

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Analýza lomového porušení ozubeného kola
Jiří Šeps

Bakalářská práce

2017

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Jiří Šeps
Osobní číslo: D15344
Studijní program: B3709 Dopravní technologie a spoje
Studijní obor: Dopravní prostředky: Silniční vozidla
Název tématu: Analýza lomového porušení ozubeného kola
Zadávající katedra: Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

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

Provést metalografickou analýzu lomového porušení ozubení, nacházejícího se na jedné z hřídelí převodovky motocyklu. Vyvodit závěry o příčinách vzniku porušení, v souvislostech posoudit vhodnost zvoleného materiálu a konstrukce hřídele. Vypracovat:

- určení materiálu použitého pro výrobu ozubení a hřídele
- metalografickou analýzu materiálu ozubení a lomové plochy ozubení
- ze získaných poznatků určit možné příčiny porušení součástí

Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucího práce

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran textu a přílohy

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

FREMUNT, P.- PODRÁBSKÝ, T. Konstrukční oceli. Brno: VUT/CERM, 1996. ISBN 80-85867-95-8

PTÁČEK A KOL. Nauka o materiálu I., II.. Brno: VUT/CERM, 2001


KUNZ, J. Základy lomové mechaniky. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02248-X

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Přemysl Hojka


Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání bakalářské práce: 15. února 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 2. června 2017


doc. Ing. Lábor Švadlenka, Ph.D.
děkan

L.S.


doc. Ing. Michael Lata, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. února 2017

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.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47 b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů,

a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní

knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

Tato bakalářská práce byla realizována s využitím technologií Výukového a Výzkumného centra v dopravě.

V Pardubicích dne 30. 5. 2017

Rád bych na tomto místě poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing Přemyslovi Hojkovi, za cenné rady, připomínky a čas, který mi věnoval při psaní této bakalářské práce. Jeho poznatky byly velkým přínosem při vytváření této práce. Dále bych rád poděkoval paní Profesorce Evě Schmidové za pomoc při práci na elektronovém mikroskopu a samotném vyhodnocení analýzy.

Annotace

Tato bakalářská práce pojednává o zjišťování příčiny poškození ozubeného kola na hřídeli převodovky malého motocyklu. Cílem této práce je stanovit důvod porušení ozubeného kola.

Klíčová slova

napětí, lom, struktura materiálu, analýza, elektronový mikroskop

Title:

Analysis of the fracture cracks on cogwheel

Annotation:

This bachelor thesis is about detection of cogwheel break which is set on the shaft of a small motorcycle gearbox. Object of this work is finding the reason why was the cogwheel broken

Keywords:

stress, cracks, the structure of the material, analysis, electron microscope

Obsah

Úvod.....	8
1 Uvedení do problému.....	9
1.1 Princip funkce převodové skříně.....	9
1.2 Popis příčiny závady	11
2 Teoretický úvod – Struktura pevných materiálů.....	13
2.1 Vazby částic v pevných látkách	13
2.2 Vnitřní stavba kovů	14
2.3 Poruchy krystalové mřížky	16
3 Zpevňování materiálu	18
3.1 Zpevňování pohybem dislokací	18
3.2 Zpevněním deformací	19
3.3 Zpevnění pomocí příměsí.....	20
3.4 Zpevnění pomocí hranice zrn.....	20
4 Mechanické vlastnosti kovů.....	21
5 Lomy materiálu.....	26
5.1 Zkouška vrubové houževnatosti.....	28
6 Únava materiálu.....	30
7 Fázové přeměny.....	32
8 Analýza hřídele	35
8.1 Materiál hřídele	35
8.2 Příprava vzorku	37
8.3 Pozorování lomové plochy a řezu	38
9 Závěr – Příčina lomu.....	44
Použité zdroje	47
Seznam příloh	48

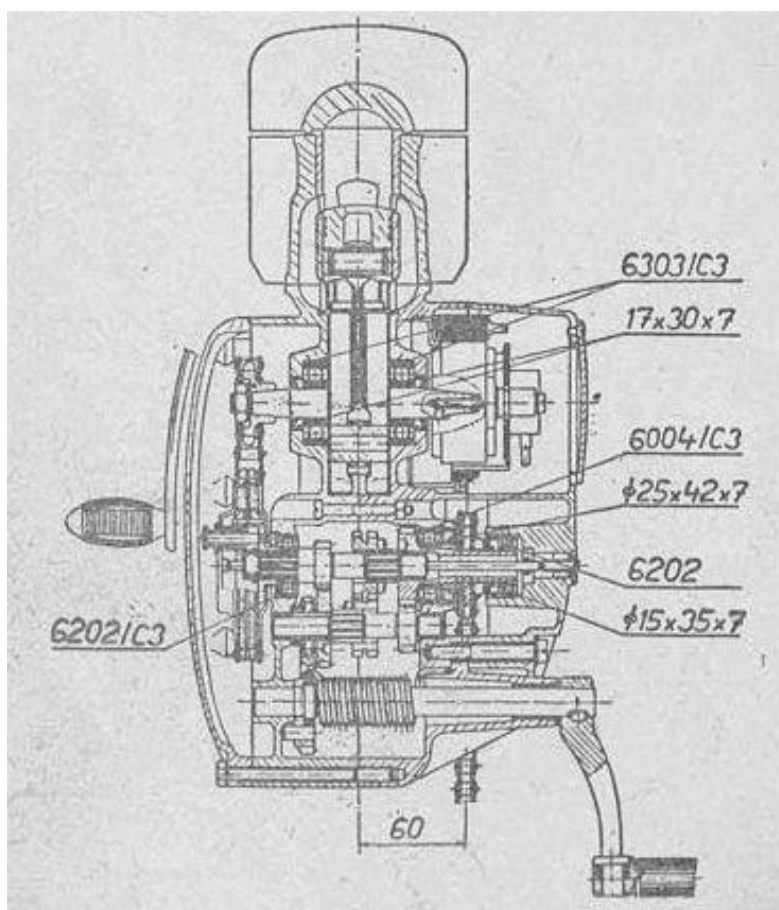
SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1 – Schéma motoru jawa 20	8
Obrázek 2 – První rychlostní stupeň	9
Obrázek 3 – Neutrál mezi 1. a 2. rychlostí	10
Obrázek 4 – Druhý rychlostní stupeň	10
Obrázek 5 – Neutrál	10
Obrázek 6 – Třetí rychlostní stupeň.....	11
Obrázek 7 – Detail na ozubené kolo	11
Obrázek 8 – Celkový pohled na předlohovou hřídel B	11
Obrázek 9 – Krychlově plošně středěná	14
Obrázek 10 – Krychlově prostorově středěná ⁴	15
Obrázek 11 – Hexagonální těsně uspořádaná	15
Obrázek 12 – Poruchy materiálu	17
Obrázek 13 – Změna R_m a R_e na deformaci.....	19
Obrázek 14 – Tahový diagram.....	22
Obrázek 15 – Smluvní mez kluzu.....	22
Obrázek 16 – Smyk.....	23
Obrázek 17 – Namáhání válce krutem.....	24
Obrázek 18 – Namáhání nosníku na ohyb	25
Obrázek 19 – Tvárný lom	26
Obrázek 20 – Interkrystalický lom	27
Obrázek 21 – Trans-krystalický lom	27
Obrázek 22– Nákres Charpyho kladiva	28
Obrázek 23 – Tranzitní oblast.....	29
Obrázek 24 – Charakteristický povrch únavy.....	30
Obrázek 25 – Typický únavový lom ¹⁶	31
Obrázek 26 – Teplotní závislost změny volné entalpie	33
Obrázek 27 – Význam a konstrukce rovnovážného diagramu	33
Obrázek 28 – Přibližné umístění materiálu v Fe_3C diagramu	36
Obrázek 29 – Čelní plocha ozubeného kola	37
Obrázek 30 – Náčrt pohledových rovin.....	37
Obrázek 31 – Celkový pohled na oba lomy.....	38
Obrázek 32 – Lesklá část lomu.....	39
Obrázek 33 – Jádro hřídele z pohledu A.....	40
Obrázek 34 – Přechodové pásmo.....	41
Obrázek 35 – Makro pohled na lom zubu (srovnej s obr. 31)	42
Obrázek 36 – Štěpný lom ve střední části lomové plochy.....	43
Obrázek 37 – Tvárný lom u okraje zubu (lomové plochy).....	43
Obrázek 38 – Interkrystalický lom, pozorovaný z povrchu lomové plochy.....	44
Obrázek 38 – Ukázka další poškozené hřídele	46
Tabulka 1 – Nejčtetnější prvky v materiálu hřídele.....	35

Úvod

Malý motocykl Jawa 50 pionýr byl vyrábět v několika verzích. Od roku 1962 pod typovým označením Jawa 50 Pionýr 05. V roce 1967 Povážské strojírný představily nový typ s označením Jawa 50 Pionýr 20 a jeho sportovní provedení 21 Sport. Nejednalo se ani tak o nový typ, jako spíše o inovaci předešlých typů 05 Standard a 05 Sport. Jednalo se v podstatě jen o další modernizaci motoru, kde se podařilo konstruktérům zvýšit výkon z 3 k (2,2 kW) na 3,5 k (2,6 kW).

Oba typy společně s typem 23 Mustang uzavíraly v roce 1983 výrobu malých motocyklů v Povážských strojírnách, kde se nadále vyráběly pouze mopedy Babetta.



Obrázek 1 – Schéma motoru Jawa 20¹

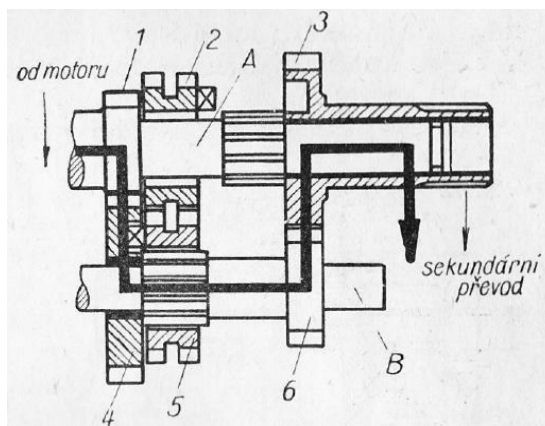
¹ *Dílenská příručka Jawa 50 pionýr* [online]. Povážská bystrica: Povážské strojírný, 1978 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.jawa-50.cz/clanek/dokumentace-prirucky-navod-kobsluze-katalog-dilu-servisni-dilenska-knizka.html>

1 Uvedení do problému

1.1 Princip funkce převodové skříně

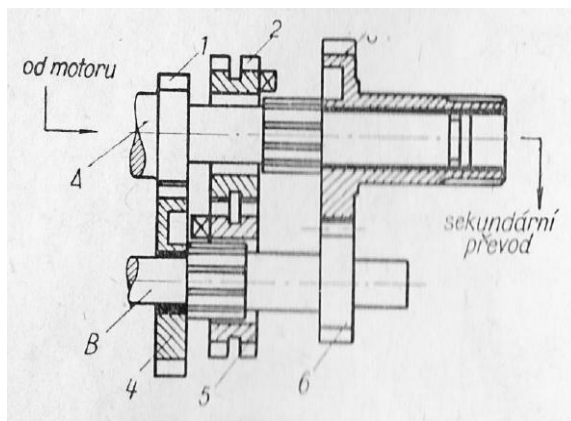
Převodová skříň malého motocyklu Jawa Pionýr je třístupňová, tříhřídelová a ovládána mokrou dvou lamelovou třecí spojkou. Převodová skříň má sekvenční řazení. Převodová skříň je součástí bloku motoru a je spojena s klikovou hřídelí pomocí řetězu. Samotný motor je dvoutaktní, vzduchem chlazený jednoválec o objemu 50cm³ a výkonu 2,6kW.

Spojkový koš otáčí hřídelí A, a s ním spojeným ozubeným kolečkem jedna. Kolečko jedna otáčí kolečkem čtyři, které je na ložisku, a není pevně spojeno s hřídelí B. Při prvním rychlostním stupni ozubené kolo pět díky pěti bočním kolíčkům a drážkování na hřídeli B, spojí kolo čtyři s hřídelí B. Hřídel B se začne s ní otáčet. Tím se otáčí i kolo šest, které je pevně spojeno s hřídelí B. Kolo šest otáčí redukčním kolem tři, v kterém je volně zasunuta hřídel A. Kolo tři je spojeno s řetězovým kolem pohánějícím zadní kolo motocyklu.



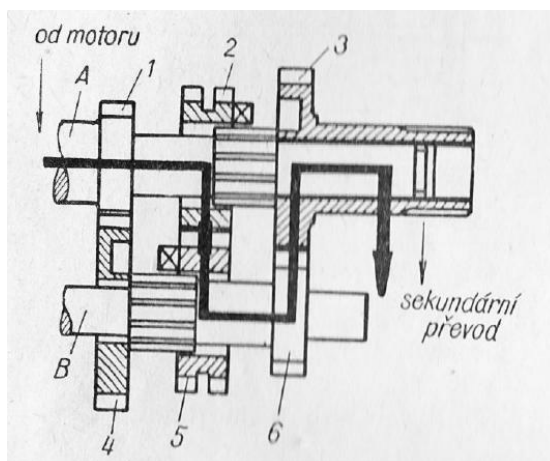
Obrázek 2 – První rychlostní stupeň²

² Princip třírychlostní převodovky jawa 50. In: [Http://mlgeardesigns.blog.cz](http://mlgeardesigns.blog.cz) [online]. Praha: TvNova, 2014 [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: <http://mlgeardesigns.blog.cz/1403/princip-trirychlostni-prevodovky-jawa-50>

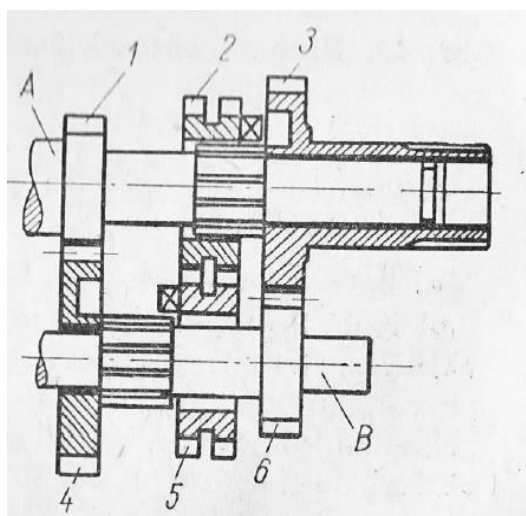


Obrázek 3 – Neutrál mezi 1. a 2. rychlostí

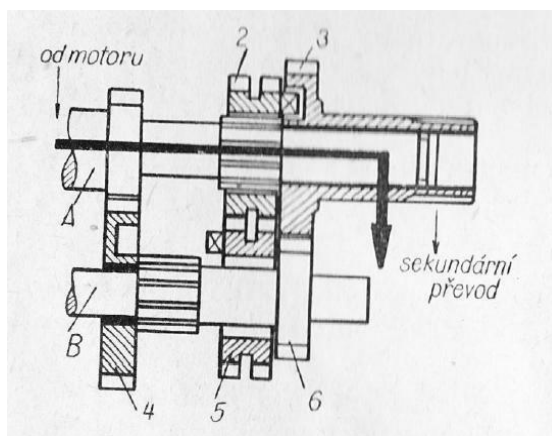
Další rychlosti jsou řazeny směrem doprava přesunutím kol dvě a pět, do kterých zapadá řadící mechanismus, kde mezi každou rychlostí je neutrál.



Obrázek 4 – Druhý rychlostní stupeň



Obrázek 5 – Neutrál



Obrázek 6 – Třetí rychlostní stupeň

1.2 Popis příčiny závady

Při rozjezdu se zařazeným prvním rychlostním stupněm, došlo vlivem špatné údržby k pádu sekundárního řetězu, jeho pádem došlo k zablokování sekundárního ozubeného kola a k zastavení převodovky. Vlivem rázu došlo k zastavení motoru, poškození spojky a vylomení dvou zubů na ozubeném kole číslo šest.



Obrázek 7 – Detail na ozubené kolo



Obrázek 8 – Celkový pohled na předlohovou hřídel B

Jsou dva možné důvody, proč mohlo dojít k vylomení zubu:

- Z důvodu přetížení. Při zastavení převodovky došlo k rázu, který překročil dovolené napětí v patě zubu.
- Z důvodu materiálové vady. Mez pevnosti byla při výrobě snížena materiálovou vadou (materiálová vada může způsobit únavové poškození).

V tomto okamžiku, ale ještě nevíme, jestli ulomení zubů bylo čistě přetížením, nebo šlo o dolomení rozvinuté únavové trhliny. Skutečnou příčinu lomu odhalí až metalografická analýza lomové plochy a materiálu. Cílem této práce je tedy stanovit příčinu lomu ozubení na ozubeném kole hřídele.

2 Teoretický úvod – Struktura pevných materiálů

Materiály se skládají z atomů, tyto atomy drží při sobě chemické vazby a samotné atomy mohou tvořit větší struktury, kterým říkáme mřížky či řetězce.

2.1 Vazby částic v pevných látkách

Atomy se díky vazbám mohou skládat do větších celků. Tyto vazby existují v několika typech a mají význam pro samotnou pevnost materiálu.

- **Iontová**

Aby vznikla iontová vazba, musí být rozdíl elektronegativity³ více než 1,67. Potom dochází k tomu, že jeden atom k sobě přitáhne od druhého atomu elektron, případně více elektronů, které potřebuje k dosažení stabilní elektronové konfigurace. Oba atomy se poté stanou ionty. Malé změny vzdálenosti iontů (poruchy mřížkové konfigurace) způsobí zvýšení vnitřní energie. Síla držící tuto vazbu vychází z Coulombova zákona. Tato vazba je nejjednodušší a jedná se o nejslabší vazbu.

- **Kovalentní**

Kovalentní vazba je vnitro-molekulární forma chemické vazby, kterou lze charakterizovat sdílením jednoho nebo více párů elektronů mezi dvěma prvky. Atomy, účastnící se vazby, si tímto způsobem zaplňují valenční vrstvu elektronového obalu. Tato vazba je směrová a silná. Je obtížné ji rozbít. Příklady vazeb: diamantová struktura uhlíku, plasty, částečně kovy, voda, oxid uhličitý.

- **Kovová**

*Označení kovová vazba vychází z představy moderní teorie kovů, podle které valenční elektrony atomů tvořící kov jsou volně sdílené mezi všemi atomy, takže kovové ionty jsou obklopeny a prostoupeny jakýmsi „elektronovým plynem“.*⁴ To dovoluje přeskupování při lokálních poruchách. Tato vazba je všesměrová a zajišťuje dobrou plasticitu, houževnatost, elektrickou i tepelnou vodivost.

³ Elektronegativita je schopnost atomů přitahovat vazebné elektrony

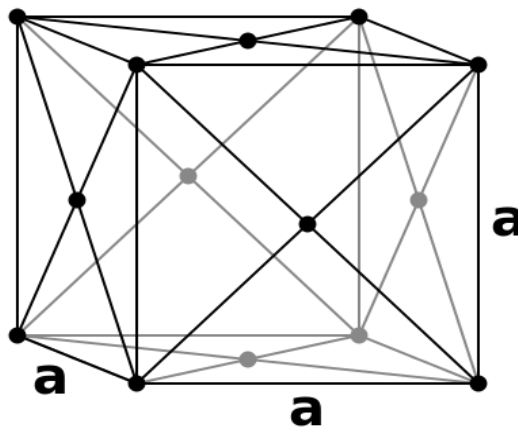
⁴ Kovová vazba. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Kovov%C3%A1_vazba

2.2 Vnitřní stavba kovů

Obecně se atomy kovů za běžných teplot uskupují do krystalových mřížek (kromě rtuti), tím jsou z části dány jejich vlastnosti. Tyto mřížky úzce souvisí s chemickými vlastnostmi a energií atomů. Samotná mřížka má velký vliv na chování materiálu, pouhá změna mřížky může způsobit velké změny v jeho vlastnostech. Existuje celkem sedm krystalických mřížek. U běžných kovů se vyskytují nejčastěji tyto mřížky.

- **Krychlově plošně středěná**

Mřížka má nejtěsnější uspořádání částic. Tato mřížka zajišťuje nejlepší tvárnost za tepla i za studena, oproti jiným. Mohou v ní být intersticiální atomy o velikosti 0,414, nebo 0,225 poloměru základních částic. Železo v této mřížce se nazývá Austenit.

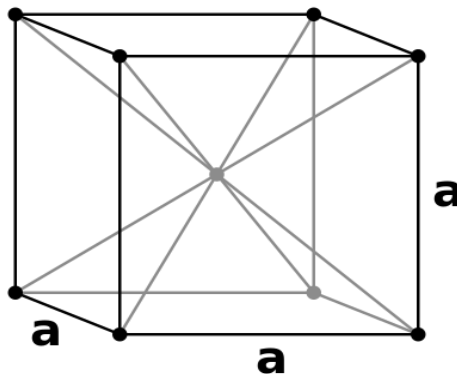


Obrázek 9 – Krychlově plošně středěná⁵

⁵ Kubická sústava. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-31]. Dostupné z: https://sk.wikipedia.org/wiki/Kubick%C3%A1_s%C3%BAstava

- **Krychlově prostorově středěná**

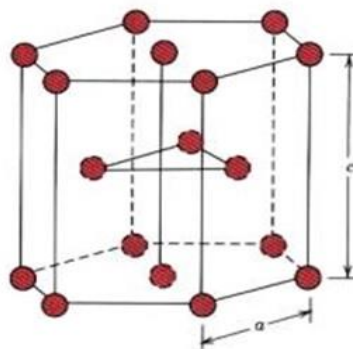
Není tvořena nejtěsnějším uspořádáním částic. Kovy v ní krystalizující jsou obtížněji tvárné za studena. Mohou být uvnitř intersticiální atomy o velikosti 0,291, nebo 0,154 poloměru základních částic. Má menší „rozpustnost“ částic oproti krychlově plošně středěné mřížce. Železo má tuto mřížku za pokojové teploty.



Obrázek 10 – Krychlově prostorově středěná⁴

- **Hexagonální těsně uspořádaná**

Ionty tvoří šestiboký hranol, který má po jednom iontu ve středu horní a dolní podstavy a po třech uvnitř hranolu. Parametry odpovídají plošně středěné mřížce, a proto se jedná opět o nejtěsnější uspořádání atomů. Do této mřížky kovy často krystalizují pouze za vysokých tlaků a teplot.



Obrázek 11 – Hexagonální těsně uspořádaná⁶

⁶ Fyzikální základy vědy o materiálu. In: *Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity* [online]. Brno, 2013 [cit. 2017-05-31]. Dostupné z: http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/fmkomplet_soubory/image055.jpg

- **Tetragonální**

Může být jako jednoduchá s atomem v každém rohu, nebo prostorově středěná s jedním dalším atomem ve středu mřížky. Charakterizuje ji to, že jeden z rozměrů je jiný (není krychlová). Například martenzit⁷ po tepelném zpracování ocele.

2.3 Poruchy krystalové mřížky

Každá krystalová mřížka má své poruchy, tyto poruchy jsou příčinou základního chování materiálu po stránce pevnostní.

- **Bodové poruchy**

Tyto poruchy jsou o velikosti jednoho atomu. Dělí se na několik typů.

Vakance – Jedná se o „volná“ místa v mřížce, kde chybí atom. Jejich množství roste s teplotou, protože roste energie atomu a atom může při dostatku energie „přetrhat vazby“ a přesunout se na jiné místo. Deformují své bezprostřední okolí v mřížce, čímž ji zpevňují.

Intersticiály – Atom je volně rozptýlen v mřížce. V mřížkách mohou být tímto způsobem umístěny pouze atomy, které mají daleko menší atomové průměry. Vždy existuje omezená „rozpustnost“ atomů v mřížce, a to v závislosti na jejím tvaru. U kovů je to pět nekovů (uhlík, dusík, kyslík, bor a vodík). Intersticiály rovněž deformují své bezprostřední okolí v mřížce, čímž ji zpevňují daleko více než vakance.

Substituční atomy – Nahrazují atom v krystalové mřížce. Jejich atomové rozměry a elektronegativita musí být přibližně stejná jako základní atom. Opět způsobuje napětí, ale na rozdíl od intersticiál, kde je omezena rozpustnost v mřížce, zde lze takto nahradit libovolný počet atomů.

⁷ Přesycený tuhý roztok uhlíku v železe

- **Čárové**

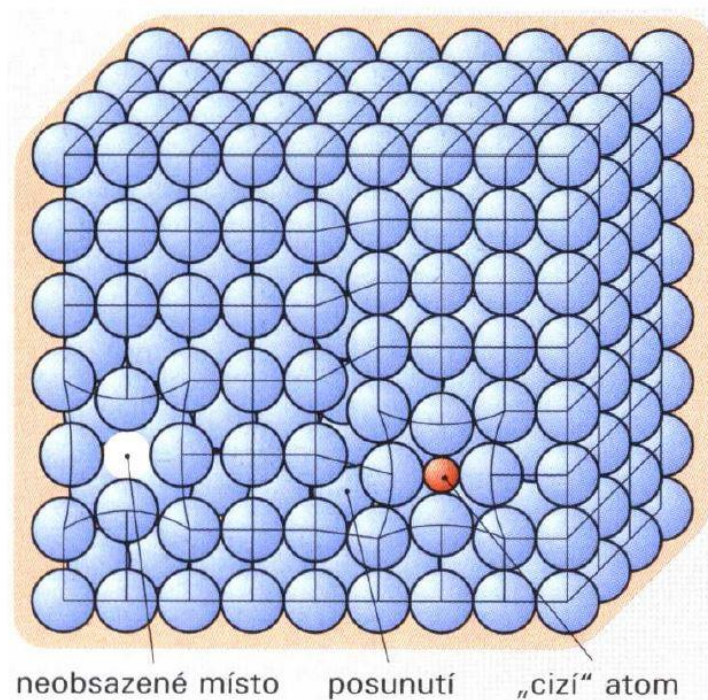
Takzvané dislokace (chybějící vrstva iontů, nebo je posunuta). Každou dislokaci definuje tzv. Burgersův vektor (b), který vyjadřuje velikost a orientaci relativního posunutí dvou částí krystalu. Dislokace vzniká při působení mechanického napětí. Není rovnovážnou poruchou, takže lze vyrobit krystal bez dislokací. Dislokace tvoří takzvané dislokační čáry. Dislokace je z atomového hlediska „obrovským“ útvarem, neboť začíná a končí na stěnách krystalu, nebo se váže sama na sebe (tvoří smyčku) a obsahuje tedy nepředstavitelné množství atomů.

- **Plošné**

Změna celé roviny iontů, například hranice zrn. Zde se skokově mění orientace kluzových rovin.

- **Objemové**

Jsou chápány jako dutiny, či trhliny.



Obrázek 12 – Poruchy materiálu⁸

⁸ Fyzikální základy vědy o materiálech [online]. Brno, 2013 [cit. 2017-05-28]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/>. Masarykova univerzita, Pedagogická Fakulta, Fyzikální oddělení

3 Zpevnování materiálu

Díky materiálovému inženýrství víme, že materiál dovede zpevnovat a tím zvyšovat mez kluzu, případně ho umíme zpevnit při výrobě. Většinou pomocí tepelného zpracování, případně přidáním dalších příměsí, dokážeme vytvořit velice širokou škálu ocelí. Zde je přehled možných druhů zpevnění.

3.1 Zpevnování pohybem dislokací

Mechanické vlastnosti látek jsou nejvíce ovlivňovány pohybem dislokací. Rozeznáváme dva typy pohybů.

- **Skluzem**

Pohyb skluzem je konzervativní pohyb, kde se hmota nepřesouvá. Atomy krystalické mřížky kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Na pohybu dislokace se účastní pouze atomy v okolí hrany nadbytečné poloroviny. Atomy této hrany mají volnou, nenasycenou vazbu. Atomy dislokace kmitají a mohou se navázat na atomy, nacházející se pod skluzovou rovinou, u nichž se při kmitání narušily vzájemné vazby. Nebude-li působit na dislokaci žádné napětí, bude dislokace pouze kmitat kolem rovnovážné polohy. Působí-li skluzové napětí, bude se dislokace pohybovat a výsledkem bude skok (řádově 10^{-10} m). *Pohyb dislokace lze přirovnat k pohybu některých živočichů, jako je například housenka. Ta se pohybuje s vynaložením minimální energie tak, že na svém těle vytvoří malé vyvýšení, které se posouvá podél celé délky těla, až dojde k posunutí. Podobně se pohybují hadi, dešťovky apod.*⁹

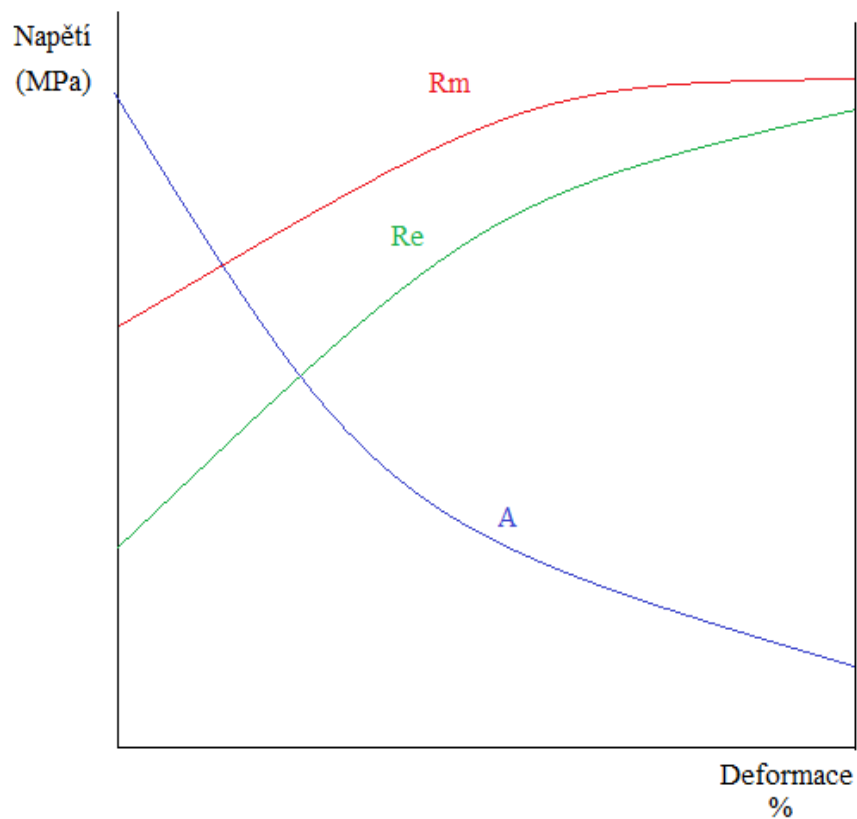
- **Šplháním**

Šplhání je difuzní pohyb, kde dochází k pohybu hmoty. Těsně pod dislokační čarou je tah a ní je tlak, což způsobuje pohyb dislokace kolmo na dislokační čáru. Tento pohyb je tepelně závislý a oproti skluzu velice pomalý. V tuhé fázi je toto jediný způsob přesunu hmoty. Pokud zabráníme tomuto pohybu, například rychlým zchlazením, můžeme zabránit atomům v přesunu, tímto zůstane v materiálu napětí, které způsobí, že je materiál pevný, ale křehký (například: zakalená čepel nože).

⁹ Fyzikální základy vědy o materiálech [online]. Brno, 2013 [cit. 2017-05-28]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/>. Masarykova univerzita, Pedagogická fakulta, Fyzikální oddělení.

3.2 Zpevněním deformací

Překážkou v pohybu dislokací jsou další dislokace v jiných skluzových rovinách. Vytvoření takových dislokací je možné například tvářením za studena. Při tváření materiálu dochází k tvorbě dislokací v jiných skluzových rovinách. Proto je výhodnější například ostří nože kovat než brousit, protože dojde ke zpevnění ostří. Deformační zpevnění se projevuje zvýšením meze pevnosti, kluzu, snížením tažnosti, houževnatosti. Na obrázku 13 vidíme, že mez kluzu R_e roste rychleji než mez pevnosti R_m . Podstatné je i zmenšování tažnosti A , materiál se proto stává křehčím.



Obrázek 13 – Změna R_m a R_e na deformaci

3.3 Zpevnění pomocí příměsí

Atomy příměsí se naváží místo hlavního atomu do mřížky, rozdíl v průměru příměšového atomu způsobí vznik napětí, způsobí zpevnění materiálu. V případě intersticiálních atomů se atomy nenaváží na mřížku, ale volně se v ní rozptýlí. V případě překročení rozpustnosti, dojde k vytvoření precipitátů, které mají odlišné vlastnosti, chemické složení a mohou mít i jinou krystalickou mřížku. U oceli se vyskytují precipitáty různého tvaru i složení. Nejčastějším precipitátem u oceli je karbid železa Fe_3C , který má tvar kuliček, destiček, nebo nepravidelný. Tvar a velikost karbidu velice výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti ocele.

3.4 Zpevnění pomocí hranice zrn

Hranice zrn jsou plošné poruchy, které jsou překážkou pro dislokace. Jednotlivá zrna se přizpůsobují tvaru ostatních zrn podél své hranice, takže nevznikají slepá místa. Dislokace se zde musí „stočit“ do jiného směru, protože jednotlivá zrna mají různě pootočené skluzové roviny mřížky. Na pootočení je potřeba další energie, a proto mají jemnozrné materiály většinou větší pevnost.

4 Mechanické vlastnosti kovů

Pro samotné určení pevnosti materiálů je důležité znát nejen to, jak materiál zpevňuje, ale také co způsobilo zpevnění, a to je většinou napětí. Všechny konstrukční součástky jsou namáhány několika základními namáháními.

- **Namáhání v tahu nebo tlaku.**

Pokud působíme na těleso silou ve směru osy, dojde k jeho protažení nebo smrštění o délku Δl . Můžeme vidět přímou úměrnost mezi silou a prodloužením. Tohoto jevu si všiml anglický fyzik Robert Hooke¹⁰. Jelikož prodloužení má závislost i na velikosti plochy průřezu S_0 kolmé na osu, tak je vhodné zavést bezrozměrnou veličinu

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (1)$$

označované jako poměrné prodloužení a dále normálové napětí

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (2)$$

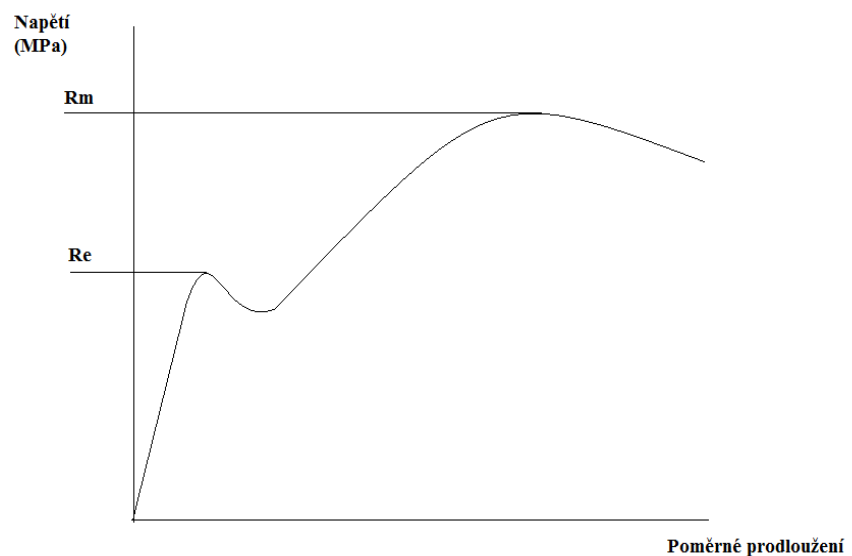
Poté můžeme psát Hookův zákon ve tvaru

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \sigma \quad (3)$$

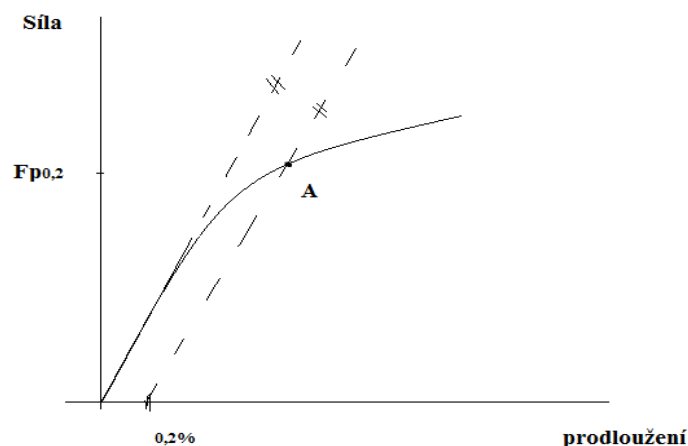
E je Youngův modul pružnosti v tahu (jedná se o tangentu $\frac{\sigma}{\varepsilon}$). Toto ale platí pouze pro malé deformace. Těmto malým deformacím říkáme pružné, protože po odlehčení se materiál vrátí zpět do své původní délky. Toto hraniční napětí popisuje mez kluzu. V technické praxi se většina běžných strojních součástí navrhuje do této meze. K určení této meze a její závislosti slouží tahová zkouška.

¹⁰Robert Hooke (1635-1707)

Tahový diagram z tahové zkoušky je na obrázku 14. Ukazuje materiál s výraznou mezí kluzu R_e . Přímá úměrnost podle Hookova zákona na grafu reprezentuje pružnou deformaci, kde se materiál po odlehčení vrací zpět do původní délky. Před bodem R_e , se někdy může objevit bod R_u , což je bod úměrnosti, který je ale většinou ztotožňován s bodem R_e . Bod R_m je mez pevnosti. Zatížení nad tuto hodnotu vede k přetržení zkušebního vzorku. U některých materiálu je vidět výrazná mez kluzu, kde se materiál dále prodlužuje, ale nedochází k zvětšování tažné síly. U většiny moderních ocelí však není na grafu tato mez vidět, proto se u těchto materiálů určuje „smluvní mez kluzu“.



Obrázek 14 – Tahový diagram



Obrázek 15 – Smluvní mez kluzu

Na výše uvedeném obrázku 15 je vysvětlena konstrukce smluvní meze kluzu. Smluvní mez kluzu je definovaná jako síla, která způsobí několika procentní pružnou deformaci. $F_{p0,2}$ je síla, která způsobila deformaci o 0,2 procenta původní délky. Pokud tuto sílu podělíme plochou průřezu, získáme smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$.

- **Namáhání ve smyku**

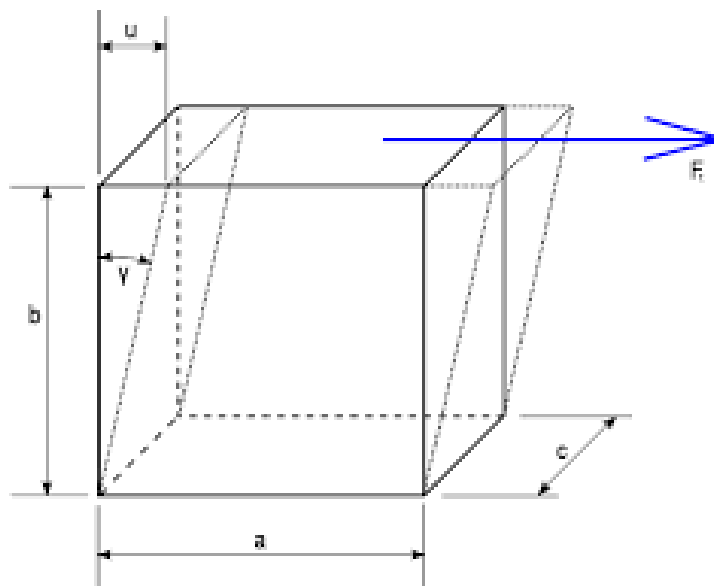
Při namáhání ve smyku působí na materiál dvě stejně velké síly proti sobě na stejné nositelce, které jsou kolmé na osu. Hookův zákon lze pro smyk vyjádřit rovnicí (3).

$$\gamma = \frac{1}{G} \tau \quad (3)$$

Kde γ vyjadřuje úhel ve smyku ($\gamma = \frac{u}{b}$), τ je smykové napětí ($\tau = \frac{F}{S_0}$) a G je modul pružnosti ve smyku. Modul pružnosti ve smyku nebývá v materiálových tabulkách uváděn, dá se určit ze vztahu (4).

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (4)$$

Kde μ je poissonovo číslo, které vyjadřuje poměr mezi deformací v příčném a podélném směru, a je v rozmezí od 0 do 1. Takto popsané namáhání ve smyku je teoretický příklad, reálně se mu lze přiblížit pouze při stříhání materiálu.



Obrázek 16 – Smyk

- **Namáhání v krutu**

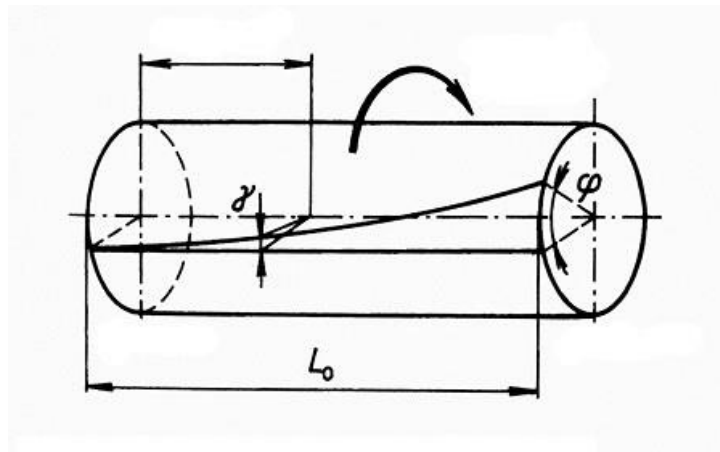
Zjednodušeně by se krut dal nazvat deformací smykovou, kde síly způsobují namáhání krouticím momentem. Maximální smykové napětí je na vnějším obvodu průřezu a jeho hodnota je dána rovnicí (5).

$$\tau_{max} = \frac{M}{\frac{I_p}{r}} \quad (5)$$

Moment M je nazýván jako krouticí moment, r je vzdálenost k nejvzdálenějšímu bodu od osy a I_p je polární kvadratický moment. V technické praxi se zlomek

$$\frac{I_p}{R_{max}} \quad (6)$$

označuje jako W_k (modul průřezu v krutu).



Obrázek 17 – Namáhání válce krutem¹¹

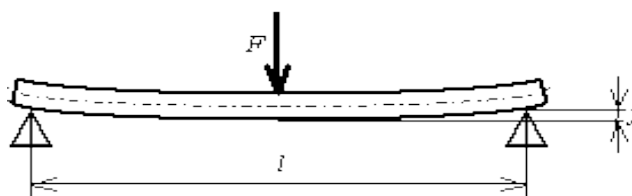
¹¹ Strojírenská technologie – 1. ročník Vlastnosti materiálů – pružnost, pevnost. In: *Strojirensví engineering* [online]. Praha, 2007 [cit. 2017-05-31]. Dostupné z: http://www.strojirensvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a_pruznost_pevnost.php

- **Namáhání ohybem**

Toto namáhání je charakterizováno silovou dvojicí (ohybovým momentem), ležící v rovině kolmé na rovinu řezu. Namáhání ohybem je dáno normálovým napětím σ_o , které je po průřezu rozloženo nerovnoměrně. Tělesa namáhaná na ohyb se obecně nazývají nosníky, přesto že se většinou jedná o konkrétní strojní součásti. Ohybové napětí nabývá maxima v krajních vláknech průřezu a jeho velikost vyjadřuje vztah (7)

$$\tau_o = \frac{M_o}{W_o} \quad (7)$$

Ohybový moment M je největší moment působící na těleso, W_o je modul průřezu v ohybu.



Obrázek 18 – Namáhání nosníku na ohyb¹²

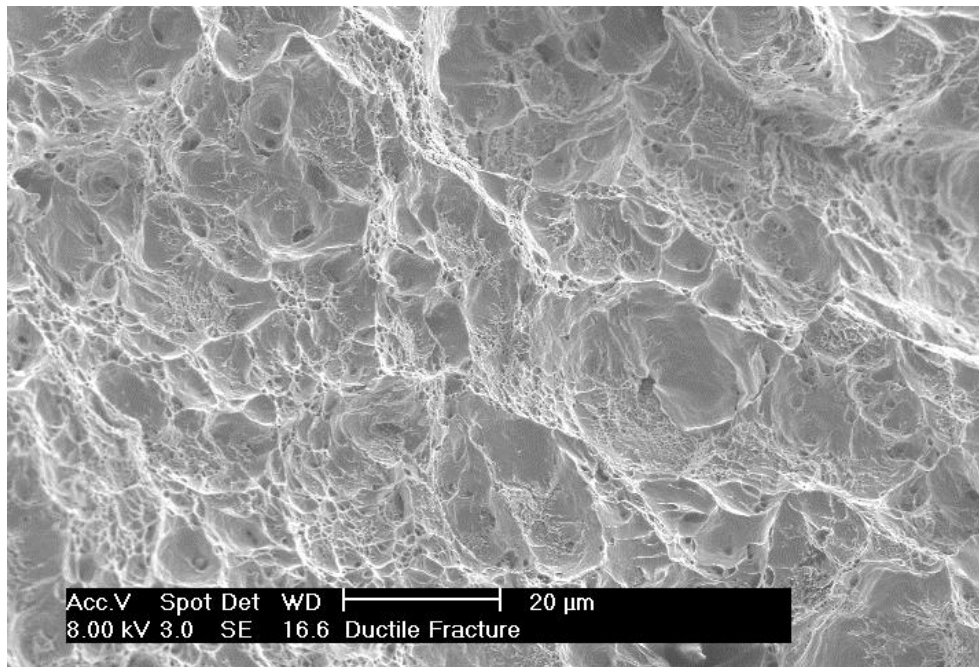
¹² Vlastnosti kovových materiálů a jejich zkoušení. *Jhamernik* [online]. Pelhřimov, 2003 [cit. 2017-05-31]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm>

5 Lomy materiálu

Při překročení meze kluzu se materiál začíná deformovat. Do meze pevnosti dojde pouze k nevratné deformaci, za touto mezí dochází k porušení celistvosti materiálu a tento děj skončí lomem. V zásadě rozlišujeme dva typy lomů. Lomovým chováním materiálu se zabývá lomová mechanika a zahrnuje více odvětví vědy.

- **Tvárný lom**

Je charakteristický plastickými deformacemi ve špičce postupující trhliny. Jeho vytvoření tedy spotřebuje velké množství energie (ve srovnání s křehkým lomem). U čistých kovů se bude téměř vždy vyskytovat plastický lom, protože dislokacím nebráníme příměsemi v pohybu (materiál může volně plastizovat). Lomová plocha je vrásčitá a hodně členitá.

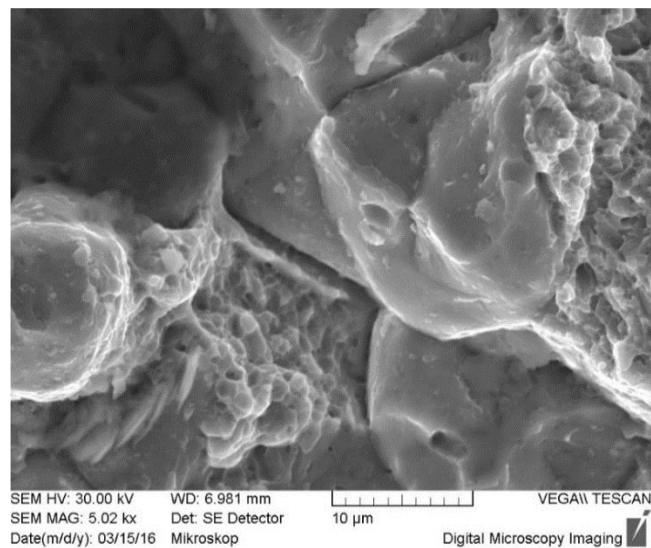


Obrázek 19 – Tvárný lom¹³

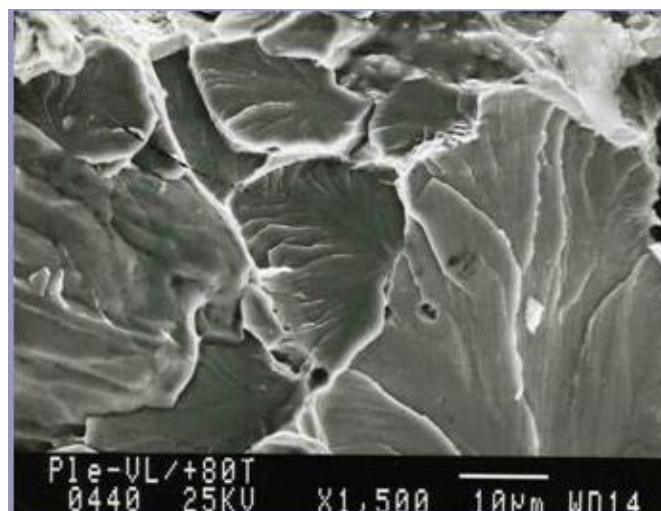
¹³ Tvárný lom. In: *Docplayer* [online]. [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/docs-images/59/43686798/images/13-0.png>

- **Křehký lom**

Křehký lom je nízkoenergetický a trhlina se při něm šíří bez působení velkého napětí (například prasknutí tabulky skla). Tyto lomy rozlišujeme na dva a to interkrystalický (mezi-krystalický), který se šíří po hranicích zrn a transkrystalický, který se může šířit i skrz jednotlivá zrna (přes krystalografické roviny). Křehký lom se vyskytuje převážně u materiálu, které netvoří krystalickou mřížku. Tento lom je u materiálu většinou nepřijatelný a ve většině případů se mu snažíme zabránit, protože mu nepředchází plastická deformace a dochází k lomu bez viditelných známek dřívějšího vnějšího poškození.



Obrázek 20 – Interkrystalický lom

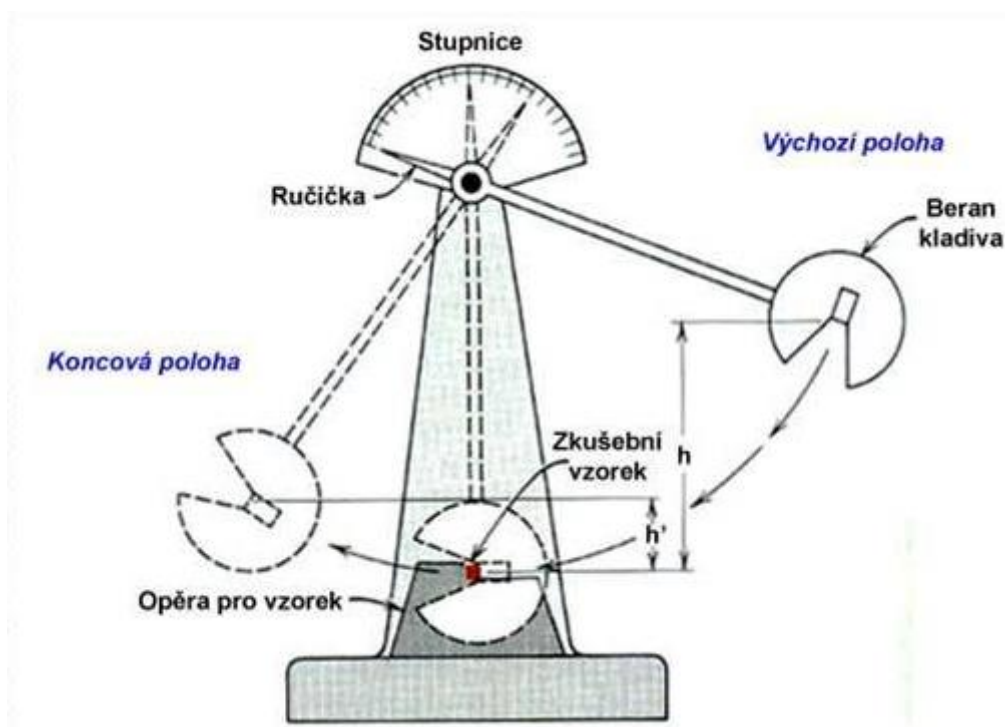


Obrázek 21 – Trans-krystalický lom¹⁴

¹⁴ Křehký lom. In: *Docplayer* [online]. 2017 [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/43686798-Houzevnatost-i-zakladni-pojmy-tranzitni-lomove-chovani-oceli-teplotni-zavislost-pevnostnich-vlastnosti-fraktografie-ii.html>

5.1 Zkouška vrubové houževnatosti

Rychlost zatěžování a teplota jsou jedním z rozhodujících faktorů o změně tvárného lomu v křehký lom. Proto jednou ze základních zkoušek materiálu je dynamická zkouška vrubové houževnatosti. K provádění zkoušky slouží tzv. Charpyho kladivo. Normalizované zkušební vzorky o různých teplotách jsou rázově lámány, je měřena energie potřebná k přelomení vzorku.



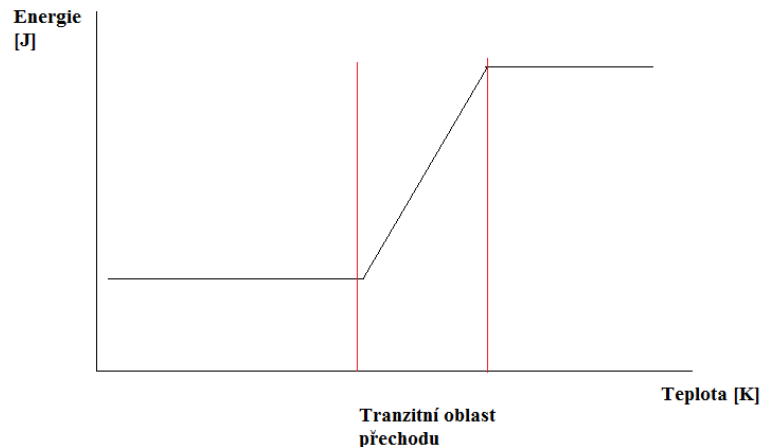
Obrázek 22– Nákres Charpyho kladiva¹⁵

Po několika pokusech můžeme najít tranzitní teplotu, kdy se tvárný lom mění v křehký (skokově se mění energie potřebná k přelomení vzorku). Dalším parametrem pro změnu tvárného lomu na křehký je také tvar součástí, proto probíhají dynamické zkoušky celých součástí (například nárazové zkoušky u automobilů) k posouzení změny tvárného lomu na křehký lom.

¹⁵ Charpyho kladivo. [online]. [cit. 2014-07-15]. Dostupné na : <http://www.noze-nuz.com/recenze/vlastnosti-damasku/vlastnosti-damasku.php>

Na to, jestli materiál bude tvořit křehký, nebo tvárný lom má vliv několik věcí:

Teplota – Klesající teplota zvyšuje pravděpodobnost křehkého lomu. Tranzitní teplota materiálu by se měla nacházet mimo pracovní teplotu stroje.



Obrázek 23 – Tranzitní oblast

Tvar součástky – Složitější tvary a větší počet vrubů zvyšuje pravděpodobnost křehkého lomu. Vždy tedy záleží na konkrétní strojní součástce.

Rychlost zatěžování – Vyšší rychlost zatěžování posouvá na grafu tranzitní oblast doprava směrem k vyšší teplotě. Při rychlém zatížení, materiál „nestíhá“ přesunout dislokace, tím zpevňuje a stává se křehčím.

Chemické složení – Vměstky a příměsi blokují pohyb dislokací. Zvyšují pravděpodobnost změny na křehký lom.

Změnu tvárného lomu na křehký ovlivňují i další vlivy. Všechny tyto vlivy se navzájem kombinují. Je tedy velmi obtížně stanovit dopředu lomové chování strojní součástky.

6 Únava materiálu

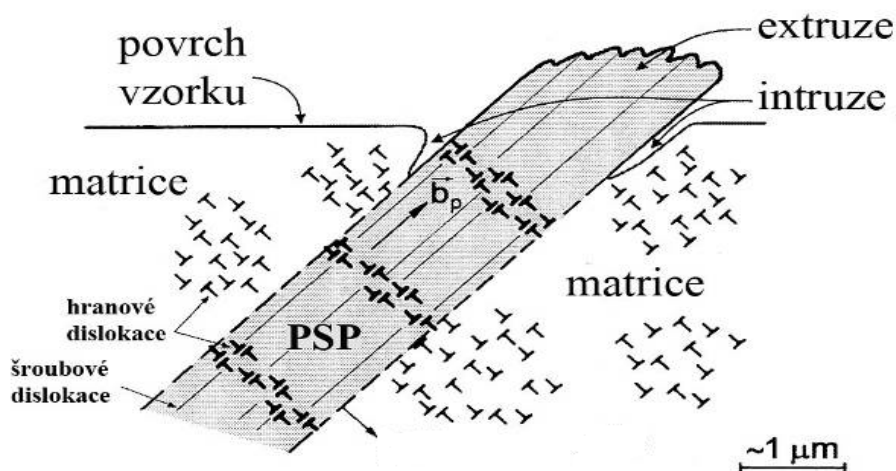
Při dynamickém namáhání můžeme pozorovat, že dochází po nějakém čase k porušení materiálu, přestože hodnoty mechanických napětí jsou pod mezí kluzu. To je způsobeno tím, že reálné materiály se po odlehčení nikdy nevrátí do původních stavu, ale vlivem mikro-plasticity v nich zůstane zbytkové napětí.

Tato mikro-plasticita se kumuluje a později způsobí lom. Tento lom je velice typický. Sestává ze tří základních fází.

V první fázi se začne inicializovat trhlinka, ta se vytvoří v místě, kde je největší napětí, zpravidla v koncentraci napětí (ostrá hrana, náhlá změna rozměru). V této fázi vznikají intruze (místo, kde došlo k propadu materiálu) a extruze (místo, kde byl materiál vytlačen nad původní materiál). Z intruzí, které jsou velkým koncentrátem napětí, se začne šířit trhlinka, která se v začátku šíří ve skluzové rovině.

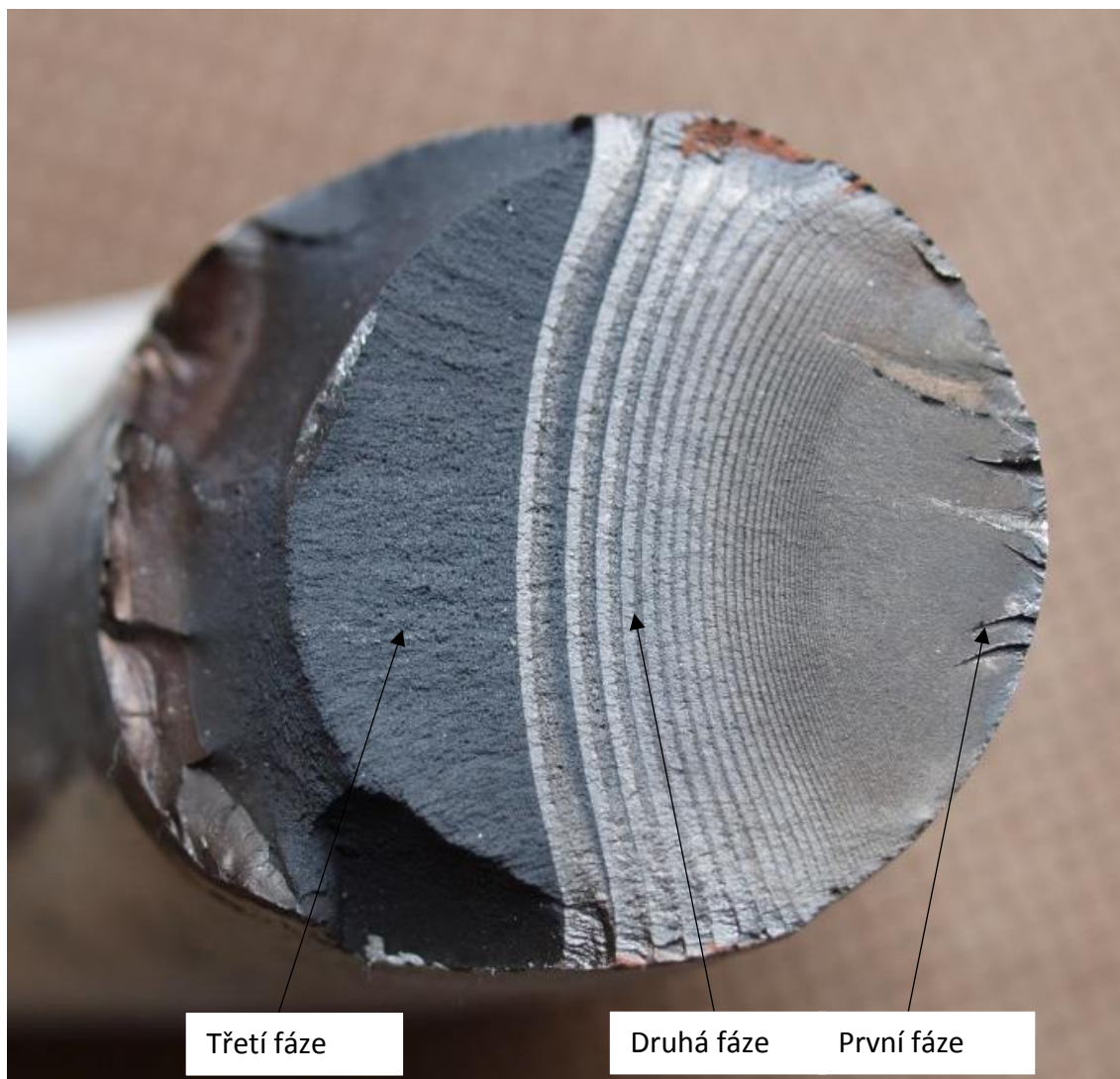
V druhé fázi dojde k stočení trhlinky do směru kolmého na působící napětí. Vytvářejí se zde lamely, které jsou velice dobrým důkazem, na zjištění směru a druhu zatížení. Šířka těchto lamel se postupně zvětšuje.

Ve třetí fázi, kde je průřez natolik zúžený, že neunesou napětí, dojde ke statickému dolomení.



Obrázek 24 – Charakteristický povrch únavy¹⁶

¹⁶ SCHMIDOVA, Eva. Mechanické chování materiálu. In: *Portal studijní agendy* [online]. Pardubice, 2015 [cit. 2017-05-31]. Dostupné z: <https://portal.upce.cz/portal/studium/moje-studium/studijni-materialy.html>



Třetí fáze

Druhá fáze

První fáze

Obrázek 25 – Typický únavový lom¹⁶

7 Fázové přeměny

Při tuhnutí materiálu dochází u kovů k tvorbě krystalové mřížky. V případě slitin dvou látek mluvíme o termálních rovnovážných diagramech, můžeme u nich pozorovat zajímavé úkazy a změny mechanických, chemických a elektrických vlastností. U těchto diagramů se může vyskytovat několik reakcí a stavů, například nižší teplota tání směsi, než je teplota tání obou základních látek.

Pro další popis je nutné uvést několik pojmů.

Tavenina – Materiál je tekutý, nevyskytují se v něm žádné krystaly.

Krystaly čistých složek – Čistý prvek bez dalších příměsí.

Tuhé roztoky – Krystalová struktura je shodná se základním kovem, ale krystalová mřížka obsahuje i další atomy či molekuly jiných prvků, a to ve dvou možných stavech:

- Substituční – Atomy jiného prvku nahradí základní atom v mřížce.
- Intersticiální – Atomy se rozptýlí v mezerách krystalové mřížky.

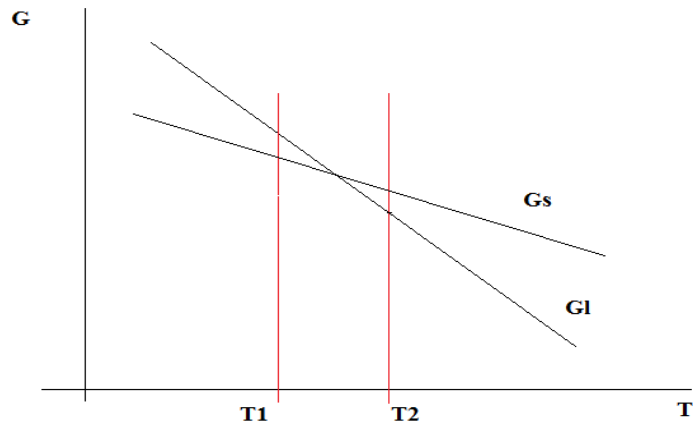
Intermediální fáze – Má samostatnou krystalovou mřížkou, díky tomu se mohou lišit fyzikálními i mechanickými vlastnostmi od čistých složek, většinou jsou značně tvrdé a křehké, uplatňuje se u nich větší vliv kovalentní vazby.

Intersticiální sloučeniny – Vznikají podobně jako intersticiální tuhé roztoky, mezi prvky se značně odlišným atomovým poloměrem. Jsou běžně označovány jako karbidy, nitridy, hydridy a boridy. Nekomové atomy jsou umístěny intersticiálně v mřížce, která je často těsně uspořádaná. Sloučeniny mají uspořádaný stav, určitý atomový poměr složek a vyznačují se kovovým vlastnostmi.

Mechanické směsi – Vznikají jako více fázové slitiny v tuhém stavu, které obsahují směs různě uspořádaných krystalů čistých složek, tuhých roztoků, či intermediálních fází.

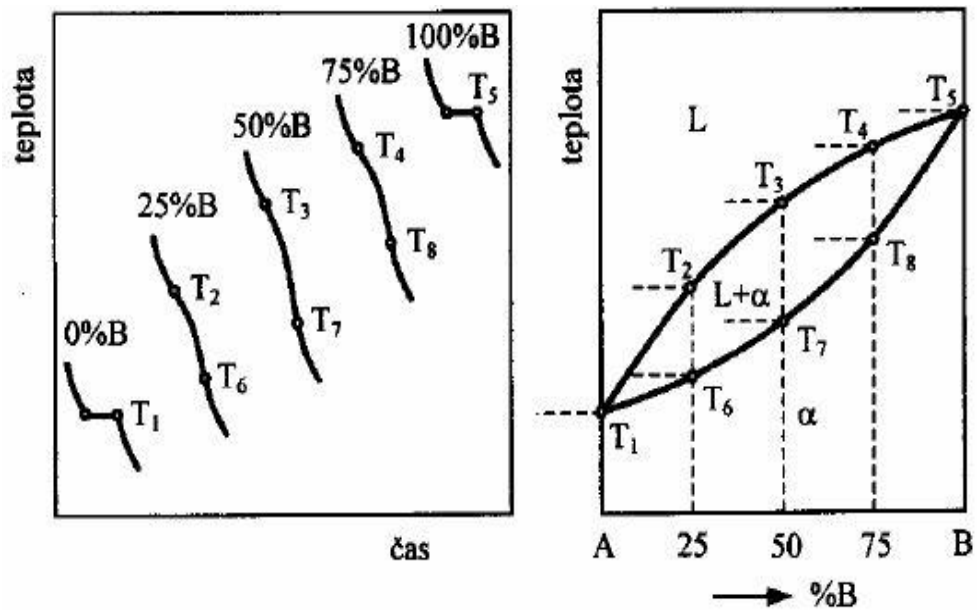
Při tuhnutí je důležité, že soustava vždy zaujímá stav s nejnižší volnou entalpií.¹⁷

¹⁷ Entalpie je fyzikální veličina vyjadřující množství energie v termodynamické soustavě



Obrázek 26 – Teplotní závislost změny volné entalpie

Přímka G_s vyjadřuje volnou entalpii tuhé fáze a G_l volnou entalpii taveniny. Fázovou rovnováhu pro všechny koncentrace podle teploty ukazuje rovnovážný (Termální) diagram.



Obrázek 27 – Význam a konstrukce rovnovážného diagramu¹⁸

¹⁸ SCHMIDOVA, Eva. Překrystalizace. In: *Portal studijní agendy* [online]. Pardubice, 2015 [cit. 2017 05 31]. Dostupné z: <https://portal.upce.cz/portal/studium/moje-studium/studijni-materialy.html>

- **Diagramy s eutektickou reakcí**

Tato reakce se převážně vyskytuje u soustav s malým rozdílem teplot tání. Tavenina eutektického složení tuhne při konstantní teplotě a probíhá vylučování dvou fází. Z homogenní taveniny tak vzniká heterogenní mechanická směs – eutektikum. U železa nazývané perlit.

- **Diagramy s peritektickou reakcí**

Tato reakce je typická pro soustavy s velkým rozdílem teplot tání. Kdy jedna složka je v tuhém stavu, zatímco druhá teprve začíná tuhnout. Tavenina a tuhá fáze spolu reagují za vzniku další tuhé fáze – tuhého roztoku

- **Soustavy s překrystalizací**

Změna krystalové mřížky prvku vlivem snížení teploty. Může způsobit změny rozpustnosti. Dochází poté k rozpadu přesyceného tuhého roztoku.

- **Rozpad přesyceného tuhého roztoku**

Difúzní přeměna, kdy se homogenní struktura mění na heterogenní směs dvou a více fází. Důvod je snížení rozpustnosti z důsledku nižší teploty, nebo změny krystalové mřížky. Tomuto jevu se dá zabránit rychlým ochlazením. Tím vzniká přesycený nestabilní tuhý roztok a dochází k precipitaci. Vyrůstá Re, Rm, tvrdost (například vytvrzování hliníku na dural, kalení ocelí).

Toho by mělo k základní teorii k pochopení zlomení zubu ozubeného kola stačit. Nyní přejdeme tedy k samotnému hřídeli.

8 Analýza hřídele

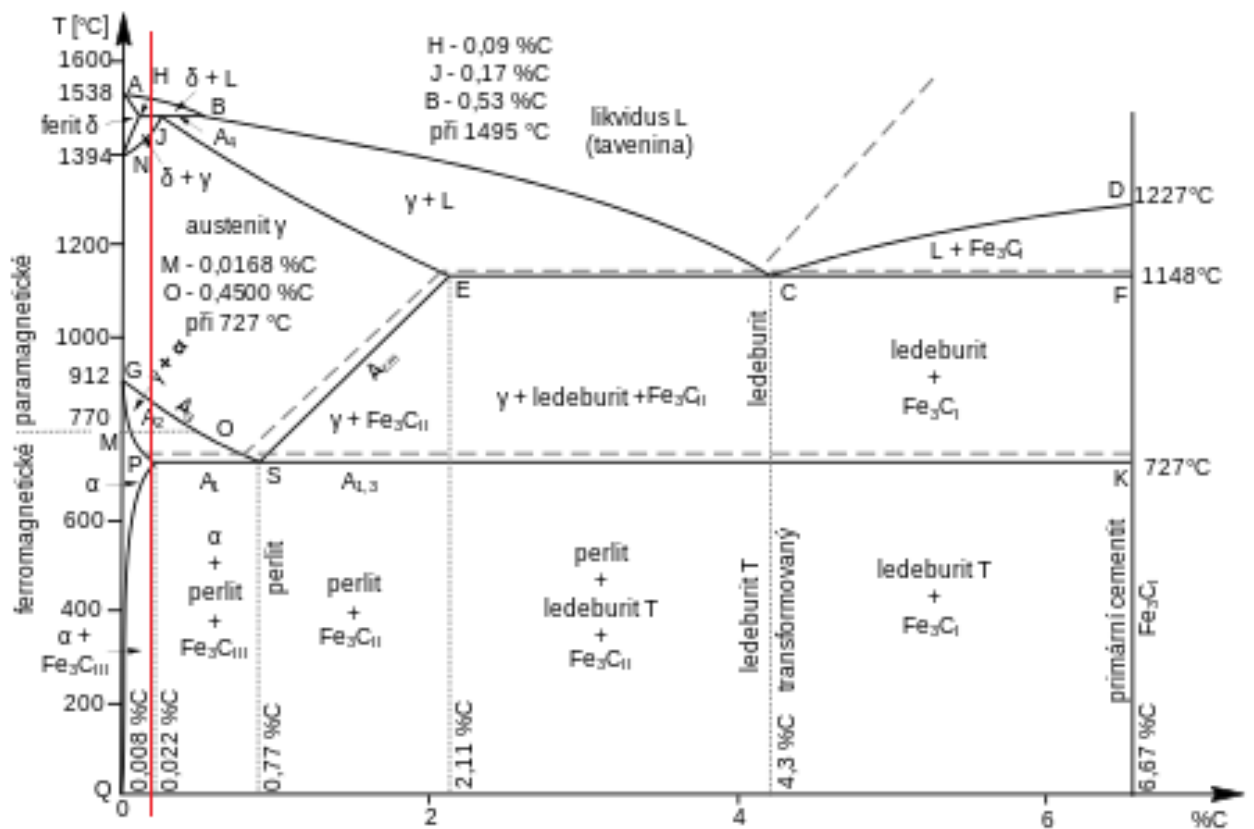
8.1 Materiál hřídele

Podle analýzy materiálu se jedná o ocel legovanou převážně manganem a chromem. Nepodařilo se určit přesné označení ocele. Společnost Jawa mi bohužel nedokázala odpovědět, protože původní výkresy změnily svého majitele a nikdo z Jawy mi nedal kontakt na kompetentní osobu. Podle složení by se mělo jednat o ocel z šestnácté nebo sedmnácté třídy oceli. Podle procentního obsahu uhlíku můžeme předpokládat, že struktura bude převážně ferit¹⁹ s obsahem perlitu. Celou analýzu materiálu hřídele naleznete v příloze A.

Tabulka 1 – Nejčtetnější prvky v materiálu hřídele

prvek	Fe	Mn	Cr	Ni	Cu	C
1.	96,73	1,12	1,054	0,329	0,235	0,14
2.	96,72	1,13	1,051	0,330	0,233	0,14
3.	93,74	1,13	1,044	0,328	0,233	0,14
průměr	96,73	1,13	1,050	0,329	0,234	0,14

¹⁹ fáze slitiny železa a uhlíku s krychlovou prostorově středěnou krystalovou mřížku



Obrázek 28 – Přibližné umístění materiálu v Fe₃C diagramu²⁰

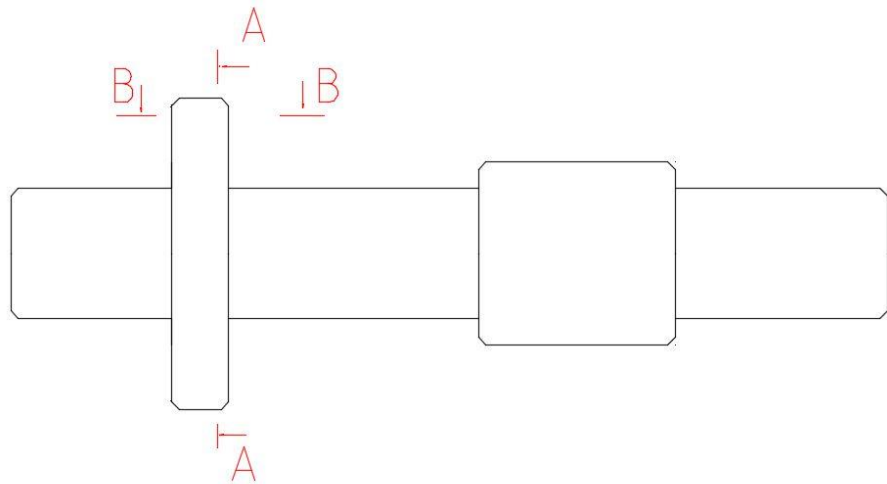
²⁰ Binární diagram železo-uhlík. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Bin%C3%A1rn%C3%AD_diagram_%C5%BElezo-uhl%C3%AD

8.2 Příprava vzorku

Hřídel byl říznut ve směru řezu A. Čelní plocha ozubeného kola byla vybroušena, vyleštěna a vyleptána, aby došlo k zvýraznění vnitřní struktury na mikroskopu. Na zbylé části hřídele byla provedena analýza složení materiálu v chromatografu.



Obrázek 29 – Čelní plocha ozubeného kola



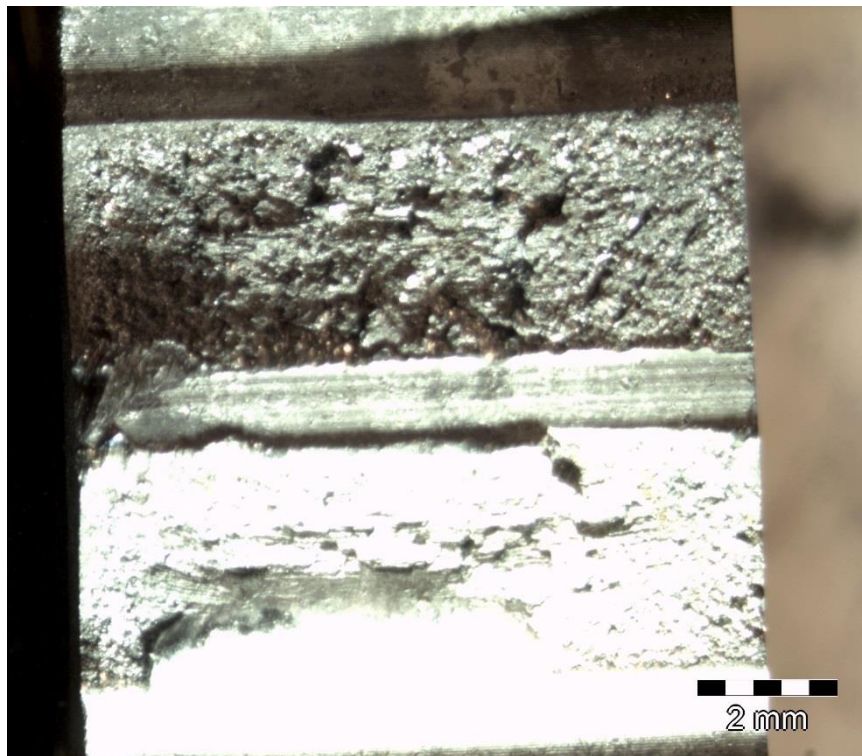
Obrázek 30 – Náčrt pohledových rovin

8.3 Pozorování lomové plochy a řezu

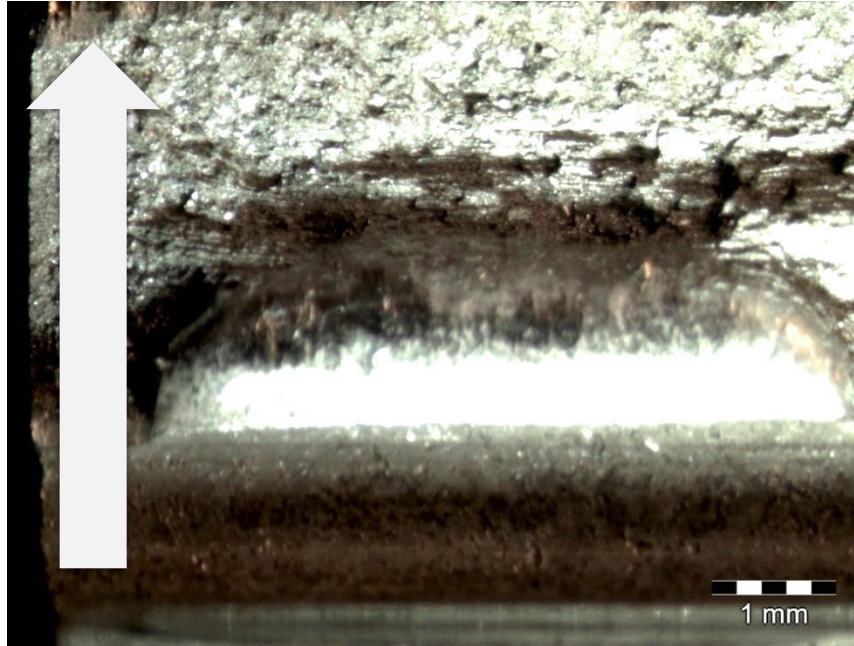
Pozorování probíhalo ve dvou fázích, a to optickou lupou spolu s metalografickým mikroskopem, a elektronovým mikroskopem. Optickou lupou byla pozorována lomová plocha (B), mikroskopem byly pozorovány roviny výbrusu (A). Elektronovým mikroskopem byla pozorována pouze lomová plocha v rovině B.

- **Pozorování optickou lupou**

První pozorování bylo provedeno z pohledu B. Na snímcích je vidět lomová plocha. Tato plocha má velmi rozdílnou strukturu. Lesklá část ve spodní části obrázku 32 vznikla pravděpodobně sklouznutím ulomeného zubu po lomové ploše. Ke sklouznutí došlo nejspíše při nárazu prvního zubu na druhý a po dolomení se pata druhého zubu pod smýkla a vytvořila tuto plochu. Bílá šipka naznačuje směr otáčení kola při záběru.



Obrázek 31 – Celkový pohled na oba lomy

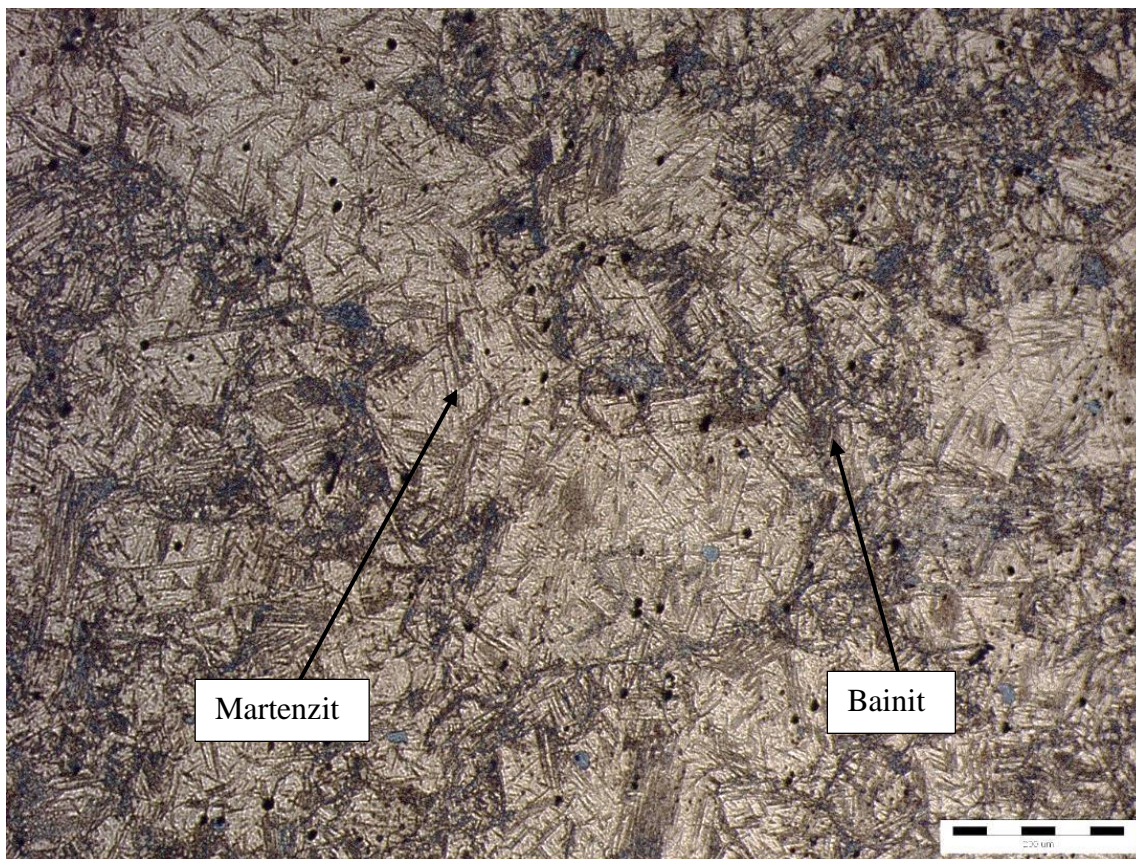


Obrázek 32 – Lesklá část lomu

- **Pozorování optickým mikroskopem**

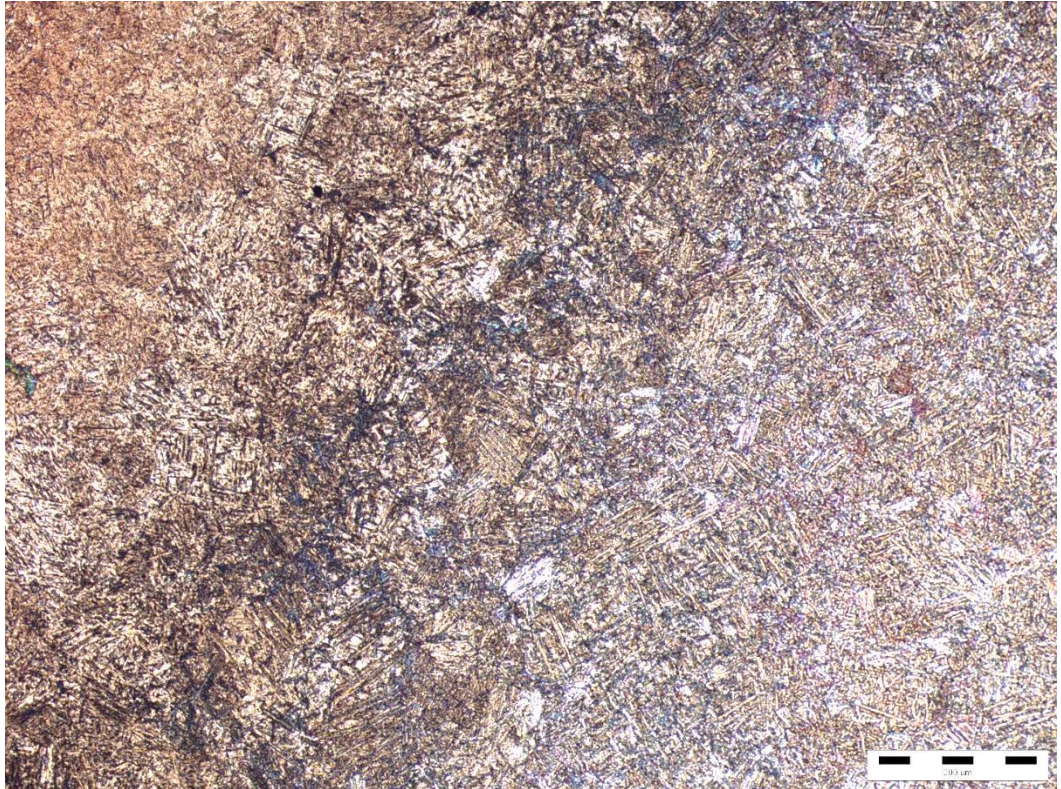
Druhé pozorování probíhalo ve směru řezu A. Účelem bylo zjistit strukturu jádra a samotného ozubení. Na obrázku 33 je vidět jádro hřídele. Světlá místa jsou martenzitická zrna, protože na nich je vidět jehlicová struktura. Tmavá místa obsahují zřejmě zrna zbytkového bainitu²¹. Zrna martenzitu v jádře hřídele jsou poměrně velká a hrubá. Bez znalosti původní předepsané technologie při výrobě, ale nelze jednoznačně říci, jestli je tato struktura cílená, nebo kalení bylo provedeno nesprávně.

²¹ Bainit vzniká rozpadem austenitu při kalení podobně jako martenzit



Obrázek 33 – Jádro hřídele z pohledu A

Obrázek 34 ukazuje přechodové pásmo, kde je viditelná změna struktury. Hřídel byl pravděpodobně zakalen celý, proto na povrchu vznikla jemnější struktura než v jádře, kde už rychlost ochlazování nebyla tak velká.



Obrázek 34 – Přechodové pásmo.


- **Pozorování pod elektronovým mikroskopem**

Snímky z optického mikroskopu neprokázaly přímo příčinu porušení. Bylo proto přikročeno k analýze v elektronovém mikroskopu, který (ze své fyzikální podstaty) umožňuje větší přiblížení zkoumaného povrchu.

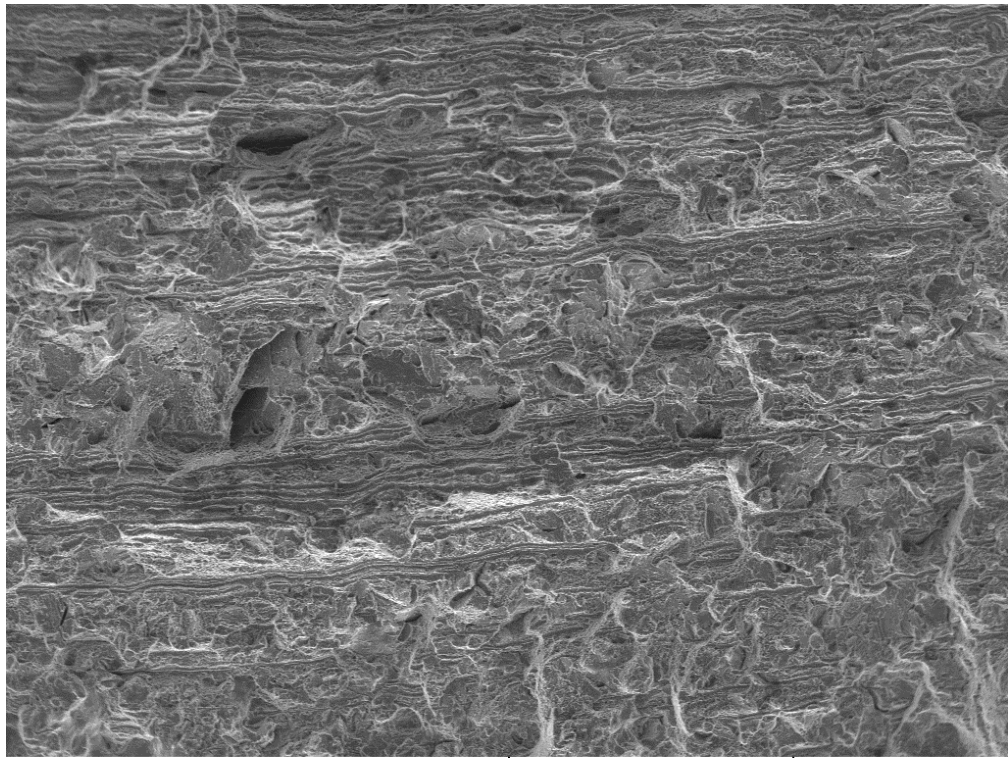
Pozorována byla přímo lomová plocha zubu, tedy pohled B.



SEM HV: 30.00 kV WD: 6.684 mm
SEM MAG: --- Det: SE Detector
Date(m/d/y): 03/15/16 Mikroskop

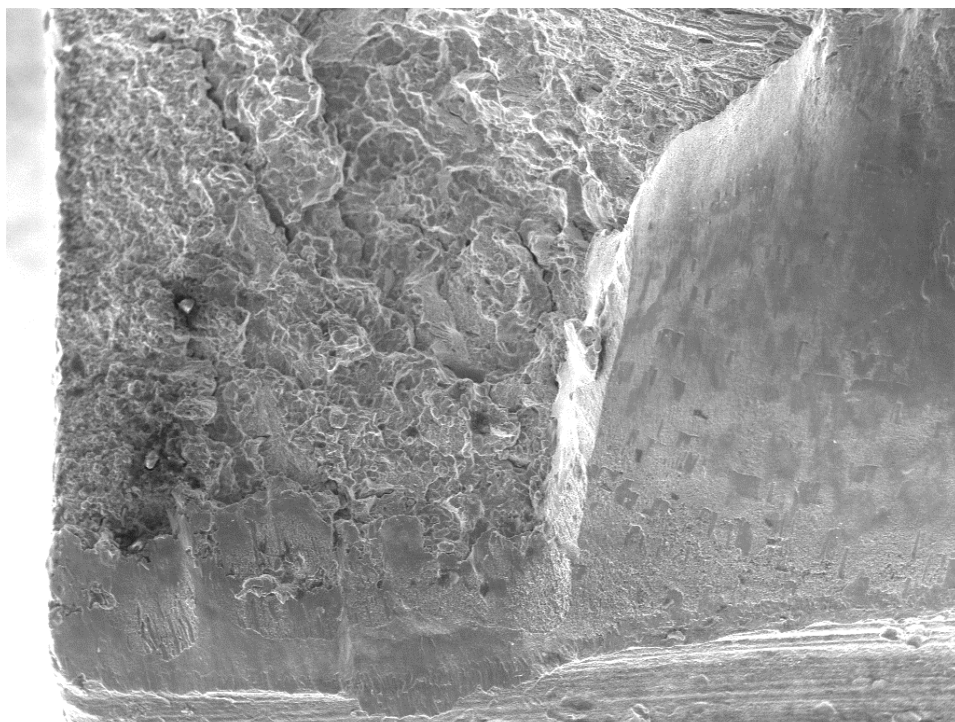
Digital Microscopy Imaging 

Obrázek 35 – Makro pohled na lom zubu (srovnej s obr. 31)



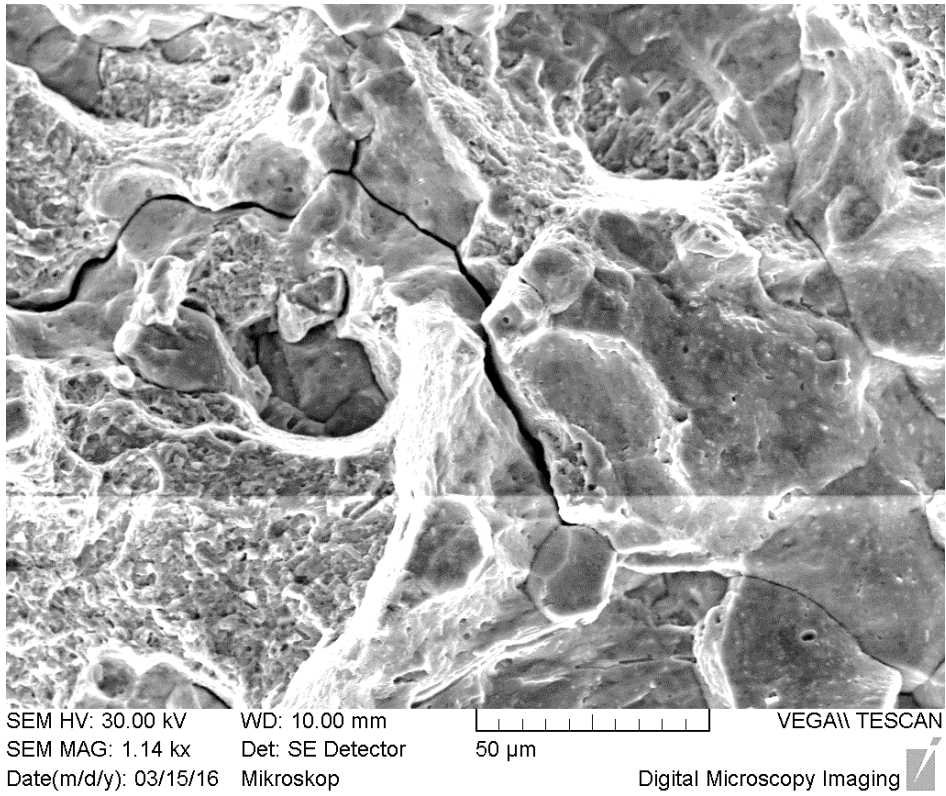
SEM HV: 30.00 kV WD: 6.981 mm 500 µm VEGA\\ TESCAN
SEM MAG: 130 x Det: SE Detector
Date(m/d/y): 03/15/16 Mikroskop Digital Microscopy Imaging

Obrázek 36 – Štěpný lom ve střední části lomové plochy



SEM HV: 30.00 kV WD: 7.066 mm 500 µm VEGA\\ TESCAN
SEM MAG: 130 x Det: SE Detector
Date(m/d/y): 03/15/16 Mikroskop Digital Microscopy Imaging

Obrázek 37 – Tvárný lom u okraje zubu (lomové plochy)



Obrázek 38 – Interkrystalický lom, pozorovaný z povrchu lomové plochy.

9 Závěr – Příčina lomu

Z pozorování vyplynulo, že vzorek má velkou heterogenitu, protože obsahuje jak štěpné, tak tvárné lomy. Ve střední části lomu se nacházejí spíše štěpné lomy, po okrajích lomové plochy převážně tvárné (obr 35).

K poškození hřídele došlo nejpravděpodobněji kvůli dynamickému zatížení rázem, kdy setrvačné účinky vyvolaly skokový nárůst sil, působící na ozubení. Jelikož není známa velikost rázu nelze určit, jestli by k porušení došlo i bez materiálových vad. Z pozorování vyplynulo, že ozubené kolo bylo kaleno celé (obr 33). Toto kalení bylo pravděpodobně zvoleno kvůli snížení ceny výroby, taková to součástka má sice požadovanou tvrdost a odolnost na opotřebení, ale zůstává křehká a náchylná právě na rázová zatížení.

Snímky z elektronového mikroskopu ukázaly na lomové ploše i interkrystalický lom (obr 38), který znamená problém na hranicích zrn. Pravděpodobně na hranice zrn difundoval nějaký prvek či sloučenina (nečistota) s malou pevností, tento prvek se, ale nepodařilo identifikovat. To mělo za následek snížení pevnosti. Materiál s touto vadou je rozhodně nevyhovující.

Z osobní zkušenosti vím, že tato závada se vyskytovala u několika strojů okolo roku výroby 1975. Pokud došlo k náhlému zastavení motoru, s velkou pravděpodobností byla poškozena převodovka, kde na této hřídeli praskl zub. Příčinu můžeme hledat v konstrukci převodovky, kde toto kolo přenáší největší krouticí moment a samotný hřídel je poměrně složitou součástkou s hodně vruby. Pionýr byl levný motocykl pro širokou veřejnost, v té době byly vyráběny spíše pro množství a nízkou cenu, než kvalitu. I přes výše zmíněné vady byl tento hřídel schopen vydržet několik desítek let a možná déle, než samotní konstruktéři zamýšleli.

Bylo by zajímavé pozorovat, vícero těchto hřídelů vyráběných přes různé výrobní roky a zjistit, jestli tyto vady byly způsobeny špatnou dodávkou materiálu, či chybou při výrobě ozubení, nebo takový to materiál byl běžný u většiny vyrobených strojů.



Obrázek 39 – Ukázka další poškozené hřídele

- **Možnosti nápravy**

V současnosti si myslím, že by takový to materiál neprošel kontrolou kvality, a to ani za cenu nízkých výrobních nákladů. Domnívám se totiž, že dříve nebylo možné, nebo tak běžné zjistit tyto vady jako dnes. Metalurgie postoupila vpřed a při dnešní výrobě a zpracování ocele se vyvarujeme takovým to chybám.

Pro zamezení tohoto poškození by bylo nutné řádně dodržovat kontrolu napnutí řetězu, případně k odstranění této vady zvolit jinou kvalitu materiálu, který by neměl výše zmíněné vady a při podobném dynamické rázu by materiál vydržel, případně by u něho došlo pouze k plastické deformaci.

Použité zdroje

- [1] Binární diagram železo-uhlík. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Bin%C3%A1rn%C3%AD_diagram_%C5%BEelezo-uhl%C3%ADk
- [2] *Dílenská příručka jawa 50 pionýr* [online]. Považská bystrica: Považské strojárne, 1978 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.jawa-50.cz/clanek/dokumentace-prirucky-navod-kobsluze-katalog-dilu-servisni-dilenska-knizka.html>
- [3] FREMUT, P.- PODHRADSKÝ, T. Konstrukční oceli. Brno: VUT/CERM, 1996. ISBN 80-85867-95-8
- [4] Fyzikální základy vědy o materiálech [online]. Brno, 2013 [cit. 2017-05-28]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/>. Masarykova univerzita, Pedagogická Fakulta, Fyzikální oddělení.
- [5] Fyzikální základy vědy o materiálu. In: Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity [online]. Brno, 2017 [cit. 2017-05-31]. Dostupné z: http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/fmkomplet_soubory/image055.jpg
- [6] Charpyho kladivo. [online]. [cit. 2014-07-15]. Dostupné na : <http://www.noze-nuz.com/recenze/vlastnosti-damasku/vlastnosti-damasku.php>
- [7] Iontová vazba. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Iontov%C3%A1_vazba
- [8] Kovalentní vazba. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Kovalentn%C3%AD_vazba
- [9] Kovová vazba. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Kovov%C3%A1_vazba
- [10] Křehký lom. In: Docplayer [online]. 2017 [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/43686798-Houzevnatost-i-zakladni-pojmy-tranzitni-lomove-chovani-oceli-teplotni-zavislost-pevnostnich-vlastnosti-fraktografie-ii.htm>
- [11] Kubická sústava. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-31]. Dostupné z: https://sk.wikipedia.org/wiki/Kubick%C3%A1_s%C3%BAstava

- [12] KUNZ, J. Základy lomové mechaniky. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02248-X
- [13] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky. 4. Úvaly: Albra – pedagogické vydavatelství, 2008. ISBN 978-80-7361-051-7.
- [14] Princip třírychlostní převodovky jawa 50. In: [Http://mlgeardesigns.blog.cz](http://mlgeardesigns.blog.cz) [online]. Praha: TvNova, 2014 [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: <http://mlgeardesigns.blog.cz/1403/princip-triryhlostni-prevodovky-jawa-50>
- [15] PTÁČEK A KOL. Nauka o materiálu I., II.. Brno: VUT/CERM, 2001
- [16] SCHMIDOVA, Eva. Mechanické chování materiálu. In: *Portal studijní agendy* [online]. Pardubice, 2015 [cit. 2017-05-31]. Dostupné z: <https://portal.upce.cz/portal/studium/moje-studium/studijni-materialy.html>
- [17] SCHMIDOVA, Eva. Překrystalizace. In: *Portal studijní agendy* [online]. Pardubice, 2015 [cit. 2017-05-31]. Dostupné z: <https://portal.upce.cz/portal/studium/moje-studium/studijni-materialy.html>
- [18] Strojírenská technologie – 1. ročník Vlastnosti materiálů – pružnost, pevnost. In: *Strojirensťví engineering* [online]. Praha, 2007 [cit. 2017-05-31]. Dostupné z: http://www.strojirensťvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a_pruznost_pevnost.php
- [19] Tvárný lom. In: Docplayer [online]. [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/docs-images/59/43686798/images/13-0.png>
- [20] Vlastnosti kovových materiálů a jejich zkoušení. *Jhamernik* [online]. Pelhřimov, 2003 [cit. 2017-05-31]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm>

Seznam příloh

Příloha A – Metalografická analýza

Příloha B – Snímky z elektronového mikroskopu

Příloha A

26.8.2016 9:40:55

Atest - Q8 MAGELLAN

Sample Identification

Jakost Jmeno vzorku HRIDEL Cislo vzorku JAWA

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%

1.	0.14	0.23	1.12	0.017	0.016	1.054	0.041	0.329	0.018	0.011
2.	0.14	0.23	1.13	0.017	0.016	1.051	0.042	0.330	0.019	0.012
3.	0.14	0.23	1.13	0.016	0.015	1.044	0.041	0.328	0.019	0.012

↑

↑

□

□

↓

σ

υ

			0.01	0.00071	0.00071	0.0051	0.00071	0.0010	0.00071	0.00071
			0.885	4.176	4.438	0.486	1.732	0.304	3.737	5.917

	Cu	Ti	V	Pb	Sn	Mg	Bi	Ce	Sb	B
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%

1.	0.235	0.0015	0.0069	<0.0010	0.012	<0.0010	0.0019	<0.0010	0.021	0.00026
2.	0.233	0.0015	0.0074	<0.0010	0.011	<0.0010	0.0024	<0.0010	0.022	0.00028
3.	0.233	0.0015	0.0073	<0.0010	0.011	<0.0010	0.0021	<0.0010	0.022	0.00030

↑

↑

□

□

↓

σ

υ

	0.0012		0.00026		0.00071		0.00025		0.00071	0.00002
	0.513		3.611		6.455		11.90		3.227	7.143

	Zn	Fe
	%	%

1.	0.0015	96.73
2.	0.0015	96.72
3.	0.0015	96.74

↑

↑

□

□

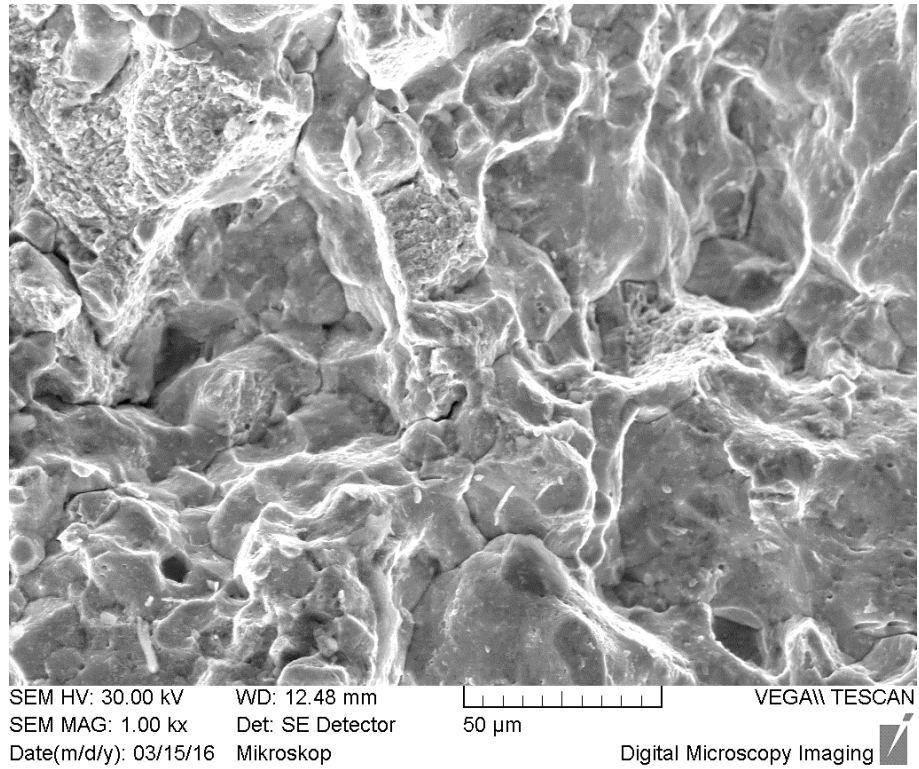
↓

σ

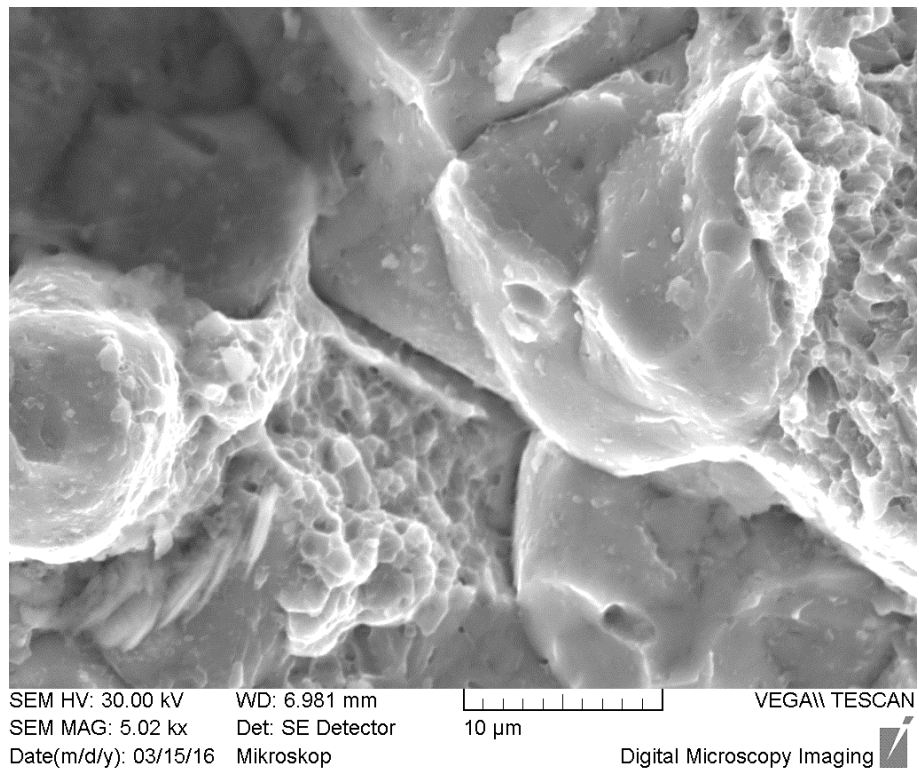
υ

	0.0100
	0.010

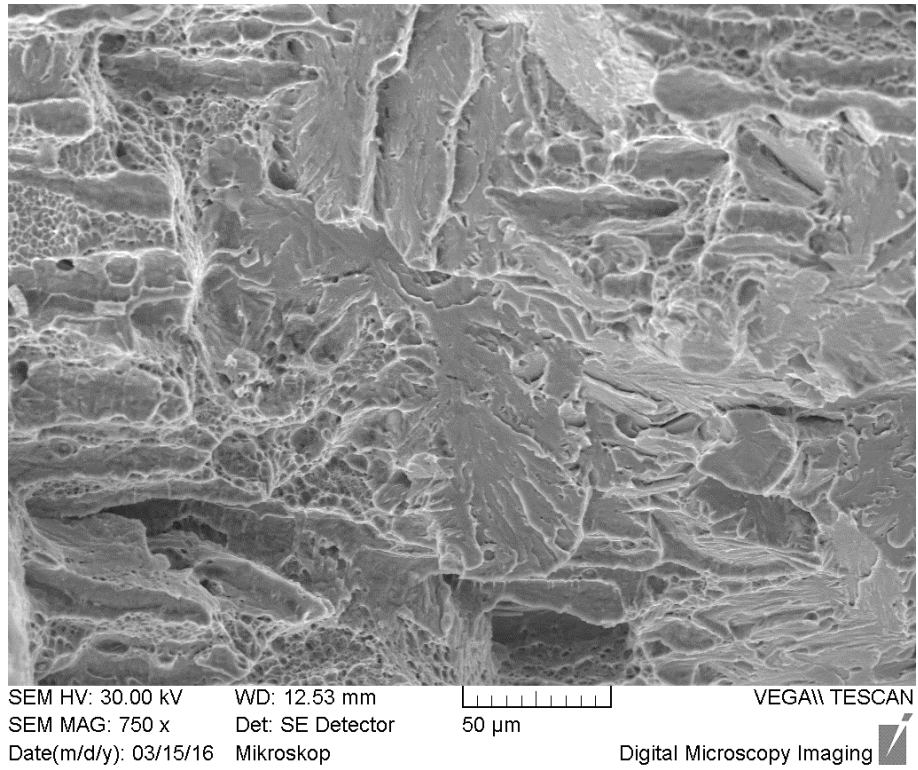
Příloha B – Snímky z elektronového mikroskopu



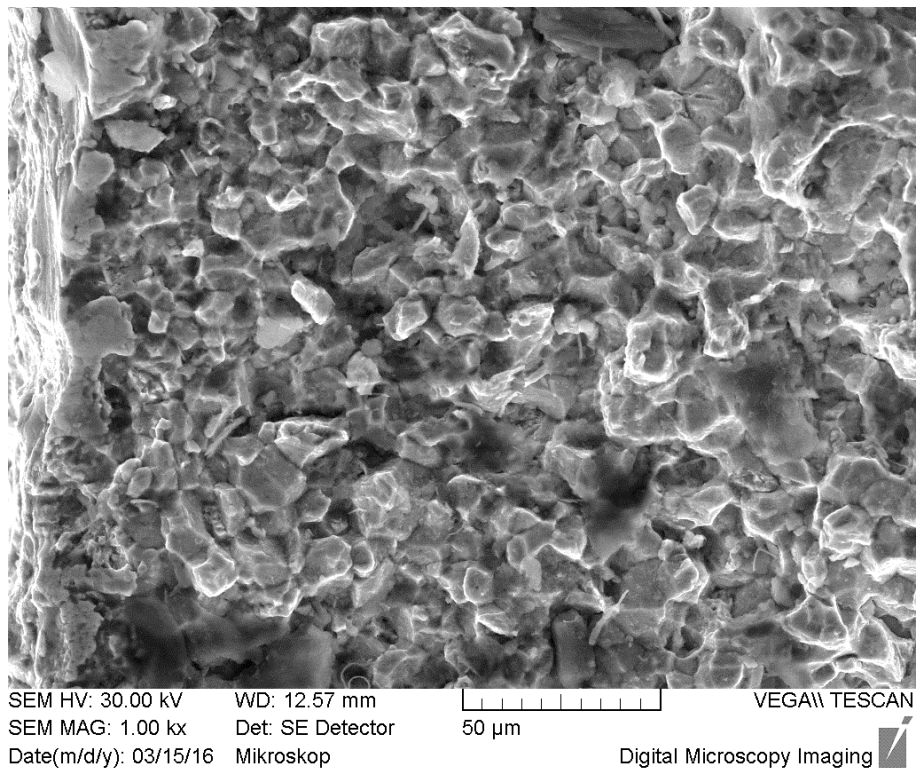
Povrch lomové plochy, další místa s interkrystalickým lomem.



Tvárný a štepový lom.



Převažující podíl štěpného lomu.



Okraj zubu, mezikrystalický lom, jemnozrnější struktura.