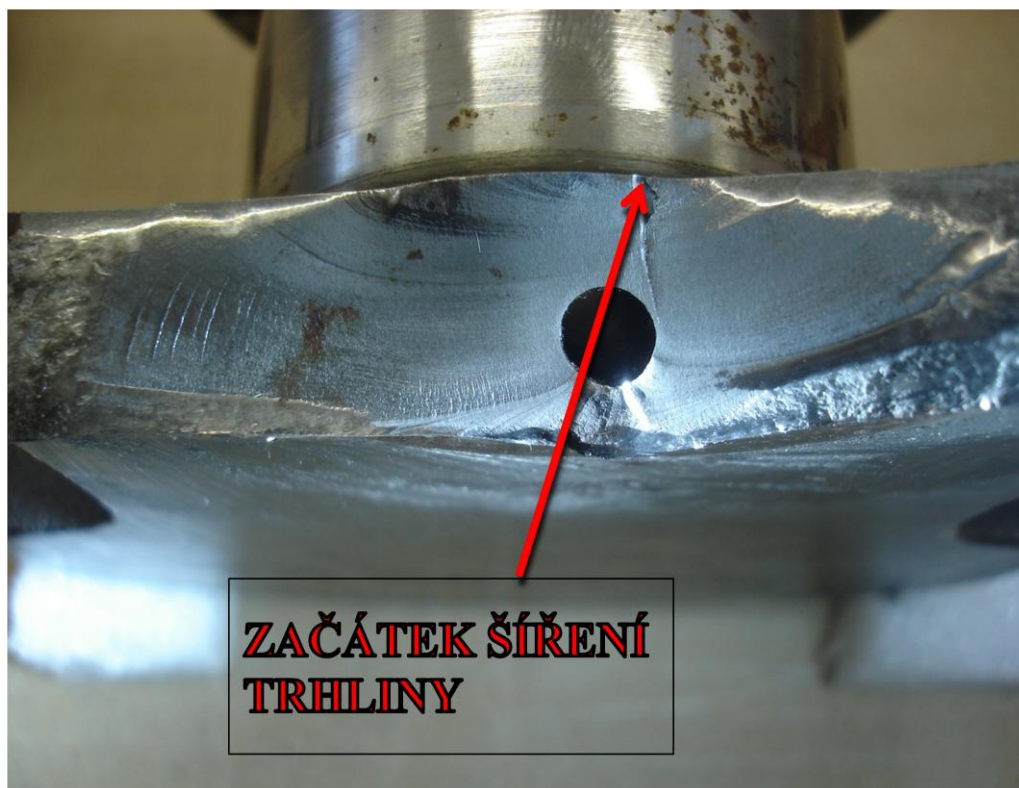
Odrazová metoda je založena na zjišťování odrazů -ech způsobených chybami materiálu (obr. 2.11). Z doby příchodu echa po vyslání ultrazvukového impulzu se určuje vzdálenost k vadě a z velikosti amplitudy echa se určuje velikost vady. Odrazová metoda je citlivější než metoda průchodová. Nevýhodou však je, že se nedají zjistit chyby, které leží v blízkosti přiložení sondy. Tzv. mrtvé pásmo sahá do hloubky 5 až 10 mm. Zlepšení zjistitelnosti vad v blízkosti zkoušeného povrchu se dá dosáhnout pomocí dvojité sondy, kde teoreticky nezjistí mrtvé pásmo zapříčiněné vysílacím impulsem. Odrazová metoda je vhodná na velké výkovky a odlitky.



Obr. 2.11 – Odrazová metoda zkoušky ultrazvukem [7]

### 3 Rozbor poškozené součásti

Hlavním úkolem bylo zjistit příčinu vzniku lomu klikové hřídele osobního automobilu. Po prvním vizuálním přezkoumání byl určen prvotní vznik šíření trhliny v místě, kde hlavní čep hřídele přechází v rameno kliky (obr. 3.1). Abychom zjistili příčinu vzniku lomu, bylo potřeba podrobit součást analýze.

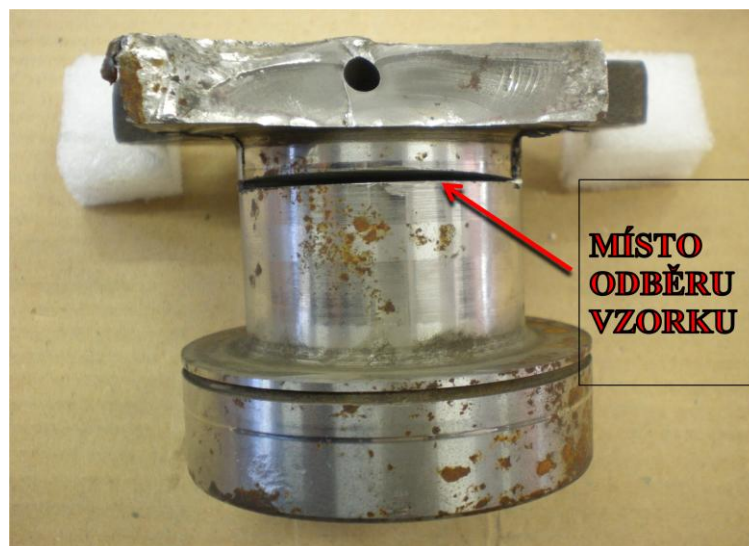


Obr. 3.1 – Začátek šíření trhliny

#### 3.1 Příprava vzorku k rozboru

Abychom mohli pozorovat materiál pod mikroskopem a provést zkoušku tvrdosti, bylo třeba odebrat vhodný vzorek z poškozené součásti.

1) Odběr vzorku – vzorek bylo třeba odebrat tak, aby nebyla porušena základní struktura vzorku, vlivem teploty nebo plastické deformace. Hrubé oddělení zkoumaného vzorku bylo provedeno úhlovou bruskou (obr. 3.2). Dále bylo potřeba rozřezat již odebraný kus klikové hřídele na požadovaný rozměr vzorku pomocí metalografické pily MIKRON 110.



Obr. 3.2 – Oddělení vzorku úhlovou bruskou

2) Broušení, leštění – broušení bylo prováděno na automatické brusce Buehler (obr. 3.3). Jako chladicí kapalina byla použita voda. Cílem broušení bylo dosáhnout minimální povrchové nerovnosti vzorku. Nejprve bylo nutno brousit vzorek brusným papírem s větší zrnitostí a postupně jeho zrnitost snižovat až byl dosažen hladký povrch vzorku. Při přecházení z hrubšího na jemnější brusný papír bylo zapotřebí vzorek opláchnout, aby se zrna s předcházejícího papíru nevnese na papír jemnější. Na jemnější brusný papír bylo možno přejít, až když byly odstraněny rýhy z předešlého broušení.



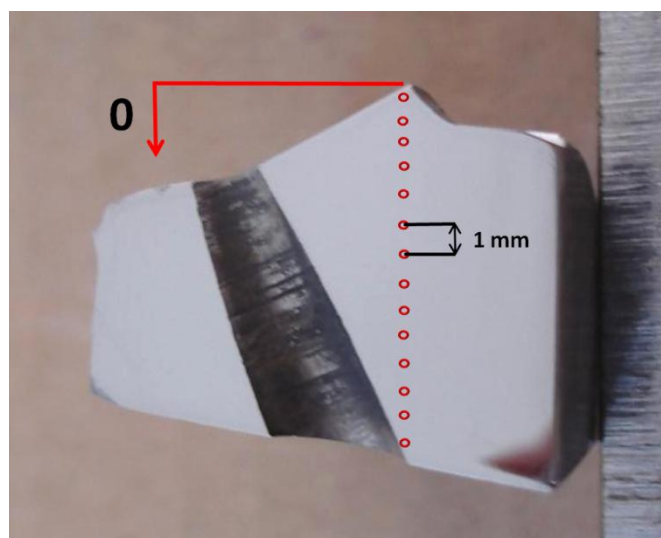
Obr. 3.3 – Automatická bruska Buehler

Další fáze přípravy vzorku bylo leštění. Leštění bylo prováděno pomocí leštících kotoučů, na které se nanášela diamantová pasta. Jakmile zmizely rýhy vzniklé při posledním broušení, bylo leštění ukončeno.

Závěrečnou fází přípravy vzorku bylo leptání. Smyslem leptání bylo zviditelnění struktury materiálu. Vzorek se ponořil do leptadla (5% Nital) a po několika vteřinách byl opláchnut ethanolem. Takto byl vzorek již připraven k pozorování pod mikroskopem a mohl být podroben zkoušce tvrdosti.

### 3.2 Měření mikrotvrdosti

Měření mikrotvrdosti bylo prováděno dle metody Vickers (Kapitola 2.2.2). Měřicí jehlan byl umístěn na okraj měřeného materiálu a po 1mm postupováno na protější stranu vzorku (obr 3.4). Jehlan byl zatěžován silou  $0.5 Kp = 0,5kg$  po dobu 15 sekund. Celkem bylo provedeno 16 měřících vtisků.

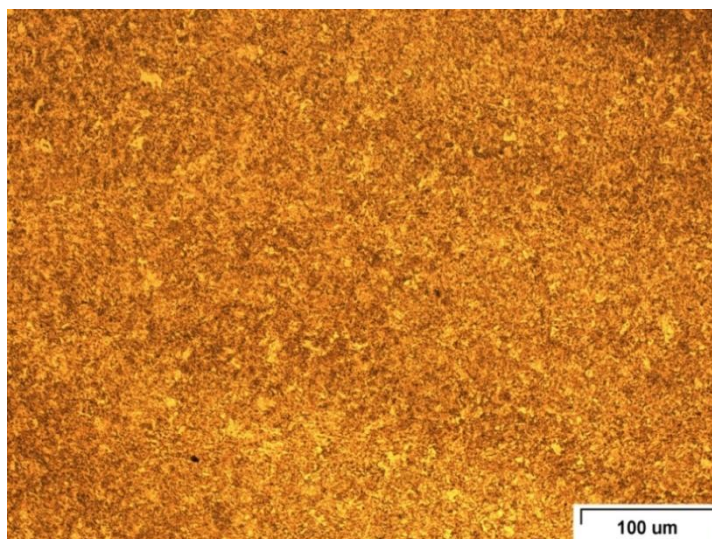


Obr 3.4 – Směr měření mikrotvrdosti na vzorku klikové hřídele

## 4 Výsledky měření

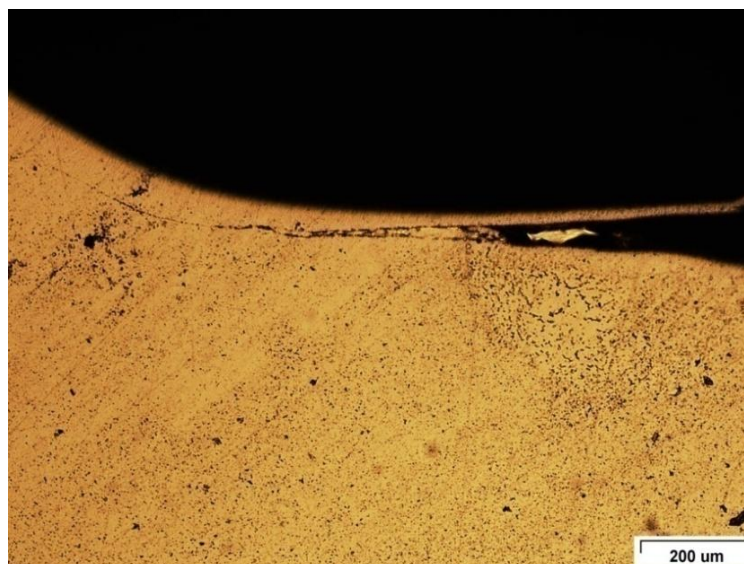
### 4.1 Vyhodnocení metalografie

Na obr. 4.1 struktury vzorku, nebyly vidět žádné vady, které by mohly mít význam pro vznik praskliny. Struktura vykazovala velmi jemný perlit – bainit, bez změn ve struktuře zkoumaného vzorku. Struktura se nelišila v žádné části vzorku.



Obr. 4.1 – Mikroskopická struktura materiálu zkoumaného vzorku

Na obr. 4.2 je vidět trhlina na měřeném vzorku. Jedná se o únavovou trhlinu, která vznikla při růstu hlavní únavové trhliny, a tudíž s největší pravděpodobností neměla vliv na iniciaci lomu.



Obr. 4.2 – Únavová trhlina na zkoumaném vzorku

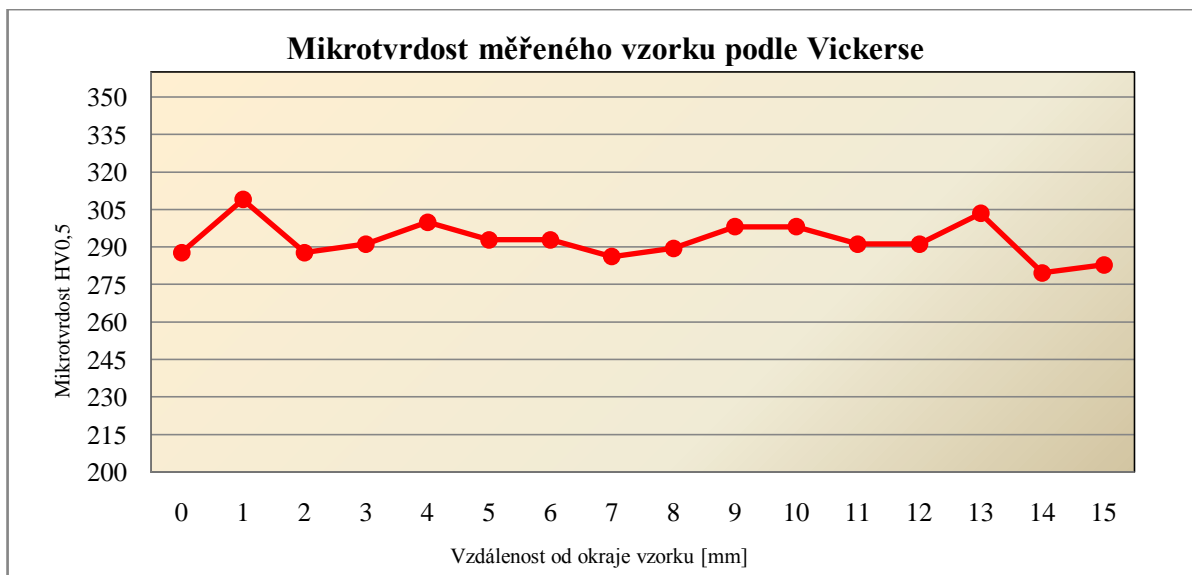
## 4.2 Vyhodnocení mikrotvrlosti

Cílem měření mikrotvrlosti bylo zjistit, zda tvrdost se mění na povrchu vzorku. Pokud by se tvrdost měnila, může to mít vliv na vznik lomu.

Z grafu mikrotvrlosti měřeného vzorku (Obr. 4.3) bylo patrné, že tvrdost nevykazuje žádné velké rozptyly, které by měly vliv na iniciaci lomu. Mírné rozdíly ve výsledcích měření mikrotvrlosti mohly být způsobeny chybami v měření.

Tabulka 2 – Naměřené hodnoty mikrotvrlosti

Vzdálenost od okraje vzorku	Úhlopříčka 1 [-]	Úhlopříčka 2 [-]	Průměr úhlopříček [mm]	Mikrotvrdot HV 0,5
0	175	169	0,05676	287,74
1	164	168	0,05478	308,91
2	175	169	0,05676	287,74
3	172	170	0,05643	291,11
4	168	169	0,055605	299,81
5	170	171	0,056265	292,82
6	171	170	0,056265	292,82
7	173	172	0,056925	286,07
8	171	172	0,056595	289,42
9	169	169	0,05577	298,04
10	168	170	0,05577	298,04
11	170	172	0,05643	291,11
12	171	171	0,05643	291,11
13	166	169	0,055275	303,4
14	175	174	0,057585	279,55
15	172	175	0,057255	282,78



Obr. 4.3 – Graf měření mikrotvrlosti



### 4.3. Zhodnocení analýz

Zkoumaný vzorek byl podroben analýze pomocí optické mikroskopie a zkoušce mikrotvrdoti podle Vickerse.

Z výsledku měření pomocí optické mikroskopie bylo zjištěno, že materiál vzorku je homogenní a nevykazoval žádné strukturní vady. Materiál měl strukturu jemně perliticko – bainitickou bez viditelných nepravidelností. Z této analýzy se můžeme domnívat, že struktura materiálu nebyla s největší pravděpodobností příčinou lomu materiálu.

Dále byla provedena zkouška mikrotvrdoti na měřeném vzorku. Hodnoty mikrotvrdoti HV<sub>0,5</sub> se pohybovaly v rozmezích od minimální hodnoty 279,55 HV<sub>0,5</sub> do maximální 308,91 HV<sub>0,5</sub>. Naměřené hodnoty nevykazovaly tak velké odchylky, aby se z nich dalo usuzovat, že mohou mít vliv na vznik lomu.

Výše uvedenými analýzami nebyl zjištěn důvod ke vzniku lomu materiálu. Proto je možno se domnívat, že na iniciaci lomu měly vliv vruby na rameni kliky, které byly zjištěny po vizuální kontrole viz. obr. 4.4.



Obr. 4.4 - Vruby na rameni kliky

## 5 Závěr

Tato bakalářská práce má za úkol v první části podat přehled o příčinách porušování součástí. Jsou zde rozebírány druhy poruch krystalové mřížky a příčiny, které vedou k lomu materiálu.

V druhé části této práce jsou rozebírány zkoušky materiálů. Jsou zde popsány mechanické zkoušky statické především zkouška tahem a zkoušky tvrdosti. Dále také nedestruktivní zkoušky materiálu, které jsou v hojné míře používány v praxi.

Poslední a hlavní částí práce je samotná analýza klikové hřídele. Z klikové hřídele byl odebrán vzorek, který byl podroben mikroskopické metalografické analýze a zkoušce mikrotvrdosti.

Při analýze vzorku nebyly zjištěny žádné strukturní vady. Také homogenita materiálu nevykazovala viditelné odlišnosti. Měření mikrotvrdosti nebyly prokázány velké odchylky.

Po důkladné vizuální kontrole bylo zjištěno, že k lomu došlo na místě, kde byl vytvořen technologický vrub, který nebyl dostatečně odstraněn. Tudíž s největší pravděpodobností tento vrub měl vliv na iniciaci lomu. Pokud by se závada opakovala, je potřeba tento vrub technologicky odstranit například broušením.

## Seznam použitých zdrojů:

- [1] PÍŠEK, F.; JENÍČEK, L.; RYŠ, P. *Nauka o materiálu I2 - Vlastnosti kovů*. 2nd ed. ACADEMIA, 1968. 1002 p. ISBN 21-015-68.
- [2] MACHEK, V.; SODOMKA, J. *Nauka o materiálu - Kovy a kovové materiály 2.část*. 1st ed. Praha : ČVUT, 2002. 213 p. ISBN 80-01-02568-3.
- [3] PUŠKÁR, A.; TILL, B. *Skúšanie kovových materiálov*. 1st ed. Bratislava : Alfa, 1971. 284 p. ISBN 302-17-02.
- [4] VOJTĚCH, D.: *Kovové materiály*. 1. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-600-1
- [5] SKOČOVSKÝ, P a kol.. *Náuka o materiáli*. 1st ed. Bratislava : Alfa, 1992. 208 p. ISBN 80-05-01018-4.
- [6] PÍŠEK, F.; JENÍČEK, L.; RYŠ, P. *Nauka o materiálu II - nauka o kovech*. 2nd ed. Praha : ACADEMIA, 1966. 634 p. ISBN 21-081-66.
- [7] KOPEC, B a kol.. *Nedetraktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. 1st ed. Brno : CERM, 2008. 571 p. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [8] FIALA, J.; MENTL, V.; ŠUTTA, P. *Struktura a vlastnosti materiálů*. 1st ed. Praha : ACADEMIA, 2003. 572 p. ISBN 80-200-1223-0.
- [9] *Strojírenská technologie - nauka o materiálu*. [online]. [cit. 2009-05-15]. Dostupné na WWW: <http://mujweb.atlas.cz/www/pk80/pub/st/menu1.htm>
- [10] DOWLING, N. *Mechanical behaviour of materials*. 3rd ed. 2006. ISBN 0131863126.
- [11] MOLLIKOVÁ, E. *ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ A VÝROBKŮ* [online]. [cit. 2009-05-20]. Dostupné z www: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/Index.html>>
- [12] *Zkouška tvrdosti podle Vickerse*. [online]. [cit. 2009-05-20]. Dostupné z www: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Zkou%C5%A1ka\\_tvrdosti\\_podle\\_Vickerse](http://cs.wikipedia.org/wiki/Zkou%C5%A1ka_tvrdosti_podle_Vickerse)>

## Seznam obrázků

OBR. 1.1 – DRUHY ELEMENTÁRNÍCH BUNĚK [4] .....	- 8 -
OBR. 1.2 – KRYSTALICKÁ MŘÍŽKA KUBICKÁ PROSTOROVĚ CENTROVANÁ [4].....	- 9 -
OBR. 1.3 – KRYSTALICKÁ MŘÍŽKA KUBICKÁ PLOŠNĚ CENTROVANÁ [4] .....	- 10 -
OBR. 1.4 - DRUHY BODOVÝCH PORUCH: A – VAKANCE, B – INTERSTICIÁL, C – INTERSTICIÁL PŘÍMĚSI, D – SUBSTITUCE [4] .....	- 11 -
OBR. 1.5 – HRANOVÁ, ŠROUBOVÁ A SMÍŠENÁ DISLOKACE [4] .....	- 12 -
OBR. 1.6 – ROZLOŽENÍ NAPĚTÍ V MATERIÁLU: VLEVO – BEZ DEFEKTU, VPRAVO – S DEFEKTEM [4] .....	- 14 -
OBR. 1.7 - NAPJATOST V OBLASTI KRČKU TYČE PŘI BĚŽNÉM TAHU [2] .....	- 15 -
OBR. 1.8 – PŘÍKLAD DUTINY V PRŮŘEZU KRČKU MĚDĚNÉ TYČE [2].....	- 16 -
OBR. 1.9 – ÚNAVOVÝ LOM [7].....	- 17 -
OBR. 1.10 – ZÁVISLOST VRUBOVÝCH SOUČINITELŮ $K_F$ , $K_T$ NA VELIKOST RÁDIUSU VRUBU [10]....	- 19 -
OBR. 2.1 – MECHANICKÝ ZKUŠEBNÍ STROJ [11] .....	- 21 -
OBR. 2.2 – CHARAKTERISTICKÉ ROZMĚRY ZKUŠEBNÍCH TYČÍ [11].....	- 21 -
OBR. 2.3 – SMLUVNÍ DIAGRAM ZKOUŠKY TAHEM [11] .....	- 22 -
OBR. 2.4 – PŘÍKLADY SMLUVNÍCH DIAGRAMŮ ZKOUŠKY TLAKEM: 1 – ŠEDÁ LITINA, 2 – MĚKKÁ OCEL, 3 – ZINEK, 4 – OLOVO [3].....	- 24 -
OBR. 2.5 – SCHEMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ZKOUŠKY OHYBEM [3].....	- 25 -
OBR. 2.6 – SCHÉMA ZKOUŠKY TVRDOSTI PODLE BRINELLA.....	- 27 -
OBR. 2.7 – SCHÉMA ZKOUŠKY TVRDOSTI PODLE VICKERSE [12] .....	- 28 -
OBR. 2.8 – SCHÉMA POSTUPU MĚŘENÍ TVRDOSTI PODLE ROCKWELLA.....	- 29 -
OBR. 2.9 – ZÁKLADNÍ PRINCIP ZKOUŠKY RENTGENOVÝM ZÁŘENÍM [9] .....	- 31 -
OBR. 2.10 – PRŮCHODOVÁ METODA ZKOUŠKY ULTRAZVUKEM [9].....	- 32 -
OBR. 2.11 – ODRAZOVÁ METODA ZKOUŠKY ULTRAZVUKEM [7].....	- 33 -
OBR. 3.1 – ZAČÁTEK ŠÍŘENÍ TRHLINY.....	- 34 -
OBR. 3.2 – ODDĚLENÍ VZORKU ÚHLOVOU BRUSKOU.....	- 35 -
OBR. 3.3 – AUTOMATICKÁ BRUSKA BUEHLER .....	- 35 -
OBR. 3.4 – SMĚR MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI NA VZORKU KLIKOVÉ HŘÍDELE .....	- 36 -
OBR. 4.1 – MIKROSKOPICKÁ STRUKTURA MATERIÁLU ZKOUMANÉHO VZORKU .....	- 37 -
OBR. 4.2 – ÚNAVOVÁ TRHLINA NA ZKOUMANÉM VZORKU .....	- 37 -
OBR. 4.3 – GRAF MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI.....	- 38 -
OBR. 4.4 - VRUBY NA RAMENI KLIKY .....	- 39 -

## **Seznam tabulek**

TABULKA 1 – STUPNICE TVRDOSTI PODLE ROCKWELLA.....	- 29 -
TABULKA 2 – NAMĚŘENÉ HODNOTY MIKROTVRDOSTI.....	- 38 -