

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra materiálu a strojírenské technologie**



**Bakalářská práce**

**Rázová houževnatost materiálů**

**Jiří Podhrazský**

© 2020 ČZU v Praze

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jiří Podhrazský

Zemědělské inženýrství

Inženýrství údržby

Název práce

**Rázová houževnatost materiálů**

Název anglicky

**Impact toughness of materials**

---

## Cíle práce

Cílem práce bude literární rešerše v oblasti rázové houževnatosti materiálů se zaměřením na zkoušky materiálů, vlivu externích podmínek zkoušky na houževnatost a vlivu materiálových vlastností na houževnatost.

## Metodika

- 1) Úvod
- 2) Zkoušky houževnatosti materiálů
- 3) Vliv teploty a rychlosti deformace na rázovou houževnatost
- 4) Vliv materiálových vlastností na rázovou houževnatost
- 5) Závěr

## **Doporučený rozsah práce**

30-40 stran

## **Klíčová slova**

houževnatost, ráz, teplota, rychlost deformace

---

## **Doporučené zdroje informací**

- CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. Materials science and engineering. NY: John Wiley & Sons, 2011.
- GARCIA-MATEO, Carlos; CABALLERO, Francisca G. Understanding the Mechanical Properties of Nanostructured Bainite. Handbook of Mechanical Nanostructuring, 2015, 35-65.
- HUANG, Donald D. Fracture-toughness testing of toughened polymers.
- HUANG, Donald D.; WOOD, Barbara A.; FLEXMAN, Edmund A. Toughened Nylons: a fracture mechanics investigation. Advanced Materials, 1998, 10.15: 1207-1211.
- HUME-ROTHERY, William. The structures of alloys of iron: an elementary introduction. Elsevier, 2016.
- LIEBOWITZ, Harold (ed.). Fracture of Metals: An Advanced Treatise. Elsevier, 2013.
- LIU, Alan F. Mechanics and mechanisms of fracture: an introduction. ASM International, 2005.
- PRABHUDEV, K. H. Handbook of heat treatment of steels. Tata McGraw-Hill Education, 1988.
- TOUGHNESS, Fracture-Initiation. Determination of dynamic fracture-initiation toughness using a novel impact bend test procedure. Journal of Pressure Vessel Technology, 1993, 115: 389.

---

## **Předběžný termín obhajoby**

2019/2020 LS – TF

## **Vedoucí práce**

doc. Ing. Rostislav Chotěborský, Ph.D.

## **Garantující pracoviště**

Katedra materiálu a strojírenské technologie

---

Elektronicky schváleno dne 30. 1. 2020

**prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.**

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 19. 2. 2020

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 08. 03. 2020

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Rázová houževnatost materiálů" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 20. 4. 2020

---

## **Poděkování**

Můj vděk si zasluhuje zejména doc. Ing. Rostislav Chotěborský, Ph.D. za odborné vedení a nevídanou trpělivost. Také děkuji mé rodině a přátelům za podporu a připomínky k práci.

# Rázová houževnatost materiálů

## Abstrakt

Tato práce pojednává rešeršní formou o rázové houževnatosti materiálů. Definuje samotný pojem rázové houževnatosti a krátce seznámí čtenáře se základy lomových procesů, jejich projevy a podobami. Poté se práce zaměří na popis jednotlivých zkoušek houževnatosti, jejich princip a silné či slabé stránky. Dále práce objasní významné faktory ovlivňující rázovou houževnatost materiálů, a to jak vnější vlivy (teplota, rychlost rázu), tak i samotné materiálové vlastnosti (uspořádání krystalové mřížky, chemické složení).

**Klíčová slova:** houževnatost, ráz, lom, zkouška houževnatosti, teplota, přechodové chování, rychlost deformace, krystalová mřížka, chemické složení

# Impact toughness of materials

## Abstract

This thesis is a summary dealing with impact toughness. It defines the concept of impact toughness of materials and introduces the reader to the basis of fracture processes, their manifestations and forms. Afterwards, it describes particular testing techniques ascertaining fracture toughness, their essence as well as their advantages and obstacles. Furthermore, it portrays major causes influencing the fracture behaviour of materials – that being both external factors (temperature, strain rate) and material properties (crystal lattice arrangement, chemical composition).

**Keywords:** impact toughness, impact, fracture, impact toughness test, temperature, ductile-to-brittle transition, strain rate, crystal lattice, chemical composition

# Obsah

<b>1.</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Zkoušky houževnatosti materiálů.....</b>	<b>7</b>
2.1.	Zkoušky založené na koncepci tranzitní teploty .....	8
2.1.1.	Zkouška rázem v ohybu dle Charpyho.....	8
2.1.2.	Zkouška rázem v ohybu dle Izoda.....	11
2.1.3.	Pelliniho zkouška padajícího závaží.....	12
2.1.4.	Zkouška rázem v ohybu velkých těles .....	13
2.1.5.	Zkouška rázem v ohybu velkých těles původní tloušťky .....	14
2.2.	Zkoušky založené na poznacích lomové mechaniky .....	15
2.2.1.	Klady a zápory zkoušek založených na poznacích lomové mechaniky .....	16
2.2.2.	Tradiční rozdělení lomové mechaniky .....	17
2.2.3.	Zkušební tělesa .....	18
2.2.4.	Zkouška lomové houževnatosti dle parametru $K_{Ic}$ .....	19
2.2.5.	Zkouška lomové houževnatosti dle kritického rozevření trhliny CTOD .....	21
2.2.6.	Zkouška lomové houževnatosti dle J-integrálu .....	23
<b>3.</b>	<b>Vliv teploty a rychlosti deformace na rázovou houževnatost.....</b>	<b>25</b>
<b>4.</b>	<b>Vliv materiálových vlastností na rázovou houževnatost.....</b>	<b>28</b>
4.1.	Obsah uhlíku.....	29
4.2.	Obsah manganu .....	29
4.3.	Obsah síry .....	30
4.4.	Obsah kyslíku .....	32
4.5.	Obsah vodíku.....	33
4.6.	Mechanické vlastnosti ve vztahu s houževnatostí.....	35
<b>5.</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>36</b>
<b>6.</b>	<b>Použitá literatura .....</b>	<b>37</b>
<b>7.</b>	<b>Použité symboly a zkratky .....</b>	<b>39</b>
<b>8.</b>	<b>Použité fyzikální veličiny .....</b>	<b>40</b>
<b>9.</b>	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>41</b>



# 1. Úvod

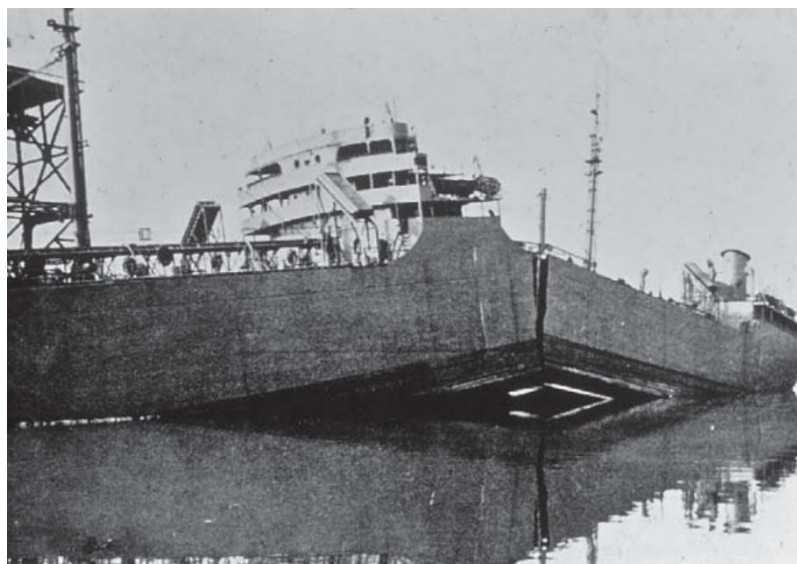
Moderní konstruktér má dnes ve srovnání s dobami minulými k dispozici značné množství spolehlivých pomůcek, sloužících k zjednodušení stádia návrhu a zdokonalení samotného produktu. Naše schopnost předvídání provozních podmínek součástí na časové ose dosáhla vysoké úrovně a příčiny poruch jsou obvykle známy. Přesto mnohdy dochází k nečekané poruše, poškození a selhání funkce součásti. (1)

Selhání funkce strojní či stavební části je téměř bez výjimky nechtěným jevem vedoucím k ekonomickým ztrátám, ohrožení lidského života i životního prostředí. Z tohoto důvodu je úkolem každého konstruktéra, v rámci jeho možností, předcházet poruchám vhodným návrhem a v případě poruchy zkoumat její příčinu v zájmu budoucí prevence. (1)

V průběhu funkce každé součásti zpravidla dochází k šíření vnitřních poruch. Jejich vznik, vzájemné propojování a růst je způsoben zatěžováním a působením prostředí a vede k porušení. Takový proces lze však sledovat a využít k predikci životnosti součásti. K porušení může dojít i náhle, před dovršením plánované životnosti. Pokud takové porušení má charakter narušení celistvosti součásti, došlo k němu obvykle prudkým rázem. (1)

K pochopení podstaty tohoto problému je klíčové zjištění, že při prudkém nástupu zatížení dochází k lomu při značně nižších hodnotách napětí v průřezu než při běžném statickém, pomalu rostoucím či cyklickém zatížení. Mylná je tedy představa, že k porušení dochází pouze dosažením nominálního napětí v průřezu, kterému vždy předchází elastická a následně plastická deformace. (2)

S cílem pochopení takových procesů vznikl s koncem druhé světové války nový vědní obor materiálového inženýrství – lomová mechanika. Ačkoliv se první náznaky nečekaných lomů (zejména objemných kovových konstrukcí) objevily již na přelomu 19. a 20. století, podnět k rozvoji oboru daly až události pevně spjaté s druhou světovou válkou. K zásobování Velké Británie a Sovětského svazu válečným materiálem ze Spojených států amerických bylo třeba značného množství dopravních lodí. Vznikla nová třída plavidel unikátní konstrukce, označovaných jako Liberty ships, s plně svařovaným trupem, který nahradil tehdy obvyklý nýtovaný skelet. Z přibližného počtu 2700 plavidel spuštěných na moře 400 kusů utrpělo porušení náhlým lomem, přičemž 90 případů bylo vyhodnoceno jako velmi vážné. Ve 20 případech porucha vedla k vyřazení plavidla ze služby a přibližně polovina z tohoto počtu byla následkem poruchy rozlomena vedví (viz obrázek č.1). (3)



Obrázek 1: Liberty ship S.S. Schenectady, rozlomena vedví v roce 1943 (23)

Jak odhalilo vyšetřování, za haváriemi stála kombinace tří faktorů, jmenovitě:

- a) nekvalitní sváry obsahovaly množství vnitřních trhlin
- b) většina lomů byla iniciována v ostrých rozích mezi palubou a poklopy, kde docházelo ke koncentraci napětí v malé oblasti
- c) použité oceli trpěly nízkou houževnatostí (1) (3)

Nejdůležitější vlastností materiálu, charakterizující jeho schopnost odolávat podobným lomům, je právě rázová houževnatost. Tu lze chápat jako schopnost materiálu pohlcovat energii a odolávat vzniku deformace či porušení. Jako houževnaté materiály považujeme ty, které spotřebují velké množství energie vynaložené na vyvolání deformace a následného lomu. Za křehké naopak materiály, které se za použití malých sil snadno porušují. (3)

V následujících kapitolách se zaměříme právě na otázku měření a významu rázové houževnatosti. Začneme pohledem na typické lomové procesy a jejich podoby. Další kapitola popíše již zavedené jednotlivé zkoušky rázové houževnatosti, stručnou historii vývoje, současnou podobu, jejich použití a úskalí interpretace jejich výsledků. Nakonec se podíváme na některé významné činitele, které ovlivňují jak samotnou rázovou houževnatost materiálu, tak i samotný pochod lomu. Havárie související s náhlým lomem se týkají především objemných kovových konstrukcí, např.: mosty, železniční stavby, tlakové nádrže atd. Tudíž se z hlediska materiálů budeme věnovat obecně kovům a slitinám. (1)

## Lomový proces

Každé narušení celistvosti součásti ukončené rozdělením na dvě či více částí vzniklo lomovým procesem. V případě krystalických materiálů lze celý průběh rozdělit do 4 etap:

- a) plastická deformace
- b) nukleace mikrodefektů
- c) růst defektů
- d) dolom (4)

Lomový proces má objemově i časově nehomogenní průběh, tudíž nelze na jednotlivé etapy pohlížet jako na diskrétní, na sebe navazující kroky. Mnohdy dochází k souběhu několika etap uvnitř zasaženého objemu. (2)

V důsledku působení vnějších (částečně i vnitřních) sil na těleso dochází k první etapě – plastické deformaci. Deformace se za běžných provozních teplot realizuje převážně pohybem dislokací (dislokační skluz). Podle vnějších podmínek namáhání může k překročení meze kluzu dojít v celém objemu tělesa (typické pro houževnaté lomy) nebo jen omezeně v lokálních mikroobjemech (křehké lomy). Běžně dochází k pohybu více dislokací najednou v rámci jedné skluzové roviny. (4)

Nukleace (nebo iniciace) mikrodefektů je způsobena interakcí dislokací mezi sebou a mezi a nehomogenitami krystalové mřížky. Pokud vlivem hromadění dislokací dochází k růstu napětí příliš rychle na to, aby bylo zastaveno deformačním zpevněním, porušují se okolní meziatomové vazby a vznikají mikrodefekty. Porušením meziatomových vazeb ale dojde i ke vzniku nových mikropovrchů, které umožní disipaci energie, která byla původně hnací silou. Dochází k relaxaci materiálu. Ve většině lomových procesů je iniciováno velké množství mikrodefektů, z nichž jen malému množství zbyde dostatek energie k dalšímu růstu. (4)

Růstem defektů se mívá jejich vzájemné spojování a vytváření pozorovatelné, tzv. magistrální trhliny, která se dále rozšiřuje. Trhlina se šíří místy se nejnižším povrchovým napětím, které kladou nejnižší odpor proti pohybu dislokací. Nejčastěji jde o sousedící mikrodefekty iniciované krátce po deformaci tělesa, ale také stávající poruchy vzniklé provozem nebo technologií výroby. (2) (4)

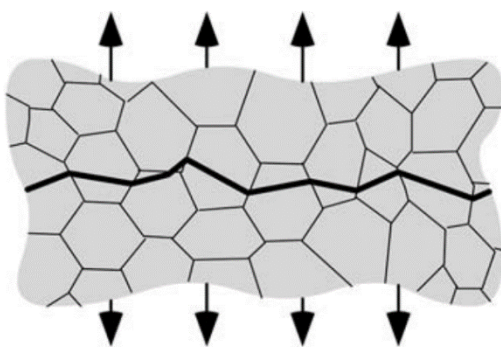
Zda k růstu skutečně dojde, je podmíněno zejména činností vnějších sil a původní velikostí (objemu) konkrétních mikrodefektů. Můžeme rozeznávat dvě formy růstu poruchy:

- a) stabilní růst
- b) nestabilní růst (3) (4)

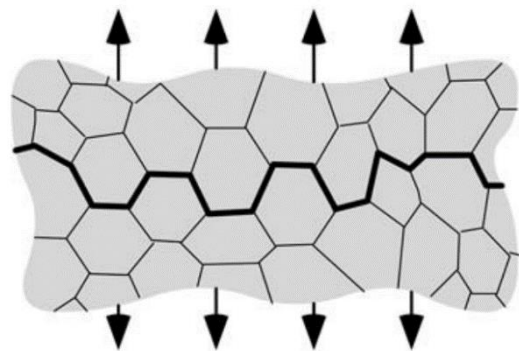
Stabilním růstem rozumíme situaci, kdy k šíření trhliny dochází pouze při kontinuálním působení vnějšího zatížení. Pokud snížíme velikost zatížení, šíření trhliny se zpomalí nebo zcela zastaví. Naopak nestabilní růst je stav, kde k šíření trhliny dochází spontánně, bez působení vnějších sil. Bližší zkoumání povrchů lomů odhalila, že důvodem pro vznik nestabilního růstu je především velikost původního mikrodefektu. Malá relativní velikost znamená, že zaoblení čela mikrodefektu má nižší poloměr. Tudiž, napětí se koncentruje v menším mikroobjemu. Takto nahromaděné napětí může plně nahradit práci potřebnou k vytvoření nové lomové plochy. Tradičně křehké materiály při deformaci vykazují nízkou míru plasticity, vznikají mikrodefekty s nízkým zaoblením čela posilující vznik nestabilního lomu. Naopak houževnaté materiály disponují mikrodefekty o větším objemu, u nichž je k šíření trhliny zapotřebí působení vnějších sil. (3) (4)

### Typologie lomů

U krystalických materiálů rozeznáváme dva typy lomů – houževnatý a křehký, rozlišené energetickou náročností celého lomového procesu. Jde však o relativní termíny, o jejich výskytu rozhoduje řada proměnlivých faktorů (viz. kapitoly 3 a 4). Vedle energetické náročnosti můžeme lomy zkoumat i podle jejich vzhledu. Pomocí elektronového mikroskopu lze sledovat fraktografické znaky lomových ploch, jejichž charakter nám prozradí, zda došlo k růstu trhliny transkrystalicky nebo interkrystalicky, tj. zda se šířila směrem po skluzové rovině – skrze zrna (viz obrázek 2) nebo se šířila cestou po hranicích zrn (viz obrázek 3). (1) (3)

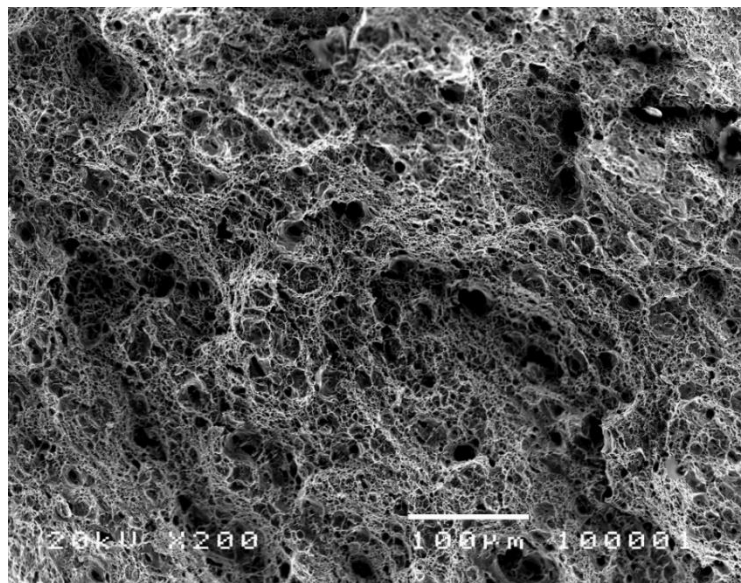


Obrázek 3: Transkrystalický lom (3)

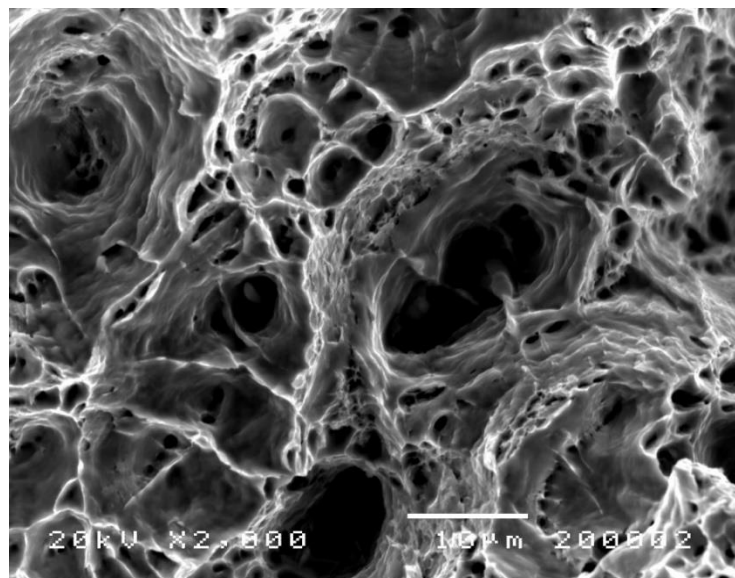


Obrázek 2: Interkrystalický lom (3)

„Lom houževnatý lze definovat jako vysokoenergetický plastický kolaps, ke kterému dochází po vzniku plastické nestability v kritickém průřezu tělesa“. (2) K nukleaci, růstu a spojování mikrodefektů dochází zpravidla v okolí částic sekundární fáze, jelikož jejich houževnatost je ve většině případů nižší než u základní matrice. Houževnaté materiály vykazují značnou plastickou deformaci v okolí trhliny před samotným lomem, trhlina se šíří pomalejší rychlostí, její růst je stabilní. Z fraktografického hlediska se houževnatý lom dělí na transkrystalický nebo interkrystalický. V obou případech je lomová plocha tvořena množstvím kulových důlků, jak lze vidět na obrázku 4. Samotné částice sekundární fáze často nalzáme na dně důlků (zřetelně viditelné na obrázku 5). (1) (4)



Obrázek 4: Tvárná lomová plocha, pořízeno SEM, 200x zvětšení (24)



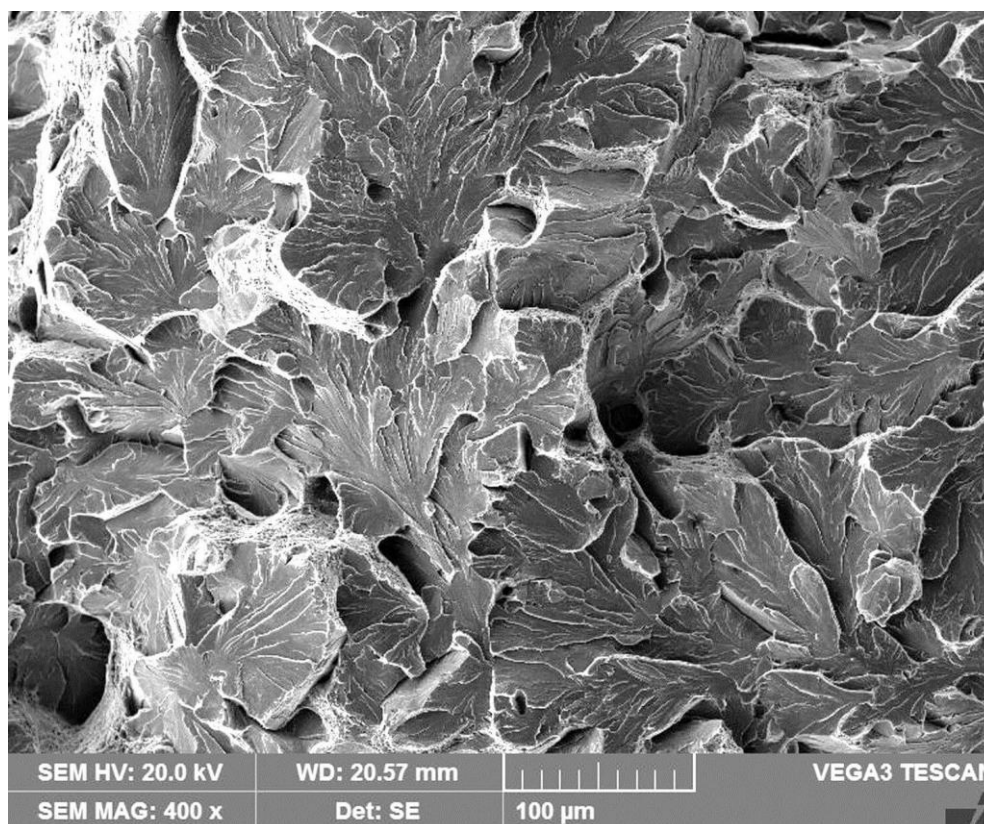
Obrázek 5: Částice sekundární fáze na dně důlků, pořízeno SEM, 2000x zvětšení (24)

Porušení houževnatým lomem je téměř vždy preferované ze dvou důvodů:

Za prvé, pozorovatelná plastická deformace nás předčasně varuje před lomem tělesa. Za druhé, trhlina houževnatého lomu se šíří stabilně, tudíž lze snížit zatížení tělesa a tím dlouhodobě předejít jejímu šíření. (1)

Na rozdíl od houževnatého lomu, křehký lom je energeticky nenáročný proces. K nukleaci mikrodefektů dochází v křehkých částicích jako jsou karbidy či vměstky, zde se hromadí dislokace, napětí stoupá a částice praská. Často se však vinou nedokonalé technologie výroby trhlina šíří propojováním již přítomnými mikrotrhlinami a dutinami. Lom doprovází jen nepatrná deformace, trhlina se šíří nestabilně, rychlostí blízké rychlosti zvuku v daném materiálu. (1) (2)

Z fraktografického hlediska nejčastěji dochází k transkrystalickému lomu (viz obrázek 6). V tomto případě dochází k porušení soudržnosti oddělením dvou částí zrna. Trhlina se šíří podél krystalografických rovin, hustě obsazených atomy, které neumožní pohyb dislokací skluzem, tudíž, dochází k porušení meziatomových vazeb napříč zrny. Plocha lomu se skládá z fazet – lomů jednotlivých zrn. Jejich orientace je dána odlišnou orientací zrn vůči sobě. (1) (5)



Obrázek 6: Transkrystalický křehký lom, pořízeno SEM, 400x zvětšení (21)

Méně častým jevem je lom interkrystalický (viz obrázek 7). Důvodem pro jeho vznik je snížení pevnosti meziatomových vazeb na hranicích zrn. To vzniká z důvodu přítomnosti jiné fáze na hranicích zrn nebo působením prostředí. (1)



Obrázek 7: Interkrystalický křehký lom, pořízeno SEM, 3000x zvětšení (22)

## 2. Zkoušky houževnatosti materiálů

Ačkoli pokusy lidstva o pochopení příčiny náhlých lomů sahají až do starověku, za prvopočátky laboratorního zkoušení rázové houževnatosti můžeme považovat až experimenty vedené na zlomu 19. a 20. století, tedy ve značném předstihu před nástupem lomové mechaniky jako vědeckého oboru. Podnětem ke zkoušení byl hojný výskyt náhlých lomů rozměrných částí převážně ocelových staveb – železnic, mostních konstrukcí, lodí atd. Konstrukce se porušovaly navzdory důslednému dimenzování dle výsledů statických zkoušek, např. pevnosti v tahu a ohybu. I materiály považované za velmi houževnaté podléhaly mechanismům křehkého lomu a pouhé naddimenzování dříve porušených částí problém mnohdy neřešilo. Prioritou materiálového inženýrství se tehdy stalo předcházení (anebo alespoň snížení počtu) výskytu onoho problému. (3) (4)



Jediným východiskem bylo zavedení nové mechanické vlastnosti – rázové houževnatosti, měřitelné veličiny, při jejímž překročení dochází ke k lomu. Jako první byly vyvinuty dvě dynamické destruktivní zkoušky: Charpyho a obdobná Izodova zkouška, určené k měření rázové houževnatosti zejména kovových materiálů. Též bylo rozeznáno, že měřená houževnatost je ovlivnitelná řadou faktorů; jako nejdůležitější byly považovány přítomnost poruch na tělese, rychlost deformace a teplota. Proto obě metody využívají kyvadlo k přerážení předem porušených vzorků za vysoké rychlosti a za dané teploty. Přestože se dnes stále jedná o významné představitele zkušebních metod pro svoji jednoduchost a reprodukovatelnost, obě metody jsou založené na sledování změny rázové houževnatosti ve spojitosti se změnou teploty vzorku. Další významní činitelé, jako například tvar a rozměry těles jsou ale u obou zkoušek normováni. Řada nynějších technických disciplín si však žádá spolehlivější zkoušení houževnatosti. Proto byly v průběhu 2. poloviny 20. století vyvinuty další zkušební metody, využívány pro zkoušení specifických výrobků, zkoušky využívající poznatků lomové mechaniky, a prostředky instrumentace. (3) (4)

## **2.1. Zkoušky založené na koncepci tranzitní teploty**

Zkoušky, které probereme v této kapitole, jsou založené na měření houževnatosti materiálů při změnách teploty. Jedním z účelů jejich měření je nalezení tzv. tranzitní (přechodové) teploty (viz kapitola 3). Tedy teploty, nad níž se vzorky porušují houževnatě a pod níž se porušují křehce. (4) (6)

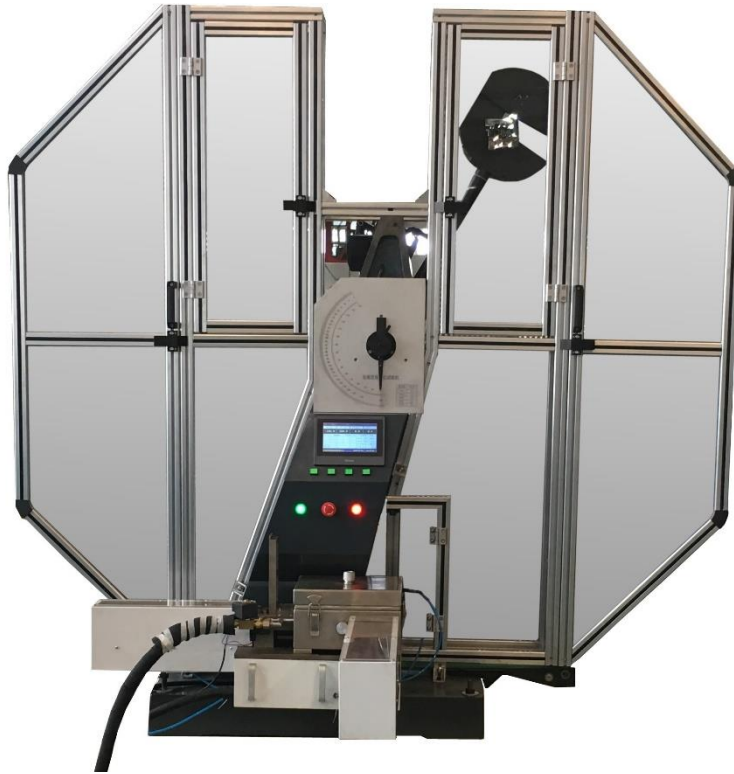
### **2.1.1. Zkouška rázem v ohybu dle Charpyho**

Zkouška vznikla na počátku 20. století společným úsilím S. B. Russella a G. Charpyho. Poprvé byla představena v roce 1901 na sjezdu Mezinárodního svazu pro technické zkoušení materiálu a již za pár let byla doporučena k přijetí členskými zeměmi. Metoda se rychle rozšířila v Evropě i v jiných zemích. (7)

Začátek 1. světové války však znamenal konec mezinárodní spolupráce o normalizaci zkoušky. Následovaly nevídané potíže po stránce reprodukovatelnosti a srovnatelnosti výsledků měření prováděných na tělesech rozmanitých rozměrů a rozličnými vruby. V druhé polovině 20. století zaznamenáváme značný pokrok ve sblížení stanovisek zejména v otázce používaných vrubů. Výrazným milníkem pro Českou republiku je rok 1998, kdy dochází k přijetí evropské normy EN 10045-1, která nahrazuje tehdejší starší normy vyvíjené ve východním bloku. Metodou se zabírají normy ČSN EN ISO 148-1 nebo ISO 179-1. (7)



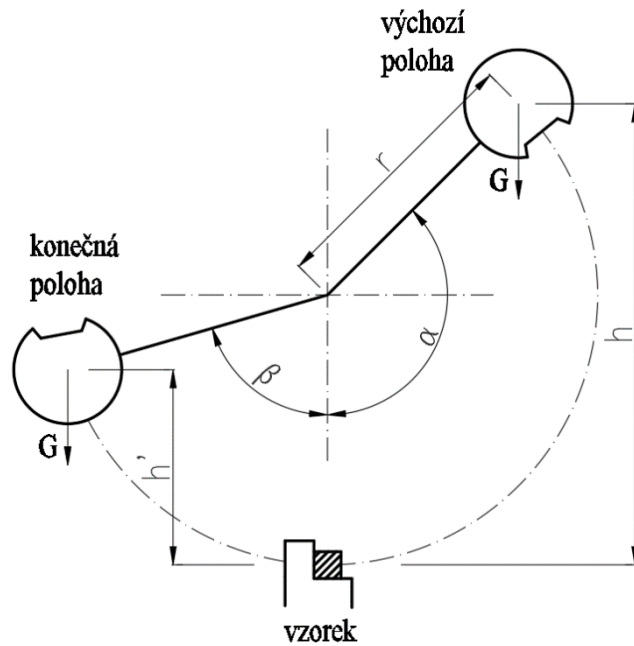
Zkouška spočívá v přerážení zkušebních těles zkoumaného materiálu nárazem kyvadla. Jde o dynamickou, destruktivní zkoušku, jejímž úkolem je měřit nárazovou energii  $K$  [J] spotřebovanou k přerážení tělesa. Aparát zkušebního zařízení se skládá ze stojanu, na němž je zavěšeno kyvadlo, podpory pro umístění vzorku, měřící stupnice a západky k vypuštění kyvadla. Příklad zařízení je uveden na obrázku 8. (1)



Obrázek 8: Příklad moderního provedení Charpyho zkušebního zařízení s prostředky instrumentace (26)

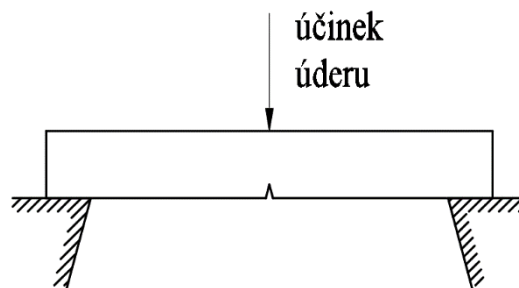
Pro provedení zkoušky se kyvadlo vyzdvihne do své výchozí polohy, tím je mu udělena potenciální energie. Vzorek se umístí do podpor a vystředí se. Uvolněním západky se kyvadlo vypustí, zhoupne se směrem dolů, potenciální energie se mění na kinetickou a kyvadlo naráží do vzorku. K lomu vzorku se spotřebuje jen část energie, kyvadlo se proto překmitne do své konečné polohy, jak je schematicky uvedeno na obrázku 9. Nárazová práce  $K$  je tedy rozdílem potenciálních energií  $W$  a  $W'$  kladiva ve výchozí poloze  $h$  a konečné poloze  $h'$  dle rovnice (1) (8):

$$K = W - W' = G(h - h') = G[r(1 - \cos \alpha) - r(1 - \cos \beta)] = Gr(\cos \beta - \cos \alpha) \quad (1)$$



Obrázek 9: Schéma principu Charpyho zkoušky

Odpor vzduchu a čepového tření v kloubu kyvadla se ve výpočtu zanedbává. Hodnotu nárazové práce lze odečíst z měřicí stupnice. Kyvadlo je opatřeno ostrým beranem, který dopadá na protější stranu vzorku od umístění vrubu. Vzorek je zatížen ohybem jako prostý nosník, jak je uvedeno na obrázku 10; nejvyššího napětí je dosaženo právě v kořeni vrubu. (8)



Obrázek 10: Vzorek je uložen jako prostý nosník

Vzorky mají tvar hranolů o rozměrech 10 x 10 x 55 mm, do nichž je obroben V-vrub nebo U-vrub daných rozměrů. Nutno dodat, že národní příloha normy ČSN EN ISO 148-1 dosud dovoluje používat jiné hloubky U-vrubu než 5 mm, a i jiné šířky tyčí než 10 mm, než jaké dovoluje evropská norma. Hlavní měřenou veličinou je míra nárazové práce  $K$  [J] (respektive KV nebo KU podle druhu vrubu). Tato veličina se většinou přepočítává na hodnotu vrubové houževnatosti  $KC$  (KCV nebo KCU):

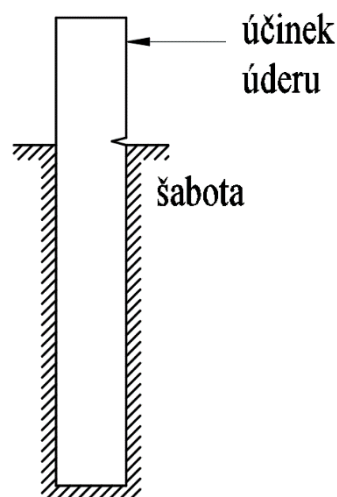
$$KC = \frac{K}{S_0} \text{ [J.cm}^{-2}\text{]} \quad (2)$$

kde:  $S_0$  je průřez tyče v místě vrubu [ $\text{cm}^2$ ] (8)

Veličiny jako nárazová práce nebo vrubová houževnatost mají pro design pokročilých konstrukcí jen pramalý význam. Mnozí výzkumníci se proto v minulosti pokoušeli nalézt závislost mezi nárazovou prací a jinými, vhodnějšími parametry popisující rázovou houževnatost, například s faktorem intenzity napětí  $K_I$ . Některé takové empirické vztahy lze považovat za dostatečně přesné, avšak většinu je nutno pokládat za nespolehlivé. Je tomu díky podstatným rozdílům v podmínkách předcházejícím lomu. Jen kupříkladu: zkoušené vzorky jsou opatřené vrubem s poměrně tupým zakončením (a to i v případě V-vrubu), kdežto skutečné konstrukce se porušují většinou lomem šířeným přes mikrotrhliny s velmi ostrým zakončením. Mimo jiné, iniciovaných předchozím cyklickým zatížením – narozdíl o prostého úderu do jinak nepoužívaného materiálu. Z tohoto důvodu výsledky Charpyho zkoušky (a dynamických zkoušek unisono) nalézají využití zejména v porovnávání a kontrole různých materiálů a v tvorbě tranzitních křivek (více viz kapitola 3). (1) (3)

### 2.1.2. Zkouška rázem v ohybu dle Izoda

Izodova zkouška je velmi podobná té Charpyho. Rovněž používá kyvadlo k přerážení vzorků a měření nárazové energie. Metodu poprvé představil E. G. Izod v roce 1903 Britskému vědeckému svazu (BSA). a podobně jako Charpyho se rychle rozšířila, zejména ve Velké Británii a Spojených státech. Průběh zkoušky a vzhled vzorků popisují normy ASTM D256 nebo ISO 180. Zatím co u Charpyho zkoušky je vzorek ukládán jako prostý nosník, Izod upevní vzorek do šaboty jako konzoli, schematicky na obrázku 11. (3)



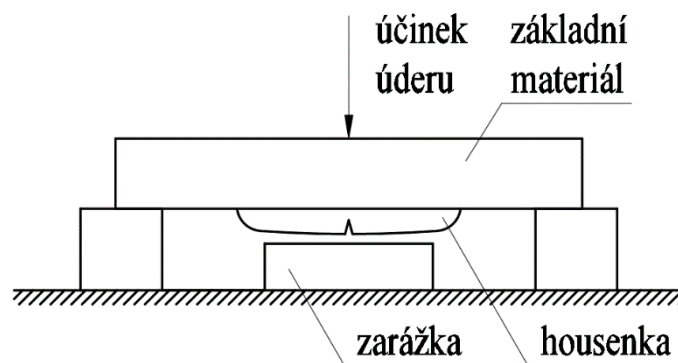
Obrázek 11: Upevněný vzorek Izodovy zkoušky

Oproti Charpyho zkoušce čelí ta Izodova stejným i dalším úskalím. Jelikož se vrub nachází velmi blízko roviny upevnění, provádění zkoušky za jiných, než pokojových teplot je nemožné, pokud není šabota aktivně chlazená (či zahřívána). Tím komplikuje měření hodnot pro tvorbu tranzitní křivky (viz kapitola 3). Navíc, po nárazu kladiva může ulomený kus kyvadlo zbrzdít a tím zkreslit výsledky. Z těchto důvodů stojí Izodova zkouška spíše na pozadí. Dále se obě zkoušky od sebe liší jen v detailech, jako: rozměry a vrub vzorků nebo typ kladiva. Uplatnění dosud nachází zejména v měření plastů a to i za velmi nízkých teplot. (1) (3)

### 2.1.3. Pelliniho zkouška padajícího závaží

Též zvaná zkouška padajícího závaží (DWT – drop weight test), zkouška byla vyvinuta Pellinim a Puzakem v 50. letech 20. století v americké NRL – Naval Research Laboratory v době formulace zákonů lineárně elastické lomové mechaniky. Původně byla určena k měření hodnoty  $K_{Ia}$ , která charakterizuje schopnost materiálu zastavit nestabilní šíření trhliny. Metoda spočívá v opakovaném vypouštění závaží na desku s křehkým návarem za daných teplot. Původního záměru nebylo dosaženo, neboť měřenou veličinou je teplota, při níž dochází k rozšíření trhliny z housenky do základního kovu, a nikoliv  $K_{Ia}$ . Zkoušku tudíž řadíme do skupiny využívající teplotně tranzitní přístup. Nicméně, dnes se jedná o velmi rozšířenou zkoušku jejímž předmětem zkoumání jsou materiály svarů tak i základních kovů. Její provedení popisuje například norma ASTM E208. (3) (4)

Na plochou kovovou desku (preferovaně o tloušťce nad 16 mm) je navařena jediná housenka elektrickým obloukem tvrdou elektrodou. Do housenky je příčně vybroušen ostrý vrub, v němž se iniciuje trhlina (viz obrázek 12). (3) (4)

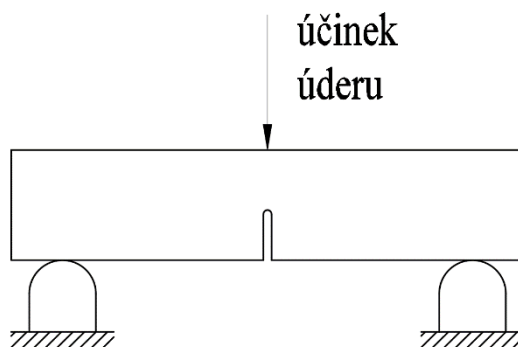


Obrázek 12: Schéma zkoušení tělesa DWT

Těleso je temperováno na počáteční teplotu, poté uloženo na podpory padostroje jako prostý nosník, kde je na něj spuštěno závaží. Díky přítomnosti zarážky je po dopadu závaží dovolen jen omezený průhyb tělesa. Tímto se simuluje situace, kdy většina nárazové energie je využita k šíření trhliny a jen malé množství k iniciaci. V závislosti na houževnatosti může dojít k rozšíření trhliny nebo k jejímu zastavení. Test spuštění závaží se opakuje při postupném snižování teploty v přírůstcích 5 °C do té doby, než je dosaženo proniknutí trhliny do základního materiálu. Nejvyšší teplota, při které ještě dochází k průniku trhliny do základního materiálu se nazývá teplota nulové houževnatosti  $t_{NDTT}$  – nil ductility transition temperature (někdy pouze  $t_{NDT}$ ). (3) (4)

#### 2.1.4. Zkouška rázem v ohybu velkých těles

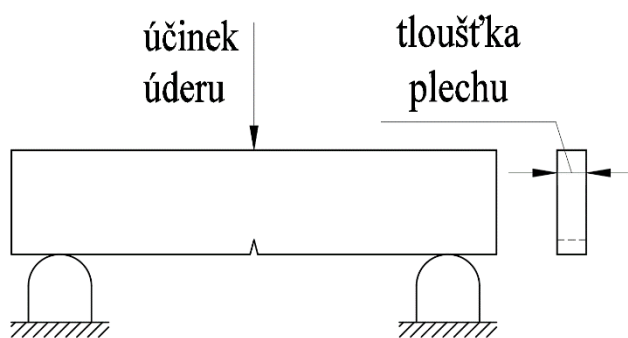
Označena zkratkou DT – dynamic tear, tato zkouška je velmi podobná té Charpyho. Vykonávána je však na větších vzorcích, obdélníkového průřezu o rozměrech obvykle 165 x 41 x 16 mm (tloušťka se může značně lišit od 16 mm). Zkušební zařízení jsou též zvětšena odpovídajícím způsobem. Těleso i vrub jsou upraveny tak, aby k iniciaci trhliny došlo snadno a krátce po zatížení. Tudiž, měřená nárazová energie  $E_{DT}$  [J] představuje energii potřebou k šíření lomu (podobně jako u DWT, kde je však měřena teplota). Zkouška se rovněž provádí za různých teplot. Vedle porovnání materiálů a kontroly výrobků, slouží  $E_{DT}$  spolu s tranzitní teplotou i k výběru konstrukčních materiálů. Provedením zkoušky se zabývá norma ASTM E436. Vzorky jsou ohýbány jako prostý nosník dopadem berana kyvadla nebo padostroje (viz obrázek 13). (3) (4)



V případě kyvadla lze hodnoty odečítat ze stupnice, při použití padostroje je však nutné použít instrumentaci, jelikož značná část energie je pohlcena konstrukcí podpor. Ačkoli je při Charpyho a DT zkoušky použité těleso stejné konfigurace, výsledky vrubové houževnatosti nejsou srovnatelné. (3) (4)

### 2.1.5. Zkouška rázem v ohybu velkých těles původní tloušťky

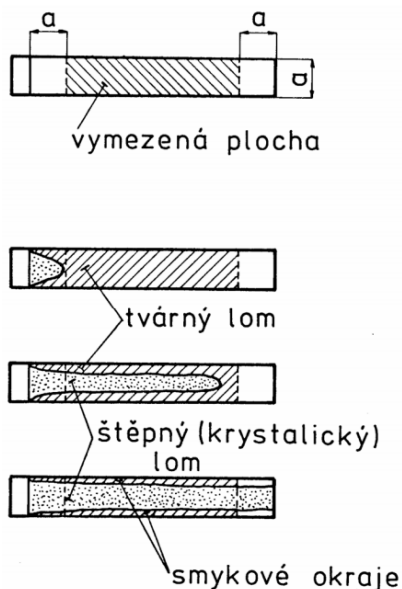
Značena zkratkou DWTT – dynamic weight tear test, jde o upravenou zkoušku DT. Zavedena společností AGA (American gas association), pro účely testování ocelových plechů pro výrobu tlakových potrubí a nádob. Jak název napovídá, zkoušeny jsou plechy o tloušťce budoucích výrobků. Zkušební vzorky dosahují značných rozměrů (obvykle 305 x 75 mm), opatřeny jsou jen mělkým vrubem (viz obrázek 14), který simuluje drobné defekty vznikající korozí. (3) (4)



Obrázek 14: Schéma tělesa zkoušky DWTT

Provedení se věnují normy ASTM E604 nebo API SPEC5L3. Při zkoušce se obvykle vedle nárazové práce vyhodnocují vzhled lomové plochy, tj. podíl tvárného lomu na celkové ploše, schematicky na obrázku 15, a tranzitní teplota kovu. Výsledky této zkoušky jsou dosud široce používané při návrhu zmíněných konstrukcí a volbě provozních teplot kapalin a plynů.

(3) (4)



Obrázek 15: U vzorků zkoušky DWTT se velice často posuzuje podíl tvárného lomu (26)

## 2.2. Zkoušky založené na poznatcích lomové mechaniky

Jak bylo řečeno (viz stať 2.1) u zkoušek založených na koncepci tranzitní teploty je hlavní proměnnou veličinou teplota. Další významné veličiny jako rychlost nárůstu zátěže nebo charakter vrubu jsou normovány rozdílně u jednotlivých zkoušek. Díky tomu jsou jejich výsledky navzájem nesrovnatelné a nevyjadřují tak schopnost materiálů odolávat účinkům křehkého lomu. V současné době se stále experimentuje s různými rozměry a tvary těles i vrubů (například miniaturizovaná zkušební tělesa Charpyho zkoušky), děje se tak však kvůli úspoře materiálu, a nikoliv kvůli snaze o dosažení srovnatelnosti zkoušek. (4) (9)

Výběr materiálů a provozních teplot dle tranzitní teploty (více viz kapitola 3) je u řady aplikací dostatečně spolehlivý, je třeba však pamatovat, že vyšší rychlost deformace nebo výrobní poruchy a jiné vlivy mohou vést k lomu i u materiálů pracujících nad tranzitní teplotou – vyšší teplota nečiní materiál imunní vůči křehkému lomu. (1)

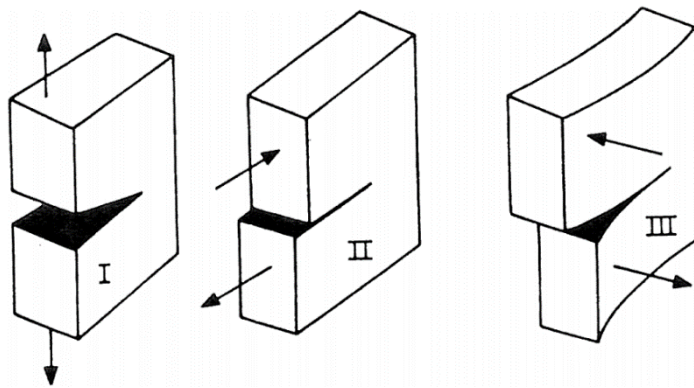
Zkoumání houževnatosti se přednostně věnovala americká NRL – Naval Research Laboratory během 2. světové války, jak bylo zmíněno v úvodu. Pod vedením G. R. Irwina byly v této laboratoři položeny základy lomové mechaniky. Později se vývoje ujaly další organizace ve světě. Praktického využití bylo dosaženo až koncem 70. let díky ucelení poznatků a nově přichozím možnostem instrumentace. V současné době řada organizací normovala metody zkoušení a měření parametrů lomové houževnatosti, jako například ASTM – American Society for Testing and Materials, BSI – British Standards Institution nebo JSME – Japan Society of Mechanical Engineers. Všeobecně jde o velmi účinné nástroje při optimalizaci a hodnocení bezpečnosti řady pokročilých výrobků a konstrukcí. (3)

Lomová mechanika se snaží řešit otázku hodnocení houževnatosti materiálu za kombinace více účinků. Pro řešení tohoto problému právě lomová mechanika zavádí pojem lomová houževnatost (také rázová houževnatost) – schopnost materiálu předcházet iniciaci a šíření trhliny. Tuto vlastnost se snaží charakterizovat pomocí jediné měřitelné veličiny ( $K$ ,  $J$ ,  $CTOD$ ) nebo závislosti jistého parametru na přírůstu délky trhliny. V případě porušení křehkým lomem je jediný parametr obvykle postačující. U houževnatého lomu se ovšem situace komplikuje, neboť během deformace narůstá odpor proti růstu trhliny. (3) (4)

### 2.2.1. Klady a zápory zkoušek založených na poznacích lomové mechaniky

Provádění zkoušek založených na poznacích lomové mechaniky sebou nese řadu výhod v porovnání s koncepcí tranzitních teplot:

- Zákonitosti lomové mechaniky jsou univerzálně platné a aplikovatelné na všechny materiály včetně těch, které nevykazují přechodové chování se změnou teploty
- Měřené parametry jsou přímo použitelné při dimenzování konstrukcí obdobně jako výsledky pevnostních zkoušek nebo mez kluzu
- Výsledky získané a zkušebních vzorcích lze aplikovat na tělesa rozdílných rozměrů, hmotností a celkové geometrie, jako jsou skutečné součásti
- Lomová mechanika zohledňuje přítomnost, charakter a lokalizaci vrubů
- Koncept řeší i časově závislé procesy jako jsou trhliny šířené korozi pod napětím, trhliny šířené cyklickým zatížením, creep a kombinace zmíněných jevů
- Řešeny jsou i případy tahové, rovinné smykové a antirovinné smykové módy zatížení vzhledem k rovině a čelu trhliny (viz obrázek 16) (4)



Obrázek 16: Rozdílné orientace působícího zatížení (10)

Měření parametrů lomové mechaniky však sebou nese i řadu nevýhod:

- Zkoušená tělesa jsou dosti rozměrná což je neekonomické a ztěžuje jejich přípravu a manipulaci.
- Zkušební zařízení jsou dosti nákladná, instrumentace je zcela nutná
- Mnohdy je nutné zkušební tělesa opatřit ostrou únavovou trhlinou, činí se tak cyklickým zatěžováním, což může být časově náročný proces

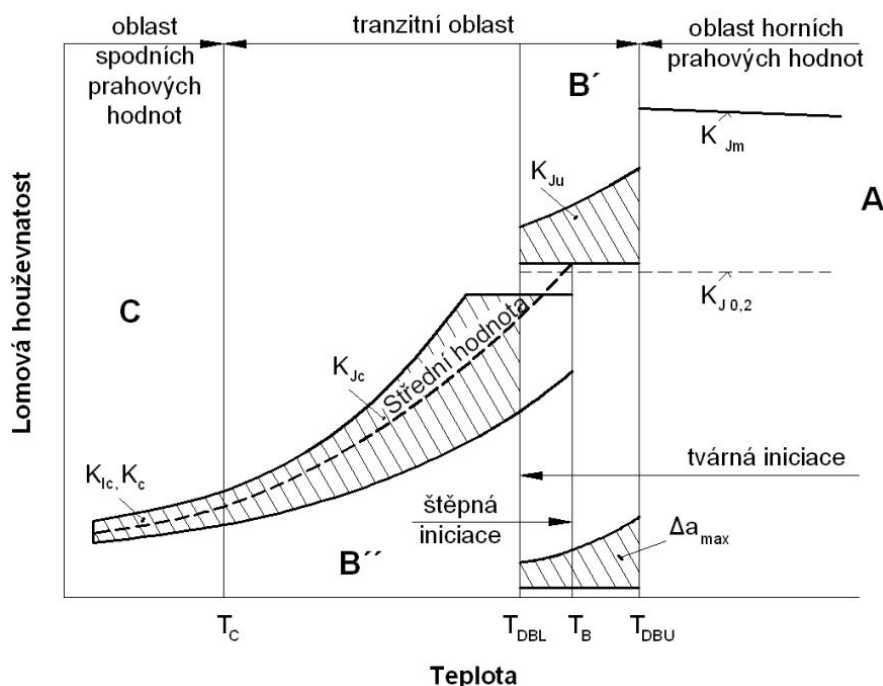


- Vyhodnocení výsledků je pracné a komplikované, vyžaduje další vybavení a dobře školený personál
- Temperování zkušebních těles je problematické díky jejich velikosti
- Nutné je dodat, že otázka lomového chování materiálů není stále zcela objasněna, zavedené vztahy a postupy jakkoli matematicky rigidní lze stále považovat za empirické, při aplikaci na nové materiály a provozní podmínky je nutné postupovat obezřetně
- Všeobecně se jedná o časově a finančně náročné zkoušky, které se používají jen v odůvodněných případech (3) (4)

### 2.2.2. Tradiční rozdělení lomové mechaniky

Jak je tomu u hodnot nárazové práce či vrubové houževnatosti, také lomová houževnatost určená parametry lomové mechaniky vykazuje tranzitní chování vlivem změny teploty nebo rychlosti deformace. Na obrázku 17 je uvedena závislost parametru  $K_{Ic}$  na teplotě tělesa. V oblasti C (nízké teploty) jde o spodní prahové hodnoty, naopak v oblasti A jde o horní prahové hodnoty lomové houževnatosti. (4) (10)

Oblast B je tranzitní oblast. V této oblasti dochází k nestabilním lomům jen po jistém stabilním nárůstu trhliny o délce  $\Delta a$ . Naměřená hodnota  $K_{Ic}$  je v této oblasti výrazně rozptýlená, proto se lomová houževnatost charakterizuje jinými parametry (J a CTOD). (4) (10)



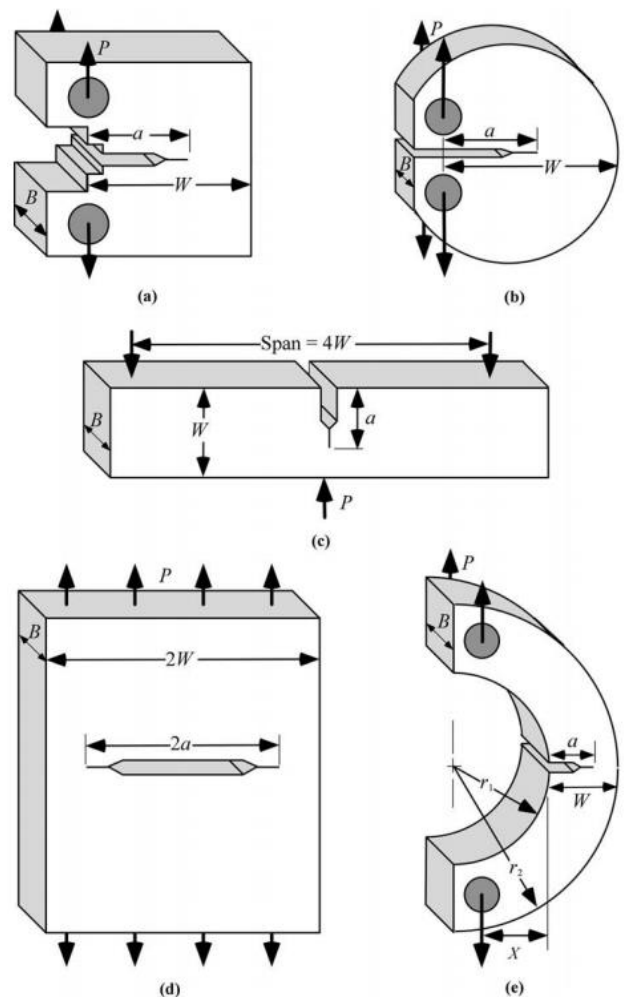
Obrázek 17: Závislost lomové houževnatosti určené parametrem  $K_{Ic}$  na teplotě (10)

Teplota a rychlost deformace během zkoušky je natolik důležitá, že vedla k tradičnímu rozdělení pojetí lomové mechaniky:

- **Oblast lineární elastické lomové mechaniky (LELM)**, je platná pouze za splnění určitých podmínek. Při nízkých teplotách zde dochází k nestabilnímu růstu trhliny, která je iniciována cyklickým zatížením. Během lomu dochází jen k nepatrné plastické deformaci na čele defektu, tudíž lze lomovou houževnatost charakterizovat jediným parametrem, nejčastěji součinitelem intenzity napětí  $K$ . (4)
- **Oblast elasticko-plastické lomové mechaniky (EPLM)** je třeba aplikovat, pokud zákonitosti LELM přestávají být platnými. To jest v případě, kdy lom doprovází značné plastické deformace – naměřené hodnoty k nejsou platné. Poté musíme přistoupit k měření hodnot buď  $J$ -integrálu nebo rozevření špice trhliny CTOD – Crack Tip Opening Displacement. Tyto parametry lze zpětně přepočítat na hodnoty součinitele intenzity napětí  $K$ . (4)

### 2.2.3. Zkušební tělesa

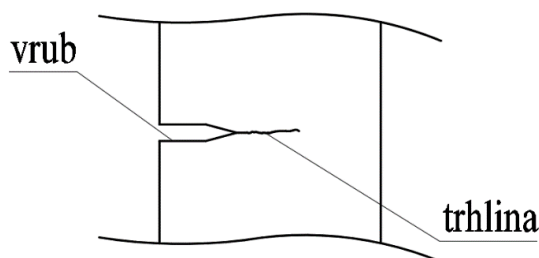
Naprostá většina zkušebních postupů je odvozena od standardů vyvinutých ASTM. Ta dovoluje používání zkušebních těles v pěti konfiguracích (viz obrázek 18). Nejpoužívanější jsou kompaktní zkušební těleso (též C(T) – compact specimen) (a), a těleso (c) (též SE(B) – single-edge notched bend specimen), které je používané u nás již známých metod jako Charpyho zkouška. Další možnosti konfigurace jsou stále předmětem zkoumání. (3)



Obrázek 18: Konfigurace zkušebních těles dovolené standardy ASTM (3)

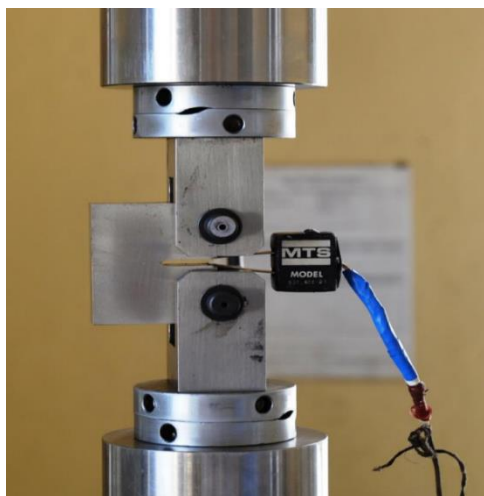
#### 2.2.4. Zkouška lomové houževnatosti dle parametru $K_{Ic}$

Pokud jsou dodrženy podmínky platnosti LELM, lze lomovou houževnatost jednoznačně charakterizovat faktorem intenzity napětí  $K$  [ $\text{MPa}\cdot\text{m}^{-2}$ ]. K tomu je potřeba, aby během lomu dosahovala plastická zóna jen malých rozměrů, je proto nutné provádět zkoušky za vhodné teploty a u vhodných rozměrů vzorku. K měření dochází za podmínek jednoosé deformace, jde tedy o zatěžovací mód I (viz obrázek 16), proto je hodnota značena indexem I. Zkušební vzorky jsou opatřeny vrubem, v němž se nachází trhlina vytvořená cyklickým zatížením (viz obrázek 19). Během měření jsou zkušební vzorky zatěžovány pomalu vzrůstající silou. Dojde-li k dosažení kritické míry  $K_{Ic}$ , trhlina se stává nestabilní a rozevřívá se. Zjištění kritické míry  $K_{Ic}$  je právě cílem zkoušení. Provedením se zabývají normy ASTM E399 nebo ČSN EN ISO 12737. (3) (4)

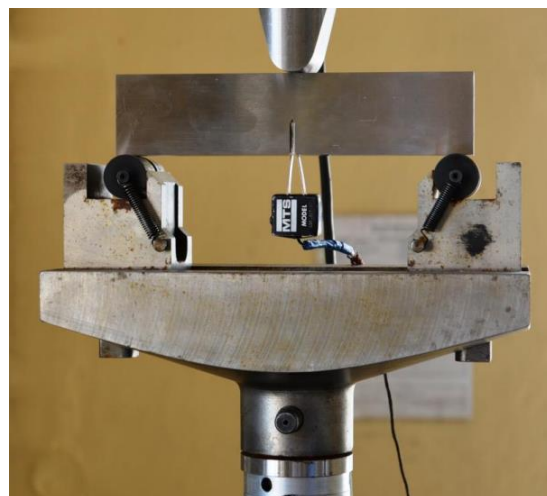


Obrázek 19: Trhlina vznikne cyklickým zatížením

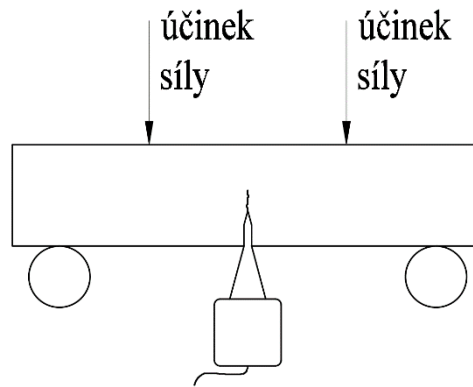
Pokud měření probíhá na tělese C(T), děje se tak excentrickým tahem (viz obrázek 20). Tato konfigurace je vhodná především z hlediska úspornosti materiálu. Důležité je dodržení správné orientace tělesa v prostoru. Těleso SE(B) je preferováno při hodnocení svárů. Nejčastěji je těleso uloženo jako prostý nosník namáhaný jedinou silou (viz obrázek 21). Je ale možné působit i dvojicí stejně velkých sil (viz obrázek 22) u obzvláště křehkých materiálů. (4)



Obrázek 20: Uchycené C(T) těleso (10)

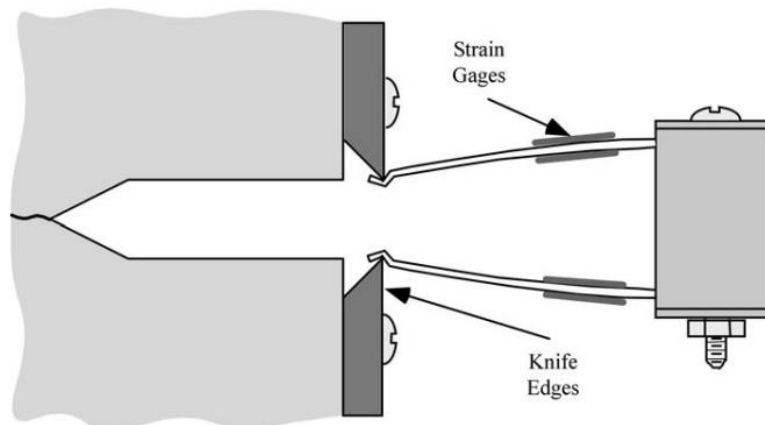


Obrázek 21: Těleso SE(B) zatížené jedinou silou (10)

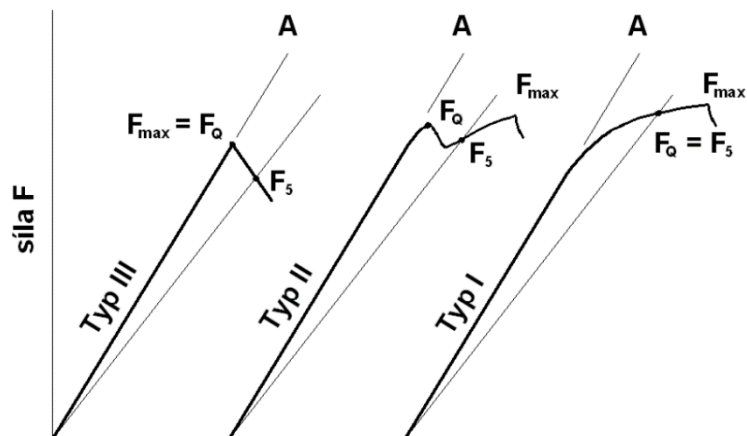


Obrázek 22: Jiná možnost zatěžování SE(B) tělesa

V obou případech je nutné minimalizovat odpor proti pootočení vzorku, proto jsou tělesa uložena pomocí čepů a válečků. Zkušební zařízení působí na těleso pohyblivým pístem za konstantní rychlosti. Do prostoru vrubu je umístěno měřící zařízení LVDT – linear variable differential transformer (viz obrázek 23), které automaticky zaznamenává působící sílu  $F$  v závislosti na míře rozevření vrubu. Typické průběhy nárůstu síly jsou vyobrazeny na obrázku 24. (3)



Obrázek 23: Schéma zařízení LVDT vloženého do prostoru vrubu (3)



Obrázek 24: Tři možné průběhy nárůstu síly vůči rozevření, obrázek upraven (3)

Kritická hodnota součinitele intenzity napětí se vypočítá dle vzorce:

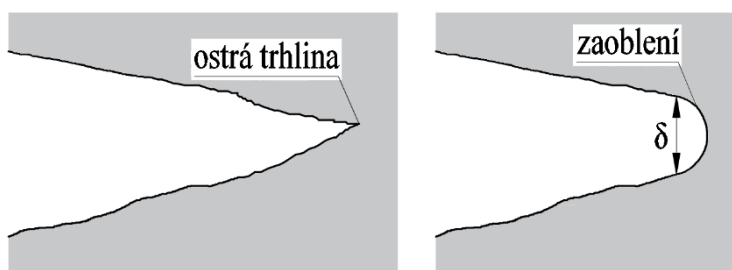
$$K_{Ic} = \frac{F_{max}}{B \cdot \sqrt{W}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \text{ [MPa} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (3)$$

kde:  $F_{max}$  je maximální dosažená síla [N]  
B a W jsou rozměry tělesa (viz obrázek 18) [m]  
 $f\left(\frac{a}{W}\right)$  je bezrozměrnou funkcí tvaru tělesa (3)

### 2.2.5. Zkouška lomové houževnatosti dle kritického rozevření trhliny CTOD

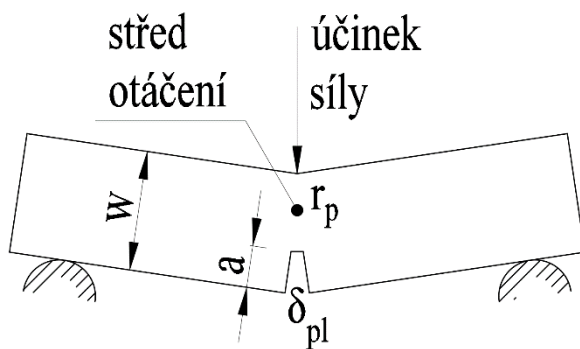
Zhruba v 70. letech bylo zjištěno, že mnohé materiály jsou příliš houževnaté pro klasifikaci pomocí LELM. Podmínky platnosti LELM jsou totiž dosti striktní, a ne vždy je možné jejich dodržení. Navíc, opravdu spolehlivé zkoušky  $K_{Ic}$  lze provést u materiálů, které bývají pro praktické využití příliš křehké. I houževnaté materiály mohou podlehnout účinkům křehkého lomu, pročež je třeba pracovat v oblasti EPLM a charakterizovat lomovou houževnatost jiným způsobem. (3) (4)

V průběhu lomu se původně ostrý kořen únavové trhliny postupně otupuje, zaobluje, a s přibývajícím houževnatostí je zaoblení jen výraznější (viz obrázek 25). Tento jev lze popsat pomocí CTOD – Crack Tip Opening Displacement, tedy kritickým rozevřením trhliny označené veličinou  $\delta$ . Tato veličina charakterizuje lomovou houževnatost materiálu nejen v oblasti EPLM ale i LELM. (3) (4)

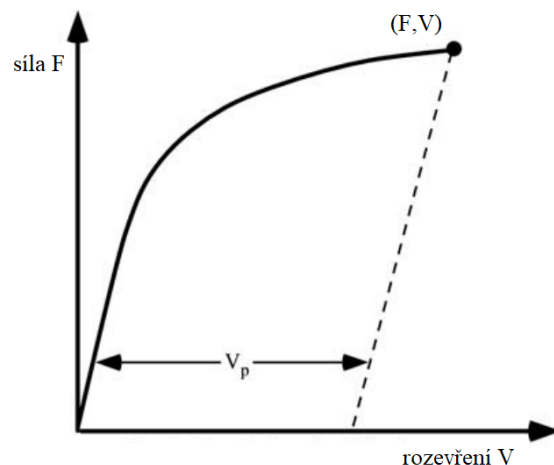


Obrázek 25: Otupení původně ostré trhliny

Pro výpočet  $\delta$  je zkušební těleso modelováno jako kloub. U vzorku si můžeme představit, že během rozevírání vrubu obě poloviny tělesa konají rotační pohyb kolem plastického kloubu, schematicky na obrázku 26. Zkouška se provádí obdobně jako u měření  $K_{Ic}$ , za pomalu narůstajícího zatížení je zařízením LDTV (viz stať 2.2.4) měřena závislost síly F na míře rozevření vrubu. Proces rozevření je rozdělen na dvě dílčí části – prvotní elastické rozevření následované plastickým průběhem. Takový průběh je uveden na obrázku 27. (3) (4)



Obrázek 26: Pomyslný pohyb dvou polovin vzorku kolem plastického kloubu



Obrázek 27: Zaznamenaný nárůst síly vůči rozevření, obrázek upraven (3)

Celková hodnota  $\delta_c$  se též skládá ze části elastické a plastické, konkrétně se  $\delta$  vypočítá dle vzorce:

$$\delta_c = \delta_{el} + \delta_p = \frac{K_{Ic}^2}{m \cdot R_e \cdot E} + \frac{r_p \cdot (W - a) \cdot V_p}{r_p \cdot (W - a) + a} \quad (4)$$

kde:

$K_{Ic}$  je faktor intenzity napětí, vypočteno dle rovnice (2) [ $\text{MPa} \cdot \text{m}^{-2}$ ]

$m$  je bezrozměrná konstanta, rovna 1 nebo 2 dle podmínek rovinného napětí

$R_e$  je mez kluzu [MPa]

$E$  je Youngův modul pružnosti v tahu [MPa]

$r_p$  je rotační součinitel plastické oblasti, který definuje relativní pozici kloubu, obvykle roven 0,44

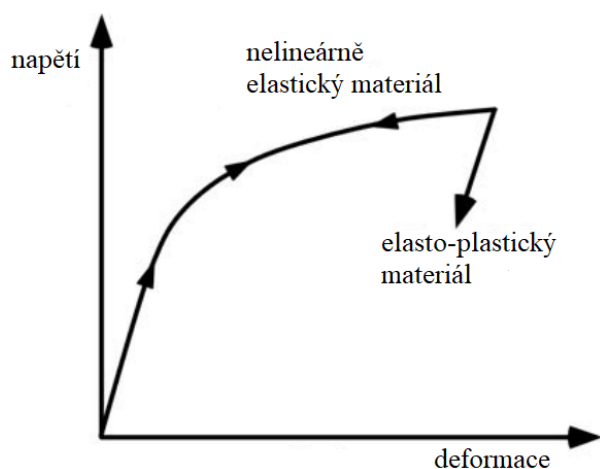
$W$ ,  $a$  jsou rozměry tělesa (viz obrázek 18 a 26) [m]

$V_p$  je plastická složka rozevření vrubu, konstruována metodou podobnosti trojúhelníků [m] (3)

Vypočtenou hodnotu  $\delta_c$  lze přepočítat na platnou hodnotu  $K_{Ic}$ . Další doplňující výpočty lze dohledat v příslušné literatuře ( (3) nebo (4)). Provedením zkoušky se zabývají normy jako ASTM E1820 nebo BS 7448. (3) (4)

### 2.2.6. Zkouška lomové houževnatosti dle J-integrálu

Zkouška hodnocení lomové houževnatosti dle J-integrálu je dnes velmi důležitou metodou, která popisuje lomové chování materiálů v oblasti LELM i EPLM. Metoda je založena na srovnatelnosti chování elasto-plastických materiálů s nelineárně elastickými během jejich zatížení a odlehčení (viz obrázek 28). Průběh deformace obou materiálů je shodný, nicméně při odlehčení se odezvy liší. Na rozdíl od elasto-plastického materiálu, u nelineárně elastického materiálu je každému stavu přetvoření jasně dána míra napětí. Pomineme-li etapu odlehčení, průběh deformace se dá považovat u obou za stejný. (3)



Obrázek 28: Průběh zatížení a odlehčení nelineárně elastického a elasto-plastického materiálu, obrázek upraven (3)

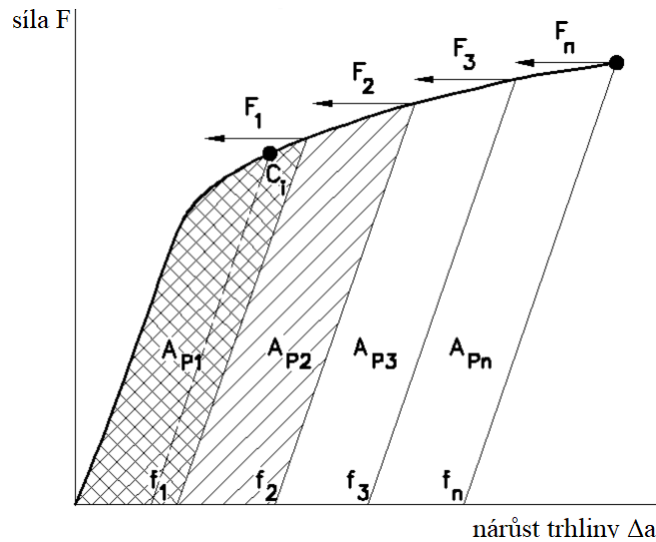
J-integrál charakterizuje intenzitu napětí na čele trhliny z hlediska energetické bilance. Při jednoosé deformaci (zatěžovací mód I – viz obrázek 16) je změna potenciální energie  $dU$  dána změnou délky trhliny  $da$  (3):

$$J_I = - \frac{dU}{dA} \quad (5)$$

Jde o stejný vzorec, který definuje rychlost uvolňování deformační energie  $G$  (též hnací síla trhliny). Bylo dokázáno, že  $J = G$  v nelineárně elastickém tělese s trhlinou. Jelikož J-integrál popisuje pouze etapu zatížení, lze jej aplikovat i na materiály, které vykazují značné plastické deformace. J-integrál je též nezávislý na tvaru a velikosti tělesa. Pomocí J-integrálu lze plně charakterizovat intenzitu napětí na čele trhliny, tudíž, v okamžiku lomu dosahuje své kritické hodnoty  $J_{Ic}$  podobně jako  $K_{Ic}$ . Měřením hodnot J-integrálu se zabývají normy jako ASTM E1820 nebo BS 7448. (3)

Cílem zkoušení je především stanovení kritické hodnoty  $J_{Ic}$ . Během zkoušky se užívají stejná tělesa jako u měření  $K_{Ic}$  nebo  $\delta_c$  (viz obrázek 18). Vzorek je zatěžován silou  $F$  a poté odlehčen, zatím co zkušební zařízení monitoruje závislost výše použité síly  $F$  a přírůstku délky trhliny  $\Delta a$ . Takové měření se provede na větším množství těles, za použití stále vyšších sil. Body závislosti  $F$  a  $\Delta a$  se graficky vynášejí a společně vytvoří tzv. J-křivku (viz obrázek 29).

(3)



Obrázek 29: J-křivka vynesena měřením více vzorků,  
obrázek upraven (10)

Z tohoto diagramu se určí plocha pod křivkou  $A_{cp}$ , ta je rovna součtu dílčích ploch  $A_{pn}$ . Kritická hodnota J-integrálu  $J_{Ic}$  se určí ze vzorce:

$$J_{Ic} = J_{el} + J_p = \frac{1 - \nu^2}{E} \cdot K_{Ic}^2 + \frac{\eta \cdot A_{cp}}{B \cdot (W - a)^2} \quad (6)$$

kde:

$\nu$  je Poissonovo číslo

$E$  je Youngův modul pružnosti v tahu [MPa]

$K_{Ic}$  je faktor intenzity napětí, vypočteno dle rovnice (2) [ $\text{MPa} \cdot \text{m}^{-2}$ ]

$A_{cp}$  je daná plocha pod J-křivkou

$B, W, a$  jsou rozměry tělesa (viz obrázek 18) [m]

$\eta$  je bezrozměrný součinitel roven 2 pro SE(B) těleso, nebo:

$$\eta = 2 + 0,522 \cdot \frac{b_0}{W} \text{ pro C(T) těleso (3)}$$

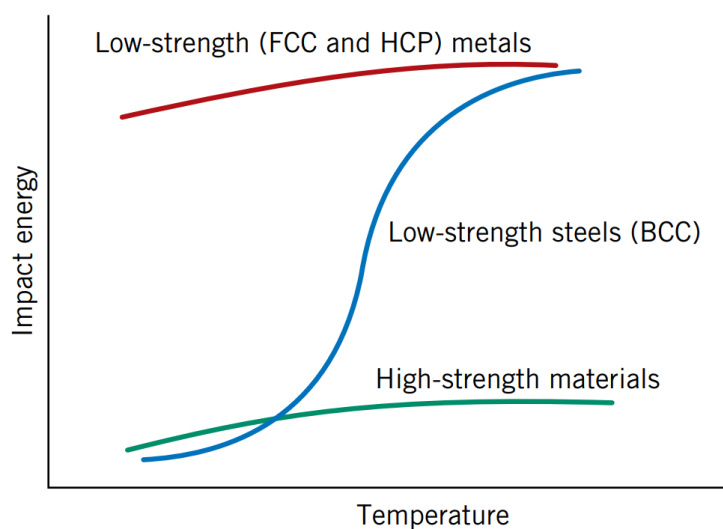
Hodnotu  $J_{Ic}$  lze též přepočítat na platnou hodnotu  $K_{Ic}$  nebo  $\delta_c$ . Další doplňující výpočty lze dohledat v příslušné literatuře ( (3) nebo (4)). (3) (4)



### 3. Vliv teploty a rychlosti deformace na rázovou houževnatost

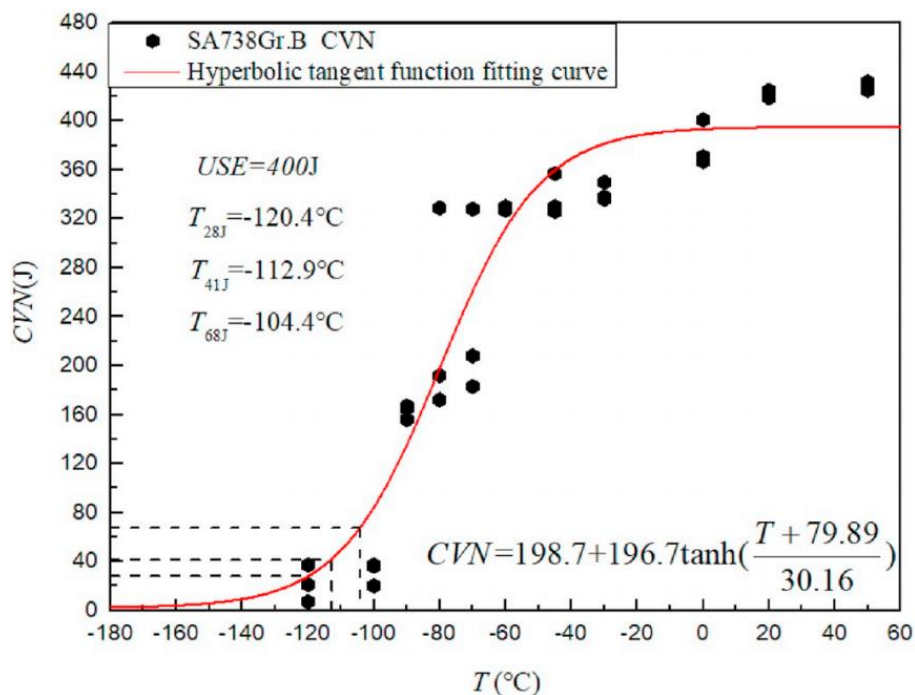
Houževnatost materiálu je funkcí mnoha proměnných, některé pocházejí z vnějšího prostředí, jiné jsou materiálu inherentně dány. Při zkoušení lomové houževnatosti se zpravidla mění právě vnější podmínky, nejčastěji teplota a rychlost deformace. Obecně platí, že rostoucí teplota a klesající rychlost deformace vedou k růstu houževnatosti. Některé materiály prožívají prudký přechod mezi křehkým a houževnatým lomem, a to při malé změně teploty. Typicky jde o kovy s krychlovou tělesně středěnou mřížkou BCC – body-centered cubic jako nízkopevnostní a korozivzdorné oceli, chrom, molybden, wolfram či vanad. Naopak u materiálů s krychlovou plošně středěnou mřížkou FCC – face-centered cubic (jako austenitické oceli, hliník, měď, či olovo) a šesterečně těsně uspořádanou mřížkou HCP – hexagonal close-packed (kadmium, kobalt nebo titan) nedochází k takovému přechodu a změna houževnatosti je plynulá. Jiné typicky křehké materiály rovněž nevykazují přechodové chování. Srovnání takových materiálů je schematicky zobrazeno na obrázku 30. (1)

(11)



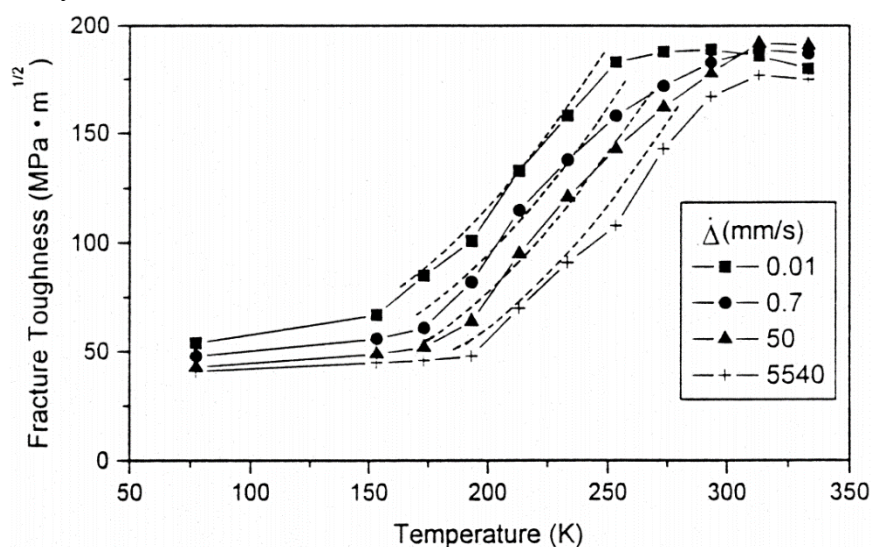
Obrázek 30: Tři typické projevy závislosti nárazové energie na teplotě (1)

Jedna z primárních funkcí zkoušek založených na koncepci přechodové teploty je zjištění, zda zkoušený materiál vykazuje přechodové chování. Jako příklad je na obrázku 31 uvedeno měření bainitické oceli SA738Gr.B provedené Charpyho zkouškou. K výraznému poklesu absorbované energie dochází kolem  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  až dosáhne spodní hranice při  $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V rozmezí těchto dvou teplot se materiál porušuje křehce i houževnatě, tato oblast je označena jako přechodová oblast. Autoři zde určili i tranzitní teploty pro energetická kritéria 28 J, 41 J a 68 J. V praxi se tyto teploty používají ke srovnávání houževnatosti materiálů různých výrobků. (1) (12)



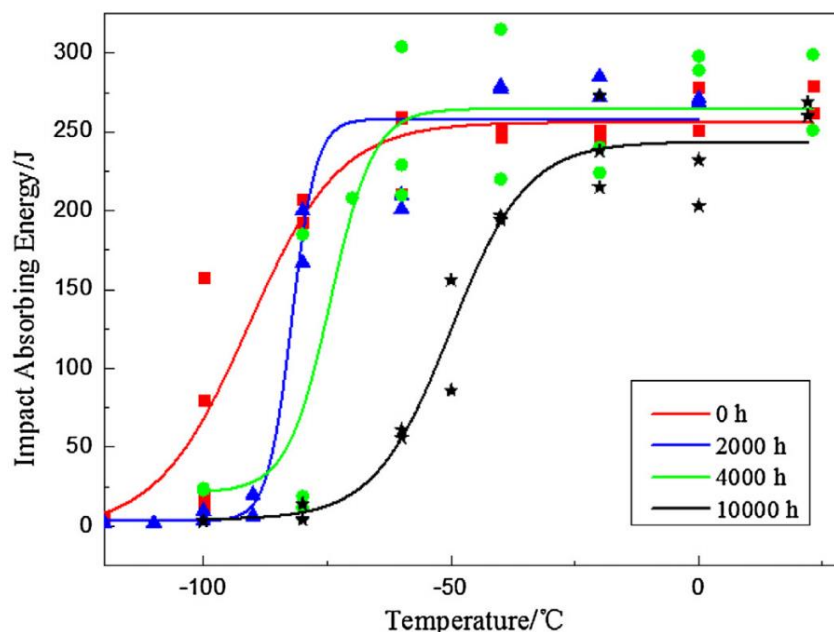
Obrázek 31: Závislost nárazové práce na teplotě bainitické oceli SA738Gr.B (12)

Většina zkoušek lomové houževnatosti je zaměřena na vliv teploty za jisté rychlosti zatížení, ve skutečnosti se oba faktory navzájem doplňují a je třeba zkoumat účinky jejich kombinace. Na obrázku 32 jsou uvedeny výsledky měření lomové houževnatosti dle J-integrálu přepočítaného na hodnoty  $K_{Ic}$  v rozmezí teplot 77 až 333 K a za rychlosti deformace 0,01 až 5540  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Vyšší rychlost deformace zpravidla snižuje lomovou houževnatost, avšak u teplot nad 293 K si lze všimnout, že při rychlosti 0,01 a 0,07  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  se hodnota  $K_{Ic}$  náhle propadá. Vyšší rychlost deformace totiž může způsobit lokální ohřev na čele trhliny, který zvýší lomovou houževnatost. U rychlostí 0,01 a 0,07  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  k tomu však zde nedochází. (13)



Obrázek 32: Lomová houževnatost v závislosti na teplotě i růstu deformace (13)

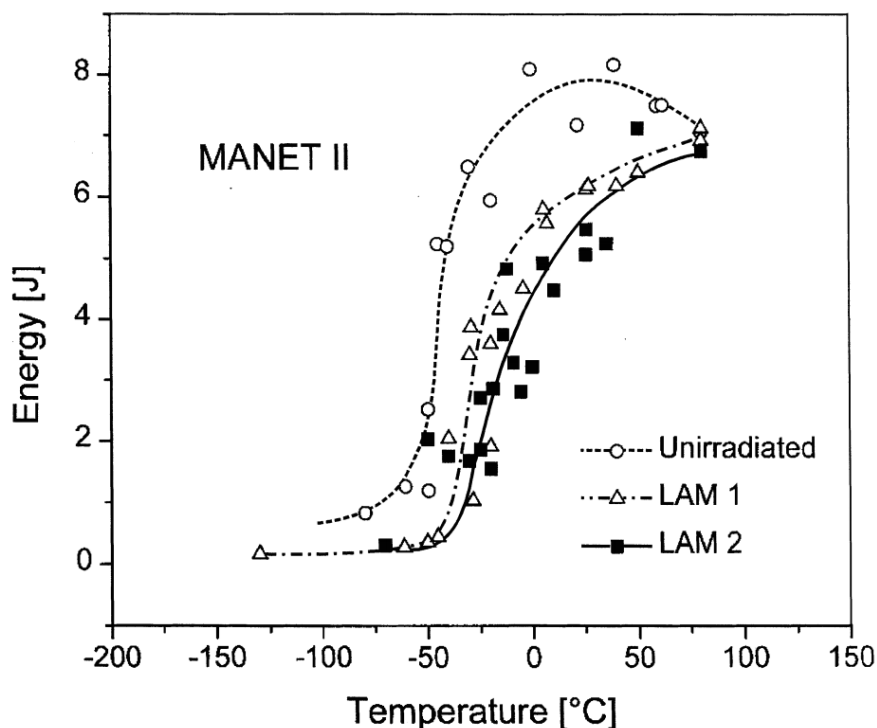
Přechodová teplota (resp. přechodová oblast) není materiálovou konstantou. Tuto oblast může ovlivnit řada faktorů, posunout ji do jiných teplot nebo změnit její rozsah. Na tom se podílí vedle rychlosti deformace například stárnutí materiálu vyvolané dlouhodobým zatížením nebo tepelnými účinky. Pro příklad, na obrázku 33 jsou uvedeny výsledky Charpyho zkoušky provedené u vzorků CLAM oceli (China Low Activation Martensitic) vystavených tepelnému účinku 550 °C po dobu 0h až 10 000h. Z výsledků je patrné, že tepelné stárnutí nepříznivě posouvá hranice přechodové oblasti do vyšších teplot (14)



Obrázek 33: Posun a změna rozsahu přechodové oblasti u CLAM oceli vystavené tepelným účinkům (14)

Stárnutí ocelí může posunout hranici až nad 100 °C, což je daleko za hranicí běžných provozních teplot, v takovém případě bezprecedentně hrozí porušení křehkým lomem. (5)

Další faktor, který výrazně ovlivňuje charakter přechodové oblasti je účinek radiace. Pro ukázkou je na obrázku 34 uveden výsledek Charpyho zkoušky martenzitické Cr-Ni-Mo-V-Nb oceli zvané MANET 2. Materiál byl nejdříve austenitizován po dobu 30 min při 1075 °C a pak 2 hodiny temperován při 750 °C. Poté následovalo ozáření proudem neutronů o dávce  $2,65 \cdot 10^{19} \text{ n. cm}^{-2}$  při 250 °C pro skupinu označenou jako LAM 1 a  $8,12 \cdot 10^{19} \text{ n. cm}^{-2}$  při 400 °C pro skupinu LAM 2. Zkouška posoudila změnu přechodové oblasti LAM 1 a LAM 2 vůči neozařenému kovu. Dolní hranice přechodové teploty neozařené kovu činí -45 °C, u LAM 1 dochází k posunu na 23 °C a u LAM 2 dokonce na 40 °C. Slitina MANET 2 je slibným materiálem pro výrobu jaderných a v budoucnosti i fúzních reaktorů, bohužel jako jiné materiály podléhá účinkům radiačního záření a mění svoje vlastnosti. (15)



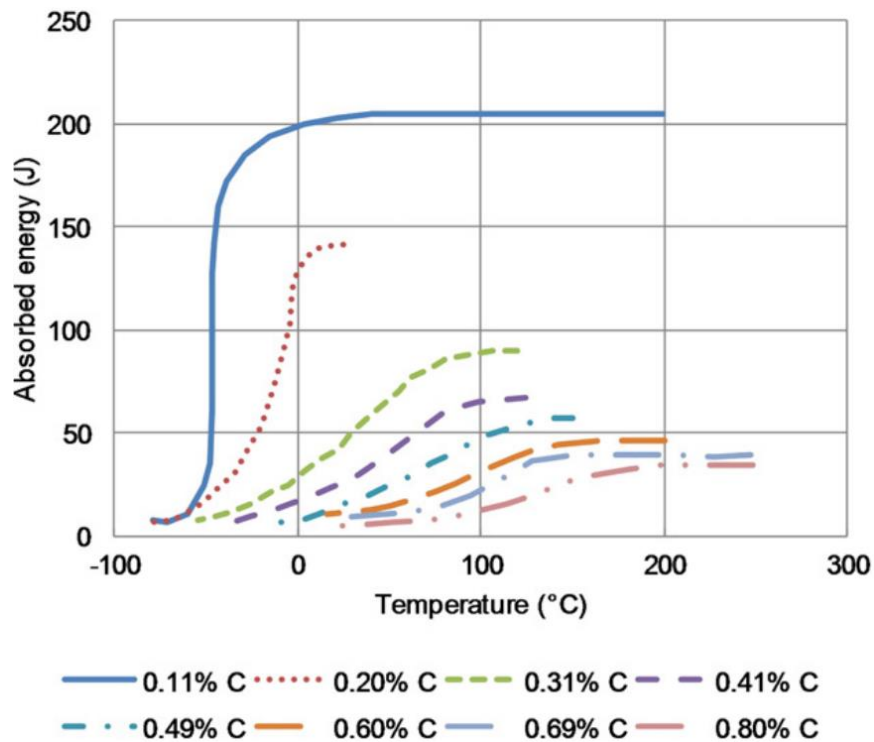
Obrázek 34: Porovnání přechodové oblasti ozářených a neožářených vzorků oceli MANET 2 (15)

#### 4. Vliv materiálových vlastností na rázovou houževnatost

Vnější podmínky ovlivňující lomovou houževnatost můžeme během zkoušení snadno měnit, materiálové vlastnosti jsou však inherentně dány a měnit se dají změnou v technologii výroby a následných úprav. Na začátku kapitoly 3 byl zmíněn vliv krystalové mřížky na charakter průběhu lomové houževnatosti s teplotou, nicméně další vlastnosti jako chemické složení nebo tepelné úpravy výrazně ovlivňují pozici přechodové oblasti a dosaženou lomovou houževnatost. Úkolem technologa během výroby je vždy potlačit nepříznivé jevy, které posouvají přechodovou oblast do vyšších teplot a snižují lomovou houževnatost. Požadavky na houževnatost jsou však často protichůdné s jinými požadovanými vlastnostmi jako tvrdost nebo pevnost, tudíž je třeba tyto vlastnosti vhodně optimalizovat; chemické složení ovlivní houževnatost jistým způsobem, tepelná úprava však tyto změny může zvrátit. V následujících odstavcích se seznámíme s účinky některých významných chemických přísad kovů na lomovou houževnatost. (5) (11)

## 4.1. Obsah uhlíku

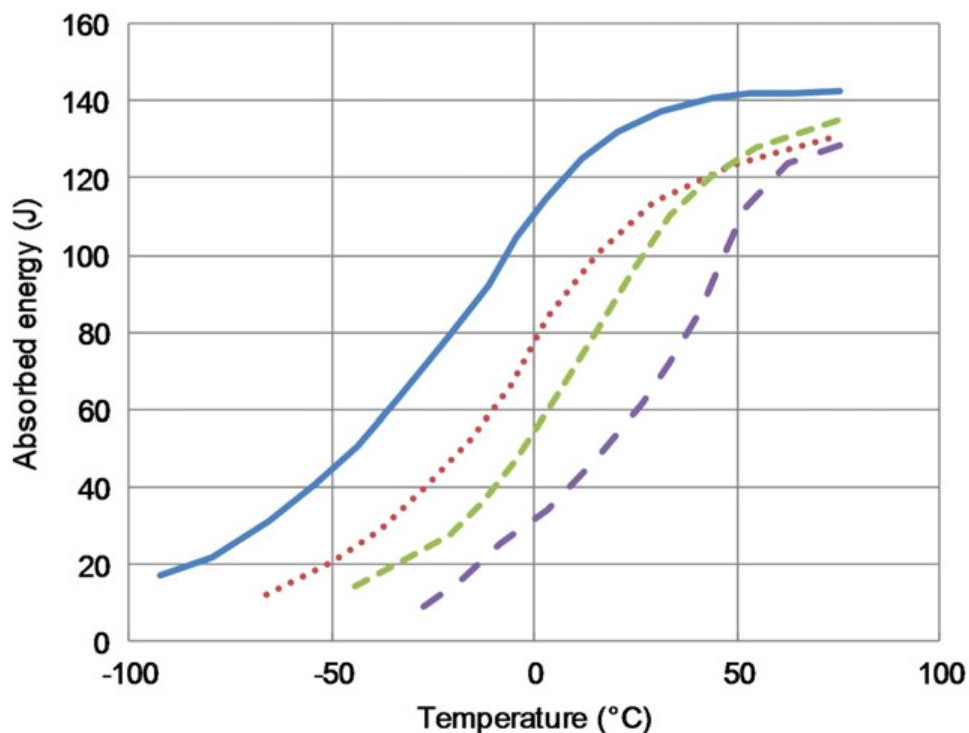
Obsah uhlíku má zcela zásadní vliv na lomovou houževnatost konstrukčních ocelí, vyšší obsah sice navyšuje mez kluzu, ale za cenu ztráty houževnatosti a zvýšení tranzitní teploty. Jako příklad jsou na obrázku 35 uvedeny výsledky Charpyho zkoušky nízkolegovaných ocelí s obsahem uhlíku 0,01 až 0,80%. Při obsahu 0,11% je zřetelná tranzitní teplota  $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$ , při obsahu 0,80% se teplota posouvá ke  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , zatímco horní práh nárazové energie klesl z 204 J na 33 J. Snižování obsahu uhlíku je základním krokem při výrobě ocelí a je zcela klíčové u vysokopevnostních a korozivzdorných ocelí. (11) (16)



Obrázek 35: Vliv obsahu uhlíku na lomovou houževnatost a přechodovou oblast nízkolegované oceli (16)

## 4.2. Obsah manganu

Mangan je tradičně zpevňující prvek ocelí, zejména v koncentracích mezi 0,3 a 1% příznivě ovlivňuje lomovou houževnatost. Jeho rostoucí obsah zjemňuje zrna a ovlivňuje složení a tvar vylučovaných karbidů. Obvykle se přidáním manganu podpoří precipitace sulfidů typu MnS a tím se sníží nepříznivé účinky síry na lomovou houževnatost. Na obrázku 36 jsou uvedeny výsledky Charpyho zkoušky čtyř nízkolegovaných ocelí s obsahem manganu 0,3% až 1,55%. Zvýšení obsahu manganu výrazně sníží přechodovou teplotu z  $36\text{ }^{\circ}\text{C}$  na  $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ , zatímco nárazová energie se mírně zvýší z 128 J na 141 J. (5) (11) (16)

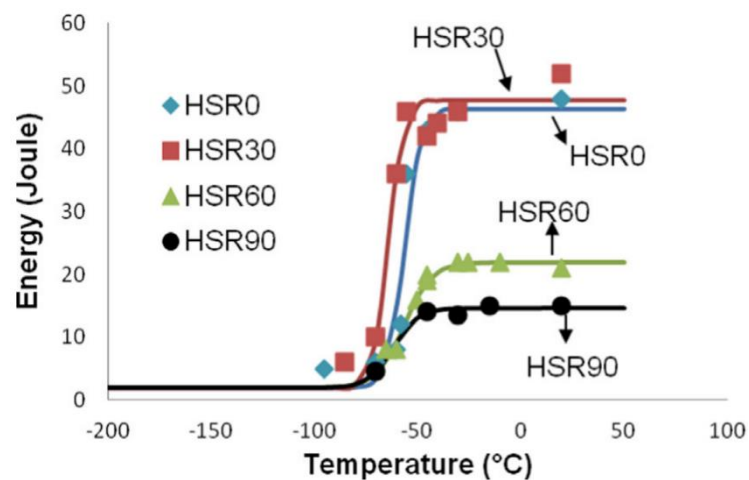


Obrázek 36: Vliv obsahu manganu na lomovou houževnatost a přechodovou oblast nízkolegované oceli (16)

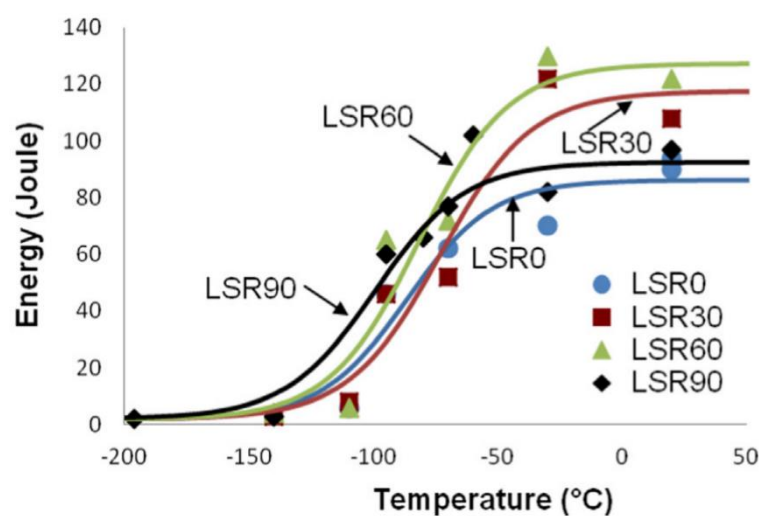
### 4.3. Obsah síry

V roztocích železa má síra malou rozpustnost, i při nízkých koncentracích se síra umísťuje v mezidendritických oblastech, kde reaguje s dalšími legujícími prvky jako mangan nebo křemík. Při příliš vysokých koncentracích tvoří sulfidické vměstky, které se shlukují, tvoří trhliny, snižují lomovou houževnatost a navyšují tranzitní teplotu. Negativní vliv síry lze omezit přidáním manganu a dalších legujících prvků (např. vanad), které podpoří precipitaci sulfidů typu MnS. Toto řešení je dostatečně efektivní jen při nízkých koncentracích síry (<0,01%), proto je třeba snížit obsah síry v samotné tavenině. Jelikož sulfidické městky jsou tvářitelné, jejich tvar a výsledný efekt na lomovou houževnatost lze ovlivnit tvářením. V případě tváření jen jedním směrem (např. u plechů a válcovaných profilů) se zrna vměstků značně protahují ve směru tváření, což vyvolává anisotropii kovu. V takovém případě je pak nutné rozeznávat lomovou houževnatost ve směru podélném a příčném vůči směru tváření. V podélném směru lze dosáhnout vysokých hodnot lomové houževnatosti, za jistých podmínek je dokonce možné dosáhnout vyšší houževnatosti oproti kovu s nízkým obsahem síry. V příčném směru se naopak hodnoty propadají. Na obrázku 37 a 38 jsou uvedeny výsledky Charpyho zkoušky provedené na ocelích s vysokým obsahem síry 0,03% (značeno HSR), a s nízkým obsahem 0,01% (LSR). Obě oceli byly též válcovány za tepla. V obou případech byly zkoušeny vzorky odebrané

v různých úhlech vůči směru tváření, kde  $0^\circ$  je podélný směr,  $90^\circ$  naopak příčný směr. Při porovnání obou ocelí lze sledovat výrazný propad nárazové energie u HSR vzorků (a to u všech orientací) oproti LSR. Tranzitní teplota se též mírně posunula do vyšších teplot. U HSR oceli se nejvíce projevuje vliv síry na anisotropii: při podélné orientaci je dosaženo energie 46,3 J, v příčném směru je hodnota 14,6 J. U LSR oceli dochází k jinému jevu: u podélné i příčné orientace je dosaženo téměř stejné hodnoty energie (přibližně 89 J), nejvyšší hodnoty dosáhl vzorek s natočením  $60^\circ$  (127 J). Díky nízkému obsahu síry je velikost MnS vměstků u LSR oceli natolik malá, že anisotropie je více ovlivněna jinými faktory. Obecně platí, že s přibývajícím obsahem síry se snižuje lomová houževnatost materiálu, tranzitní teplota se zvyšuje a vliv na anisotropii postupně roste. (5) (11) (17)



Obrázek 37: Vliv obsahu síry na lomovou houževnatost, přechodovou oblast a anisotropii HSR oceli, obrázek upraven (17)

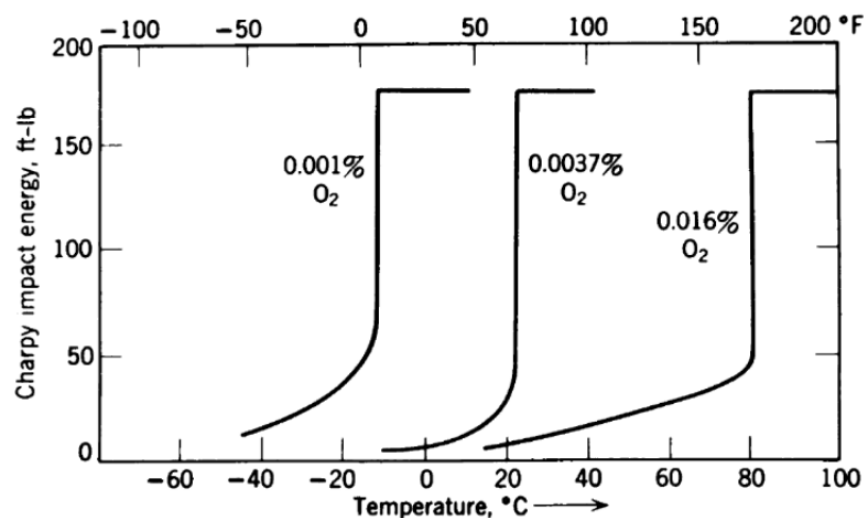


Obrázek 38: Vliv obsahu síry na lomovou houževnatost, přechodovou oblast a anisotropii LSR oceli (17)



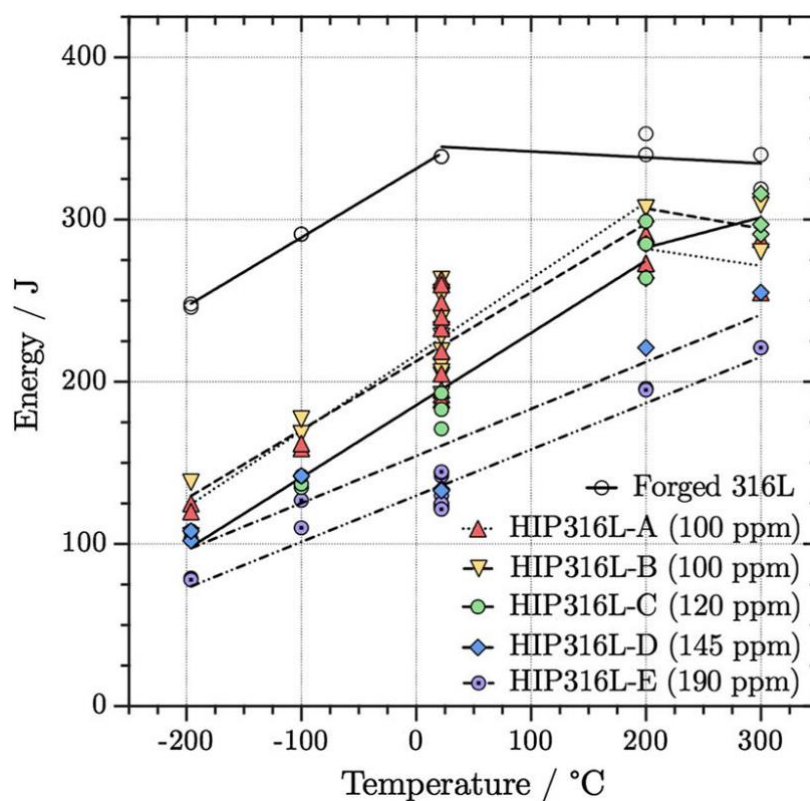
## 4.4. Obsah kyslíku

Obdobně jako síra, kyslík je jen málo rozpustný v roztocích železa, navíc s chladnutím taveniny tato rozpustnost dále klesá. Negativní dopad na rázovou houževnatost se dá při nízkých koncentracích snížit příměsí manganu nebo hliníku s nimiž kyslík tvoří stabilní oxidy. Malé množství těchto oxidů způsobí především posun tranzitní teploty do vyšších teplot, jak lze vidět na obrázku 39. Při vyšších koncentracích u tzv. neuklidněných ocelí kyslík reaguje s velkým množstvím prvků, ty se odměšují z feritu a tvoří vměstky podobně jako sulfidy a snižují houževnatost. Navíc, tyto vměstky se odlučují i za pokojových teplot bez působení vnějších sil nebo prostředí. Neuklidněné oceli stárnou (viz kapitola 3) a dále křehnou. Kyslík mimoto reaguje také s uhlíkem a tvoří dutiny vyplněné plynným CO. Těchto dutin může vzniknout velké množství, vedou až k pórovitosti materiálu a tím zásadně zvyšují šanci výskytu křehkého lomu. Vyšší množství kyslíku vede ke snížení lomové houževnatosti i posunu přechodové oblasti. Při výrobě ocelí je tedy nutné snížit samotný obsah kyslíku v tavenině. Na obrázku 40 jsou uvedeny výsledky Charpyho zkoušky provedené na korozivzdorné austenitické oceli SAE 316L s obsahem kyslíku od 0,002% (20 ppm) do 0,019%. K poklesu hodnot nárazové energie dochází za všech teplot u vzorků s vysokým obsahem kyslíku na rozdíl od vzorku s nejnižším obsahem, jenž není změnou teploty (nad pokojovou teplotou) příliš ovlivněn. Nutno dodat, že vzorky nevykazují výrazné přechodové chování, neboť austenit disponuje BCC mřížkou (viz začátek kapitoly 3). (18) (19)



Obrázek 39: Posun tranzitní teploty vlivem nižší koncentrace kyslíku (18)



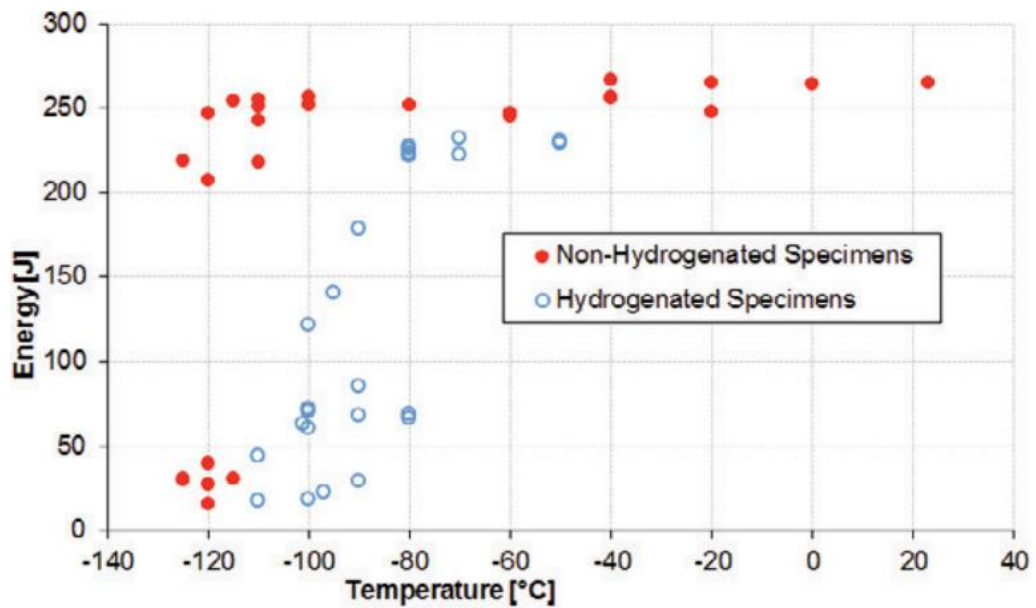


Obrázek 40: Vliv obsahu kyslíku na lomovou houževnatost korozivzdorné austenitické oceli (19)

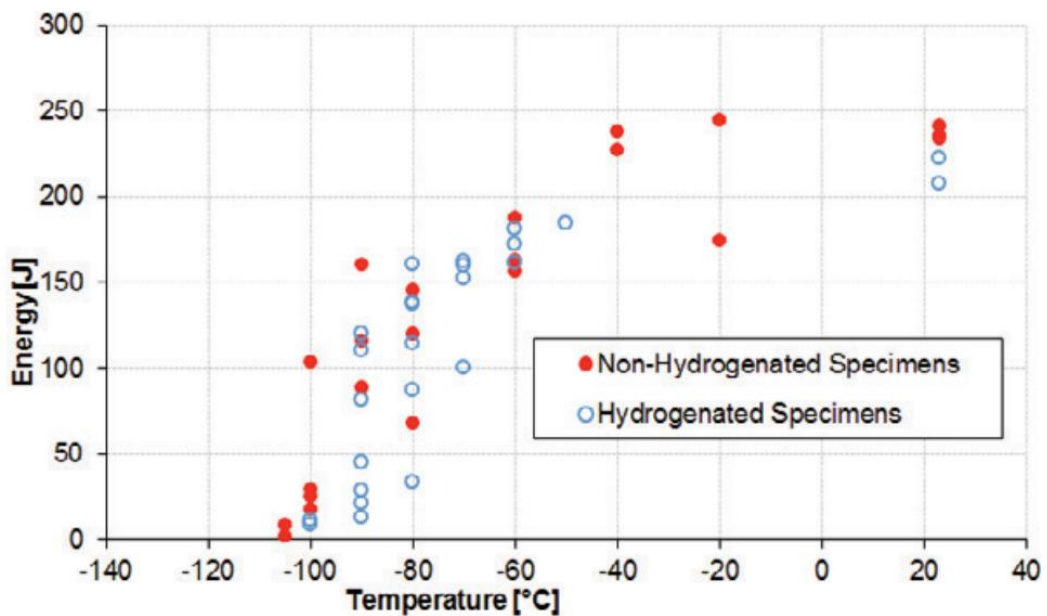
## 4.5. Obsah vodíku

Vliv vodíku je poněkud komplexní, jeho přítomnost může vést u jistých materiálů k drastickému poklesu lomové houževnatosti, jiné materiály jsou ovlivněny méně. Vliv vodíku úzce souvisí s mechanismem vodíkového zkřehnutí. Absorbovaný vodík zaujímá uvnitř zrna pozici intersticiály a již v této poloze narušuje tvar mřížky a snižuje houževnatost. Rozpustnost vodíku v železe je velmi nízká, a proto díky vysoké difúzní rychlosti se přemísťuje k hranicím zrn, zde narůstající dutiny vodíku vyvíjejí silné pnutí, materiál křehne a pravděpodobnost vzniku křehkého interkrystalického lomu se narůstá. Vodíkové zkřehnutí může v extrémních případech zapříčinit náhlý lom i za nízkých napětí. Vodík je přijímán během výroby oceli, ale také během provozu z atmosféry, respektive z jakéhokoli prostředí kde se vodík vyskytuje v atomové i molekulární formě. Přisun vodíku je tedy žádoucí omezit jednak během výroby, ale i během provozu nebo uskladnění. Na obrázcích 40 a 41 jsou uvedeny výsledky Charpyho zkoušky provedené na vzorcích dvou nízkolegovaných ocelích F22 a X65 a to v základním stavu a u vzorků elektrochemicky nasycených vodíkem. U vodíkem nasycených vzorků oceli F22 dochází k rozšíření přechodové oblasti a k jejímu posunu zhruba o 30 °C. Naměřené

hodnoty jsou též více rozptýlené. Horní práh nárazové energie se značně snížil z 270 J na 230 J. U oceli X65 nedochází k rozšíření přechodové oblasti, pouze k mírnému posunu o 10 °C. horní práh nárazové energie se též snížil méně, z 240 J na 220 J. Lomová houževnatost oceli X65 je v porovnání s F22 zasažena méně. Rovněž lze dodat, že k difúzi vodíku na hranice zrn dochází v řádu jen několika hodin, stejné měření provedené o několik hodin později od nasycení zapříčiní dosažení horších výsledků. (3) (18) (20)



Obrázek 42: Vliv obsahu vodíku na lomovou houževnatost a přechodovou oblast nízkolegované oceli F22, obrázek upraven (20)



Obrázek 41: Vliv obsahu vodíku na lomovou houževnatost a přechodovou oblast nízkolegované oceli X65, obrázek upraven (20)

## 4.6. Mechanické vlastnosti ve vztahu s houževnatostí

Houževnatost úzce souvisí se schopností materiálu vykazovat plastickou deformaci. Plastické chování je vlastní čistým kovům, kde snadno dochází ke skluzu krystalových rovin (a to i za nízkých teplot). Pokles teploty, růst rychlosti deformace, deformační zpevnění a přítomnost legujících prvků snižují právě plasticitu a tím nepřímo ovlivňují houževnatost. (11) (18)

Kovy jsou legovány z různých důvodů, nejčastěji jde o zvýšení pevnosti a tvrdosti, v obou případech dochází k růstu meze kluzu. Bylo dokázáno, že s růstem meze kluzu klesá houževnatost a přechodová oblast se posouvá do vyšších teplot. Až na výjimky lze konstatovat, že zvyšující se obsah legujících prvků způsobí růst meze kluzu a tím i zkřehnutí materiálu. Cizí atomy zaujímají pozice intersticiálních a substitučních příměsí, narušují pravidelnost mřížky a omezují zmíněný skluz, při vylučování sekundární fáze se tento jev jen umocní. Mějme však na paměti, že legováním lze mez kluzu i snížit, anebo docílit jejího růstu při udržení postačující houževnatosti. (11) (18)

Výsledky pevnostních zkoušek můžeme využít k predikci lomového chování materiálu. Houževnaté materiály dosahují téměř stejně vysoké pevnosti v tahu i tlaku, kdežto křehké materiály vykazují výrazně vyšší pevnost v tlaku nežli v tahu. Důležitá není celková výše dosažených pevností, ale jejich poměr. (11)

Vyšší tvrdost součásti je zpravidla žádoucí na povrchu, jako ochrana proti mechanickému opotřebení, korozi a vysokým teplotám. Té se dosáhne buď čistě tepelnou úpravou (kalení) nebo chemicko-tepelnými procesy (cementace, nitridace, aj.). V obou případech dochází na pomezí vytvrzené vrstvy a nitra součásti ke vzniku vnitřních pnutí, které výrazně usnadňují koalescenci mikrodefektů, a tím snižují lomovou houževnatost celého průřezu. Proto je nutné (popouštěním či žíháním) tato pnutí odstranit. (5) (11)

## 5. Závěr

Častý kolaps rozměrných kovových konstrukcí způsobený náhlým, nečekaným lomem v dobách průmyslové revoluce motivoval vědeckou komunitu k hledání řešení tohoto problému. Jistého rozhršení bylo dosaženo počátkem 20. století se zavedením Charpyho a Izodovy zkoušky, nicméně tyto metody a jim podobné nebyly postačující. Z tohoto důvodu byla minulém století vyvinuta řada dalších metod hodnotících lomové chování materiálů. Dnes se tradičně dají rozdělit do dvou skupin:

- zkoušky založené na koncepci tranzitní teploty sledují především dva parametry:
  - jaké množství energie je spotřebováno porušením tělesa
  - za jaké teploty dochází k přechodu mezi houževnatým a křehkým lomemVýsledky těchto zkoušek nejsou vzájemně srovnatelné, lze je však použít ke kontrole a k porovnání různých materiálů. Konstruktéři poskytují jistá vodítka při dimenzování a výběru materiálů.
- zkoušky založené na poznacích lomové mechaniky:  
Poskytují mnohem ucelenější představu o chování materiálů, postaveny jsou na silných matematických základech, jejich provedení je však náročné z mnoha hledisek.

Ze zkoumání faktorů, které ovlivňují lomovou houževnatost, vyplývá jedno důležité poznání: jednotlivé účinky se také navzájem ovlivňují. S narůstající rychlostí deformace houževnatost klesá, při příliš nízkých rychlostech se tomu ale děje taktéž. Navíc, při příliš vysokých nebo nízkých teplotách se rychlost deformace náhle stává méně podstatnou. Vyšší obsah síry, kyslíku nebo vodíku negativně ovlivňuje lomové chování, přítomnost jiných prvků s vyšší afinitou než železo však tyto dopady snižuje. V některých aplikacích se přidáním těchto "škodlivých" prvků a následnou úpravou lze kupodivu dosáhnout lepších výsledků než je tomu u "čistších" slitin. Tvářením a tepelně-chemickým zpracováním rovněž ovlivní výsledný efekt. Účinků působících na lomovou houževnatost je skutečně ohromné množství, tato práce je ani v nejmenším nepokrývá všechny.

## 6. Použitá literatura

1. **Callister, W. D., Rethwisch, D. G.** *Materials science and engineering*. New York : John Wiley & Sons, 2011. ISBN: 978-1-118-32457-8.
2. **J. Pokluda, F. Kroupa, L. Oddržálek.** *Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek*. Brno : PC-DIR s.r.o. - Nakladatelství Brno, 1994. ISBN 80-214-0575-9.
3. **Anderson, T.L.** *Fracture mechanics: Fundamentals and Applications*. New York : CRC Press, 2011. 978-1-4200-5821-5.
4. **Liu, A. F.** *Mechanics and mechanisms of fracture: an introduction*. Ohio : ASM International, 2005. ISBN 0-87170-802-7.
5. **Chotěborský, R.** *Nauka o materiálu*. Praha : Česká zemědělská univerzita, 2011. ISBN 978-80-213-2236-3.
6. **R. Chotěborský, P. Hrabě.** Teplotní závislost houževnatosti kovových materiálů. [Online] 2004. <https://www.mmspektrum.com/clanek/teplotni-zavislost-houzevnosti-kovovych-materialu.html>.
7. **L. Tóth, H. P. Rossmann, T. A. Siewert.** Historical background and development of the Charpy test. [Online] 2002. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.622.7456&rep=rep1&type=pdf>.
8. **ČSN EN ISO 148-1.** *Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy – Část 1: Zkušební metoda*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
9. **Kander, L.** *Stanovení křehkolomových vlastností konstrukčních ocelí na zkušebních tělesech nestandardních rozměrů*. [Online] 2006. [http://metal2012.tanger.cz/files/proceedings/metal\\_06/papers/205.pdf](http://metal2012.tanger.cz/files/proceedings/metal_06/papers/205.pdf).
10. **Matocha, K. a Jonšta, P.** Speciální zkušební metody. [Online] 2013. [http://katedry.fmfi.vsb.cz/Modin\\_Animace/Opory/03\\_Materialov%C3%A9\\_inženýrství/03\\_Specialni\\_zkusebni\\_metody/Matocha\\_Specialni\\_zkusebni\\_metody.pdf](http://katedry.fmfi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/03_Materialov%C3%A9_inženýrství/03_Specialni_zkusebni_metody/Matocha_Specialni_zkusebni_metody.pdf).
11. **Hume-Rothery, W.** *The structures of alloys of iron: an elementary introduction*. Oxford : University of Oxford, 1966. Library of Congress Catalog No. 65-25334.
12. **Y. L. Zhang, H. Hui, J. B. Zhang, Z. Q. Zhou, X. Hu, X. Cong.** Prediction of fracture toughness of SA738Gr.B steel in the ductile-brittle transition using master curve method and bimodal master curve method. [Online] 2020. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308016118305155>.

13. **Li, Cun-Jian.** Effects of temperature and loading rate on fracture toughness of structural steels. [Online] 2000. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306999000424>.
14. **W. Wang, J. Chen, G. Xu.** Effect of thermal aging on grain structural characteristic and Ductile-to-Brittle transition temperature of CLAM steel at 550 °C. [Online] 2017. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379616307529>.
15. **Belianov, I. Marmy, P.** The effect of low dose irradiation on the impact fracture energy and tensile properties of pure iron and two ferritic martensitic steels. [Online] 1998. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311598001937>.
16. **Sun, M. a Packer, A.** Charpy V-notch impact toughness of cold-formed rectangular hollow sections. [Online] 2014. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X14000534>.
17. **Ghosh, A. Modak, P. Dutta, R. Chakrabarti, D.** Effect of MnS inclusion and crystallographic texture on anisotropy in Charpy impact toughness of low carbon ferritic steel. [Online] 2015. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509315307437>.
18. **H. Liebowitz, (ed.).** *Fracture of Metals: An Advanced Treatise*. New York : Academic Press Inc., 1969.
19. **A. J. Cooper, N. I. Cooper, J. Dhers, A. H. Sherry.** Effect of Oxygen Content Upon the Microstructural and Mechanical Properties of Type 316L Austenitic Stainless Steel Manufactured by Hot Isostatic Pressing. [Online] 2016. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11661-016-3612-6.pdf>.
20. **P. Fassina, F. Bolzoni, G. Fumagalli, L. Lazzari, L. Vergani, A. Sciuccati.** Influence of Hydrogen and Low Temperature on Pipeline Steels Mechanical Behaviour. [Online] 2011. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811007211>.
21. **Arikan, M. M.** [Online] 2015. <https://www.mdpi.com/2075-4701/5/2/986/htm>.
22. **Marchand, D.** nanoScience. [Online] 2020. <https://www.nanoscience.com/applications/materials-science/fractography/>.
23. **Arshad, M.** Metallurgy and materials. *Liberty ship failures*. [Online] 2015. <https://metallurgyandmaterials.wordpress.com/2015/12/25/liberty-ship-failures/>.
24. **Shterenlikht, A.** 3D CAFE modelling of transitional ductile - brittle fracture in steel. [Online] 2003. <https://abumpack.sourceforge.io/>.
25. Instrumented Charpy Impact Testing machine. [Online] <https://timetestingmachine.en.made-in-china.com/product/pCJxjnmdJIWH/China-Instrumented-Charpy-Impact-Testing-machine.html>.

26. Houževnatost, tranzitní lomové chování: studijní podklady. [Online]  
<http://ime.fme.vutbr.cz/index.php/cs/studium/podklady-pro-vyuku-zimni-semestr>.

## 7. Použité symboly a zkratky

SEM	Rastrovací elektronový mikroskop (Scanning Electron Microscope)
BSA	Britský vědecká svaz (British Science Association)
ASTM	(American Society for Testing and Materials)
NRL	(Naval Research Laboratory)
DWT	Zkouška padajícího závaží (drop weight test)
DT	Zkouška rázem v ohybu velkých těles (dynamic tear)
DWTT	Zkouška rázem v ohybu velkých těles původní tloušťky (dynamic weight tear test)
AGA	(American Gas Association)
API	(American Petroleum Institute)
BSI	(British Standards Institution)
JSME	(Japan Society of Mechanical Engineers)
CTOD	Kritické rozevření trhliny (Crack Tip Opening Displacement)
LELM	Lineární elastická lomová mechanika
EPLM	Elasto-plastická lomová mechanika
C(T)	Kompaktní těleso (compact specimen)
SE(B)	(single-edge notched bend specimen)
LVDT	(linear variable differential transformer)
BCC	krychlová tělesně středěná mřížka (body-centered cubic)
FCC	krychlová plošně středěná mřížka (face-centered cubic)
HCP	šesterečně těsně uspořádaná mřížka (hexagonal close-packed)
CLAM	(China Low Activation Martensitic)
HSR	(High Sulfur Rolled)
LSR	(Low Sulfur Rolled)
SAE	(Society of Automotive Engineers)

## 8. Použité fyzikální veličiny

K	[J]	Nárazová práce
W	[J]	Potenciální energie
G	[N]	Tíha kyvadla
h	[m]	Výška polohy kyvadla
r	[m]	Poloměr trajektorie
$\alpha$	[°]	Úhel výchozí polohy kyvadla
$\beta$	[°]	Úhel konečné polohy kyvadla
KV	[J]	Nárazová práce vzorku s V-vrubem
KU	[J]	Nárazová práce vzorku s U-vrubem
KCV	[J]	Vrubová houževnatost vzorku s V-vrubem
KCU	[J]	Vrubová houževnatost vzorku s U-vrubem
$K_I$	[MPa. m <sup>-2</sup> ]	Faktor intenzity napětí zatěžovacího módu I
$S_0$	[cm <sup>2</sup> ]	Průřez tyče v místě vrubu
$K_{Ia}$	[-]	Faktor intenzity napětí zatěžovacího módu I
$t_{NDTT}; t_{NDT}$	[°C]	Teplota nulové houževnatosti
$E_{DT}$	[J]	Nárazová energie
$K_{Ic}$	[MPa. m <sup>-2</sup> ]	Kritická hodnota faktoru intenzity napětí při módu I
$\Delta a$	[m]	Nárůst délky trhliny
F	[N]	Působící síla
B;W;a	[m]	Rozměry tělesa
$f\left(\frac{a}{W}\right)$	[-]	Bezrozměrná funkce tvaru tělesa
$\delta$	[-]	Míra rozevření trhliny
$\delta_c$	[-]	Kritická míra rozevření trhliny
$\delta_{el}$	[-]	Elastická složka kritické míry rozevření trhliny
$\delta_p$	[-]	Plastická složka kritické míry rozevření trhliny
m	[-]	Bezrozměrná konstanta
$R_e$	[MPa]	Mez kluzu
E	[MPa]	Youngův modul pružnosti v tahu
$r_p$	[-]	Rotační součinitel plastické oblasti
$V_p$	[m]	Plastická složka rozevření vrubu
$J_I$	[J.mm <sup>-2</sup> ]	J-integrál při zatěžovacím módu I



$dU$	[J]	Přírůstek potenciální energie
$da$	[m]	Přírůstek délky trhliny
$J_{Ic}$	[J.mm <sup>-2</sup> ]	Kritická hodnota J-integrálu při módu I
$\nu$	[-]	Poissonovo číslo
$A_{pn}$	[m <sup>2</sup> ]	Dílčí plochy pod J-křivkou
$A_{cp}$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha pod J-křivkou
$\eta$	[-]	Bezrozměrný součinitel

## 9. Seznam obrázků

Obrázek 1: Liberty ship S.S. Schenectady, rozlomena vedví v roce 1943 (23) .....	2
Obrázek 2: Interkrystalický lom (3).....	4
Obrázek 3: Transkrystalický lom (3) .....	4
Obrázek 4: Tvárná lomová plocha, pořízeno SEM, 200x zvětšení (24).....	5
Obrázek 5: Částice sekundární fáze na dně důlků, pořízeno SEM, 2000x zvětšení (24) .....	5
Obrázek 6: Transkrystalický křehký lom, pořízeno SEM, 400x zvětšení (21).....	6
Obrázek 7: Interkrystalický křehký lom, pořízeno SEM, 3000x zvětšení (22) .....	7
Obrázek 8: Příklad moderního provedení Charpyho zkušebního zařízení s prostředky instrumentace (26) .....	9
Obrázek 9: Schéma principu Charpyho zkoušky .....	10
Obrázek 10: Vzorek je uložen jako prostý nosník .....	10
Obrázek 11: Upevněný vzorek Izodovy zkoušky .....	11
Obrázek 12: Schéma zkoušení tělesa DWT .....	12
Obrázek 13: Schéma tělesa zkoušky DT .....	13
Obrázek 14: Schéma tělesa zkoušky DWTT .....	14
Obrázek 15: U vzorků zkoušky DWTT se velice často posuzuje podíl tvárního lomu (26) ...	14
Obrázek 16: Rozdílné orientace působícího zatížení (10) .....	16
Obrázek 17: Závislost lomové houževnatosti určené parametrem $K_{Ic}$ na teplotě (10).....	17
Obrázek 18: Konfigurace zkušebních těles dovolené standardy ASTM (3) .....	18
Obrázek 19: Trhlina vznikne cyklickým zatížením .....	19
Obrázek 20: Uchycené C(T) těleso (10) .....	19
Obrázek 21: Těleso SE(B) zatížené jedinou silou (10).....	19
Obrázek 22: Jiná možnost zatěžování SE(B) tělesa.....	20
Obrázek 23: Schéma zařízení LVDT vloženého do prostoru vrubu (3) .....	20

Obrázek 24: Tři možné průběhy nárůstu síly vůči rozevření, obrázek upraven (3) .....	20
Obrázek 25: Otupení původně ostré trhliny .....	21
Obrázek 26: Pomyslný pohyb dvou polovin vzorku kolem plastického kloubu .....	22
Obrázek 27: Zaznamenaný nárůst síly vůči rozevření, obrázek upraven (3).....	22
Obrázek 28: Průběh zatížení a odlehčení nelineárně elastického a elasto-plastického materiálu, obrázek upraven (3) .....	23
Obrázek 29: J-křivka vynesena měřeními více vzorků, obrázek upraven (10).....	24
Obrázek 30: Tři typické projevy závislosti nárazové energie na teplotě (1) .....	25
Obrázek 31: Závislost nárazové práce na teplotě bainitické oceli SA738Gr.B (12) .....	26
Obrázek 32: Lomová houževnatost v závislosti na teplotě i růstu deformace (13).....	26
Obrázek 33: Posun a změna rozsahu přechodové oblasti u CLAM oceli vystavené tepelným účinkům (14) .....	27
Obrázek 34: Porovnání přechodové oblasti ozářených a neozářených vzorků oceli MANET 2 (15) .....	28
Obrázek 35: Vliv obsahu uhlíku na lomovou houževnatost a přechodovou oblast nizkolegované oceli (16) .....	29
Obrázek 36: Vliv obsahu manganu na lomovou houževnatost a přechodovou oblast nizkolegované oceli (16) .....	30
Obrázek 37: Vliv obsahu síry na lomovou houževnatost, přechodovou oblast a anisotropii HSR oceli, obrázek upraven (17) .....	31
Obrázek 38: Vliv obsahu síry na lomovou houževnatost, přechodovou oblast a anisotropii LSR oceli (17) .....	31
Obrázek 39: Posun tranzitní teploty vlivem nižší koncentrace kyslíku (18) .....	32
Obrázek 40: Vliv obsahu kyslíku na lomovou houževnatost korozivzdorné austenitické oceli (19).....	33
Obrázek 42: Vliv obsahu vodíku na lomovou houževnatost a přechodovou oblast nizkolegované oceli X65, obrázek upraven (20).....	34
Obrázek 41: Vliv obsahu vodíku na lomovou houževnatost a přechodovou oblast nizkolegované oceli F22, obrázek upraven (20).....	34