

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B0715A270013 – Strojní inženýrství

Studijní specializace: Strojírenské materiály a technologie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Analýza deformačních jevů pomocí vysokorychlostního záznamu

Autor: Vít ROUŠAR

Vedoucí práce: Ing. Petr BENEŠ, Ph.D.

Akademický rok 2020/2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Vít ROUŠAR**
Osobní číslo: **S19B0683P**
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenské materiály a technologie**
Téma práce: **Analýza deformačních jevů pomocí vysokorychlostního záznamu**
Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Zásady pro vypracování

1. Základní deformační mechanismy kovových materiálů
2. Statické a dynamické mechanické zkoušky
3. Podstata, tvorba a specifika vysokorychlostního záznamu
4. Experimentální program
5. Využití naměřených dat z vysokorychlostního záznamu pro charakterizaci deformačních jevů
6. Diskuse
7. Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30-40 stran**
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Tsuji, Kinko, Ed., *The Micro-World Observed by Ultra High-Speed Cameras*, Springer International Publishing, 2018.

IDT – Motion Studio:, *User manual*, 2015.

ASM Handbook, *Volume 8, Mechanical testing and evaluation*, 2018, 49(7), ASM International.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Beneš, Ph.D.**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant bakalářské práce: **Doc. Ing. Václav Machek, CSc.**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Datum zadání bakalářské práce: **6. října 2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **28. května 2021**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: ...24.5.2021...



.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Roušar	Jméno Vít	
STUDIJNÍ PROGRAM	B0715A270013 Strojní inženýrství		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Beneš, Ph.D.	Jméno Petr	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST – KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Analýza deformačních jevů pomocí vysokorychlostního záznamu		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2021
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	52	TEXTOVÁ ČÁST	52	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Tato bakalářská práce se zabývá analýzou deformace během rázové zkoušky metodou Charpy. Cílem je stanovit rozdílnou rychlost šíření trhlin. Zkušební vzorky jsou z oceli ČSN 11 373 v nezpracovaném, žíhaném a vodíkově zkřehlém stavu. Další částí je rázová zkouška oceli ČSN 14 260. Experimentální část popisuje postup analýzy, kdy je zkoumáno šíření trhliny na základě rozboru vysokorychlostního záznamu mechanické zkoušky.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p style="text-align: center;">analýza, deformace, křehkost, ohyb, snímková frekvence, trhlina, vodík, vysokorychlostní kamera</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Roušar	Name Vít		
STUDY PROGRAMME	B0715A270013 Mechanical Engineering			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Beneš, Ph.D.	Name Petr		
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Analysis of deformation by using high-speed recording			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2021
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	52	TEXT PART	52	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>This bachelor thesis explores the analysis of deformation during the Charpy impact test. The aim of the thesis is to determinate different speed of crack propagation. The test samples are made from steel ČSN 11 373 without post-processing, in annealed condition and in hydrogen embrittlement condition. The next part is about impact test of steel ČSN 14 620. The experimental part describes process of analysis, where crack propagation is examined by using high-speed recording of the mechanical test.</p>
KEY WORDS	<p style="text-align: center;">analysis, bend, crack, deformation, fragility, frame rate, high-speed camera, hydrogen</p>

Poděkování

Touto cestou bych rád velmi poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Petru Benešovi, Ph.D, za cenné rady a za velmi ochotnou pomoc při řešení problémů v rámci mé bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině, přítelkyni a kamarádům za neustálou a velmi významnou podporu při psaní této bakalářské práce, ale také během celého svého dosavadního studia.

Obsah

1	Úvod	11
2	Základní deformační mechanismy kovových materiálů.....	12
2.1	Napětí.....	12
2.2	Deformace	12
2.2.1	Pružná (elastická) deformace	13
2.2.2	Trvalá (plastická) deformace.....	13
2.3	Deformační mechanismy	13
2.3.1	Skluž dislokací	13
2.3.2	Dvojčatění dislokací.....	14
2.4	Vliv deformace na strukturu materiálu.....	14
2.4.1	Na vnitřní strukturu	14
2.4.2	Na vnější strukturu	15
3	Mechanické zkoušení	16
3.1	Statické mechanické zkoušky	17
3.1.1	Statická zkouška tahem	17
3.1.2	Statická zkouška tlakem	17
3.1.3	Statická zkouška ohybem	18
3.1.4	Statická zkouška krutem.....	18
3.1.5	Statická zkouška stříhem.....	19
3.2	Dynamické mechanické zkoušky	19
3.2.1	Dynamické zkoušky rázem	20
3.2.2	Dynamické zkoušky únavové (cyklické)	21
4	Křehký a houževnatý typ poškození.....	23
4.1	Lomová mechanika.....	23
4.2	Lomový proces a typy lomu	23
4.2.1	Houževnatý (smykový) lom	23
4.2.2	Křehký (štěpný) lom.....	23
4.3	Trhliny	24
4.3.1	Materiálové faktory ovlivňující šíření trhlin	24
5	Pružinové oceli a oceli legované borem	25
5.1	Pružinové oceli	25
5.2	Oceli legované borem.....	26
5.2.1	Bor.....	26

5.2.2	Využití.....	26
5.3	Nebezpečí vodíku v oceli	26
6	Vysokorychlostní záznam.....	28
6.1	Princip záznamu	28
6.2	Obrazové senzory	28
6.3	Základní veličiny nastavované při záznamu.....	29
6.3.1	Rozlišení záznamu.....	30
6.3.2	Snímková frekvence záznamu.....	30
6.3.3	Doba expozice	30
6.3.4	Hloubka ostrosti	31
6.3.5	Světlost (jas) záznamu.....	31
6.3.6	Spouštěč (pre-trigger, trigger, post-trigger)	31
6.4	Fyzikální limity.....	31
6.4.1	Z pohledu osvětlení	32
6.4.2	Paměťová kapacita kamery	32
6.4.3	Problematika výrazné svítivosti zkoumaného děje	32
7	Experimentální část	33
7.1	Rázové zkoušky oceli ČSN 11 373	33
7.1.1	Materiál a geometrie zkušebních vzorků	33
7.1.2	Navodíkování oceli za pomoci elektrolýzy	34
7.1.3	Žihání oceli.....	34
7.1.4	Průběh zkoušky	34
7.1.5	Obrazová analýza a výpočty	35
7.2	Rázové zkoušky pružinové oceli ČSN 14 260	44
8	Diskuze výsledků.....	45
9	Závěr.....	47
10	Použitá literatura.....	48

Použité zkratky a jednotky

Zkratky

CCD – zařízení s vázanými náboji
CMOS – komplementární polovodič oxidu kovu
ČSN – československá státní norma
DIC – digitální korelace obrazu
FCC – kubická plošně středěná krystalová mřížka
HCP – hexagonálně těsně uspořádaná krystalová mřížka
HSLA – vysokopevnostní nízkolegované oceli
Max. – maximálně
Min. – minimálně
Např. – například
Obr. – obrázek
RGB – „red-green-blue“ = červená-zelená-modrá
SMPTE – Společnost filmových a televizních techniků
Tab. – tabulka
Tzn. – to znamená
Tzv. – tak zvaný
Zk. – vodíkově zkřehlé

Jednotky

° – stupeň
°C – stupeň Celsia
A – ampér
fps – „frames per second“ = snímky za sekundu
HRC – tvrdost dle Rockwella
Hz – hertz
J – joule
m – metr
mm – milimetr
MPa – megapascal
hPa – hektopascal
ppm – „parts per milion“ = částic na jeden milion
px – pixel
s – sekunda
μs – mikrosekunda
TB – terabyte
V – volt

1 Úvod

Analýza deformačních jevů patří do skupiny nejdůležitějších operací s ohledem na bezpečnost konstrukce. Zkoumáním deformace lze předejít nežádoucímu defektu materiálu a zabránit tak škodě nebo případnému zranění způsobeného selháním materiálu. Pro ocelové konstrukce může být velmi nebezpečná tzv. vodíková křehkost, ke které dochází difuzí vodíku v oceli a následným vznikem bublin na hranicích zrn. Nastává ztráta tvárnosti a snížení únosnosti materiálu.

Experimentální část této bakalářské práce je zaměřena na analýzu rázové, a tedy dynamické zkoušky oceli metodou Charpy. Při rázové zkoušce je pozorován rozdíl průběhu a rychlosti šíření trhliny v případě tepelně nezpracovaného stavu, vodíkově zkřehlého stavu, žíhaného stavu a žíhaného stavu s následným navodíkováním konstrukční oceli ČSN 11 373. Ocel je testována za pomoci nenormalizovaných vzorků s vrubem U i V. Další částí experimentu je analýza pružinové oceli ČSN 14 260 opět při rázové zkoušce. Pružinová ocel ČSN 14 260 je hojně využívána pro svou vysokou houževnatost jako vhodný materiál pro velmi namáhané pružiny.

Výraznou komplikací analýzy je rychlost celého jevu, který je v případě rázové zkoušky lidským zrakem téměř nepozorovatelný. Pro vytvoření použitelného záznamu bylo využito vysokorychlostní kamery IDT NX4-S3 s obrazovým snímačem typu CMOS, která dokáže zaznamenávat až 160 000 snímků za vteřinu. Vysokorychlostní kamery se především v posledních letech stávají nedílnou součástí materiálové analýzy, a to právě za účelem vytvoření zpomaleného záběru pozorovaného jevu a jeho následného rozboru.

2 Základní deformační mechanismy kovových materiálů

2.1 Napětí

Napětí lze definovat jako velikost vnitřní síly vztažené na plochu tělesa. Jedná se o veličinu vyjadřující stav napjatosti tělesa. [1] [6]

Na základě směru působení jsou rozlišovány dva typy napětí:

- Normálové napětí σ
 - v případě, že síla (síly) působí na průřezovou plochu tělesa kolmo, je typické pro namáhání v tlaku, tahu
- Smykové (tangenciální) napětí τ
 - působící síla (síly) působí v rovině průřezu [1] [6]

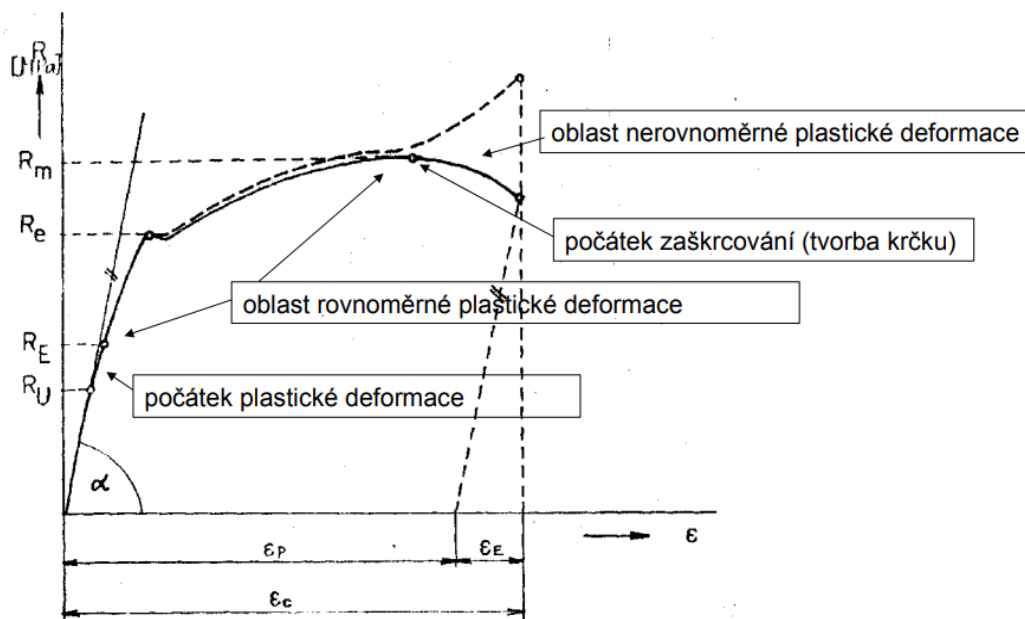
V některých případech dochází ke kombinaci normálového a smykového napětí. [1] [6]

2.2 Deformace

Pojem deformace definuje změnu tvaru, tzn. vzájemný posuv jednotlivých bodů tělesa vůči sobě, vlivem působící síly. Je viditelná, tedy i měřitelná. [1]

Základní typy deformace dle vratnosti děje jsou:

- Pružná (elastická) deformace
- Trvalá (plastická) deformace [1]



Obr. 1: Smluvní diagram tahové zkoušky materiálu s výraznou mezí kluzu [3]

Na obr. 1 je viditelné rozdělení elastické a plastické deformace v průběhu statické zkoušky tahem kovového materiálu. Tímto dělicím bodem je bod R_E neboli mez elasticity. [3]

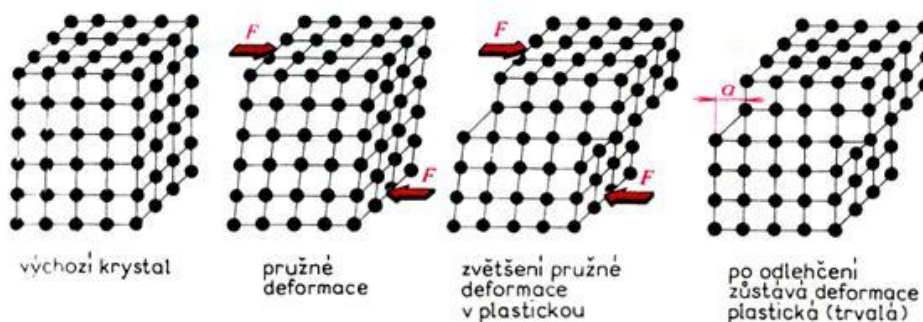
Deformace je závislá na napjatosti, rychlosti deformace, rychlosti zatěžování, teplotě, zpevnění materiálu, chemickém složení a tření. Všechny tyto vlastnosti definují tzv. deformační odpor. Jedná se o odpor kovu vůči změně tvaru. [7]

2.2.1 Pružná (elastická) deformace

V případě pružné deformace dochází k vymizení změny tvaru po odlehčení působících sil. Je možná pouze do určitého (malého) stavu napětí. Těleso se vrací do původního tvaru a nabývá svého původního objemu. Pružná deformace je umožněna pouze malým posunem vůči vzájemné poloze atomů v krystalografické mřížce. Po překročení meze elasticity nastává deformace trvalá (plastická). [1]

2.2.2 Trvalá (plastická) deformace

Trvalá deformace nastává po překročení meze elasticity materiálu. Po dosažení této meze se jedná o nevratnou deformaci, tedy po odlehčení sil nedochází k návratu do původního tvaru a objemu. Při této deformaci mohou začít vznikat trhliny. [1]



Obr. 2: Schéma pružné deformace přecházející na trvalou deformaci [7]

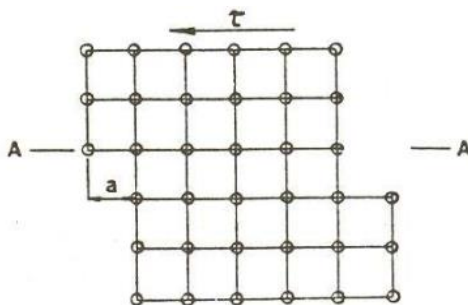
2.3 Deformační mechanismy

Plastická deformace je umožněna pohybem dislokací, tedy čárovými poruchami krystalové mřížky. Tyto poruchy lze definovat jako polohové přesuny několika atomů při skluzovém pohybu vůči sousedním vrstvám. Jejich důležitou vlastností je možnost pohybu skrze krystalovou mřížku. Výskyt dislokací v krystalu ovlivňuje mechanismy pružné a plastické deformace. [10] [13]

Jsou známy dva základní druhy mechanismy deformace, přičemž v případě vyšší teploty jsou navíc možné ještě mechanismy tzv. pokluzu po hranicích zrn a tečení difúzní a dislokační. Je nutné si uvědomit, že vždy se prioritně rozvíjí ten mechanismus, který vyžaduje menší napětí. [3] [7]

2.3.1 Skluz dislokací

Skluz je patrný v místech, která jsou nazývána skluzové roviny a skluzové směry. Jedná se o krystalografické roviny a směry s nejvyšší hustotou atomů. Společně tvoří skluzový systém. Je to nejčastější deformační mechanismus. [3] [10]



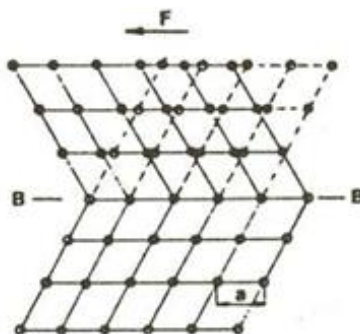
Obr. 3: Schéma deformace skluzem v dokonalé krystalové mřížce [3]

Ke skluzu dochází při působení skluzového napětí, které je větší než kritické skluzové napětí. V tomto případě dochází k posunu atomů ve skluzových rovinách až o několikanásobek mezi atomových vzdáleností, což je dobře patrné z obrázku *obr. 2*. Na obrázku je vidět skluzová rovina A-A za působení smykového napětí τ . [3]

2.3.2 Dvojčatění dislokací

Jedná se o druhotný deformační mechanismus, jelikož při dvojčatění je kritické napětí vyšší než u skluzu. Dochází tedy mnohem častěji ke skluzu a dvojčatění se vyskytuje převážně tam, kde se nenachází dostatek skluzových systémů. Nejčastěji se vyskytuje u kovů s kubickou plošně středěnou krystalovou mřížkou (FCC) a s hexagonální těsně uspořádanou krystalovou mřížkou (HCP). [10]

Dvojčatění je způsobeno průchodem neúplné dislokace krystalem. Jedná se o zvláštní případ koordinovaného skluzu, na rozdíl od skluzu se však atomy přemístí pouze o část meziatomové vzdálenosti. Dochází tedy k přesunu krystalové mřížky, která vytvoří zrcadlový obraz nepřesunuté části mřížky, viz *obr. 3*. Velmi nápomocné pro dvojčatění jsou velmi nízká teplota a vysoká deformační rychlost. [3] [6] [10]



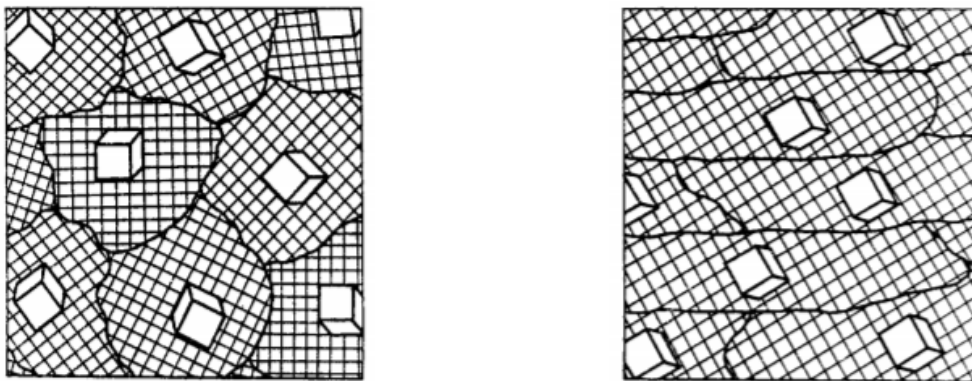
Obr. 4: Schéma deformace dvojčatěním v dokonalé krystalové mřížce [3]

2.4 Vliv deformace na strukturu materiálu

2.4.1 Na vnitřní strukturu

Při plastických deformacích materiálu dochází k významným vnitřním strukturním změnám, čehož se využívá při tváření. Samotné strukturní změny mají vliv na mechanické vlastnosti daného materiálu, které mohou pozitivně či negativně ovlivnit. Typickým projevem vlivu deformace je zpevňování materiálu, což je odpor vůči dalšímu tváření materiálu. Rostoucí odpor je výsledkem deformace zrn ve směru působících vnějších sil, z čehož také plyne anizotropie materiálu, tedy nestejnorodé vlastnosti materiálu z pohledu různých směrů souřadnicového systému. Zpevněním dochází k nárůstu meze pevnosti a kluzu, naopak k poklesu dochází v případě tažnosti. Anizotropie materiálu je přímo ovlivněna krystalografickým a geometrickým uspořádáním struktury, které známé pod pojmem textura. [30] [31]

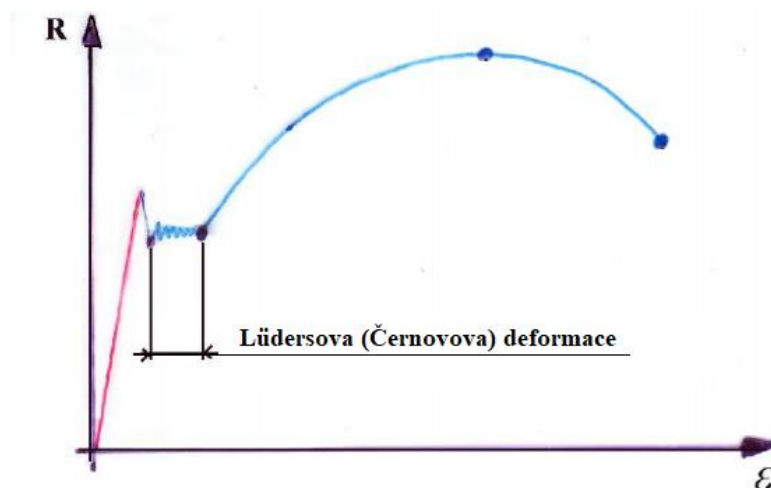
- Deformační textura strukturní (mechanická)
 - ovlivněna z velké část přítomností vměstků a nestejnorodostí chemického složení, projevuje se jako vláknitá nebo řádkovitá struktura
- Deformační struktura krystalografická
 - její vznik je podmíněn přeměnou náhodně orientovaných zrn do dané specifické orientace shodné se směrem působících vnějších sil [31]



Obr. 5: Původní a podeformační stav vnitřní struktury [31]

2.4.2 Na vnější strukturu

Deformace ovlivňuje také vnější strukturu materiálu, kterou lze opticky pozorovat. Častým projevem deformace jsou Lüdersovy (Černovovy) čáry, což jsou na povrchu viditelné skluzové pásy pod úhlem 45° vzhledem ke směru působící síly. Je to nežádáný jev, jelikož snižuje povrchovou kvalitu materiálu. Lüdersovy čáry jsou způsobeny intersticiálními atomy C a N v oceli, které mají brzdný vliv na deformaci, jelikož se právě v nich soustředí dislokace. Vznikají především u materiálů s výraznou mezí kluzu, tedy například u měkkých ocelí. [3]



Obr. 6: Smluvní diagram tahové zkoušky materiálu s vyznačenou Lüdersovo (Černovova) deformací [3]

V praxi je využíváno několika metod k pozorování a měření vzniklých deformací, které lze rozdělit na optické a kontaktní. Výhodou optických metod je bezkontaktnost, nehrozí tedy ovlivnění měřeného vzorku kontaktem se snímačem. Další výhodou je možnost dosažení mnohem vyšších přesností než kontaktními metodami. Mezi optické metody lze zařadit fotoelasticimetrii, stereometrické metody, metodu Moire nebo v dnešní době hojně využívanou metodu DIC, tedy digitální korelaci obrazu, která využívá výpočetní techniky k vyhodnocování přesunů jednotlivých bodů materiálu před a po deformaci. [33] [34]

Kontaktní metody využívají přímo mechanických snímačů upevněných na měřeném tělese, což ale může negativně ovlivnit samotný měřený vzorek. Měření spočívá v zachycení délkových nebo odporových změn během deformace. Je možné použít několik druhů snímačů, jako extenzometry nebo tenzometry. [34]

3 Mechanické zkoušení

Mechanické zkoušení materiálu je dnes přítomno téměř v každém výrobním odvětví, případně s ním alespoň kooperuje. Vždy je třeba nejprve ověřit, zda materiál splňuje dané fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti, než je možné jej použít. Samozřejmě každá součást může být namáhána jiným způsobem zatížení, a proto je nutné stanovit vhodné mechanické zkoušky. [8]

Mezi nejdůležitější vlastnosti materiálu, které je třeba často znát a počítat s nimi patří:

- Pevnost
 - schopnost soudržnosti materiálu zatíženého vnějšími silami
- Houževnatost
 - odolnost materiálu vůči prasknutí, při deformaci
- Pružnost
 - schopnost materiálu vrácení do původního tvaru po odlehčení působících sil
- Tvrdost
 - odpor materiálu vůči síle deformující vnější vrstvu materiálu
- Tvárnost
 - schopnost materiálu v tuhém stavu měnit svůj tvar (vzájemnou polohu částic) při působení vnějších sil bez porušení soudržnosti [8]

Co je důležité si pro testování uvědomit je, že výsledkem dané mechanické zkoušky, není absolutní hodnota vlastnosti materiálu. Získáme z nich pouze hodnoty, které jsou důležité pro následné pevnostní výpočty jednotlivých součástí. Vždy je nutné výsledek zkoušky vztahovat k okolnostem, za kterých zkouška probíhá. Žádné dvě části i stejného materiálu nejsou vždy zaručeně naprosto shodné. Zkoušky jsou proto často přísně normalizovány ať už tvarem zkoušeného tělesa nebo působící silou a vnějšími podmínkami. Získanými hodnotami jsou však pouze minimální zaručené vlastnosti, které testovaný materiál za daných podmínek skutečně má. [1] [8] [11]

Obecné dělení mechanického zkoušení je na základě působení síly na zkušební těleso:

- Statické mechanické zkoušky
 - postupné zvyšování působící síly, těleso je zatěžováno po dobu několika vteřin, minut nebo hodin, v případě dlouhodobých testů několik dní až let
- Dynamické mechanické zkoušky
 - nárazové působení síly, doba působení je v rámci zlomku vteřiny, v případě cyklických testů se působení mnohokrát opakuje (zkoušení pružin) [1] [8] [15]

Speciálním typem mechanického zkoušení jsou zkoušky tvrdosti, Jedná se o zkoušky založené na vnikání normalizovaného tělesa do povrchu testovaného materiálu, dělí se na vrypové a vtlačovací, nebo statické a dynamické [1] [8] [15]

Mechanické zkoušky lze dělit samozřejmě také na základě jiných faktorů:

- dle fyzikálních podmínek zkoušky
 - teplota, doba trvání zkoušky, prostředí
- dle stavu napjatosti
 - tahové, tlakové, ohybové, krutové, stříhové zkoušky [8]

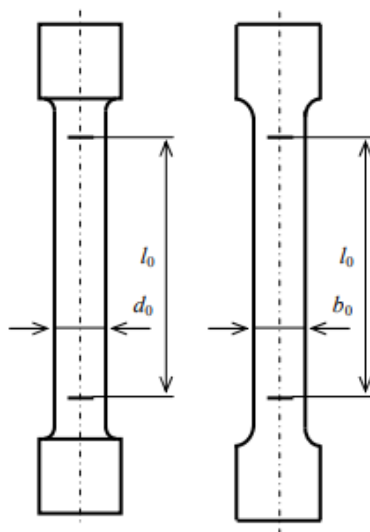
3.1 Statické mechanické zkoušky

Typ mechanických zkoušek, založených na postupném zvyšování působení vnějších sil, jejichž účelem je především poznatek o pevnosti materiálu. Jelikož ve skutečnosti dochází k různým typům zatěžování materiál, je nutné této skutečnosti zkoušky přizpůsobit. Existuje proto několik druhů statického testování, přičemž pro každý typ testu je normalizováno několik podmínek, které je nutné dodržet pro získ skutečných použitelných hodnot vlastností daného materiálu. Základní typy statických zkoušek rozdělujeme na zkoušku tahem, tlakem, ohybem, krutem a stříhem. [15]

3.1.1 Statická zkouška tahem

Nejčastěji využívaná statická zkouška v oblasti strojírenství. Zkouška spočívá v roztahování normalizovaného vzorku testovaného materiálu upnutého v čelistech trhacího stroje, které vzorek roztahují postupně rostoucí silou. [8]

Jako testované vzorky jsou používány normalizované zkušební válcové tyče nebo normalizované ploché tyče, které se používají především pro testování tenkých plechů, z nichž je nemožné utvořit válcový tvar. [8] [15]



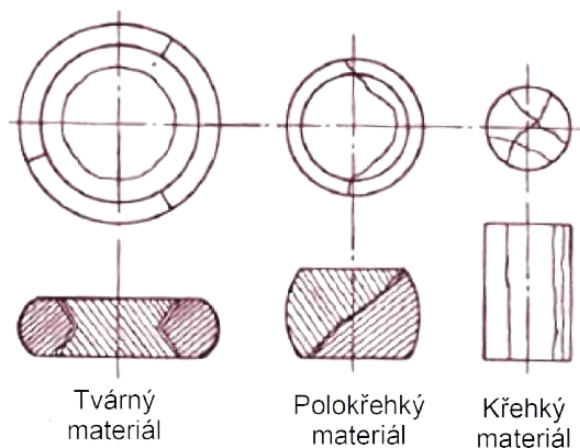
Obr. 7: Normalizovaný tvar vzorku statické zkoušky tahem [15]

Výstupem testu je diagram, znázorňující průběh tahové zkoušky v závislosti prodloužení tělesa l na zatěžovací síle F (případně poměrné prodloužení ϵ na napětí σ). Z diagramu jsou čitelné případně odvoditelné důležité hodnoty jako je mez pevnosti v tahu, mez kluzu v tahu nebo poměr plastické a elastické deformace, tažnost (prodloužení) nebo kontrakce (zúžení). [8] [15]

3.1.2 Statická zkouška tlakem

Zkouška opačného charakteru než zkouška tahová. Ke zkoušce lze využít shodný trhací stroj, který na testovaný vzorek působí dvojitou silou v ose zkušební vzorku. Síly působí vzájemně vůči sobě, a tak vytváří tlak. Zkušebním vzorkem nejčastěji bývá těleso válcovitého tvaru vyrobené z daného zkoušeného materiálu. Jedná se o nenormalizovanou zkoušku. Zjišťované mechanické vlastnosti jsou opět velmi obdobné. Jedná se převážně o mez pevnosti v tlaku, mez kluzu v tlaku, mezní poměrné stlačení nebo rozšíření. [9] [15]

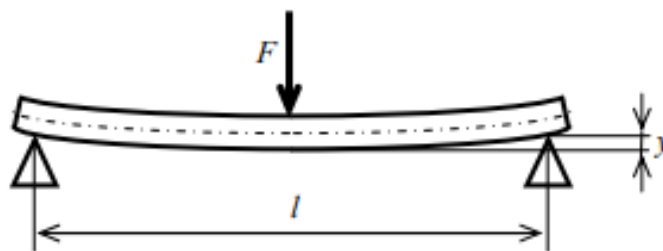
Nejčastější odvětví s využitím statické tlakové zkoušky, je stavebnictví. Často jsou vyžadovány pevnostní zkoušky betonů a jiných materiálů, které jsou dlouhodobě vystavovány tlaku. Měkčí a houževnatější materiály mají přibližně shodné hodnoty pevnosti v tlaku jako v tahu, z tohoto důvodu mají smysl především testy křehkých a polokřehkých materiálů. V případě materiálu křehčího, např. litiny, je výrazně patrná vyšší pevnost v tlaku než v tahu. Pokud se jedná opravdu o křehký materiál, dochází k rozdrčení vzorku. [9] [15]



Obr. 8: Chování jednotlivých typů materiálu při statické zkoušce tlakem [9]

3.1.3 Statická zkouška ohybem

Normalizovaná mechanická zkouška, využitelná převážně pro křehké materiály. U materiálů houževnatých nedochází při ohybu k porušení, zkouška je tedy bez výsledná. Normalizovaným tvarem vzorku bývá tyč válcového průřezu. Průběh zkoušky spočívá v postupném zatěžování uprostřed válcové tyče, podepřené na dvou podstavách. Speciální případem je také působení více sil. Výstupem zkoušky je pevnost v ohybu a poměrný průhyb φ vzorku v době porušení, který je závislý na rozestupu podpěr a celkovému průhybu. [1] [9] [15]



Obr. 9: Průběh statické zkoušky ohybem [15]

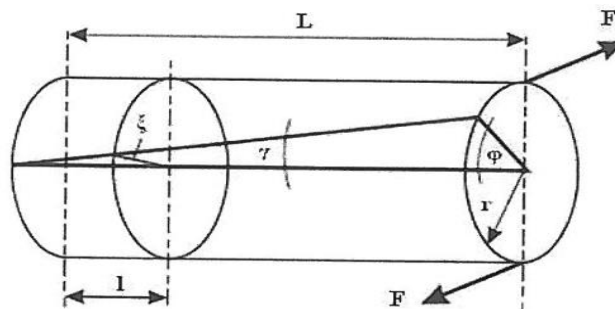
3.1.4 Statická zkouška krutem

Další z řady nenormalizovaných mechanických zkoušek. Zkouška je založena na zjištění pevnosti materiálu pomocí zkušební vzorku. Přičemž jeden její konec je pevně upnutý a na druhý působí postupně rostoucí kroučící moment, tedy dvojice sil kolmých na osu vzorku. [11] [15]

Výstupem zkoušky může být diagram zobrazující průhyb v závislosti na působící dvojici sil. Následně je z diagramu možné odečíst hodnoty meze pevnosti v krutu, meze kluzu v krutu, meze úměrnosti a meze pružnosti. [16]

Mezi další pozorované charakteristiky patří:

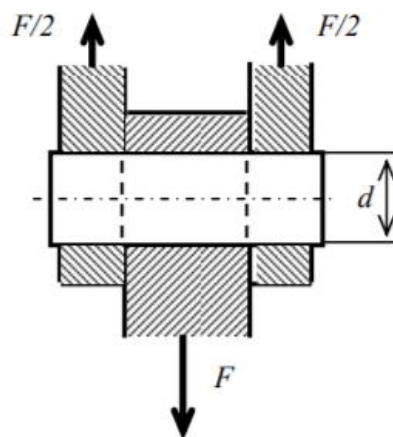
- Zkrut ξ
 - úhel zkroucení φ dělený délkou vzorku L
- Zkos γ
 - poměrný posun povrchového vlákna, který lze vypočítat jako součin úhlu zkroucení φ a poloměru vzorku r , dělený délkou vzorku L
- Úhel zkroucení φ [11] [16]



Obr. 10: Schéma namáhání vzorku krutem [17]

3.1.5 Statická zkouška stříhem

Zkouška, která se provádí pouze velmi výjimečně. Je založena na způsobu zátěže, která se co nejvíce blíží namáhání prostým smykem. Za pomoci sil působících od sebe dochází ke stříhu zkoušeného vzorku. Důležitou výstupní hodnotou je pevnost ve stříhu. [15]



Obr. 11: Schéma namáhání vzorku na stříh [15]

3.2 Dynamické mechanické zkoušky

Dynamické zkoušky jsou definovány náhlou, v mnohých případech i opakovanou, změnou zatížení. V případě dynamického zatížení je pevnost materiálu výrazně nižší než při zatěžování statickém. [15]

Na základě praxe je totiž nutné si uvědomit, že v mnohých případech ve skutečnosti nedochází k namáhání součástí pouze staticky, tedy s postupně se zvyšujícím (snižujícím) napětím. Často je součást namáhána náhle, tedy rázem, tomu je samozřejmě nutné uzpůsobit i mechanické zkoušení. [14] [15]

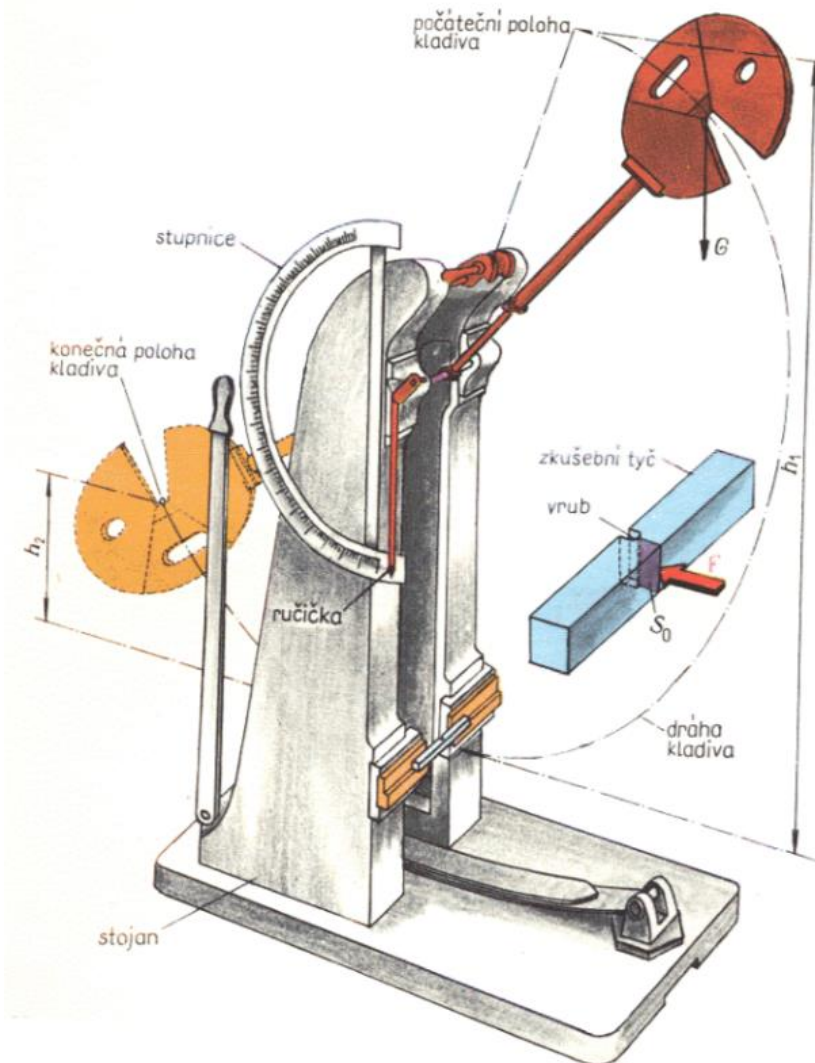
Základní typy mechanického dynamického zkoušení dle způsobu namáhání jsou:

- Zkoušky rázem
 - náhlé působení napětí
- Zkoušky únavové (zkoušky cyklické)
 - opakované zatížení
- Zkoušky kombinované [14] [15]

3.2.1 Dynamické zkoušky rázem

Stejně jako u statických zkoušek je možné provádět dynamické rázové zkoušky tahem, tlakem, ohybem, stříhem či krutem. Účelem rázových zkoušek je zjištění houževnatosti materiálu za pomoci zjištění práce vyžadované k porušení zkušební vzorku. [15]

Hojně využívanými dynamickými zkouškami jsou především normalizované zkoušky ohybové, které se dělí na metodu dle Charpyho a dle Izoda. Nejvýraznějším rozdílem těchto dvou metod je především uložení zkušební vzorku. [15]



Obr. 12: Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy [14]

V případě metody dle Charpyho je vzorek uložen na dvou podporách ve vzdálenosti 40 mm, zatímco metoda dle Izoda volí uchycení jednoho konce zkušebního tělesa. Obě metody však spočívají v přerážení tělesa za pomoci kyvadla. Z této zkoušky je vystupující hodnotou energie spotřebovaná k přerážení vzorku. Energie kyvadla nabývá hodnot 150, 300 nebo 450 J. [11]

Zkušebním vzorkem ohybové rázové zkoušky, je těleso hranolovitého tvaru. Jedná se o normalizovaný vzorek, v případě metody dle Charpyho o rozměrech podstavy 10 x 10 mm a délce 55 mm. Metoda dle Izoda využívá zkušební těleso o stejných rozměrech podstavy, ale s často větší délkou, sloužící k uchycení jednoho konce. [11]

Důležitým prvkem je vrub, který je koncentrátorem napětí zkušební vzorku. Bez použití vrubu by při zkoušení houževnatých materiálů nemuselo dojít k prasknutí, na rozdíl od materiálů křehkých, který nemusí být vrubem opatřeny. Existuje spousta druhů vrubů různých rozměrů, ale norma připouští pouze vrub typu V – 2 mm, nebo vrub typu U – 5 mm. Při zkoušce je vždy nutné uložit zkušební vzorek tak, aby vrub byl na opačné straně tělesa, než ze které dochází ke vniku kyvadla. [11]

Nepoužívanější vruby jsou:

- Vrub typu U
 - vhodný pro zkoušení perlitických a legovaných ocelí
- Vrub typu V
 - vhodný pro odlitky, svařitelné tvářené oceli a tvárnou litinu [11]

Jednotlivé vruby mohou mít také rozdílné rozměry. Nevýhodou je neporovnatelnost výsledků při kombinaci různých typů a rozměrů vrubů, či metod rázových zkoušek. [11]

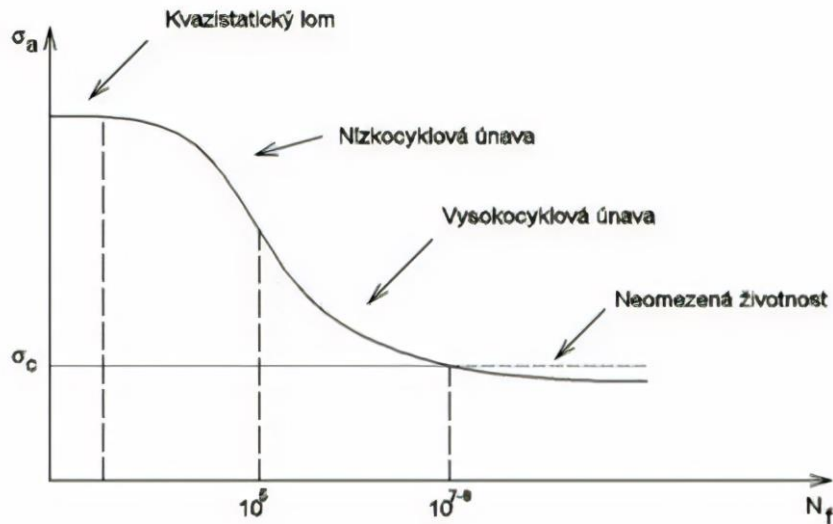
Výstupní hodnotu je absorbovaná energie, což je energie nutná pro přerážení vzorku, vycházející ze součinu tíhy kyvadla a výškového rozdílu počáteční a konečné polohy kyvadla. [11]

3.2.2 Dynamické zkoušky únavové (cyklické)

Velmi často v praxi vyskytujícím se jevem je opakované zatěžování součásti. Opakované zatěžování je také velký problém, protože při něm často dochází k poruše soudržnosti, aniž by bylo dosaženo meze pevnosti materiálu. Tento jev se nazývá únava materiálu. Z toho důvodu je nutné materiál otestovat způsobem, co nejbližšímu praxi. Opět je možné volit zatěžování tahem, tlakem, krutem nebo ohybem.

Nejobvyklejším způsobem zatěžování je zkouška v ohybu, jelikož ohybové zatížení je nejnebezpečnější z pohledu součásti. Ačkoliv v praxi je materiál velmi často zatěžován nepravidelně, v laboratorních podmínkách mechanických zkoušek je z důvodu náročnosti simulace podmínek nutné uvažovat pouze pravidelné zatěžování. Materiál je během zkoušky zatěžován pravidelně (cyklicky), avšak různě dle charakteru vznikajícího napětí, které může být pulzující, míjivé, střídavé souměrné a střídavé nesouměrné. [15]

Grafickým výstupem únavové zkoušky je například Wöhlerova křivka. Křivka rozděluje materiál podle počtu cyklů zatížení, než dojde k lomu, do několika skupin únavové životnosti. Symbolizuje závislost počtu cyklů na zatěžujícím napětí. Různé typy materiálů vyžadují různý počet cyklů. [15] [18]



Obr. 13: Schéma Wöhlerovy křivky [18]

V případě oceli postačí přibližně 10^7 cyklů, ke stanovení potřebných hodnot. Kovy neželezné je nutné zkoušet i déle, jelikož vady se mohou začínají projevovat o mnoho cyklů později. Z Wöhlerovi křivky lze následně určit tzv. mez únavy, tedy hodnotu napětí, při kterém materiál teoreticky vydrží nekonečný počet zatěžujících cyklů. [15] [18]

4 Křehký a houževnatý typ poškození

4.1 Lomová mechanika

Tento vědní obor umožnil definovat, co ovlivňuje soudržnost materiálu nejen z pohledu samotného materiálu, ale i jeho okolí a reálného stavu. Reálný stav lze v tomto případě definovat jako materiál s vyskytujícími se trhlinami za různé teploty a jiných fyzikálních vlivů okolí. Právě díky tomu lze převést naměřená data ve zkušebně na reálný případ. Stanovené hodnoty bývají často velmi výrazně nižší než v mnohdy takřka ideálních podmínkách zkušebny. Hlavním cílem lomové mechaniky je určení vlivu defektů na vlastnosti materiálu z hlediska životnosti a pevnosti a také popis chování trhlín a defektů. Mezi ovlivňující parametry lze řadit velikost a typ napětí, lomovou houževnatost materiálu a také vlastnosti již stávající trhlíny jako je její velikost, tvar, orientace a rychlost jejího šíření. Přístupem lomové mechaniky lze velmi výrazně přispět k omezení šíření trhlín a zamezit tak porušení. Častým využitím lomové mechaniky ovšem je i opačná úvaha, kdy je cílem materiál co nejefektivněji poškodit po vynaložení co nejmenšího množství energie, což se využívá například při důlní těžbě nebo třískovém obrábění. [2] [4]

4.2 Lomový proces a typy lomu

Jednotlivé typy lomu jsou závislé na lomovém procesu. Jedná se o vznik nových lomných ploch v materiálu způsobené právě šířením trhlín. Velmi výrazný vliv na lomový proces má právě houževnatost materiálu, tedy odolnost materiálu vůči prasknutí při deformaci, jinými slovy schopnost plastické deformace materiálu. Lze také říct, že houževnatost stanovuje energii, kterou je schopný materiál absorbovat. Houževnatost je závislá na krystalografické mřížce materiálu. V případě rostoucí schopnosti plastické deformace, roste také houževnatost materiálu, a právě houževnatost má velký vliv na typ vzniklého lomu. [4]

4.2.1 Houževnatý (smykový) lom

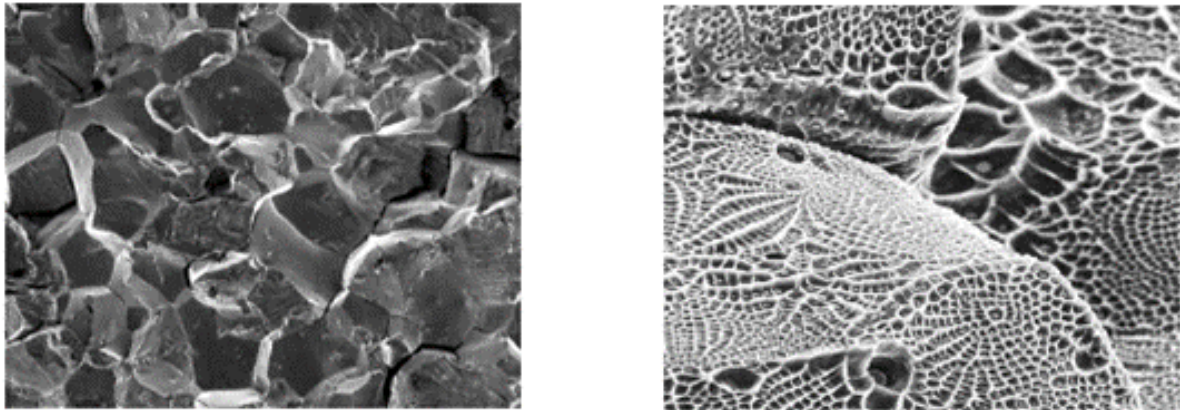
Vzniká u materiálů s vysokou schopností plastické deformace při zatěžování za normální teploty. Jeho šíření je pomalé a stabilní za vysoké spotřeby mechanické energie na plastickou deformaci materiálu. Struktura lomu je velmi hrubého charakteru a dochází k velmi výrazné plastické deformaci. Typickým zástupcem materiálu se vznikem houževnatého lomu za normální teploty je nízkouhlíková ocel. Z důvodu stabilního šíření trhlín, tedy šířením trhliny pouze se zvyšujícím se zatížením, lze považovat houževnatý lom za bezpečný. [1] [11]

4.2.2 Křehký (štěpný) lom

Jedná se o typ lomu, který se vyskytuje především u křehkých, ale i u houževnatých materiálů. Po vzniku lomu nejsou patrné známky plastické deformace. V tomto případě dochází ke schopnosti lokálního napětí porušovat meziatomární vazby (štěpný mechanismus) za využití mnohem menší energie, než by byla potřebná pro porušení materiálu houževnatého. Křehký lom je charakterizován plochým a poměrně hladkým povrchem. Šíření trhlín skrze materiál postupuje nestabilně, velmi rychle a často bez možnosti mu zabránit. [1] [11]

Ne vždy je však ke vzniku křehkého lomu potřeba křehkého materiálu. Právě z toho důvodu je křehký lom v konstrukci nebezpečný. Je několik podmínek, za kterých i houževnatý materiál může utvořit křehký lom. Některé z ovlivňujících parametrů jsou, například rychlost zatěžování, agresivita prostředí chemické složení nebo radiační ozáření materiálu. [1] [4] [11]

Nejvýraznějším parametrem ovlivňujícím typ vzniklého lomu je teplota. Jelikož vznik křehkého lomu vyžaduje mnohem méně energie než vznik lomu houževnatého, roste při nižší teplotě pravděpodobnost, že vzniklý lom bude právě křehký. Teplota, pod kterou by se daný materiál neměl dostat, právě z pohledu zamezení vzniku křehkého lomu, se nazývá přechodová (tranzitní) teplota. Právě pod přechodovou teplotou je zamezeno stabilnímu šíření trhliny o povolené velikosti. [1] [4] [11]



Obr. 14: Povrch lomu – vlevo: houževnatý (smykový), vpravo: křehký (štěpný) [4]

4.3 Trhliny

Jedná se o vady, které vznikají především při technologických procesech a často se jim není možné z technologického hlediska vyvarovat. Jsou odhalitelné nedestruktivními defektoskopickými metodami. Trhliny se šíří po hranicích zrn nebo skrze zrna, tedy transkrystalicky. [12] [20]

4.3.1 Materiálové faktory ovlivňující šíření trhlin

Na chování trhlin z pohledu šíření má vliv vnější zatížení, konfigurace trhlin, jejich poloha, tvar konstrukce a mechanické vlastnosti materiálu. Šíření samotných trhlin je ovlivněno dvěma protichůdnými parametry. Prvním z nich je hnací síla, reprezentující práci vloženou vnějšími zatěžovacími silami, které podporují šíření trhliny. Druhým parametrem je odpor proti šíření trhliny, který se především pomocí mechanismů v materiálu brání a ovlivňuje rychlost šíření trhlin. Právě na základě poměru těchto parametrů lze určit, zda se trhlina v materiálu šíří. Rychlost šíření trhliny lze také zpětně odvodit u již porušených materiálů pomocí fraktografických metod, tedy pozorováním charakteristiky lomné plochy. [12] [20]

Ačkoliv je obecné řešení napjatosti v okolí trhliny poměrně složité lze řešení stavu napjatosti v okolí trhliny zredukovat a lze jej stanovit pomocí metody superpozice 3 základních módů namáhání trhliny v podobě rovinných úloh. [4] [5]

- I. Normálový mód (tah, tlak)
- II. Podélný (rovinný) smykový mód
- III. Příčný (antirovinný) smykový mód [4] [5]

Na základě superpozice jednotlivých módů lze stanovit faktor intenzity napětí, což je veličina popisující stav napjatosti v blízkosti čela trhliny. Pomocí faktoru intenzity napětí lze stanovit stabilitu / nestabilitu trhliny. [5]

5 Pružinové oceli a oceli legované bórem

Jelikož v rámci experimentální části mělo dojít ke zkoumání i pružinových ocelí a ocelí legovaných bórem, je žádoucí je blíže popsat a specifikovat. Z důvodu nedostatku času, který byl výrazně omezen vlivem celosvětové pandemie Covid-19, bohužel k samotnému výzkumu nedošlo.

5.1 Pružinové oceli

Pružina je neustále cyklicky zatěžovaná a odlehčovaná součást mechanického systému s primární funkcí vychýlení a opětovného návratu do původního tvaru. Jedná se o akumulátor energie, ve kterém se může koncentrovat energie po různě dlouhou dobu, a právě tomu musí odpovídat také použitý materiál na jejich výrobu. [24]

Typickým materiálem pro výrobu pružin jsou tzv. pružinové oceli, které se vyznačují vysokou mezí kluzu, což je výsledek chemického složení a vytvrzení oceli. Vysoká mez kluzu umožňuje oceli odolat opakovanému velkému ohybovému a krouticímu zatěžování. Díky této vlastnosti lze pružiny neustále ohýbat, stlačovat nebo natahovat, případně kroutit bez jakékoliv známky trvalé deformace. V současném světě je k dispozici celá řada pružinových ocelí, je tedy nutné správně volit vhodný materiál na základě chemického složení, mechanických vlastností, dostupnosti a v neposlední řadě ceny. [24]

Pružinové oceli jsou se středním nebo vysokým obsahem uhlíku, nízkolegované nebo nerezové oceli. Musí splňovat určité požadavky tuhosti a otěruvzdornosti, ale také kombinaci několika technických požadavků:

- vysoká mez pevnosti
 - aplikovatelné napětí bez vzniku plastické deformace materiálu
- vysoké mezní přetvoření
 - hodnota vztahu prodloužení bez vzniku porušení vztahená k původní délce
- nízká kontrakce při lomu
 - změna průřezu po přetržení vzhledem k původnímu
- vysoká mez pevnosti v tečení
 - druh pevnosti v tahu s přihlédnutím k teplotě a času [24]

Právě požadované technické požadavky lze ovlivňovat legujícími prvky, mezi které lze zařadit křemík, mangan, vanad, nikl, molybden chrom a bor. Většina pružinových ocelí je následně kalena a temperována přibližně na hodnotu tvrdosti 45 HRC. [24]

V praxi se vyskytuje celá řada pružin vyrobených z pružinových ocelí. Mezi nejčastější typy pružinových ocelí patří spirálové pružiny a listové pružiny. Vinuté pružiny jsou hojně využívány v automobilovém průmyslu sloužící jako tlumiče rázu. Listové pružiny se používají také v automobilové průmyslu, a to například v zavěšení těžkých vozidel jako jsou nákladní automobily. [24]

Jejich výhodou oproti pružinám vinutých je přenášení zatížení na celou plochu podvozku a tím rozložení celé síly. Vinuté pružiny jsou schopny přenášet zatížení pouze do jednoho bodu. [24]

5.2 Oceli legované borem

5.2.1 Bor

Bor je při teplotě 0 °C a atmosférickém tlaku (1013,25 hPa) prvkem v pevném skupenství. Jedná se o polokov, který byl známý již ve středověku, avšak pouze v minerálu známém jako Tinkal (dnes Borax). Tato sloučenina se hojně využívala jako pomocník při tavení a pájení. Mezi největší naleziště boru patří Kazachstán, Argentina a Turecko. Nikdy se v zemské kůře nevyskytuje elementárně, vždy se vyskytuje ve sloučenině. Mezi minerály s vysokým obsahem boru patří např. již zmíněný Borax, Kernit nebo Boracit. [21]

Bor v atomárním stavu lze také využít jako legující prvek ke zlepšení vlastností mnoha různých materiálů. Hojně se využívá jako legující prvek u ocelí. Typickou vlastností, kterou bor ovlivňuje u oceli, je tvrdost. Přidává se do nelegovaných a nízkolegovaných ocelí, a právě zvýšení jeho obsahu přímo ovlivňuje rostoucí prokalitelnost oceli. Již při malé koncentraci, 0,001 % boru, je zvýšená prokalitelnost patrná. [22]

V případě přidání boru do rychlořezných ocelí lze dosáhnout zvýšení řezného výkonu na úkor kovačích vlastností. U austenitických ocelí napomáhá bor zase k větší vysokoteplotní pevnosti. Oceli legované borem jsou považovány za vysoce kvalitní, tepelně zpracovatelné konstrukční oceli. Jsou také vhodné pro tváření za studena, lze je tedy použít například na výrobu šroubů. [22]

Vliv boru na tvrdost oceli je však také omezen. Vrcholu vytvrditelnosti dosahuje ocel při množství boru 3 až 15 ppm. Při výrazném převýšení této meze (30 ppm a více) dochází k oddělování složek boru na hranicích austenitických zrn, což způsobuje snížení prokalitelnosti a houževnatosti a může způsobit křehkost materiálu. Dalším vlivným prvkem, který významně ovlivňuje účinnost boru na prokalitelnost v oceli, je uhlík. Čím vyšší obsah uhlíku ocel má, tím nižší je účinek boru na prokalitelnost oceli. [22]

5.2.2 Využití

Oceli legované borem mají velké pole využití ať už jako otěruvzdorný materiál nebo vysokopevnostní konstrukční ocel. Bor se stále více využívá ve vysokopevnostních nízkolegovaných (HSLA) a dalších konstrukčních ocelí. [22]

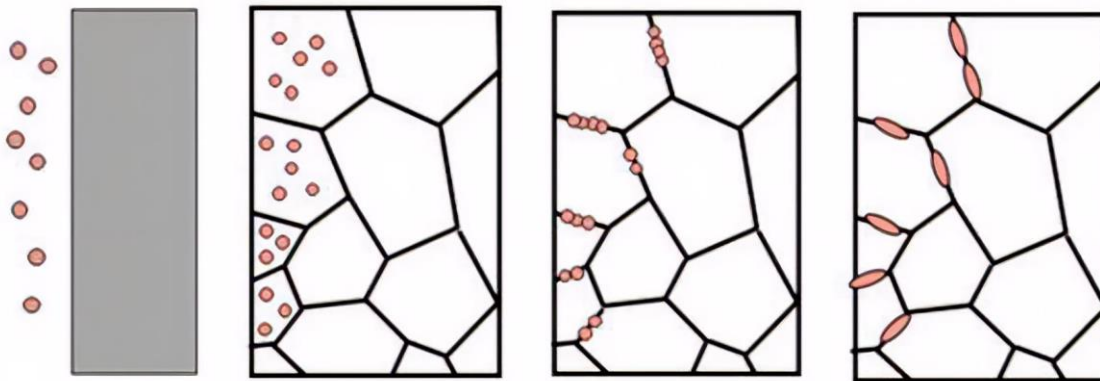
Velmi časté využití nachází borové oceli v automobilovém průmyslu, a to díky své extrémně vysoké pevnosti. Využívají se především pro velmi namáhané nebo bezpečnostní části, jako jsou nosníky dveří, vnitřní B-sloupky a lišty kolem sedadel především u evropských aut značek Porsche, Volvo nebo Mercedes-Benz. [22]

5.3 Nebezpečí vodíku v oceli

Vodík v oceli je velmi nežádoucí prvek. Právě za přítomnosti vodíku může docházet k tzv. vodíkovému křehnutí oceli, což je ztráta tvárnosti a únosnosti materiálu. Vodík se do oceli dostane absorpcí atomů nebo molekul kovem a následnou difusí se na hranicích zrn utváří bubliny. Vzniklé bubliny utváří tlak na jednotlivá zrna, a právě to způsobuje praskání součástí při menším napětím, než je mez kluzu. [23]

Co je na vodíkové křehkosti nejnebezpečnější je to, že vodík může do materiálu vstupovat a difundovat v ní i při pokojové teplotě za běžného provozu, nejen tedy při výrobních nebo montážních operacích. Jednoduše řečeno, vodík může do materiálu vstupovat kdykoliv, kdy kov přijde do styku s vodíkem, ať už v atomové nebo molekulární formě. Vodíkové křehnutí oceli umožňuje lehký vznik křehkého, tedy nebezpečného a nekontrolovatelného mezikrystalového lomu. Trhliny se tvoří a následně rostou podél narušených hranic zrn. [23]

Vysoká pravděpodobnost absorpce vodíku je při moření kyselinou, což se využívá k odstranění vodního kamene z povrchu součásti a při přípravě ocelí k procesům jejíž úkolem je zvýšení povrchové korozní odolnosti. V kyselině je ovšem přítomen právě vodík, a tudíž zde hrozí vstup vodíku do oceli. Další nebezpečnou operací je galvanické pokovování, které slouží k nanášení zinku, tedy antikorozi ochrany, na spojovací prvky. Při galvanickém pokovování dochází k utváření vodíku na povrchu samotného materiálu. Absorpce vodíku kovem hrozí také za normálního provozu součásti, pokud je ocel vystavena kyselinám. [23]



Obr. 15: Absorpce vodíku ocelí [23]

Aby nedocházelo k vodíkovému křehnutí oceli, musí být zabráněno souhře všech těchto skutečností současně:

- Ocel náchylná na vodíkovou absorpci
 - typický příklad je vysokopevnostní ocel s pevností tahu větší než 1 000 MPa
- Ocel vystavená vodíkovému prostředí
 - například kyselina
- Ocel zatěžovaná tahem [23]

Výrazně lze zabránit absorpci vodíku materiálem zahřátím součásti po daném procesu na teplotu 190 až 220 °C. Při této teplotě vodík naopak difunduje z kovu. Dalším způsobem, jak se vyhnout vodíkovému křehnutí je právě použití oceli s nižší pevností, než je daných 1 000 MPa, případně docílit snížení zbytkového a působícího napětí. [23]

Právě vodíkové zkřehnutí materiálu bylo využito v rámci experimentální části této bakalářské práce, kde byl zkoumán právě tohoto mechanismu na mechanické vlastnosti zkoumaného materiálu.

6 Vysokorychlostní záznam

Zkoumání lomového procesu se dnes již takřka neobejde bez vysokorychlostního záznamu, díky kterému jsou pozorovatelné i jevy pro oko neviditelné. Zrak není schopen jev zachytit především z toho důvodu, že se udál příliš rychle. Vysokorychlostní záznam je schopna vytvořit vysokorychlostní kamera, kterou již roku 1948 definovala Společnost filmových a televizních techniků (SMPTE) jako kameru s minimálně 128 snímků za vteřinu (fps). V porovnání s okem, které je schopné vidět 20 – 25 snímků za vteřinu, se jedná o velice zásadní pozorovatelný rozdíl. [25] [26]

První digitální vysokorychlostní kamera byla vyrobena v roce 1989. V průběhu následujících let však počet zachytitelných snímků za sekundu exponenciálně zvětšil a u dnešních moderních vysokorychlostních kamer není 10^8 snímků za vteřinu žádný větší problém. Dle očekávání velmi blízká budoucnost přinese dokonce kamery se schopností 10^9 – 10^{10} snímků za vteřinu. [25] [26]

Pořízený vysokorychlostní záznam se následně zpomalí a přehraje se v podobě běžných snímků za vteřinu pozorovatelných lidským zrakem. V případě již zmíněných 128 snímků za sekundu se jedná přibližně o šestinásobné zpomalení zaznamenaného jevu. [25]

6.1 Princip záznamu

Princip záznamu spočívá v určitém systému uvnitř kamery. Nejprve dochází k transformování zaznamenaného obrazu pomocí čoček. U obrazu jsou následně separovány barvy za pomoci filtrů a jednotlivé body zaznamenaného obrazu jsou následně přeměněny na proud elektronů pomocí obrazového snímače. Proud elektronů je následně převeden do digitální formy za pomoci převodníku. Digitální data jsou povětšinou nejdříve nahrána na interní paměť z důvodu přenosové rychlosti, z ní je následně možné data přenést na jakékoliv jiné datové zařízení. [25] [27]

Celý proces záznamu obrazu je umožněn pomocí obrazových senzorů CCD nebo CMOS využívající fotocitlivé buňky, které zaznamenávají daný proud fotonů, tedy kvanta elektromagnetické energie. Právě podle velikosti proudu fotonů čipy určují jas obrazu a následně pomocí barevného filtru rozdělí obraz na základní barvy RGB, tedy červenou, zelenou a modrou. Na základě znalosti jasu základních barev v dostatečně malém bodě, je možné zobrazit veškeré barvy, které jsou lidským okem pozorovatelné. [25]

6.2 Obrazové senzory

a) CCD – Charge-Coupled Device

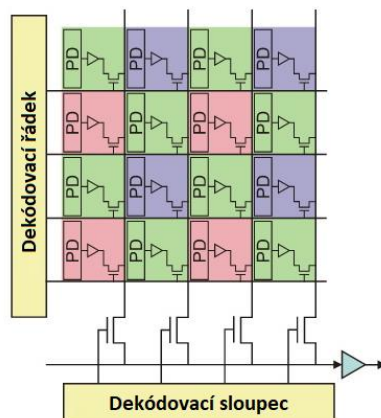
Snímač obrazové informace známý pod zkratkou CCD, v překladu zařízení s vázanými náboji, využívá jevu fotoefektu. Tento jev funguje na principu převodu elektronu snímače ze základního stavu na stav s větším obsahem energie, ihned jakmile dojde k nárazu elementární částice fotonu do snímače. Když se následně elektron uvolní, může se podílet na elektrické vodivosti. Signály jednotlivých buněk postupně odchází do řídicí elektroniky přes celé zařízení, kde je nakonec vyčten. Celý proces je tedy poměrně náročný na spotřebu elektrické energie. Stejně tak je v porovnání s CMOS objemný. [25] [28]



Obr. 16: Vychítání elektrického náboje u CCD senzorů [28]

b) CMOS – Complementary Metal-Oxide-Semiconductor

Technologie obrazového snímače CMOS, tedy komplementárního polovodiče oxidu kovu, je dnes využívána více než obrazový snímač CCD. Hlavním rozdílem je, že CMOS využívá použití tranzistoru u každého pixelu zvlášť. Elektrický signál je tedy odváděn přímo od něj. Každý pixel je zvlášť vyhodnocován, což velmi napomáhá odolnosti vůči šumu, ale také mnohém nižší elektrické a prostorové náročnosti. [25] [28]



Obr. 17: Vychítání elektrického náboje u CMOS senzorů [28]

6.3 Základní veličiny nastavované při záznamu

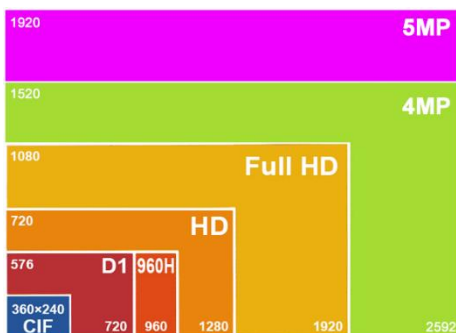
Před vytvořením každého záznamu je třeba si uvědomit, co přesně je třeba zaznamenat, co je třeba vidět, případně jak dlouhá část záznamu je vyžadována. Požadované vlastnosti záznamu však musí samozřejmě korespondovat s jednotlivými parametry daného typu vysokorychlostní kamery, které je nutné předem znát. [26] [27]

Mezi jednotlivé nastavitelné parametry patří:

- Rozlišení záznamu
- Snímková frekvence záznamu
- Doba expozice
- Hloubka ostrosti
- Světlost (jas) záznamu
- Spouštěč (pre-trigger, trigger, post-trigger) [26] [27]

6.3.1 Rozlišení záznamu

Určuje počet pixelů po vodorovné a svislé straně. Jejich součinem lze určit počet pixelů tvořících snímek. Vysoké rozlišení je důležité především v případě velkého zorného pole kamery nebo když je vyžadováno velmi detailní zaznamenání určitého děje, který obsahuje spoustu malých detailů. Je možné nastavit rozlišení u kamery naopak nižší, a to především z důvodu paměťové náročnosti. Čím nižší rozlišení záznam má, tím méně datové paměti vyžaduje. [32]



Obr. 18: Porovnání jednotlivých rozlišení [36]

6.3.2 Snímková frekvence záznamu

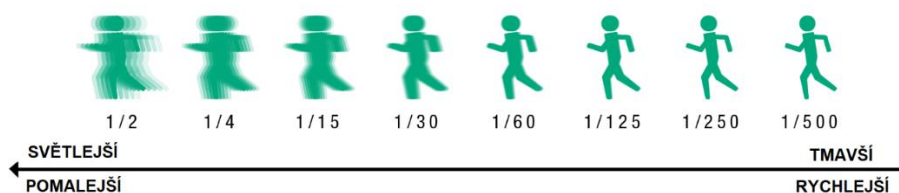
Snímková frekvence je vyžadována k záznamu a analýze pozorovaného děje. Je nejdůležitějším parametrem volby typu vysokorychlostní kamery. Určuje počet snímků, které kamera zaznamená za sekundu. Na trhu se vyskytují kamery s frekvencí od 1 000 až po moderní zařízení s více než 10^6 snímků za sekundu. Snímková frekvence má vliv na nastavení rozlišení záznamu. Zvýšení snímkové frekvence omezuje konkrétní počet vodorovných a svislých pixelů. [32]



Obr. 19: Porovnání snímkové frekvence 60 fps a 24 fps [37]

6.3.3 Doba expozice

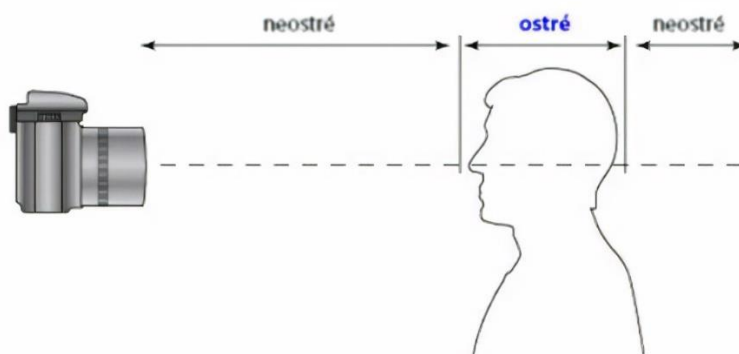
Časové okno, ve kterém dochází k převodu světla snímaného obrazovým snímačem do elektrické podoby. Je závislá na rychlosti snímače, za jak dlouho provede expozici a na citlivosti obrazového snímače, aby dokázal zachytit dostatek fotonů světla pro vytvoření kvalitního záznamu. [27] [32]



Obr. 20: Doba expozice [38]

6.3.4 Hloubka ostrosti

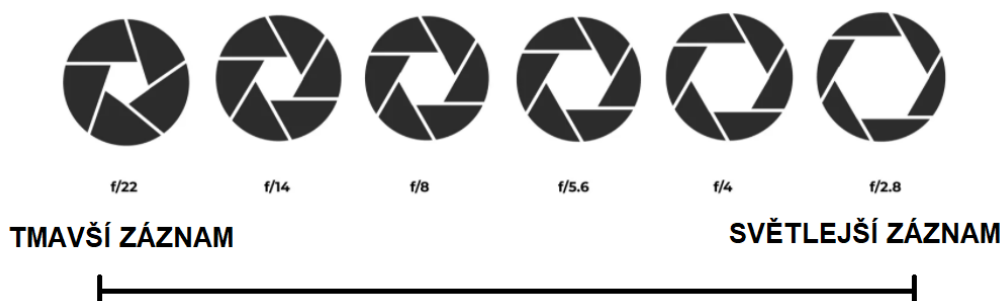
Definuje vzdálenost předmětu, kdy působí pro lidské oko jako ostrý. V malé vzdálenosti od kamery působí jako rozostřený, následuje oblast zaostřená. V přílišné vzdálenosti je předmět opět neostrý. Pomocí v hloubce ostrosti může zmenšující clona. Předmět musí být při záznamu dostatečně ostrý, aby bylo možné jej analyzovat. [27]



Obr. 21: Hloubka ostrosti v případě snímání lidské postavy [39]

6.3.5 Světlost (jas) záznamu

Záznam nemůže být ani moc tmavý, ale ani přesvětlený. Světlost záznamu je možné nastavit pomocí clon, které ovlivňují množství světla, které projde objektivem. Clona je volně nastavitelná a před samotným záznamem je dobré si úroveň světlosti zkontrolovat. [27]



Obr. 22: Světlost záznamu v závislosti na nastavení clony [40]

6.3.6 Spouštěč (pre-trigger, trigger, post-trigger)

Z důvodu často velmi krátkého záznamu je třeba stanovit, kdy přesně má dojít ke spuštění záznamu. K tomu slouží tzv. trigger, což je elektronický spouštěcí signál, jehož reakci je možné nastavit na změnu jasu v zaznamenávaném poli, určitý zvuk nebo jiný spouštěcí signál. Lze jej nastavit tak, aby zaznamenal také několik snímků před nebo po ději, aby bylo jasné, že děj bude zaznamenán skutečně celý. [27]

6.4 Fyzikální limity

V případě pořizování vysokorychlostního záznamu je třeba brát zřetel na několik fyzikálních omezení, které úzce souvisí s daným typem použité vysokorychlostní kamery a prostředím, ve kterém dochází k pořízení záznamu.

6.4.1 Z pohledu osvětlení

Značný problém v případě vysokorychlostního záznamu způsobuje osvětlení. Když dochází ke zpomalování jevu pomocí zvyšování snímkové frekvence, je nutné tomu přizpůsobit také světelné podmínky. Jinými slovy, pokud je nastaven dvojnásobný počet snímků za sekundu, než je obvyklých 24-30 snímků za vteřinu, pro vytvoření stejné expozice se zdvojnásobuje také množství potřebného světla. [27] [29]

Dalším problémem v oblasti osvětlení je tzv. blikání. V závislosti na zemi a jejím energetickém systému lampy napájené střídavým proudem mají frekvenci 50-60 Hz. Dochází tedy k problikávání světla, které není lidským zrakem patrné. V případě vysokorychlostní kamery může způsobovat velký problém, jelikož snímač s vyšší snímkovou frekvencí snímá dostatek snímků za sekundu, aby blikání světla viděl. Záznam je pak proložen nepříjemným blikáním, které celý záznam může znehodnotit. Blikání souvisí s typem žárovky, výkonem nebo s fyzikálními vlastnostmi vlákna uvnitř žárovky. Nepříjemnostem se světlem lze předejít použitím stejnosměrného proudu, kdy nedochází ke střídání cyklu, nebo napájením malých zdrojů světla za pomoci baterie. Jiným způsobem, jak vadám způsobeným světlem předejít, je využití laserového osvětlení s vysokou opakovací frekvencí. [27] [29]

6.4.2 Paměťová kapacita kamery

V současné době dosahují paměťová média kapacit vyšších než 10 TB a často tedy není sebemenší problém s uložením i velmi objemných dat. To bohužel ne tak úplně platí pro vysokorychlostní kamery, které z důvodu přenosové rychlosti využívají především paměť interní, která v naprosté většině dosahuje řádově nižších paměťových kapacit. Prvotní uložení ale prioritně využívá právě předinstalovanou interní paměť, ačkoliv je následně samozřejmě možné si nahraný záznam přenést na jiné datové médium a interní paměť kamery znovu vymazat. Před samotným záznamem je nutné počítat s tím, že záznam musí být paměťové kapacitě kamery uzpůsoben. Čím vyšší rozlišení nahrávaný záznam má, tím větší paměť bude záznam zabírat. To samé platí pro nahrávaný počet snímků za sekundu. [25]

6.4.3 Problematika výrazné svítivosti zkoumaného děje

Vysokorychlostní kamery se mohou vlivem vysoké svítivosti zkoumaného objektu poškodit, přesněji řečeno může dojít k poškození obrazového senzoru. I pokud by k poškození nedošlo, byl by s vysokou pravděpodobností záznam nepoužitelný, jelikož by celý záznam byl zcela přesvětlený nebo dokonce bílý. Proto v případě záznamu velmi svítivých jevů, jako je například svařování, je využíváno spektrálního filtru. Spektrální filtr umožňuje průchod pouze světlu ve velmi úzkém pásmu vlnových délek a blokuje tím většinu světla vznikajícího při zaznamenávaném ději. [25]

7 Experimentální část

Experimentální část této bakalářské práce je rozdělena do dvou dílčích částí, které úzce souvisí s pozorováním a analýzou šíření trhliny při dynamické rázové zkoušce za pomoci vysokorychlostní kamery.

7.1 Rázové zkoušky oceli ČSN 11 373

Prvním experimentem bylo zaznamenání a následná analýza zkoušky rázem v ohybu metodou Charpy na vzorcích materiálu ČSN 11 373 s vrubem typu U a V s nenormalizovanou hloubkou vrubu 3 mm. Jednotlivé vzorky materiálu jsou v tepelně nezpracovaném stavu, vodíkově zkřehlém stavu, žíhaném stavu a žíhaném stavu s následným navodíkováním. Výstupem z analýzy vzorků je průběh rychlost šíření trhliny v závislosti na čase.

7.1.1 Materiál a geometrie zkušebních vzorků

Použitý materiál ČSN 11 373 je neušlechtilá konstrukční ocel, která je vhodná ke svařování a k využití v rámci konstrukcí staticky i mírně dynamicky namáhaných. [41]

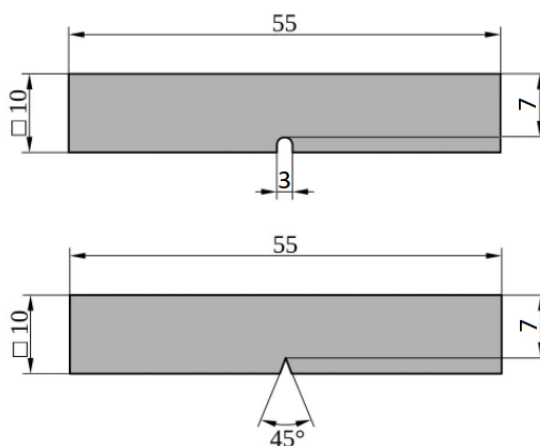
Tab. 1: Chemické složení oceli ČSN 11 373 [41]

C	Mn	Si	P	S	N	Al
max. 0,170 %	-	-	max. 0,045 %	max. 0,045 %	max. 0,007 %	-

Tab. 2: Mechanické vlastnosti oceli ČSN 11 373 [41]

Mechanické vlastnosti	Provedení	
	Tepelně nezpracované	Normalizačně žíhané
Pevnost v tahu R_m [MPa]	min. 370	min. 350
Mez kluzu R_e [MPa]	min. 250	min. 220
Tažnost A_{10} [%]	min. 7	min. 20

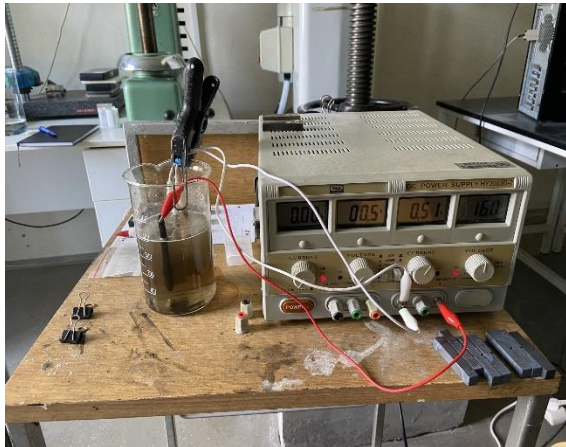
Geometrie zkušebních vzorků materiálu ČSN 11 373 dodržuje rozměry dle obr. 17. Následně byly zkušební vzorky označeny písmeny U a V dle typu vrubu, aby bylo umožněno s nimi přehledně a systematicky manipulovat. V obou případech se však nejedná o normalizované vzorky z důvodu hloubky vrubu, který je na rozdíl od normy hluboký 3 mm.



Obr. 23: Geometrie zkušebních vzorků s U a V vrubem [42]

7.1.2 Navodíkování oceli za pomoci elektrolýzy

Za účelem navodíkování oceli bylo využito elektrolýzy. Vodíkování probíhalo v elektrolytu tvořeném roztokem vody a cca 5% NaCl po dobu 5 hodin. Přidáním NaCl se docílilo zvýšení vodivosti elektrolytu. Anodou byla grafitová elektroda a katodou vzorek. Napětí mezi anodou a katodou bylo 16 V, elektrický proud cca 0,2 A.



Obr. 24: Průběh elektrolýzy

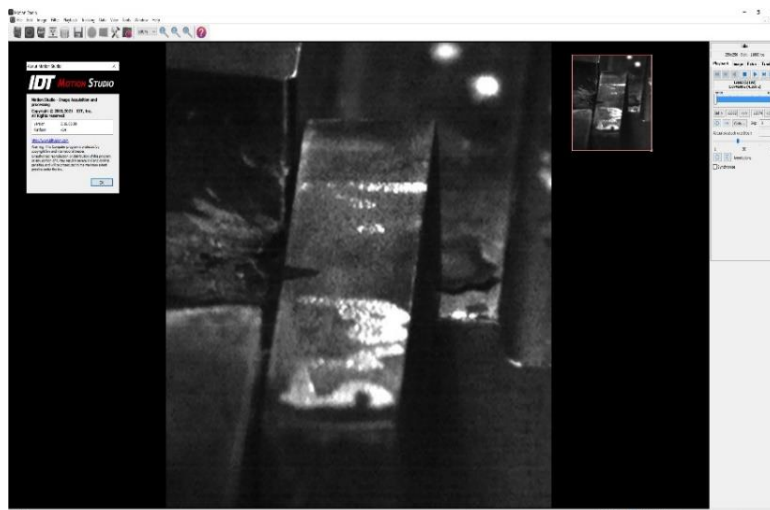
7.1.3 Žihání oceli

Vzorky byly za účelem žihání zahřáty na teplotu 900 °C. Při této teplotě byly drženy 35 minut, přičemž následně byly dochlazen na vzduchu. Aby došlo k eliminaci okujení byly vzorky při teplotní expozici zabaleny do kalící fólie.

7.1.4 Průběh zkoušky

Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy vzorků materiálu ČSN 11 373 opatřených U a V vrubem byla zaznamenána na několik pokusů při různém nastavení vysokorychlostní kamery, aby bylo docíleno co nejvhodnějšího záznamu, na kterém lze šíření trhliny co nejpresněji analyzovat. K záznamu byla použita vysokorychlostní kamera IDT NX4-S3 s obrazovým snímačem typu CMOS. Maximální rozlišení kamery je 1024 x 1024 při 3 000 snímcích za sekundu (fps). Maximální nastavitelný počet snímků za sekundu u kamery je 160 000 fps, a naopak minimální možná doba expozice je 1 μ s. Po několika pokusech bylo stanoveno za vhodné nastavení rozlišení 256x256 px, při snímkové frekvenci 11 800 fps, s časem snímkové expozice 37 μ s. Záznam byl vytvořen pomocí počítačového programu Motion Studio společnosti IDT.

V rámci každého stavu oceli bylo zkoušeno hned několik vzorků. Zprůměrované výstupy byly zapsány do jednotlivých tabulek a bylo s nimi následně počítáno. Během zkoušení nastalo několik technických potíží a několik vzorků bylo testováno, aniž by se vytvořil kvalitní použitelný záznam zkoušky. Nejčastější chybou bylo nedostatečné nasvícení děje nebo nezaznamenání celého průběhu zkoušky. I přes to každá hodnota v tabulce je průměrem alespoň 3 výstupů z různých záznamů zkoušky za každého stavu materiálu.



Obr. 25: Prostředí počítačového programu IDT Motion Studio

Zaoblení břitu kladiva bylo o poloměru $r = 8$ mm. Průběh zkoušky byl zaznamenán ze vzdálenosti 1,4 m při halogenovém osvětlení. Jelikož při prvních pokusech nebyl zkušební vzorek zcela osvětlen, halogenové osvětlení doplnil další zdroj světla z opačné strany pohledu testovacího zařízení.



Obr. 26: Uspořádání laboratoře během rázové zkoušky metodou Charpy

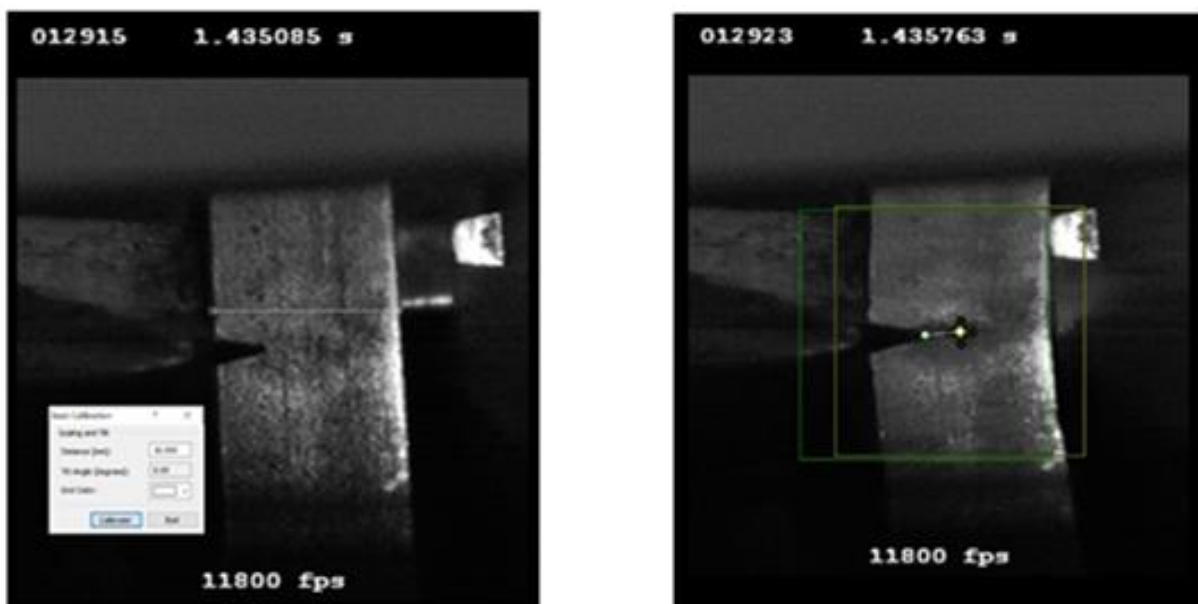
7.1.5 Obrazová analýza a výpočty

Ve vysokorychlostním záznamu při snímkové frekvenci 11800 fps vychází expoziční čas na $t = 84,75$ μ s. Na jednotlivých snímcích je již zběžně patrná proměnná rychlost šíření trhliny. K posouzení proměnlivé rychlosti šíření trhliny lze využít automatizovaného trasování v počítačovém programu Motion Studio.

Program trasuje šíření trhliny za pomoci obrazové analýzy, jinými slovy vytváří trajektorii pohybu bodu se stejným odstínem v rámci po sobě jdoucích snímků. Automatické trasování v rámci rázové zkoušky ovšem provázely dva výrazné negativní faktory:

1. I přes značné osvětlení vzorku při mechanické zkoušce, nebyla veškerá místa vzorku dostatečně osvětlena. Tím pádem nebylo možné přesně nadefinovat jeden daný odstín, který by byl patrný i na každém dalším snímku. Každý snímek by tedy musel být zvlášť manuálně překalibrován, a i přes to by do měření byla zanesena výrazná chyba.
2. Ještě výraznější ovlivnění výsledků by způsobil druhý faktor měření. Automatické trasování uchovává informaci změny polohy bodu v podobě změny souřadnic x, y, z v rámci po sobě jdoucích snímků. Následně za pomoci získané vzdálenosti a doby mezi jednotlivými snímky vypočte rychlost, jakou se daný bod v průběhu záznamu pohybuje. To by plně korespondovalo pouze v případě pevného usazení a znehybnění testovaného vzorku. Bohužel v případě rázové zkoušky dochází po rázu k celkové plastické deformaci, posunu, a dokonce uvolnění zkušební tělesa z rámu. Při automatickém výpočtu by tedy v rámci celkové rychlosti šíření trhliny byla nesprávně započtena také rychlost pohybu celého vzorku.

Z důvodu těchto faktorů nebylo možné automatické trasování využít a bylo nutné celé trasování a následné výpočty rychlosti šíření trhliny počítat manuálně. Ačkoliv program Motion Studio měření v základním nastavení vzdálenosti v jednotkách pixel, pomocí funkce kalibrace je možné jej přenastavit na jednotky milimetry. Je však nutné definovat určitou vzdálenost na zaznamenaném snímku, což byla nastaveno za pomoci známé šířky zkušební vzorku 10 mm.



Obr. 27: Obrazová analýza - vlevo: kalibrace, vpravo: měření vzdálenosti posuvu trhliny mezi snímky

Na základě změřené trajektorie, kterou trhlina v materiálu utvoří mezi jednotlivými snímky a znalosti časového rozdílu mezi snímky, lze jednoduše pomocí vztahu (1) vypočítat průměrnou rychlost šíření trhliny v jednotlivých časech od počátku šíření trhliny.

$$v_i = \frac{\Delta S_i}{\Delta t} \quad (1)$$

kde: v_i je průměrná rychlost šíření trhliny při jednotlivých snímcích [m/s]
 ΔS_i je naměřený posun trhliny mezi jednotlivými snímky [m]
 Δt je prodleva mezi jednotlivými snímky [s]

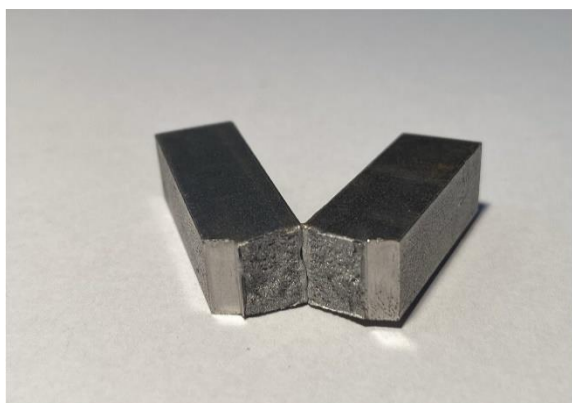
Při celém testování všech vzorků došlo k úplnému přeražení jen v jediném případě. Ve všech ostatních případech se tedy výpočet rychlosti vztahuje pouze k dosažené délce trhliny. Samotná rychlost šíření trhliny je zprůměrována pouze od skutečného počátku šíření trhliny po její konec. Z tohoto důvodu nejsou do výpočtu aritmetického průměru započítávány rychlosti v době prvního a posledního snímku, kdy je rychlost rovna nule.

7.1.5.1 Analýza oceli ČSN 11 373.0

První analyzovaný vzorek je v tepelně nezpracovaném stavu. Naměřené a vypočtené hodnoty lze tedy považovat z výchozí stav, se kterým lze porovnat ostatní hodnoty.



Obr. 28: Vzorek materiálu ČSN 11 373.0 po rázové zkoušce - vrub U



Obr. 29: Vzorek materiálu ČSN 11 373.0 po rázové zkoušce - vrub V

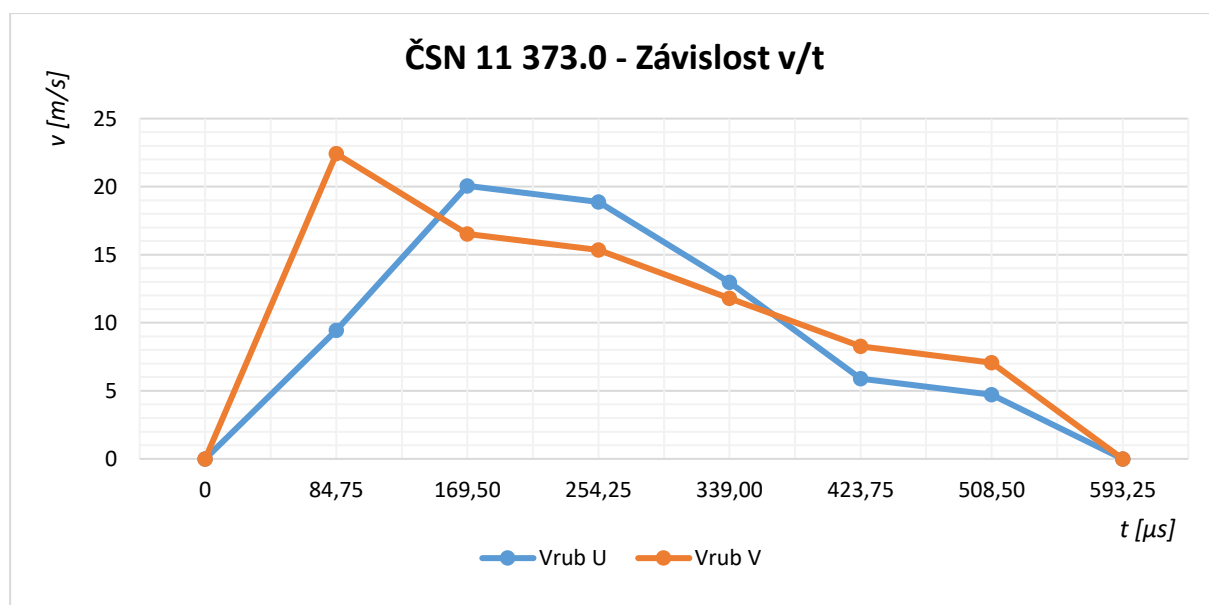
Tab. 3: Tabulka k výpočtu rychlosti šíření trhliny - ČSN 11 373.0 (vrub U - 3 mm)

Snímek - i	Δt [μs]	t [μs]	Δs_i [mm]	v_i [m/s]
1	0	0	0	0
2	84,75	84,75	0,8	9,44
3	84,75	169,50	1,7	20,06
4	84,75	254,25	1,6	18,88
5	84,75	339,00	1,1	12,98
6	84,75	423,75	0,5	5,90
7	84,75	508,50	0,4	4,72
8	84,75	593,25	0	0
Průměrná rychlost šíření trhliny - v [m/s]				12,00
Celková délka trhliny - s [mm]				6,1

Tab. 4: Tabulka k výpočtu rychlosti šíření trhliny - ČSN 11 373.0 (vrub V - 3 mm)

Snímek - i	Δt [μs]	t_i [μs]	Δs_i [mm]	v_i [m/s]
1	0	0	0	0
2	84,75	84,75	1,9	22,42
3	84,75	169,50	1,4	16,52
4	84,75	254,25	1,3	15,34
5	84,75	339,00	1,0	11,80
6	84,75	423,75	0,7	8,26
7	84,75	508,50	0,6	7,08
8	84,75	593,25	0	0
Průměrná rychlost šíření trhliny - v [m/s]				13,57
Celková délka trhliny - s [mm]				6,9

Následující graf 1 ukazuje průběh rychlosti šíření trhliny v závislosti na čase během rázové zkoušky materiálu ČSN 11 373.0. Ani v jednom případě nedošlo k úplnému přeražení vzorku. Je patrná vyšší počáteční rychlost šíření trhliny v případě vrubu V, která postupně klesá. U vrubu U dochází k maximální rychlosti šíření později, následně má také klesající tendenci.



Graf 1: Rychlost šíření trhliny materiálem ČSN 11 373.0

7.1.5.2 Analýza oceli ČSN 11 373.0 ve vodíkově zkřehlém stavu

Další analyzovaný vzorek je tepelně nezpracovaný materiál ve vodíkově zkřehlém stavu. Ze všech testovaných vzorků by měl materiál v tomto stavu mít nejmenší odpor. Předpokladem je, že odpor materiálu bude ještě slabší než ve výchozím stavu. Z toho plyne, že rychlost šíření trhliny dosáhne vyšší rychlosti. Zároveň se utvoří delší trhlina, která by mohla celý vzorek přerazit.



Obr. 30: Vzorek materiálu ČSN 11 373.0 ve vodíkově zkřehlém stavu po rázové zkoušce - vrub U



Obr. 31: Vzorek materiálu ČSN 11 373.0 ve vodíkově zkřehlém stavu po rázové zkoušce - vrub V

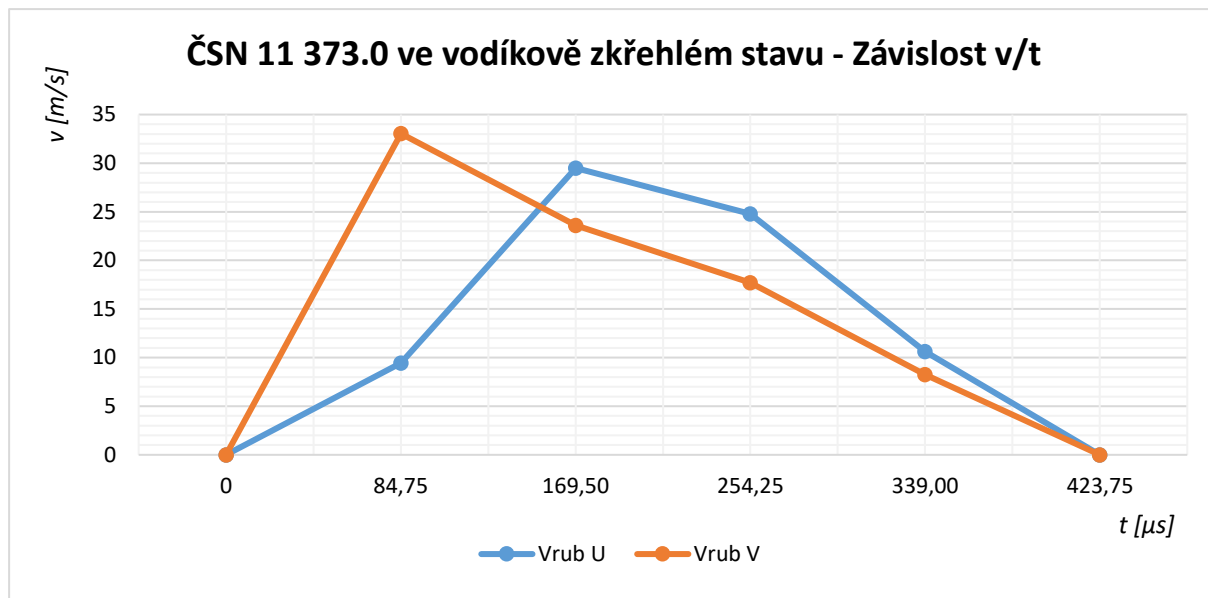
Tab. 5: Tabulka k výpočtu rychlosti šíření trhliny - ČSN 11 373.0 ve vodíkově zkřehlém stavu (vrub U - 3 mm)

Snímek - i	Δt [μs]	t [μs]	Δs_i [mm]	v_i [m/s]
1	0	0	0	0
2	84,75	84,75	0,8	9,44
3	84,75	169,50	2,5	29,50
4	84,75	254,25	2,1	24,78
5	84,75	339,00	0,9	10,62
6	84,75	423,75	0	0
Průměrná rychlost šíření trhliny - v [m/s]				18,59
Celková délka trhliny - s [mm]				6,3

Tab. 6: Tabulka k výpočtu rychlosti šíření trhliny - ČSN 11 373.0 ve vodíkově zkřehlém stavu (vrub V - 3 mm)

Snímek - i	Δt [μs]	t_i [μs]	Δs_i [mm]	v_i [m/s]
1	0	0	0	0
2	84,75	84,75	2,8	33,04
3	84,75	169,50	2,0	23,60
4	84,75	254,25	1,5	17,70
5	84,75	339,00	0,7	8,26
6	84,75	423,75	0	0
Průměrná rychlost šíření trhliny - v [m/s]				20,65
Celková délka trhliny - s [mm]				7,0

Následující *graf 2* ukazuje průběh rychlosti šíření trhliny během rázové zkoušky materiálu ČSN 11 373.0 ve vodíkově zkřehlém stavu. Zatímco v případě vrubu U k přeražení nedošlo, u vzorku s tvarem vrubem V bylo dosaženo předpokladu a jako jediný vzorek z celé experimentální části byl během rázové zkoušky skutečně přeražen. Dle předpokladu se také v obou případech šířila trhlina podstatně rychleji než v nenavodíkováném stavu. Stejně jako v minulém případě vzorek s vrubem V dosáhne nejvyšší rychlosti šíření trhliny takřka hned z počátku děje. S vrubem U opět dosáhne maximální rychlosti až v pozdější fázi zkoušky, následně rychlost klesá.



Graf 2: Rychlost šíření trhliny materiálem ČSN 11 373.0 ve vodíkově zkřehlém stavu

7.1.5.3 Analýza oceli ČSN 11 373.1

Další analyzovaný vzorek je z materiálu ČSN 11 373.1, tedy ve vyžíhaném stavu. Předpokladem je, že odpor materiálu bude ze všech testovaných vzorků největší. Rychlost šíření trhliny nedosáhne tak vysoké rychlosti a ani se trhlina dostatečně nerozšíří skrze vzorek.



Obr. 32: Vzorek materiálu ČSN 11 373.1 po rázové zkoušce - vrub U



Obr. 33: Vzorek materiálu ČSN 11 373.1 po rázové zkoušce - vrub V

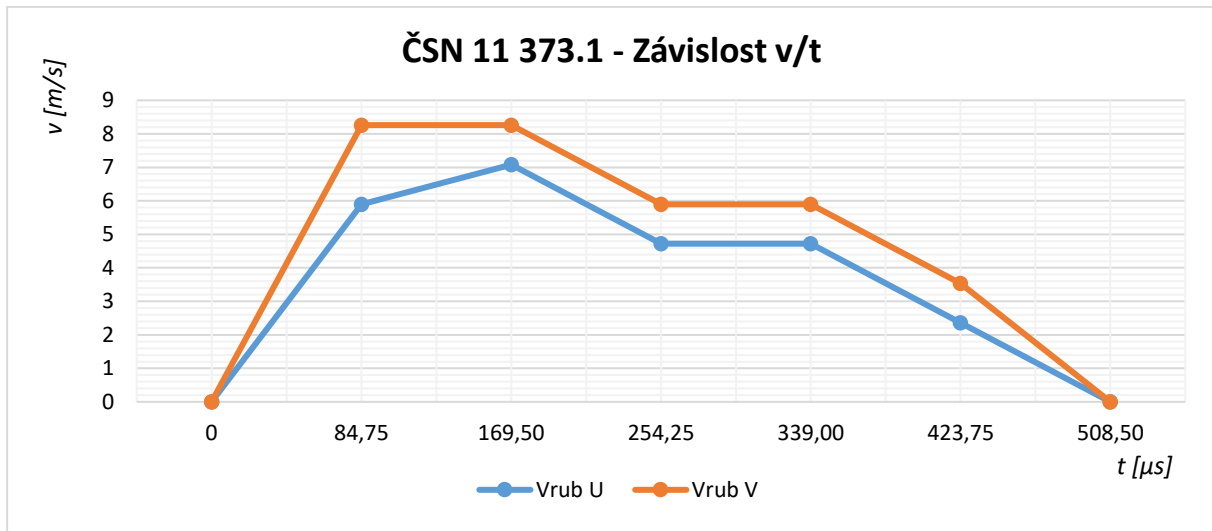
Tab. 7: Tabulka k výpočtu rychlosti šíření trhliny - ČSN 11 373.1 (vrub U - 3 mm)

Snímek - i	Δt [μs]	t [μs]	Δs_i [mm]	v_i [m/s]
1	0	0	0	0
2	84,75	84,75	0,5	5,90
3	84,75	169,50	0,6	7,08
4	84,75	254,25	0,4	4,72
5	84,75	339,00	0,4	4,72
6	84,75	423,75	0,2	2,36
7	84,75	508,50	0	0
Průměrná rychlost šíření trhliny - v [m/s]				4,96
Celková délka trhliny - s [mm]				2,1

Tab. 8: Tabulka k výpočtu rychlosti šíření trhliny - ČSN 11 373.1 (vrub V - 3 mm)

Snímek - i	Δt [μs]	t_i [μs]	Δs_i [mm]	v_i [m/s]
1	0	0	0	0
2	84,75	84,75	0,7	8,26
3	84,75	169,50	0,7	8,26
4	84,75	254,25	0,5	5,90
5	84,75	339,00	0,5	5,90
6	84,75	423,75	0,3	3,54
7	84,75	508,50	0	0
Průměrná rychlost šíření trhliny - v [m/s]				6,37
Celková délka trhliny - s [mm]				2,7

Následující graf 3 ukazuje průběh rychlosti šíření trhliny během rázové zkoušky materiálu ČSN 11 373.1. Trhlina se skutečně zastavila v obou ještě před polovinou šířky vzorku (7 mm). Odpor materiálu byl velmi znatelný také v případě dosažené rychlosti šíření trhlín, které byly z celé experimentální části znatelně nejnižší. V případě vzorku s vrubem U opět bylo dosaženo maxima v pozdější fázi děje, zatímco u vzorku s vrubem tvaru V rychlost dosáhla maxima na jeho počátku.



Graf 3: Rychlost šíření trhliny materiálem ČSN 11 373.1

7.1.5.4 Analýza oceli ČSN 11 373.1 ve vodíkově zkřehlém stavu

Poslední analyzovaný vzorek je z materiálu ČSN 11 373.1 ve vodíkově zkřehlém stavu. Z předešlých zkoušek lze předpokládat vývoj děje mezi rázovou zkouškou materiálu ČSN 11 373.0 v normálním stavu a ČSN 11 373.1. K přeražení materiálu s největší pravděpodobností nedojde.



Obr. 34: Vzorek materiálu ČSN 11 373.1 ve vodíkově zkřehlém stavu po rázové zkoušce - vrub U



Obr. 35: Vzorek materiálu ČSN 11 373.1 ve vodíkově zkřehlém stavu po rázové zkoušce - vrub V

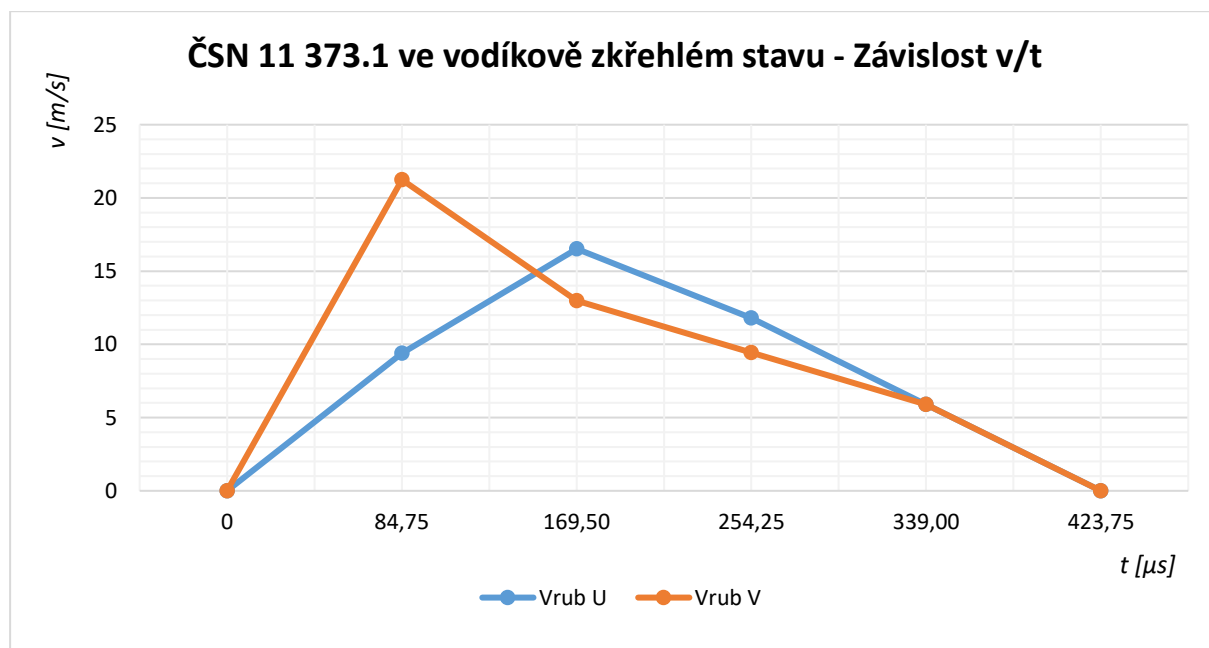
Tab. 9: Tabulka k výpočtu rychlosti šíření trhliny - ČSN 11 373.1 ve vodíkově zkřehlém stavu (vrub U - 3 mm)

Snímek - i	Δt [μs]	t [μs]	Δs_i [mm]	v_i [m/s]
1	0	0	0	0
2	84,75	84,75	0,8	9,4
3	84,75	169,50	1,4	16,52
4	84,75	254,25	1,0	11,80
5	84,75	339,00	0,5	5,90
6	84,75	423,75	0	0
Průměrná rychlost šíření trhliny - v [m/s]				10,91
Celková délka trhliny - s [mm]				3,7

Tab. 10: Tabulka k výpočtu rychlosti šíření trhliny - ČSN 11 373.1 ve vodíkově zkřehlém stavu (vrub V - 3 mm)

Snímek - i	Δt [μs]	t_i [μs]	Δs_i [mm]	v_i [m/s]
1	0	0	0	0
2	84,75	84,75	1,8	21,24
3	84,75	169,50	1,1	12,98
4	84,75	254,25	0,8	9,44
5	84,75	339,00	0,5	5,90
6	84,75	423,75	0	0
Průměrná rychlost šíření trhliny - v [m/s]				12,39
Celková délka trhliny - s [mm]				4,2

Následující graf 4 ukazuje průběh rychlosti šíření trhliny během rázové zkoušky materiálu ČSN 11 373.1 ve vodíkově zkřehlém stavu. Výstupní hodnoty i průběh šíření rychlosti trhlín se skutečně přibližují hodnotám zkoušky materiálu ČSN 11 373.0 v normálním stavu, ovšem trhlina se ani zdaleka nerozšířila do takové vzdálenosti jako v již zmíněném případě.



Graf 4: Rychlost šíření trhliny materiálem ČSN 11 373.1 ve vodíkově zkřehlém stavu

7.2 Rázové zkoušky pružinové oceli ČSN 14 260

V rámci experimentální části, měla být dále analyzována rázová zkouška pružinové oceli ČSN 14 260. Hlavním cílem experimentu bylo postihnout rozdílnost lomových vlastností při zatěžování vzorku rázem v ohybu metodou Charpy a modifikovaným zařízením na dynamický tříbodový ohyb drátů.

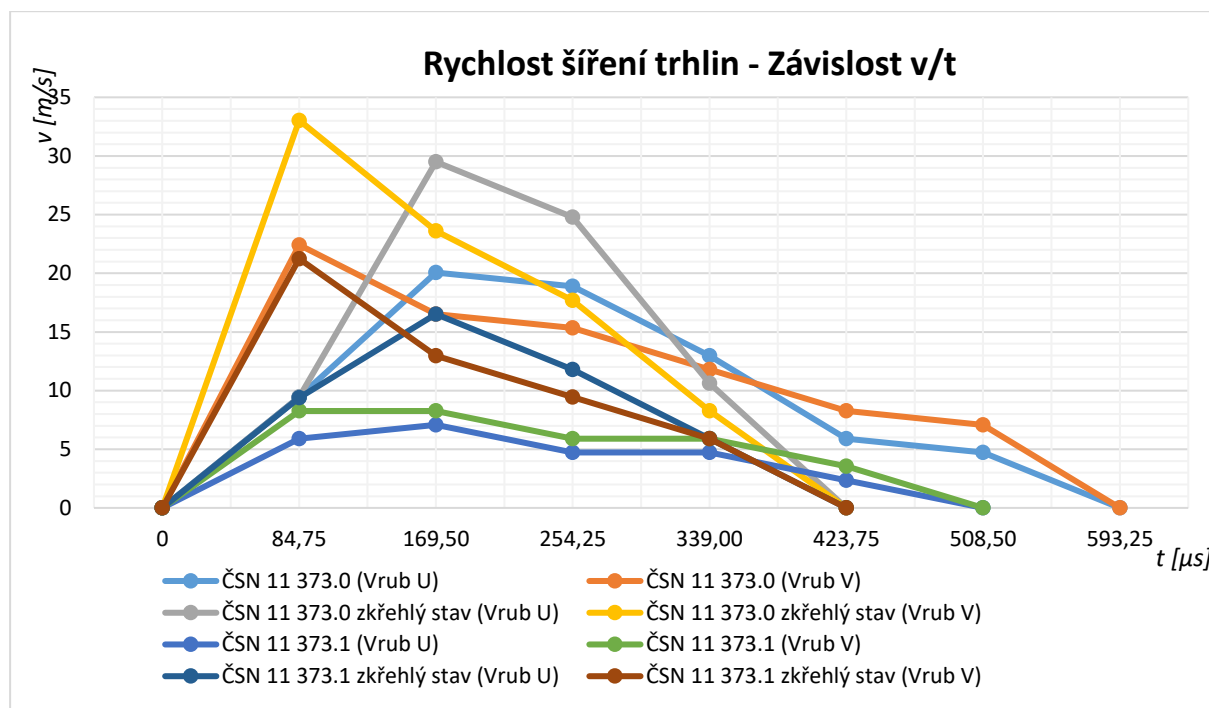
Tab. 11: Chemické složení oceli ČSN 14 260

C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	B
0,57 %	0,68 %	1,51 %	0,75 %	0,032 %	0,13 %	max. 0,001 %

Bohužel z důvodu situace ohledně pandemie Covid-19, kvůli které došlo k výrazným komplikacím s docházkou do laboratorních zařízení, nebylo možné zkoušku uskutečnit. Experimentální část se tak zabývá pouze analýzou rázové zkoušky metodou Charpy oceli ČSN 11 373 v různých stavech zpracování, viz kapitola 7.1 Rázové zkoušky oceli ČSN 11 373.

8 Diskuze výsledků

Tato kapitola experimentální části se věnovala rozboru 8 různých vzorků stejného materiálu v různém stavu, případně s jiným typem vrubu. Aby došlo ke skutečné autenticitě zkoušky, byly použity nenormalizované vzorky s vruby U a V se stejnou hloubkou vrubu 3 mm. Samotné zjištěné hodnoty jsou znázorněny v *grafu 5*.



Graf 5: Rychlost šíření trhlin

Tab. 12: Souhrn vypočtených a naměřených hodnot

Materiál	Typ vrubu	Průměrná rychlost šíření trhliny - v [m/s]	Celková délka trhliny - s [mm]
ČSN 11 373.0	U	12,00	6,1
ČSN 11 373.0	V	13,57	6,9
ČSN 11 373.0 - Zk.	U	18,59	6,3
ČSN 11 373.0 - Zk.	V	20,65	7,0
ČSN 11 373.1	U	4,96	2,1
ČSN 11 373.1	V	6,37	2,7
ČSN 11 373.1 - Zk.	U	10,91	3,7
ČSN 11 373.1 - Zk.	V	12,39	4,2

Významný vliv vrubu na šíření trhliny je patrný již ze samotného jeho tvaru. K porušení materiálu dojde mnohem snáze v případě vrubu V tím, že samotná porucha je ve vzorku již naznačena a trhlina pouze pokračuje v šíření skrze vzorek. Proto je hned z počátku dosaženo maximální rychlosti šíření, která je postupným prostupem materiálem a jeho odporem snižována, dokud není úplně spotřebována. V případě U je značná energie spotřebována jen k samotnému přerazení vzorku, následné šíření je tímto počátečním stavem velmi ovlivněno. Proto dochází k dosažení maximální rychlosti až v pozdější fázi děje, což je patrné z *grafu 5* a tabulky *Tab. 12*.

Z naměřených průběhů rychlostí je taky patrné, že ani 5 hodin elektrolýzy k dosažení navodíkové oceli není dostatečné, aby snížilo mechanické vlastnosti žíhaného materiálu na úroveň tepelně nezpracovaného materiálu. ČSN 11 373.1 ve vodíkově zkřehlém stavu dosahuje v případě vrubu V rychlosti šíření trhliny maximálně 21,24 m/s s délkou trhliny 4,2 mm, zatímco tepelně nezpracovaný materiál maximální rychlosti 22,42 m/s s délkou trhliny 6,9 mm. Ačkoliv maximální rychlosti šíření jsou přibližně stejné, délka trhliny u materiálu ČSN 11 373.0 je výrazně větší.

Samotný průběh měření byl však provázen velkou spoustou technických, ale také časových komplikací. Na počátku samotné experimentální části došlo z epidemiologického důvodu k uzavření laboratoří, a proto příprava a praktické zaučování s vysokorychlostní kamerou bylo poměrně velmi zkomplikováno. Další komplikací bylo složité osvětlení samotného děje, jelikož zkušební zařízení nebylo uzpůsobeno pro možnosti dostatečného osvětlení vzorku během zkoušky. I přes několik provizorních opatření, např. provizorní instalace příručního osvětlení v těsné blízkosti vzorku, byly některé sekvence děje nedostatečně osvětlené a docházelo tak ke komplikacím přesného manuálního trasování trhliny. Z těchto důvodů nelze experiment považovat za naprosto průkazný a k jeho určitému stanovení by bylo zapotřebí velká spousta dalších testů za lepších časových a technických podmínek.

9 Závěr

Tato bakalářská práce pojednává o analýze deformačních jevů za pomoci vysokorychlostního záznamu. Rešeršní část popisuje základní dělení deformace a její mechanismů, metody mechanických zkoušek, typy lomů, materiálové vlastnosti zkoumaných materiálů, ale také přibližuje základní poznatky ohledně vysokorychlostních kamer a záznamů.

V experimentální části bylo využito výhod vysokorychlostního záznamu, který umožnil detailní průchod dějem rázové zkoušky metodou Charpy. Lidským zrakem je nemožné pozorovat jednotlivé fáze zkoušky, což bylo umožněno právě analýzou vytvořeného záznamu, který využívá snímkové frekvence 11 800 fps. Na základě záznamu bylo možné stanovit rychlost šíření trhliny a její délku skrze konstrukční ocel ČSN 11 373 v tepelně nezpracovaném stavu, vodíkově zkřehlém stavu, žíhaném stavu a žíhaném stavu s následným navodíkováním.

Znatelným rozdílem průběhu rychlosti šíření trhliny skrze materiál byl vliv samotného vrubu U a V. Zatímco v případě vrubu V docházelo obecně k rychlostem vyšším, zároveň k nejvyšší rychlosti takřka hned po začátku děje, v případě vrubu U bylo spotřebováno velké množství energie na samotné utvoření trhliny a k maximální rychlosti došlo až v pozdější fázi.

Dle předpokladů, žíhání oceli vedlo ke zlepšení mechanických vlastností materiálu, kdy nedošlo ani k průchodu trhlinou skrze poloviční šířku vzorku. Pomocí analýzy bylo dokonce zjištěno, že žíhání materiálu jej natolik ovlivní, že i po 5 hodinové elektrolýze za účelem navodíkování, má materiál stále lepší vlastnosti než materiál v tepelně nezpracovaném stavu. Nicméně přítomnost vodíku i tak zdatelně negativně ovlivnila lomové chování oceli, což je patrné z porovnání žíhaného stavu bez navodíkování a s navodíkováním.

Dalším úkolem experimentální části měla být analýza rázové zkoušky pružinové oceli ČSN 14 260. Hlavním cílem bylo postihnout rozdílnost lomových vlastností při zatěžování vzorku rázem v ohybu metodou Charpy a modifikovaným zařízením na dynamický třibodový ohyb drátů. Z časových důvodů, které velmi ovlivnila celosvětová pandemie nemoci Covid-19, však tento úkol nebyl naplněn a k analýze nedošlo. Přístup do laboratorů byl velmi omezen a výsledkem toho nebylo umožněno splnit veškeré plánované cíle experimentální části.

10 Použitá literatura

- [1] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-720-4283-1.
- [2] KUHN, Howard, MEDLIN, Dana, ed. *ASM Handbook Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation*. ASM International, 2000. ISBN 978-0-87170-389-7.
- [3] *Strojírenské materiály 1. cvičení* [online]. 2006 [cit. 2020-10-19]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/staticke_zkouseni_cviceni.pdf
- [4] KUNZ, Jiří. *Aplikovaná lomová mechanika* [online]. 4. Praha: ČVUT, 2005 [cit. 2020-11-12]. ISBN 80-01-03306-6. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/276202726_Aplikovana_lomova_mechanik
- [5] RŮŽIČKA, Milan a Josef JURENKA. *Úvod do lineární lomové mechaniky Přednášky část 6* [online]. ČVUT [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: http://www.kmp.tul.cz/system/files/duz_2018_6_lm_ru.pdf
- [6] BENEŠOVÁ, Soňa. *Skripta tváření* [online]. Plzeň: ZČU [cit. 2020-10-19]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~sbenesov/Skriptatvareni.pdf>
- [7] Technologie tváření kovů. *Technická univerzita Liberec: Katedra strojírenské technologie* [online]. Liberec: TUL [cit. 2020-10-20]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm
- [8] *Nauka o materiálu: 1. přednáška* [online]. Plzeň: ZČU, 2020 [cit. 2020-10-22]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=171087>
- [9] *Nauka o materiálu: 2. přednáška* [online]. Plzeň: ZČU, 2020 [cit. 2020-10-22]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=171289>
- [10] *Nauka o materiálu: 3. přednáška* [online]. Plzeň: ZČU, 2020 [cit. 2020-10-23]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=171708>
- [11] *Nauka o materiálu: 4. přednáška* [online]. Plzeň: ZČU, 2020 [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=173753>
- [12] STRNADEL, Bohumír a Ivo DLOUHÝ. Proč se šíří trhliny. Kritické vlastnosti materiálu. *Vesmír* [online]. 2007, 2007(10) [cit. 2020-11-15]. ISSN 1214-4029. Dostupné z: <http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=6473&cid=6.html>
- [13] SOJKA, Jaroslav. *Nauka o materiálu I* [online]. Ostrava: VŠB, 2008 [cit. 2020-10-20]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=175005>
- [14] DRIML, Bohuslav. Základní vlastnosti materiálů a jejich zkoušení. *Chemikálie.upol* [online]. Olomouc: UPOL [cit. 2020-10-21]. Dostupné z: http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf

- [15] Vlastnosti kovových materiálů a jejich zkoušení. *Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích: Katedra aplikované fyziky a techniky* [online]. České Budějovice: JČU [cit. 2020-10-21]. Dostupné z: http://www.pf.jcu.cz/structure/departments/kaft/wp-content/uploads/Ing_Hladky_4.pdf
- [16] OŠTÁDAL, Josef. *Zkoušky tvaritelnosti a jejich uplatnění v praxi* [online]. Brno, 2011 [cit. 2020-10-27]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/5106/final-thesis.pdf?sequence=6>. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Kamil Podaný.
- [17] POKORNÝ, Karel. *Mechanické zkoušky* [online]. [cit. 2020-10-27]. Dostupné z: <https://adoc.pub/ovmt-mechanicke-zkouky5dd3e728552c3119c52b2acfa03ecf1358823.html>
- [18] LEHNERT, Ondřej. *Zpracování napětově deformační odezvy v průběhu cyklického zatěžování* [online]. Brno, 2014 [cit. 2020-11-11]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30293767.pdf>. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Jana Horníková.
- [19] KLOGNER, David. Uhlíková ocel 14 260. *Kudlárství* [online]. [cit. 2020-12-08]. Dostupné z: <https://www.kudlarstvi.cz/kopie-z-1-4116/>
- [20] RŮŽIČKA, Milan, Josef JURENKA a Martin NESLÁDEK. *Jur I: Dynamická pevnost a životnost* [online]. Praha: ČVUT [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: http://mechanika.fs.cvut.cz/content/files/DPZ/2017/DPZ_Jur_2017_01_web.pdf
- [21] Boron in Steel: Part One. *Total Materia* [online]. 2007 [cit. 2020-11-18]. Dostupné z: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=KTS&NM=212>
- [22] Boron in Steel: Part Two. *Total Materia* [online]. 2007 [cit. 2020-11-18]. Dostupné z: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&LN=CZ&site=kts&NM=214>
- [23] Hydrogen Embrittlement of Steel. *Industrial Metallurgists* [online]. [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: <https://www.imetllc.com/training-article/hydrogen-embrittlement-steel/>
- [24] Spring Steels. *IspatGuru* [online]. 2013 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <https://www.ispatguru.com/spring-steels/>
- [25] MEJZLÍK, Tomáš. Vysokorychlostní kamera v akci. *TVFreak* [online]. 2010 [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <https://www.tvfreak.cz/vysokorychlostni-kamera-v-akci/3762>
- [26] TSUJI, Kinko. *The Micro-World Observed by High-Speed Cameras: We See What You Don't See*. Cham: Springer International Publishing, 2018. ISBN 978-3-319-61490-8.
- [27] ČERNÝ, Jan. *Optimalizace vysokorychlostního záznamu pro použití u svařovacích procesů* [online]. Plzeň, 2018 [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/31621/1/Diplomova%20prace-Cerny%20Jan.pdf>. Diplomová práce. ZČU. Vedoucí práce Petr Beneš.
- [28] Slovníček pojmů machine vision. *Analýza obrazu* [online]. [cit. 2020-11-26]. Dostupné z: <http://www.analyza-obrazu.cz/strojove-videni/slovnicek-pojmu/>

- [29] Lightning For High Speed. *Love High Speed* [online]. [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: <https://www.lovehighspeed.com/lighting-for-high-speed/>
- [30] Technologie tváření kovů. *TUL* [online]. Liberec: TUL [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm
- [31] SCHINDLER, Ivo a Petr KAWULOK. *Deformační chování materiálů: Studijní podpora* [online]. Ostrava: VŠB, 2013 [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/13_Deformacni_chovani_materialu/Schindler_Deformacni_chovani_materialu.pdf
- [32] Factors to Consider When Purchasing a High-Speed Camera. *Photron* [online]. 2017 [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: <https://photron.com/factors-consider-purchasing-high-speed-camera/>
- [33] KOVAŘÍKOVÁ, Sabina. *Využití optických metod pro určování deformací těles* [online]. Brno, 2018 [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=173248. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Tomáš Návrat.
- [34] MELZER, Marek. *Aplikace a porovnání metod kontaktního a bezkontaktního měření deformace* [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/27362/1/BC2017-Melzer_Marek.pdf. Bakalářská práce. ZČU. Vedoucí práce Petr Beneš.
- [35] NX4-S3 Specification Sheet. *IDT Vision* [online]. 2018 [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: https://idteurope.eu/wp-content/uploads/2016/03/NX4-S3_20180316.pdf
- [36] HD Security Camera – 1MP 1.3MP 2MP 3MP 5MP 4K UHD Resolution. *Unifore* [online]. 2015 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <https://www.unifore.net/ip-video-surveillance/hd-security-camera-1mp-1-3mp-2mp-3mp-5mp-4k-uhd-resolution.html>
- [37] Frame Rate: A Beginner's Guide. *TechSmith* [online]. 2017 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <https://www.techsmith.com/blog/frame-rate-beginners-guide/>
- [38] Aperture, Shutter Speed, ISO. *I Shoot FUJI Film* [online]. [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <https://www.ishootfujifilm.com/film-101/articles/aperture-shutter-speed-iso>
- [39] Hloubka ostrosti. *Moje Tajemno* [online]. 2015 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <https://moje.tajemno.net/hloubka-ostrosti/>
- [40] DALTON, Sean. How to Choose the Best Aperture Every Time. *Sean Dalton Photography* [online]. 2020 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <https://seandalt.com/how-to-choose-the-best-aperture/>
- [41] ČSN 11373 – nelegovaná ocel obvyklých jakostí pro konstrukce. *CZ FERRO STEEL* [online]. [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/tyce-11373.pdf>
- [42] Charpy impact test. *TEC Science* [online]. [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://www.tec-science.com/material-science/material-testing/charpy-impact-test/>

Seznam obrázků

Obr. 1: Smluvní diagram tahové zkoušky materiálu s výraznou mezí kluzu [3]	12
Obr. 2: Schéma pružné deformace přecházející na trvalou deformaci [7]	13
Obr. 3: Schéma deformace skluzem v dokonalé krystalové mřížce [3]	13
Obr. 4: Schéma deformace dvojčatěním v dokonalé krystalové mřížce [3]	14
Obr. 5: Původní a podeformační stav vnitřní struktury [31]	15
Obr. 6: Smluvní diagram tahové zkoušky materiálu s vyznačenou Lüdersovo (Černovova) deformací [3]	15
Obr. 7: Normalizovaný tvar vzorku statické zkoušky tahem [15]	17
Obr. 8: Chování jednotlivých typů materiálu při statické zkoušce tlakem [9]	18
Obr. 9: Průběh statické zkoušky ohybem [15]	18
Obr. 10: Schéma namáhání vzorku krutem [17]	19
Obr. 11: Schéma namáhání vzorku na střih [15]	19
Obr. 12: Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy [14]	20
Obr. 13: Schéma Wöhlerovy křivky [18]	22
Obr. 14: Povrch lomu – vlevo: houževnatý (smykový), vpravo: křehký (štěpný) [4]	24
Obr. 15: Absorpce vodíku ocelí [23]	27
Obr. 16: Vyčítání elektrického náboje u CCD senzorů [28]	29
Obr. 17: Vyčítání elektrického náboje u CMOS senzorů [28]	29
Obr. 18: Porovnání jednotlivých rozlišení [36]	30
Obr. 19: Porovnání snímkové frekvence 60 fps a 24 fps [37]	30
Obr. 20: Doba expozice [38]	30
Obr. 21: Hloubka ostrosti v případě snímání lidské postavy [39]	31
Obr. 22: Světlost záznamu v závislosti na nastavení clony [40]	31
Obr. 23: Geometrie zkušebních vzorků s U a V vrubem [42]	33
Obr. 24: Průběh elektrolýzy	34
Obr. 25: Prostředí počítačového programu IDT Motion Studio	35
Obr. 26: Uspořádání laboratoře během rázové zkoušky metodou Charpy	35
Obr. 27: Obrazová analýza - vlevo: kalibrace, vpravo: měření vzdálenosti posuvu trhliny mezi snímky	36
Obr. 28: Vzorek materiálu ČSN 11 373.0 po rázové zkoušce - vrub U	37
Obr. 29: Vzorek materiálu ČSN 11 373.0 po rázové zkoušce - vrub V	37
Obr. 30: Vzorek materiálu ČSN 11 373.0 ve vodíkově zkřehlém stavu po rázové zkoušce - vrub U	39
Obr. 31: Vzorek materiálu ČSN 11 373.0 ve vodíkově zkřehlém stavu po rázové zkoušce - vrub V	39
Obr. 32: Vzorek materiálu ČSN 11 373.1 po rázové zkoušce - vrub U	40
Obr. 33: Vzorek materiálu ČSN 11 373.1 po rázové zkoušce - vrub V	41
Obr. 34: Vzorek materiálu ČSN 11 373.1 ve vodíkově zkřehlém stavu po rázové zkoušce - vrub U	42
Obr. 35: Vzorek materiálu ČSN 11 373.1 ve vodíkově zkřehlém stavu po rázové zkoušce - vrub V	42

Seznam grafů

Graf 1: Rychlost šíření trhliny materiálem ČSN 11 373.0.....	38
Graf 2: Rychlost šíření trhliny materiálem ČSN 11 373.0 ve vodíkově zkřehlém stavu.....	40
Graf 3: Rychlost šíření trhliny materiálem ČSN 11 373.1.....	42
Graf 4: Rychlost šíření trhliny materiálem ČSN 11 373.1 ve vodíkově zkřehlém stavu.....	43
Graf 5: Rychlost šíření trhlin.....	45

Seznam tabulek

Tab. 1: Chemické složení oceli ČSN 11 373 [41].....	33
Tab. 2: Mechanické vlastnosti oceli ČSN 11 373 [41]	33
Tab. 3: Tabulka k výpočtu rychlosti šíření trhliny - ČSN 11 373.0 (vrub U - 3 mm)	37
Tab. 4: Tabulka k výpočtu rychlosti šíření trhliny - ČSN 11 373.0 (vrub V - 3 mm)	38
Tab. 5: Tabulka k výpočtu rychlosti šíření trhliny - ČSN 11 373.0 ve vodíkově zkřehlém stavu (vrub U - 3 mm)	39
Tab. 6: Tabulka k výpočtu rychlosti šíření trhliny - ČSN 11 373.0 ve vodíkově zkřehlém stavu (vrub V - 3 mm)	39
Tab. 7: Tabulka k výpočtu rychlosti šíření trhliny - ČSN 11 373.1 (vrub U - 3 mm)	41
Tab. 8: Tabulka k výpočtu rychlosti šíření trhliny - ČSN 11 373.1 (vrub V - 3 mm)	41
Tab. 9: Tabulka k výpočtu rychlosti šíření trhliny - ČSN 11 373.1 ve vodíkově zkřehlém stavu (vrub U - 3 mm)	43
Tab. 10: Tabulka k výpočtu rychlosti šíření trhliny - ČSN 11 373.1 ve vodíkově zkřehlém stavu (vrub V - 3 mm)	43
Tab. 11: Chemické složení oceli ČSN 14 260	44
Tab. 12: Souhrn vypočtených a naměřených hodnot	45