

VLIV VODÍKU NA PEVNOST A ŽIVOTNOST ZAŘÍZENÍ

ČÁST 2: RŮST TRHLIN VE VODÍKOVÉM
PROSTŘEDÍ

STAVBA PROCESNÍCH ZAŘÍZENÍ (KSZ)

TOMÁŠ LÉTAL, ANEŽKA MICHÁLKOVÁ, 2025



PROJEKT AKCELERACE ZELENÝCH DOVEDNOSTÍ A UDRŽITELNOSTI NA VUT V BRNĚ
NPO_VUT_MSMT-2143/2024-5



OBSAH

- LOMOVÁ MECHANIKA
- RŮST TRHLIN
- RŮST TRHLIN VE VODÍKOVÉM PROSTŘEDÍ
- PŘÍKLAD





**LOMOVÁ
MECHANIKA**

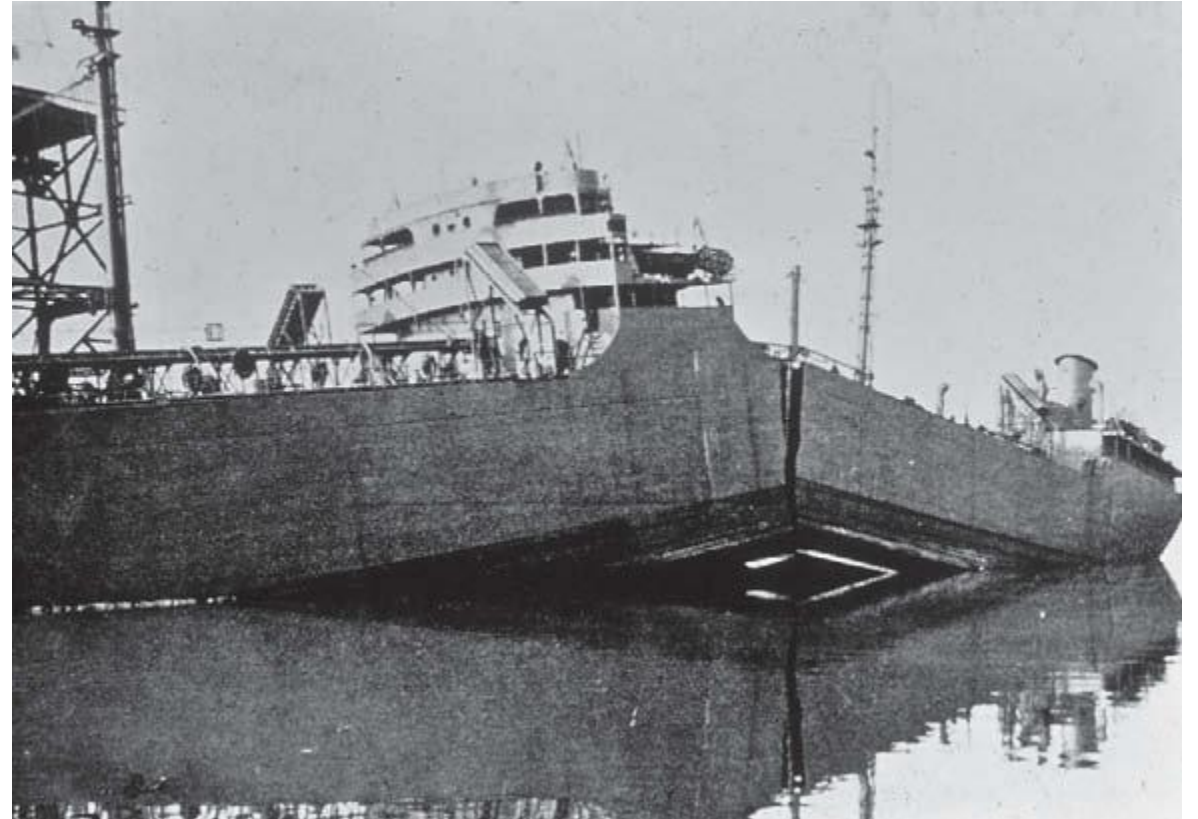


ÚVOD DO PROBLEMATIKY

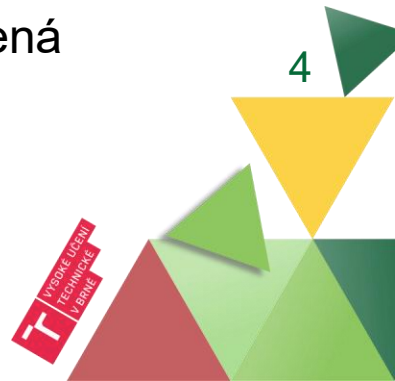
Tělesa mají trhliny

Za určitých okolností se trhliny
mohou šířit

Příklad: Lodě Liberty v 2. světové
válce



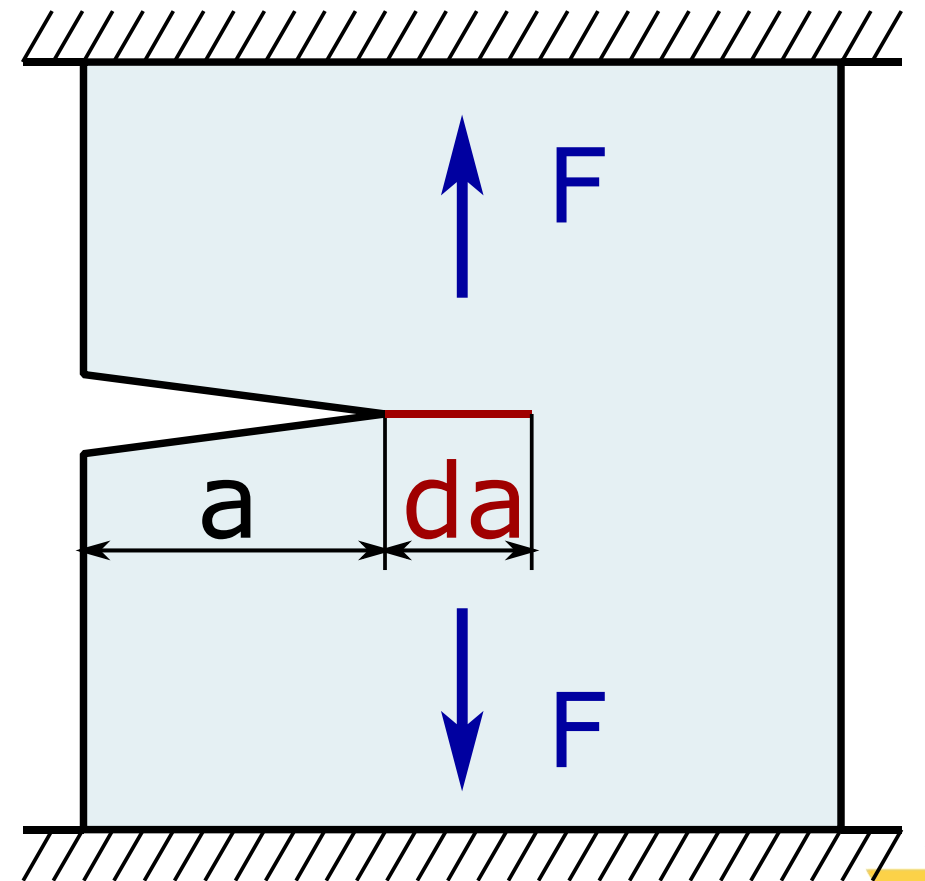
S.S. Schenectady, 16. ledna 1943 zlomená
v přístavu ([zdroj](#))



ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Deska tloušťky t je po zatížení tahovou silou F uložena podle obrázku

Griffith (1920): při zvětšení trhliny o da dojde ke snížení lokálních napětí – uvolní se energie přetvoření U_{eI} ale současně se vytvoří nové povrchy s povrchovou energií E_p



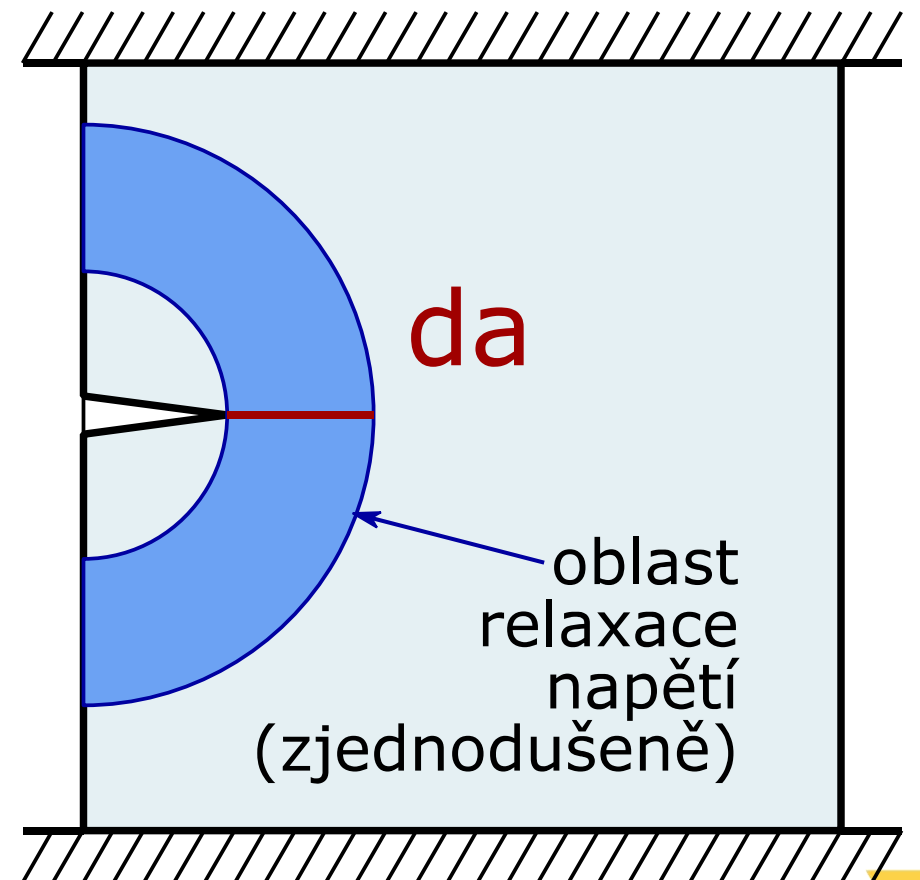
ZJEDNODUŠENÝ ODHAD ZMĚNY ENERGIE PŘETVOŘENÍ

Energie přetvoření U_{el} v polokruhové oblasti

$$U_{el} = \frac{\sigma^2}{2 \cdot E} \cdot \frac{\pi \cdot a^2}{2} \cdot t$$

Změna této energie při zvětšení trhliny o da

$$dU_{el} = \frac{\partial U_{el}}{\partial a} \cdot da = \frac{\sigma^2}{2 \cdot E} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{2} \cdot t \cdot da$$



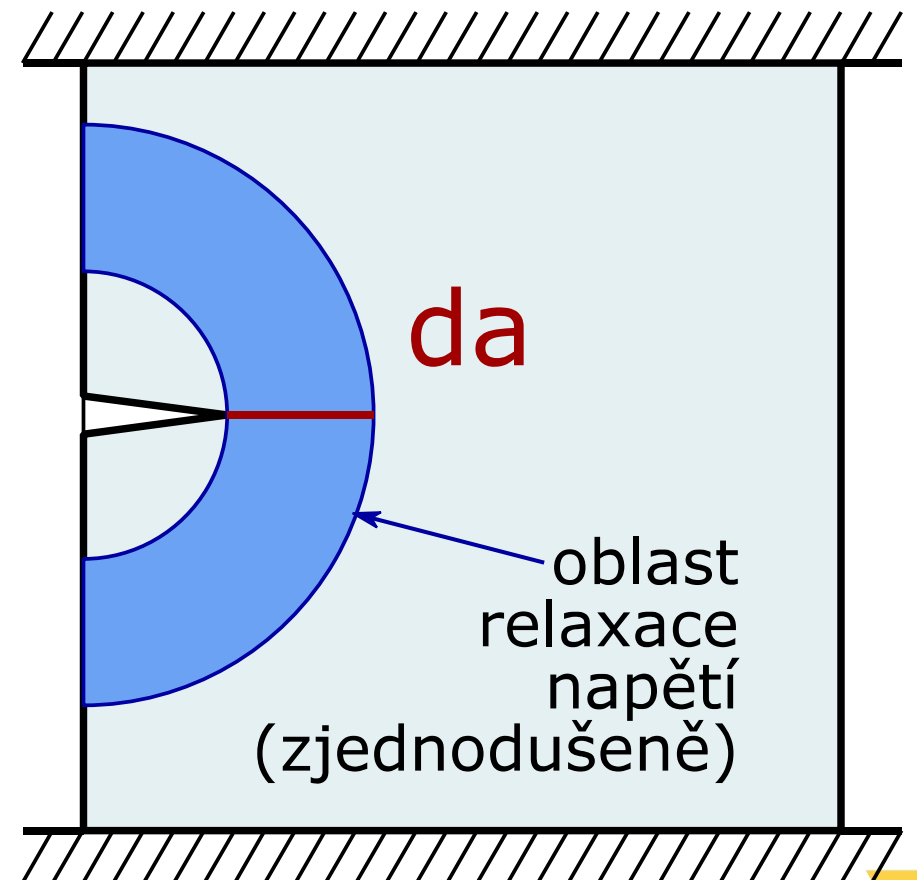
ENERGIE NOVÝCH POVRCHŮ S DÉLKOU Δa

Energie nových povrchů (s využitím měrné povrchové energie materiálu Γ)

$$E_p = 2 \cdot \Gamma \cdot da \cdot t$$

V lomové mechanice se zavádí energie G_c – energie absorbovaná na plochu trhliny; $G_c = 2\Gamma$

$$E_p = G_c \cdot da \cdot t$$



BILANCE ENERGIÍ

Rovnost uvolněné energie přetvoření s energií potřebnou na vytvoření nových povrchů

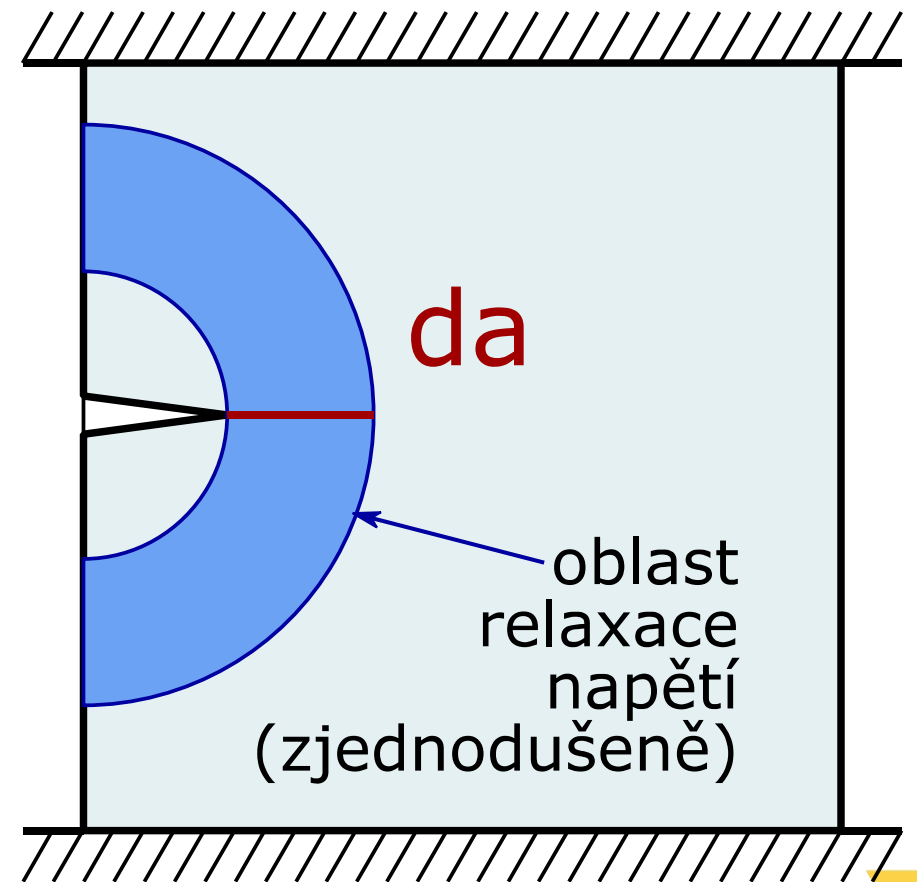
$$\frac{\sigma^2}{2 \cdot E} \cdot \frac{2\pi \cdot a}{2} \cdot t \cdot da = G_c \cdot da \cdot t$$

Výsledek zjednodušené analýzy:

$$\sigma^2 \pi a = 2EG_c$$

Přesná analýza:

$$\sigma^2 \pi a = EG_c$$



PŘESNÉ ŘEŠENÍ ELASTICKÉHO NAPĚTÍ

Lokální napětí (Engels, 1913)

- σ_∞ – napětí ve velké vzdálenosti od trhliny (například od síly F na řez deskou bez trhliny)
- r – vzdálenost od kořene trhliny

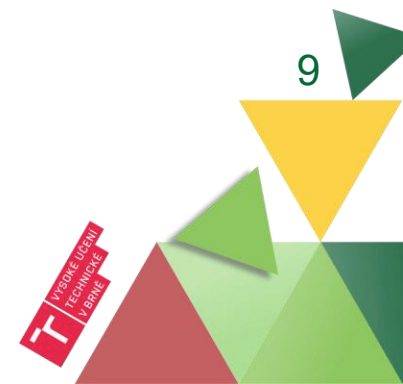
$$\sigma(r) \propto \frac{\sigma_\infty \cdot \sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}}$$

Přesná analýza energií:

- Alternativní zápis:

$$\sigma^2 \pi a = E G_c$$

$$\sigma \sqrt{\pi a} = \sqrt{E G_c}$$



PRAKTICKÉ POUŽITÍ

Přesná analýza energií
modelového případu:

- Alternativní zápis:

$$\sigma^2 \pi a = E G_c$$

$$\sigma \sqrt{\pi a} = \sqrt{E G_c}$$

Pro nekonečnou
desku!

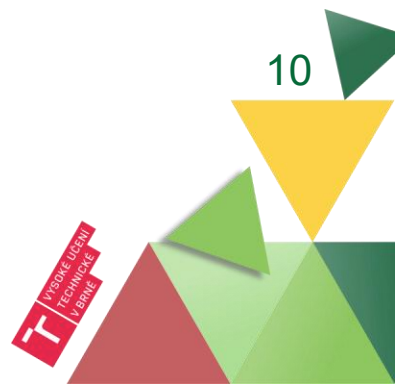
Odtud pro obecné případy: **součinitel intenzity napětí K_I**

- Y – součinitel geometrie a podmínek zatížení

$$K_I = Y \cdot \sigma \sqrt{\pi a}$$

Lomová houževnatost K_{IC}
(vlastnost materiálu)

$$K_{IC} = \sqrt{E G_c}$$



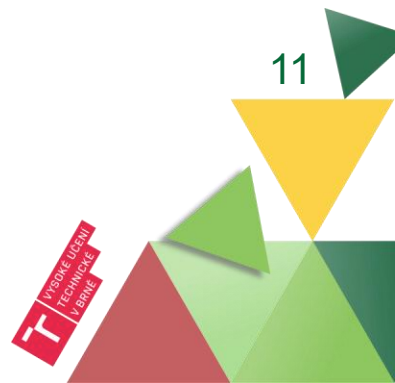
GIFFITHOVO KRITÉRIUM LOMU

K lomu dochází při rovnosti součinitele intenzity napětí a lomové houževnatosti

$$K_I = K_{IC}$$

Pokud je součinitel intenzity napětí menší než lomová houževnatost, k lomu nedojde (alespoň ne v aktuálním zátěžném cyklu)

$$K_I < K_{IC}$$



PLASTICITA V OKOLÍ KOŘENE TRHLINY

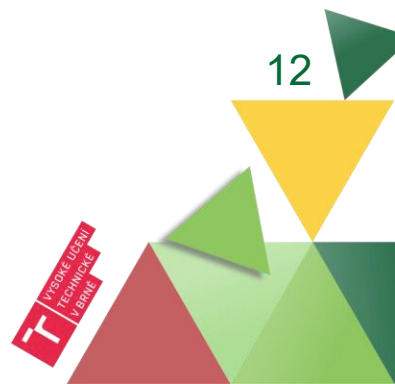
Matematicky přesné řešení v elasticitě: napětí v oblasti kořene trhliny jde do nekonečna

$$\sigma(r) \propto \frac{\sigma_{\infty} \cdot \sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} = \frac{\sigma_{\infty} \cdot \sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{r}}$$

Ve skutečném tělese bude v okolí kořene trhliny docházet k plastizaci – to má pozitivní vliv na změnu energie přetvoření při růstu trhliny, která je vlivem plasticity menší

Griffithovo kritérium je použitelné jen v případech, kdy je plastická oblast kolem kořene trhliny velmi malá („small scale yielding“)

$$\frac{r_p}{a} < 0.02$$



PLASTICITA V OKOLÍ KOŘENE TRHLINY

Přibližná velikost plastické oblasti
(s použitím jedné složky napětí)

$$\sigma(r) \propto \frac{\sigma_{\infty} \cdot \sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r_p}} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r_p}} \approx R_e$$

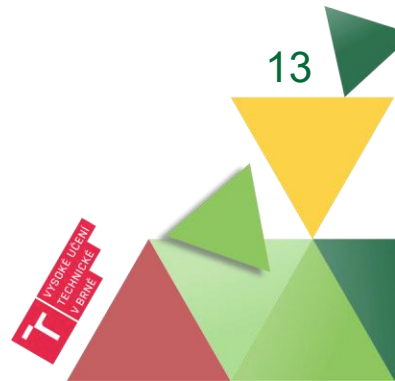
$$r_p \approx \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{K_I^2}{R_e^2}$$

Přesnější řešení (z von Misesova kritéria)

- Rovinná napjatost
- Rovinné přetvoření

$$r_p \approx \frac{1}{\pi} \cdot \frac{K_I^2}{R_e^2}$$

$$r_p \approx \frac{1}{3\pi} \cdot \frac{K_I^2}{R_e^2}$$



TRANZITNÍ TEPLoty A KŘEHKÝ LOM

Velikost plastické zóny u kořene trhliny závisí na mezi kluzu materiálu R_e

Mez kluzu R_e je závislá na teplotě T (Eyringova rovnice)

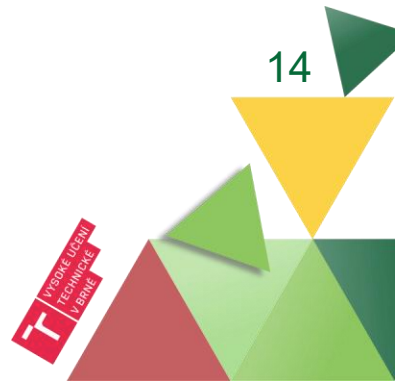
$$r_p \propto \frac{1}{R_e^2}$$

- k - Boltzmannova konstanta
- Q - energie vazby
- $\dot{\gamma}$ - rychlost přetvoření
- $\dot{\gamma}_0$ - referenční rychlost přetvoření
- R_{e0} - referenční mez kluzu

$$R_e(T) = R_{e0} \cdot \left[1 - \frac{kT}{Q} \cdot \ln \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right) \right]$$

Se snižující se teplotou roste mez kluzu a tím se zmenšuje velikost plastické zóny a materiál se stává křehčím*

(*některé materiály mohou mít v určitém rozsahu teplot rostoucí mez kluzu s rostoucí teplotou, viz Yield Strength Anomaly)





RŪST TRHLIN



RŮST TRHLIN

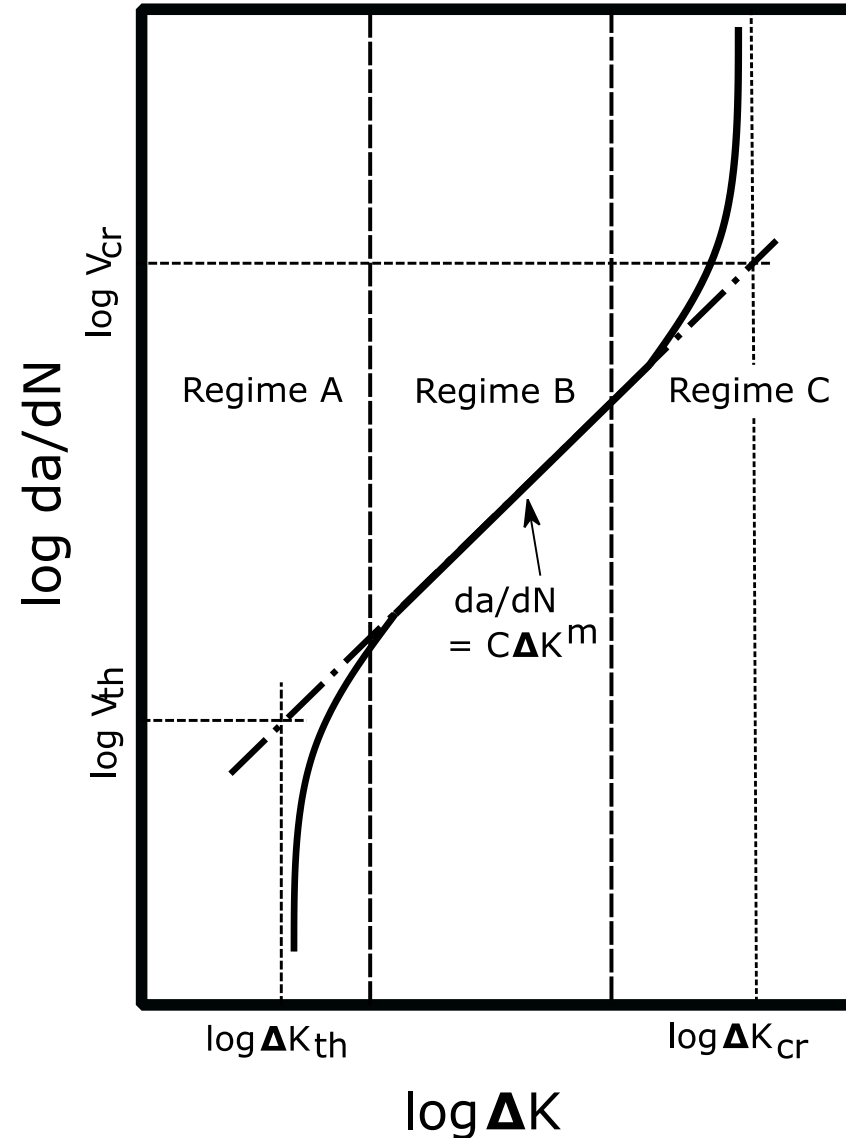
Růst probíhá ve 3 fázích

- Iniciace (popis není)
- Stabilní růst (Paris-Erdogan)
- Nestabilní růst (krátká fáze)

Stabilní růst je popsán vztahem Paris-Erdogan

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m \left(\cdot \left[1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right]^p \right)$$

(člen pro zahrnutí režimu A – 1. fáze)



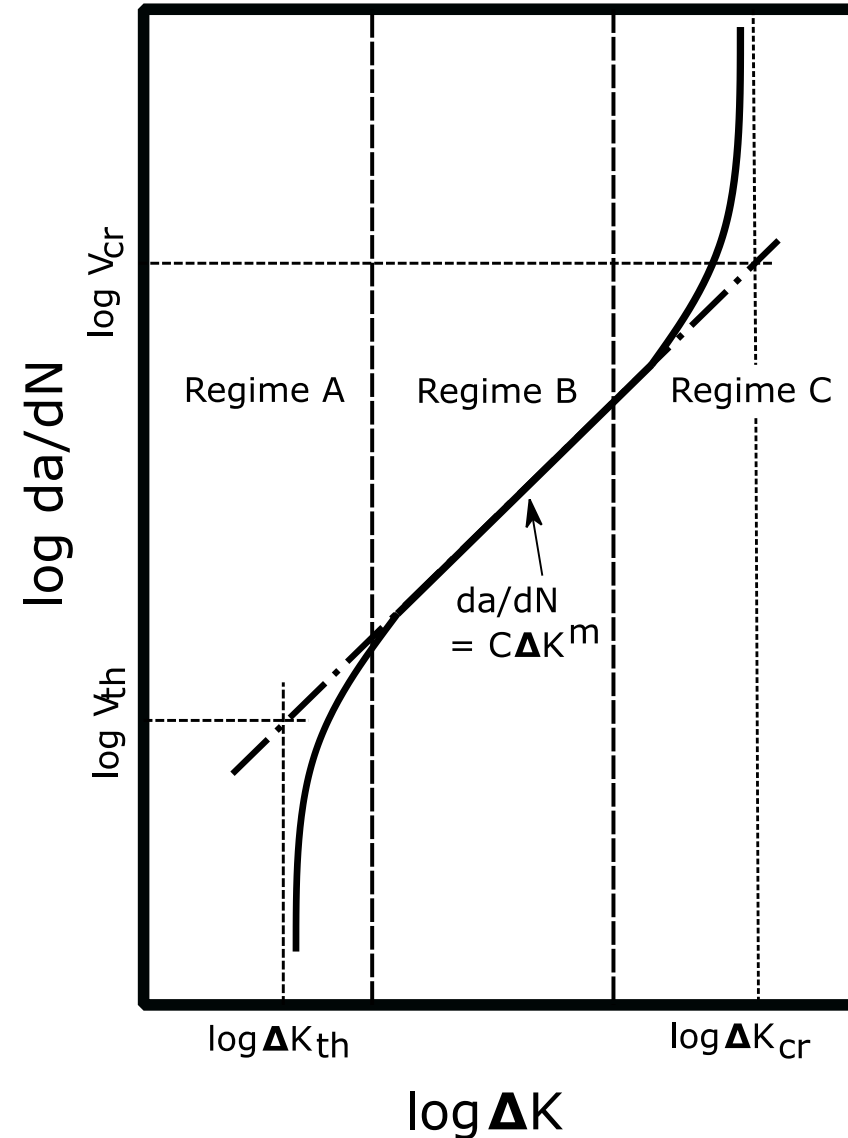
By Sairam Pamulaparthy Venkata - Crack propagation curve Paris' law.pdf, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=82230930>

RŮST TRHLIN

Paris-Erdogan

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m$$

N nereprezentuje změny napětí mezi každými dvěma po sobě jdoucími stavy, v případě obecné historie zatížení je třeba použít **metody počítání cyklů** jako v únavě

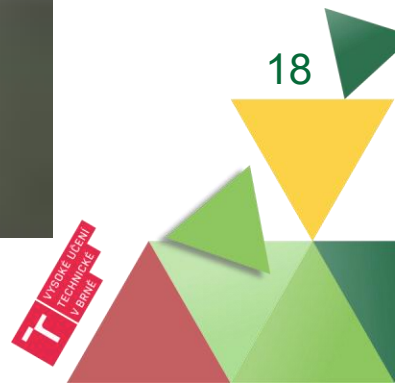


By Sairam Pamulaparthy Venkata - Crack propagation curve Paris' law.pdf, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=82230930>

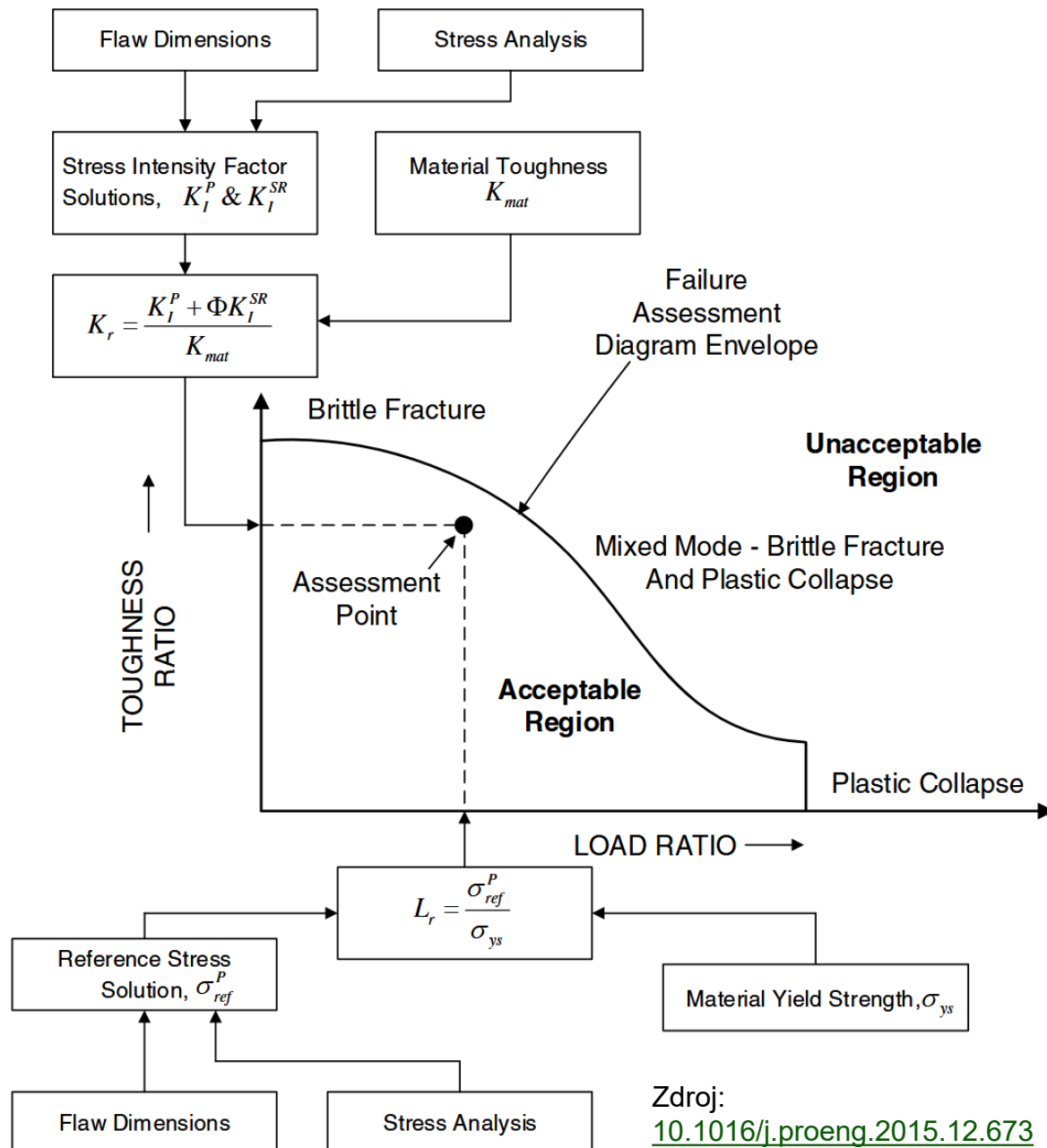
RŮST TRHLIN



[Odkaz na video](#)



FAILURE ASSESSMENT DIAGRAM



Lomovou mechaniku používáme pokud hrozí **křehký lom** nebo **šíření trhliny**, současně ale také může hrozit **plastický kolaps**

Interakci obou fenoménů řeší Failure Assessment Diagram (FAD)

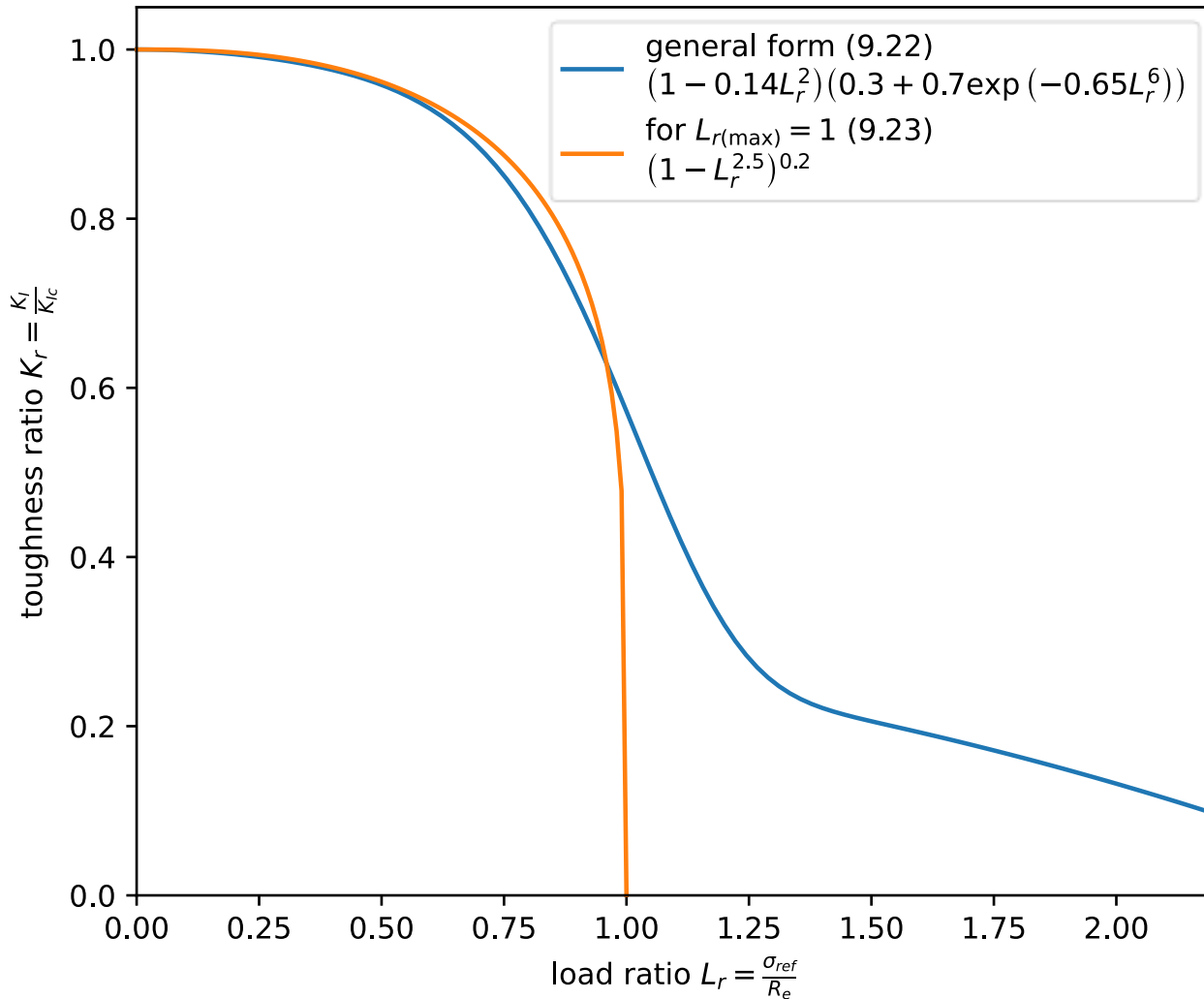
Osa X: podíl referenčního napětí a meze kluzu

Osa Y: podíl součinitele intenzity napětí a lomové houževnatosti

Zdroj:
[10.1016/j.proeng.2015.12.673](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.673)



FAILURE ASSESSMENT DIAGRAM



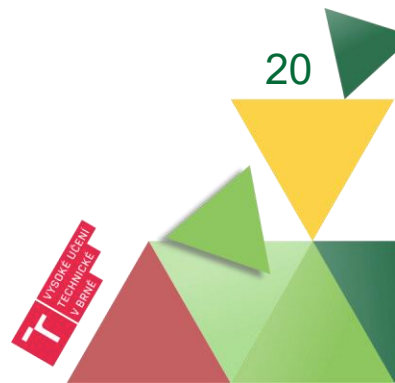
Křivka hranice diagramu je popsaná v normě ASME FFS-1

- Obecný vztah ($L_{r,\max} = 2.2$):

$$K_r(L_r) = (1 - 0.14L_r^2)(0.3 + 0.7\exp(-0.65L_r^6))$$

- Jednodušší vztah pro $L_{r,\max} = 1$:

$$K_r(L_r) = (1 - L_r^{2.5})^{0.2}$$



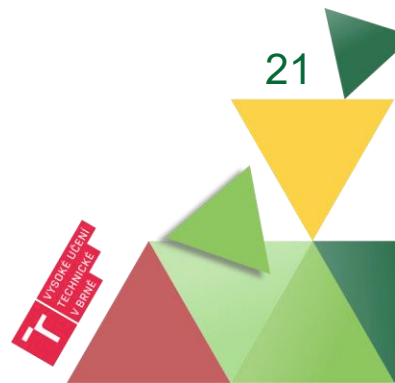
VELIKOST TRHLIN

V již existující konstrukci je trhliny možné detekovat různými metodami, nalezenou trhlínu je pak možné změřit.

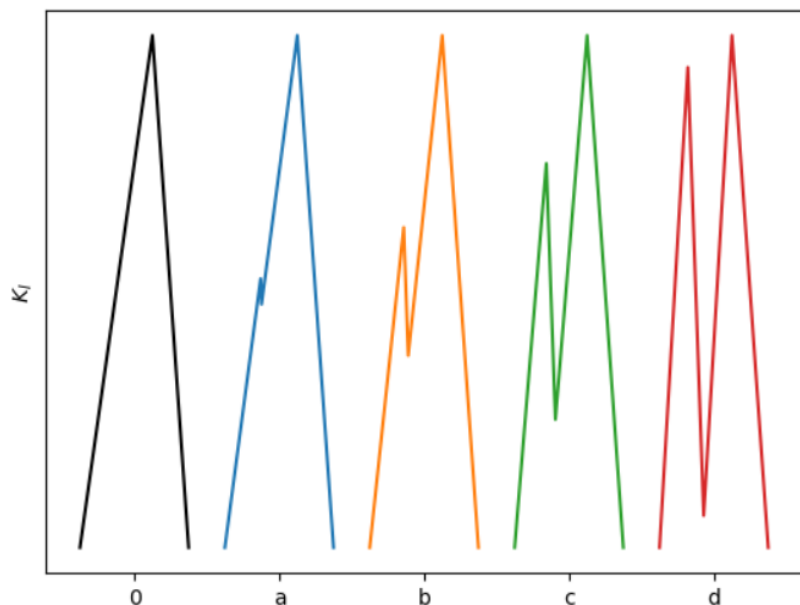
Pokud ovšem není žádná trhlina nalezena, neznamena to, že konstrukce je bez trhlín, ale že je bez trhlín nad určitou velikost, kterou použitá NDE metoda dokáže spolehlivě detekovat;

- Jaká největší trhlina mohla být při inspekci přehlédnuta?

Na otázku odpovídá koncept Probability of Detection (POD)



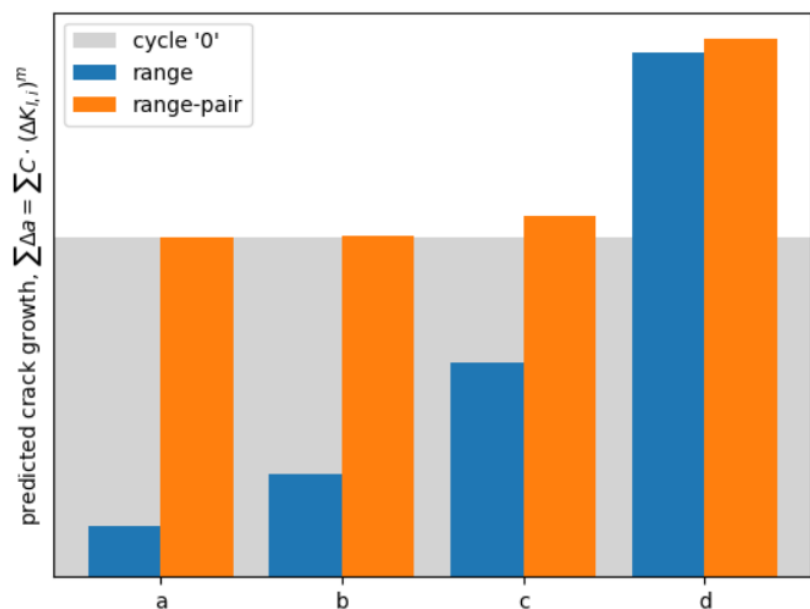
RŮST TRHLIN PŘI OBECNÉM ZATĚŽOVÁNÍ



Bohužel je tu podobný problém jako u únavy – Paris-Erdoganův vztah dobře funguje jenom pro zatěžování se stejnými cykly.

Celkový růst trhliny v případech **a**, **b**, **c**, **d** na obrázku by měl být vždy vyšší než v případě **0**, což pouhé sčítání přírůstků od následujících rozkmitů K_I nepodchytí.

Metoda párových rozkmitů funguje lépe.



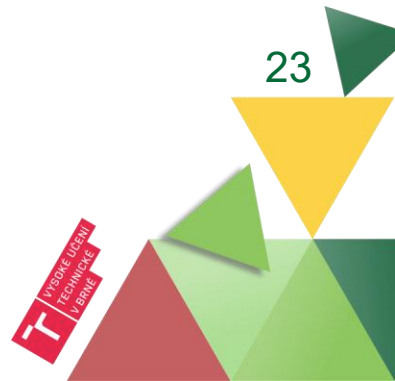
RŮST TRHLIN – SROVNÁNÍ S ÚNAVOU

Růst trhlin

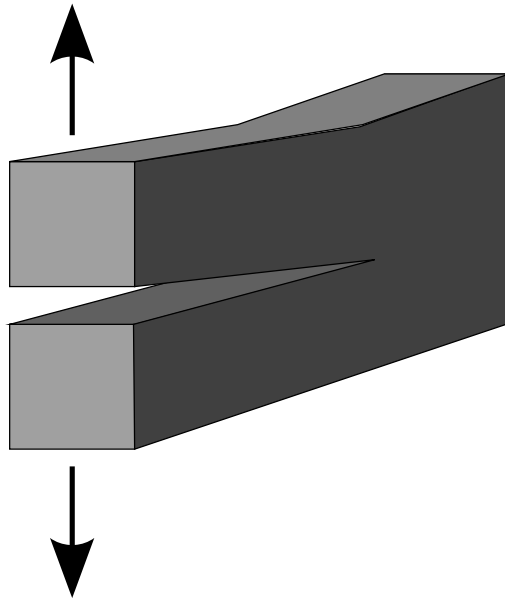
- Na počátku: těleso s trhlinou (pokud není změřena, lze předpokládat konzervativně na dolní hranici použitého NDT)
- Konec životnosti: když trhlina dosáhne kritické velikosti, případně když dojde k ztrátě funkce (v některých případech je možné zařízení s trhlinou dále provozovat (trhlina roste jen když $\Delta K \geq \Delta K_{th}$))

Únava materiálu

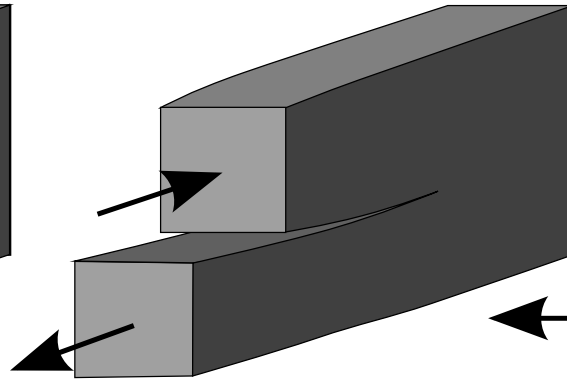
- Na počátku: tělesa bez trhlin (ve skutečnosti tam můžou být)
- Konec životnosti: když dojde k lomu nebo ztrátě schopnosti konstrukce odolávat zatížení



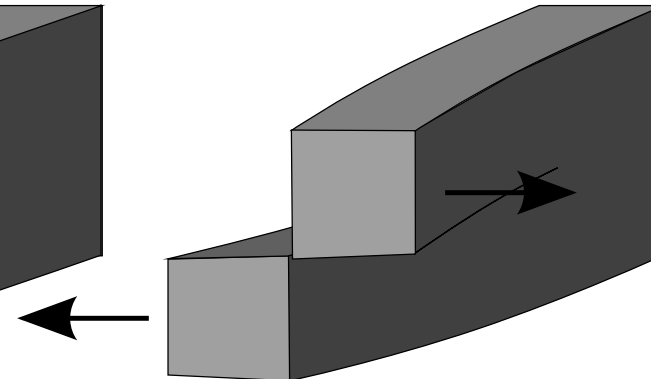
ZÁKLADNÍ REŽIMY LOMU PODLE ZPŮSOBU NAMÁHÁNÍ



Mode I:
Opening



Mode II:
In-plane shear



Mode III:
Out-of-plane shear

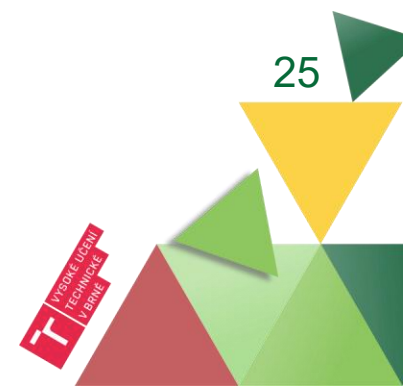
MĚŘENÍ LOMOVÉ HOUŽEVNATOSTI K_{IC}

Konzervativní přístup – měření pro podmínky **rovinného přetvoření**

→ menší plastická zóna → menší lomová houževnatost

Standardizované testy:

- ASTM E399-19: Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{IC} of Metallic Materials
- ASTM E1820-20: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness
- ČSN ISO 12135 Kovové materiály – Jednotná metoda zkoušky pro určení kvazistatické lomové houževnatosti



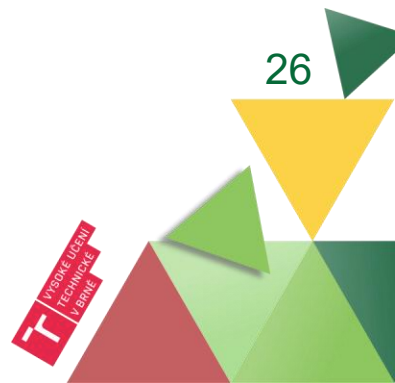
SOUVISLOST LOMOVÉ HOUŽEVNATOSTI A NÁRAZOVÉ PRÁCE

Lomová houževnatost K_{IC} je odolnost materiálu vůči šíření trhliny při opakovaném zatěžování (zkoušky podle ISO 12135)

- Pokud trhlina postupně roste, může po určitém počtu cyklů dojít k rychlému šíření trhliny zbytkem nosného průřezu vzorku

Nárazová práce K_V je právě práce potřebná k prostupu trhliny zbytkem nosného průřezu vzorku (zkoušky podle EN ISO 14556)

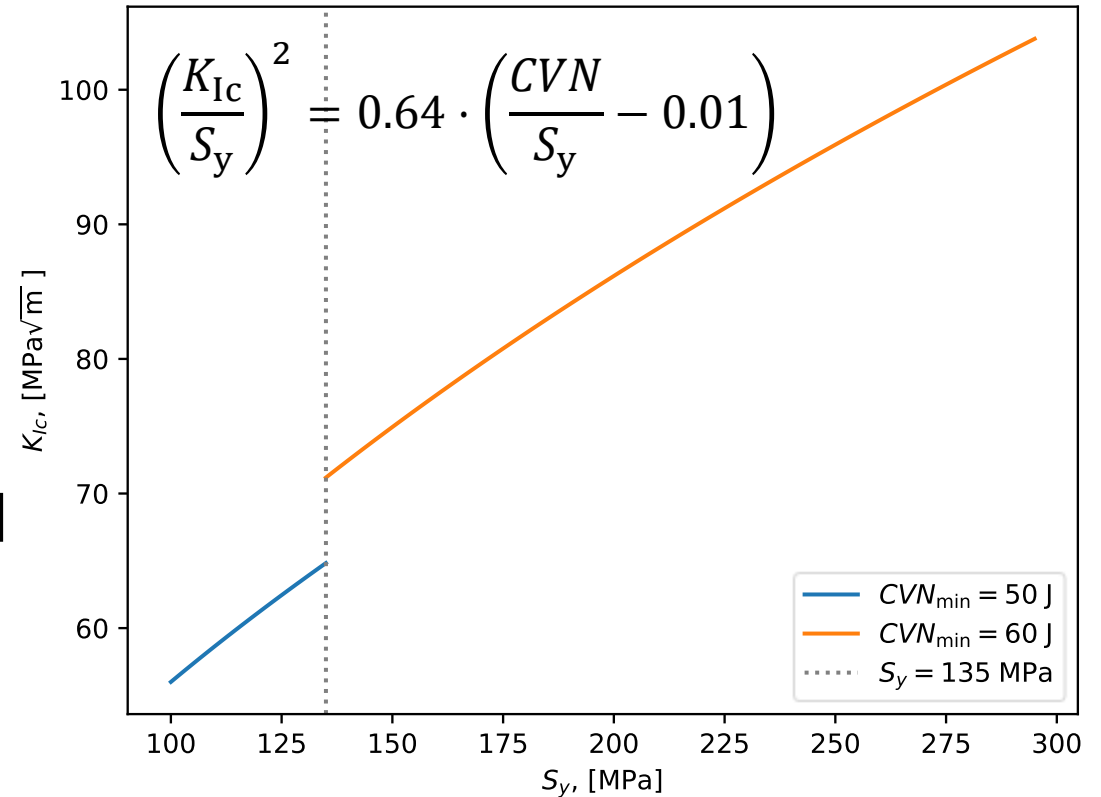
Protože je Charpyho test nárazové práce jednodušší, jsou snahy o predikci lomové houževnatosti z nárazové práce (např. [Fracture Toughness Determination of a Nuclear Pressure Vessel Steel by Instrumented Charpy Impact Test](#))



SOUVISLOST LOMOVÉ HOUŽEVNATOSTI A NÁRAZOVÉ PRÁCE

ASME BPVC.VIII.3:

- Nonmandatory appendix D
 - D-600 Fracture toughness correlations
 - K_{Ic} lomová houževnatost [MPa \sqrt{m}]
 - S_y mez kluzu [MPa]
 - CVN Charpyho nárazová práce [J] (Charpy V-notch)
- KM
 - Table KM-234.2(a) – minimální hodnoty CVN materiálů pro tlakové účely:
 - $S_y < 135$ MPa: $CVN_{min} = 50$ J
 - $S_y \geq 135$ MPa: $CVN_{min} = 60$ J

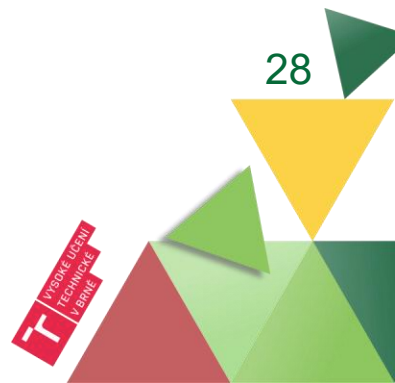


VÝPOČTY TRHLIN V PRAXI

USA – API 579-1/ASME FFS-1 Fitness-For-Service

EU

- ČR – NTD ASI: Normativně technická dokumentace – Sekce IV
 - Pro řízení životnosti reaktorů VVER, používá se ale i obecně v energetice
- Německo – normy KTA, např. [KTA 3206 \(2014-11\)](#) (jádro), DVGW G 464 (plynovody pro vodík)
- Chybí EN norma pro vyhodnocování a opravy vad na tlakových zařízeních (obdoba ASME FFS), do budoucna se o ní uvažuje
- ČSN EN 1993-1-10 Houževnatost materiálu a vlastnosti napříč tloušťkou (řeší se tu spíš nárazová práce, lomová mechanika se v rámci eurokódů zřejmě nepoužívá)

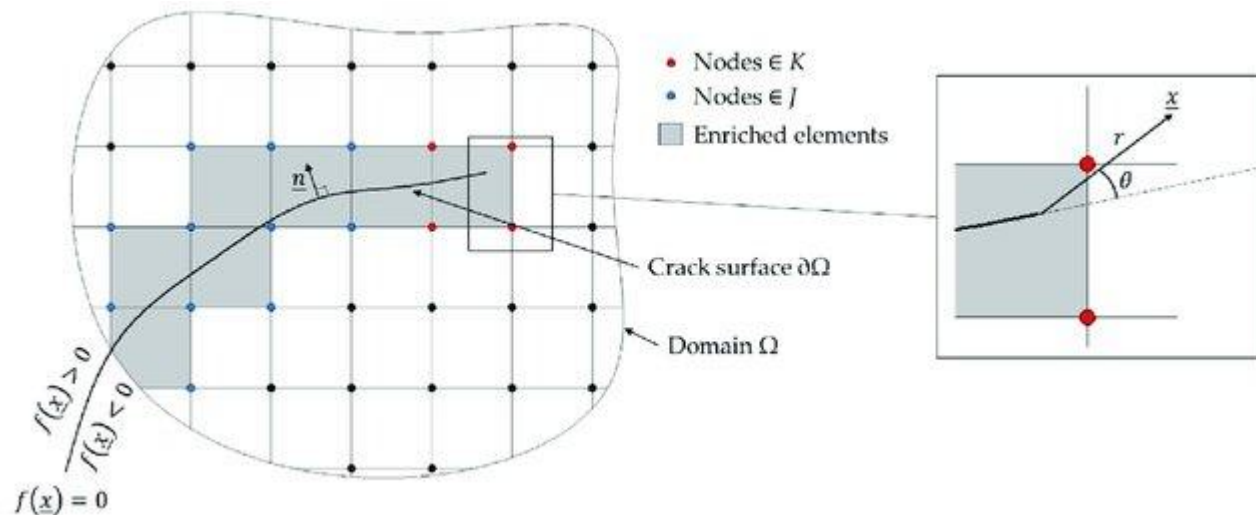


SIMULACE RŮSTU TRHLIN

Při predikci postupného růstu trhlin lze využít MKP

Je to důležité pro výpočet napětí a plastické zóny v okolí kořene trhliny

Speciální rozšíření MKP – XFEM, kde jsou ke standardním báзовým funkcím přidány diskontinuální funkce, což umožňuje popsat trhlinu uvnitř prvku



D. De Cicco, F. Taheri, Delamination Buckling and Crack Propagation Simulations in Fiber-Metal Laminates Using xFEM and Cohesive Elements, Applied Sciences. 8 (2018).
<https://doi.org/10.3390/app8122440>.



**RŮST TRHLIN
VE
VODÍKOVÉM
PROSTŘEDÍ**



VLIV VODÍKU NA RŮST TRHLIN

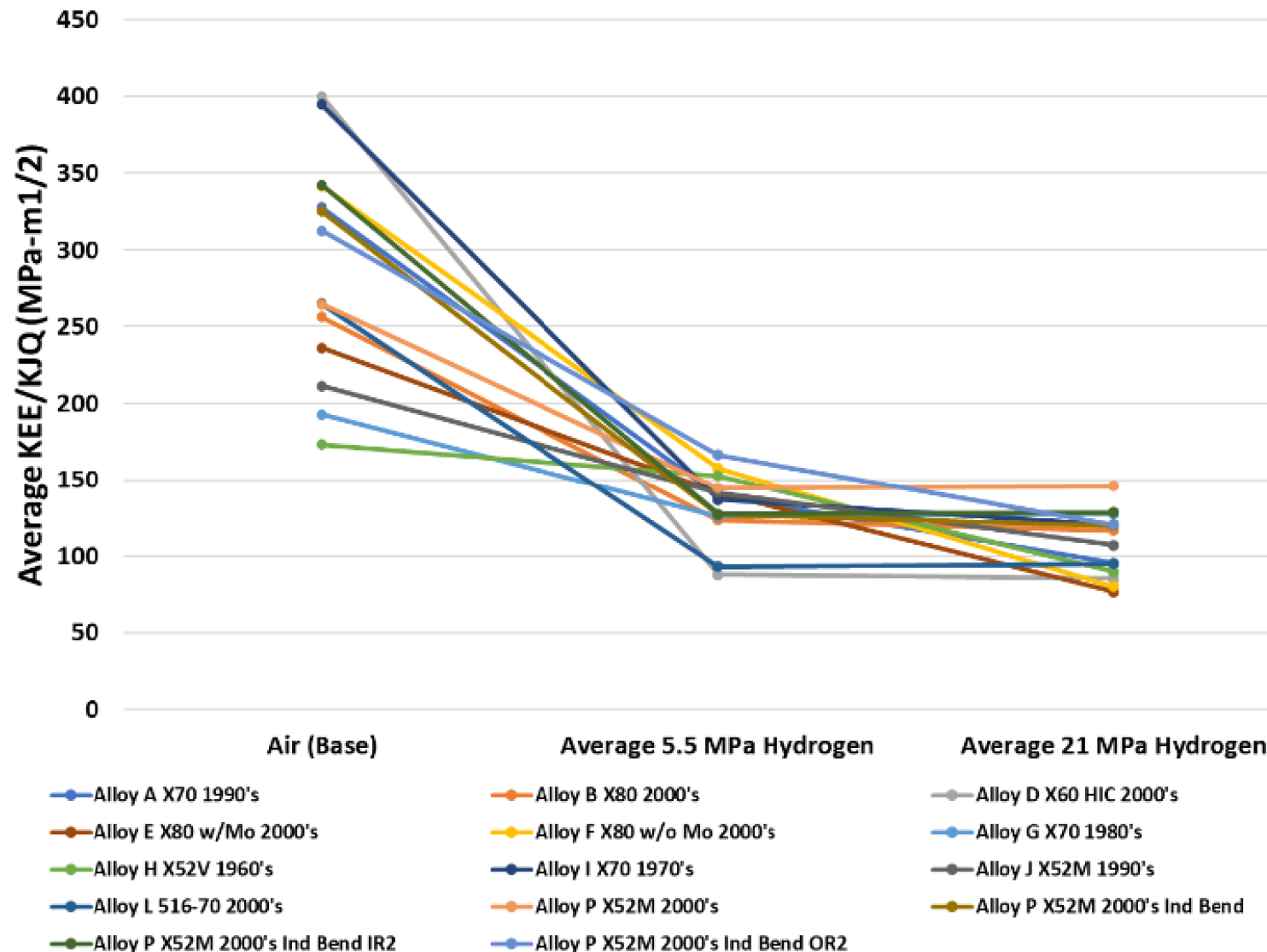
Výzkumy ukazují, že vodíkové prostředí dokáže výrazně urychlovat růst trhlin, např. podle Companion Guide to the ASME BPVC (2018) se problém týká hlavně feritických ocelí a rychlost růstu se ještě více zvyšuje u ocelí s vyšší mezí kluzu a pevnosti

Lomová houževnatost oceli také může být negativně ovlivněna vodíkovým prostředím

VLIV VODÍKU NA RŮST TRHLIN

Srovnání lomových houževnatostí K_{Ic} v různých ocelích pro plynovody, v prostředí vzduchu a v prostředí vodíku s různými tlaky

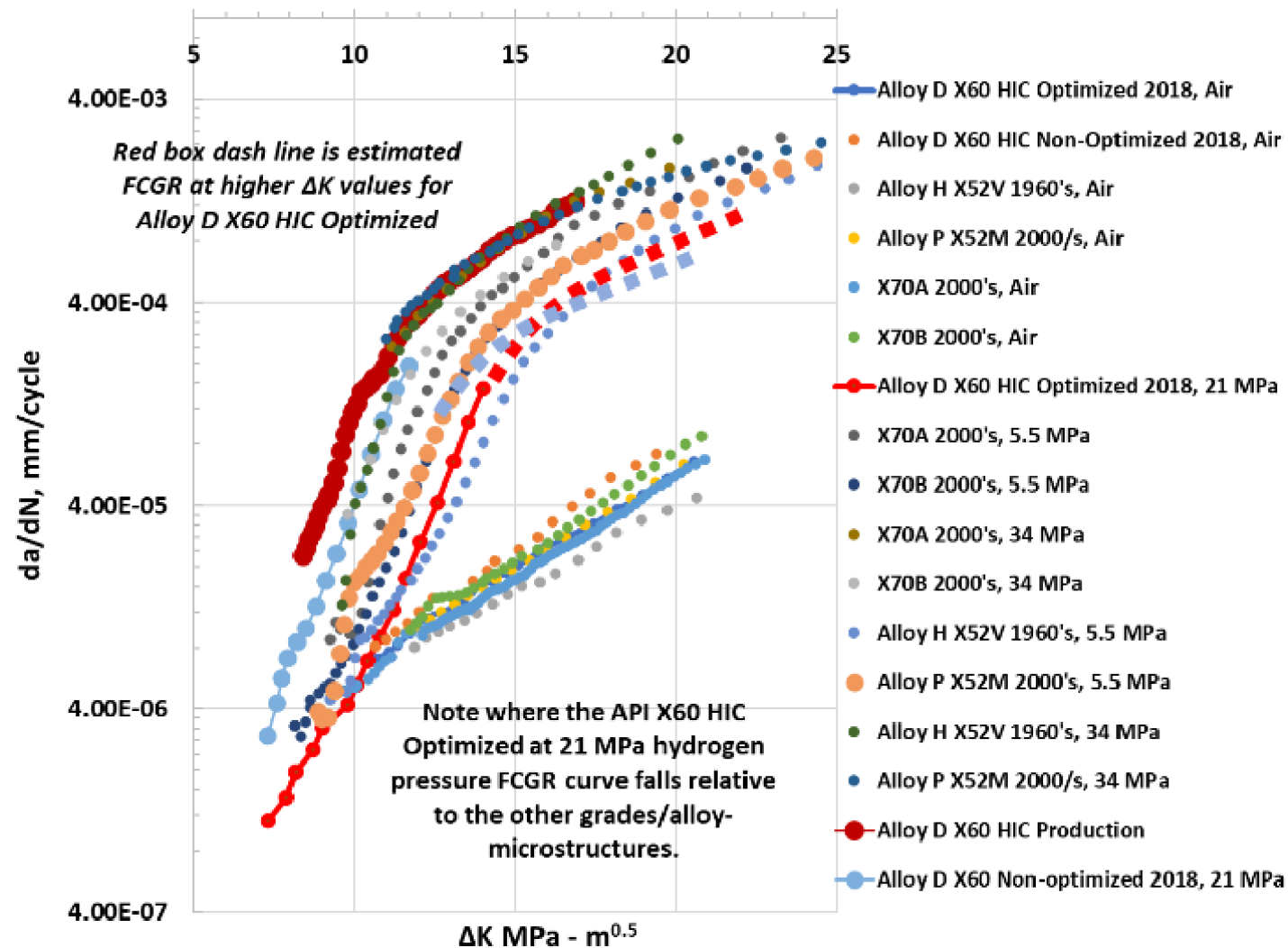
Implementation of Ductility and Microstructural Attributes for Evaluation of Fracture and Fatigue Performance of API X Grades in High Pressure Gaseous Hydrogen Transmission Pipeline Environments. IPC2022-87069. doi:[10.1115/IPC2022-87069](https://doi.org/10.1115/IPC2022-87069)



VLIV VODÍKU NA RŮST TRHLIN

Srovnání rychlostí
růstu trhlin v různých
ocelích pro plynovody,
v prostředí vzduchu a
v prostředí vodíku
s různými tlaky

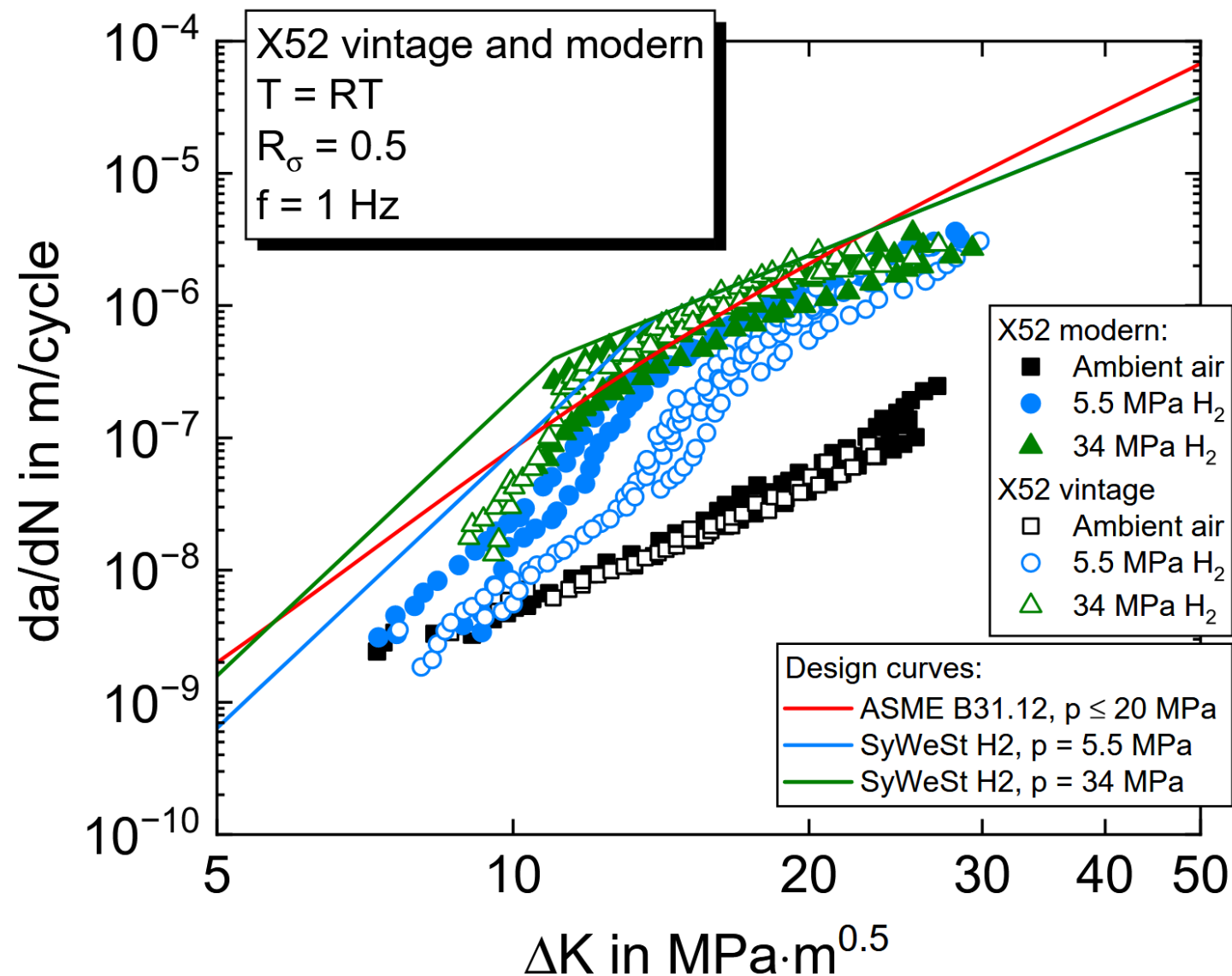
Implementation of Ductility and
Microstructural Attributes for
Evaluation of Fracture and
Fatigue Performance of API X
Grades in High Pressure
Gaseous Hydrogen Transmission
Pipeline Environments. IPC2022-
87069. doi:[10.1115/IPC2022-
87069](https://doi.org/10.1115/IPC2022-87069)



VLIV VODÍKU NA RŮST TRHLIN

Srovnání rychlostí
růstu trhlin v oceli X52:
ASME B31.12:2019 a
DVGW G 464:2023
(projekt SyWeSt)

OESTERLIN, Heiner, Carl
FISCHER a Thorsten MICHLER.
Evaluation of Lifetime Predictions
for Future Hydrogen Pipelines by
Different Fracture
Mechanics-Based Design Codes.
Energy Technology [online]. 2024,
13. Dostupné
z: [doi:10.1002/ente.202301012](https://doi.org/10.1002/ente.202301012)



RŮST TRHLIN VE VODÍKOVÉM PROSTŘEDÍ

Normy zabývající se trhlinami ve vodíkovém prostředí:

ASME B31.12 Hydrogen Piping and Pipelines

Už od roku 2008

ASME BPVC.VIII.3 Alternative Rules for Construction of High Pressure Vessels

článek KD-10: Special Requirements for Vessels in Hydrogen Service

DVGW G 464 Fracture-Mechanical Assessment Concept for Steel Pipelines with a Design Pressure of more than 16 bar for the Transport of Hydrogen

RŮST TRHLIN VE VODÍKOVÉM PROSTŘEDÍ

ASME BPVC.VIII.3: KD-10: Special Requirements for Vessels in Hydrogen Service

Předpokládá se, že nádoby na vodík budou do 100 MPa

KD-10 je nutno použít podle parciálního tlaku vodíku:

nesvařované nádoby: nad 41 MPa

z ocelí s $R_e \geq 945$ MPa: nad 5.2 MPa

svařované nádoby: nad 17 MPa

z ocelí s $R_e \geq 620$ MPa: nad 5.2 MPa

ASME BPVC.VIII.3: KD-141: Leak-Before-Burst Mode of Failure

Jde o situaci, kdy trhlina proroste skrz celou tloušťku stěny nádoby a médium začne unikat ještě předtím, než dojde ke kritickému růstu a lomu.

Je to žádoucí vlastnost konstrukce nádoby, protože díky zaznamenanému úniku je možné odhalit stabilně rostoucí trhlinu.

Pokud nelze prokázat, že k tomuto způsobu poruchy dojde, je požadováno hodnocení životnosti s využitím lomové mechaniky. V opačném případě lze alternativně využít i klasickou únavu s využitím únavových (S-N) křivek svarových tříd a materiálů.

RŮST TRHLIN VE VODÍKOVÉM PROSTŘEDÍ

Růst trhlin při cyklickém zatěžování se řídí Paris-Erdoganovým vztahem

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m$$

Vodíkové prostředí obecně růst trhlin urychluje, což je třeba zohlednit i v normách. V článku [] jsou uvedeny

Také lomová houževnatost je ovlivněna vodíkovým prostředím, kromě K_{Ic} se uvažuje i K_{IH}

RŮST TRHLIN VE VODÍKOVÉM PROSTŘEDÍ

Článek: „Technical Basis for Fatigue Crack Growth Rules in Gaseous Hydrogen for ASME B31.12 Code Case 220 and for Revision of ASME VIII-3 Code Case 2938-1“ doi:[10.1115/PVP2024-122529](https://doi.org/10.1115/PVP2024-122529)

Aktualizace parametrů v ASME BPVC.VIII.3 pro Paris-Erdoganův vztah při tlaku vodíku 103 MPa

Poměr součinitelů intenzity napětí: $R_k = \frac{K_{I \min}^* + K_{I \text{res}}}{K_{I \max}^* + K_{I \text{res}}}$

$$\frac{da}{dN} = C \cdot f(R_k) \cdot \Delta K^m$$

$\Delta K, \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$	$C, \frac{\text{m}}{\text{cycle}} (\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^{-m}$	m	C_H
$\Delta K < \Delta K_c$	3.5E-14	6.5	0.43
$\Delta K_c \leq \Delta K \leq 40$	1.5E-11	3.66	2.0

(Parametry s indexem 0 jsou z prvního řádku tabulky)

$$f(R_k, C_H) = \frac{1 + C_H \cdot R_k}{1 - R_k}$$

$$\Delta K_c = \exp\left(\frac{\ln\left(\frac{C_0}{C} \cdot \frac{f(R_k, C_{H0})}{f(R_k, C_H)}\right)}{m - m_0}\right)$$



**PŘÍKLAD NA
RŮST TRHLIN
V H₂
PROSTŘEDÍ**



RŮST TRHLIN V H₂ PROSTŘEDÍ - PŘÍKLAD

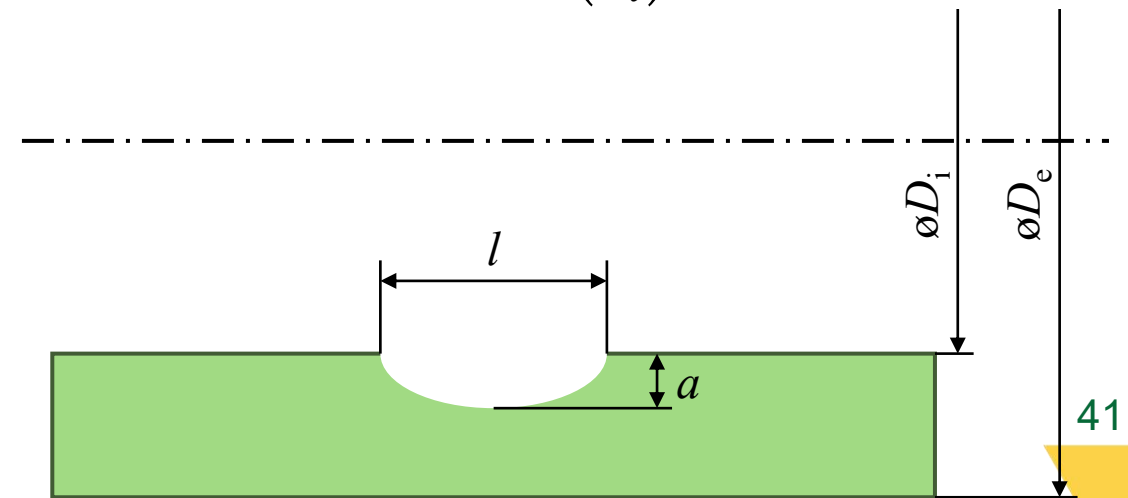
Podle ASME BPVC.VIII.3 „High Pressure Vessels“; tlak nad 70 MPa

Trhlina na vnitřním povrchu válcového pláště

- $D_e = 200$ mm
- $e_n = 8$ mm
- $P = 20$ MPa
- $R_e = 355$ MPa
- $R_m = 470$ MPa
- $K_{lc} = 40$ MPa $\cdot\sqrt{m}$

Rovnice pro návrhový tlak (KD-221.2)

$$P_D = \min\left(\frac{R_e}{1.25}; \frac{R_e + R_m}{3}\right) \cdot \ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)$$



PŘÍKLAD PODLE ASME BPVC.VIII.3 – ŘEŠENÍ

Předpokládaná velikost trhliny: KE-301-2

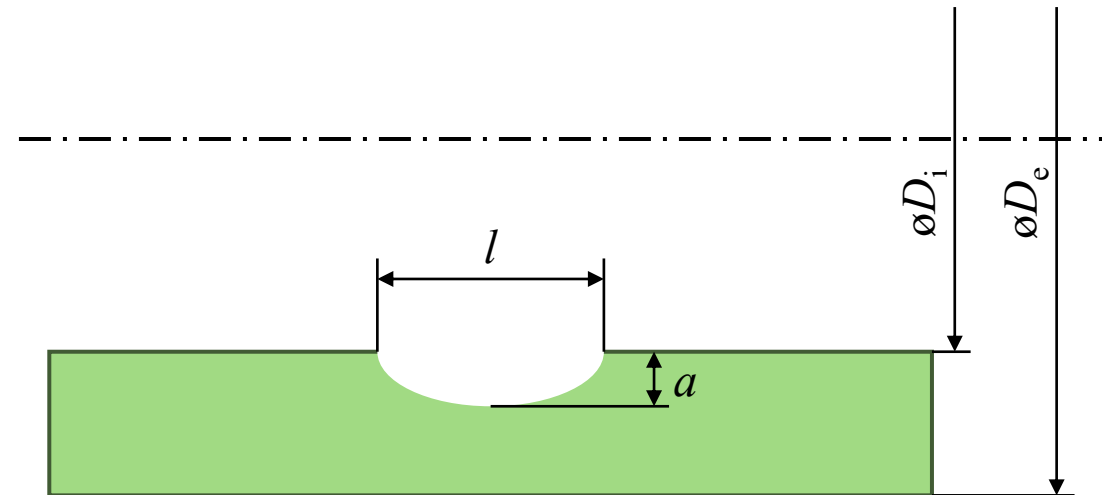
- $a = 0.74e_n$
- $l = 3a$

KD-141: omezení platnosti analytických vztahů na trhlinu do hloubky 0.8 tloušťky t

KD-412: dovolená velikost trhliny – menší z:

- polovina z cyklů pro dosažení kritické velikosti trhliny a_c
- menší z $t/4$ nebo $a_c/4$

Kritická velikost trhliny – lze určit z FAD (ASME FFS-1)



PŘÍKLAD PODLE ASME BPVC.VIII.3 – ŘEŠENÍ

1) Určení napětí

typ trhliny: NA-D: Figure D-200

D-401: Výpočty – napětí jen od zatížení tlakem

$$Y = D_e/D_i$$

$$A'_0 = \frac{Y^2 + 1}{Y^2 - 1} \cdot P$$

$$A'_1 = (1.051 - 2.318Y + 0.3036Y^2 - 0.004417Y^3) \cdot P$$

$$A'_2 = (-1.7678 + 0.9497Y + 0.9399Y^2 - 0.2056Y^3) \cdot P$$

$$A'_3 = (-0.2798 + 1.3831Y - 1.2603Y^2 + 0.21387Y^3) \cdot P$$

PŘÍKLAD PODLE ASME BPVC.VIII.3 – ŘEŠENÍ

1) Určení napětí

typ trhliny: NA-D: Figure D-200

D-401: Výpočty – Konverze součinitelů A_i' na A_i :

$$A_0 = A_0'$$

$$A_1 = A_1' \cdot \frac{a}{t}$$

$$A_2 = A_2' \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2$$

$$A_3 = A_3' \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^3$$

PŘÍKLAD PODLE ASME BPVC.VIII.3 – ŘEŠENÍ

2) Určení součinitele intenzity napětí K_I

Obecný vztah

$$K_I = [(A_0 + A_p)G_0 + A_1G_1 + A_2G_2 + A_3G_3] \cdot \sqrt{\pi \cdot a/Q}$$

Kde:

$Q = 1 + 4.593 \cdot (a/l)^{1.65} - q_y$ (parametr tvaru trhliny)

$q_y = 0$ (korekce na plasticitu – může být 0)

Součinitele G_i jsou z tabulky D-401.1

Pozor! Aby K_I vyšlo v $[\text{MPa}\sqrt{\text{m}}]$, musí se a dosadit v $[\text{m}]$!

PŘÍKLAD PODLE ASME BPVC.VIII.3 – ŘEŠENÍ

3) Je trhlina přípustná?

Jednodušší ověření: $K_I < K_{Ic}$

Sofistikovanější ověření: FAD

- K tomu je třeba určit referenční napětí:
ASME FFS-1, konkrétně pro tuto
trhlinu: 9C.5.10

$$l_a = 1.818 \cdot \frac{c}{\sqrt{R_i \cdot a}} \quad (9C.19)$$

$$M_{ta} = \sqrt{\frac{1.02 + 0.4411 \cdot l_a^2 + 0.005124 \cdot l_a^4}{1 + 0.02642 \cdot l_a^2 + 1.533 \cdot 10^{-6} \cdot l_a^4}} \quad (9C.8)$$

$$M_s = \left(1 - \frac{a}{t} + \frac{a}{t} \cdot \frac{1}{M_{ta}}\right)^{-1} \quad (9C.18)$$

$$P_m = \frac{P \cdot R_i}{t} \quad (9C.48)$$

$$P_b = \frac{P}{2} \quad (9C.49)$$

$$\alpha = \frac{\frac{a}{t}}{1 + \frac{c}{t}} \quad (9C.77)$$

$$g = 1 - 20 \cdot \left(\frac{a}{2c}\right)^{0.75} \cdot \alpha^3 \quad (9C.32)$$

$$\sigma_{ref} = \frac{g \cdot P_b + \sqrt{(g \cdot P_b)^2 + 9 \cdot (M_s \cdot P_m \cdot (1 - \alpha)^2)^2}}{3 \cdot (1 - \alpha)^2} \quad (9C.76)$$

PŘÍKLAD PODLE ASME BPVC.VIII.3 – ŘEŠENÍ

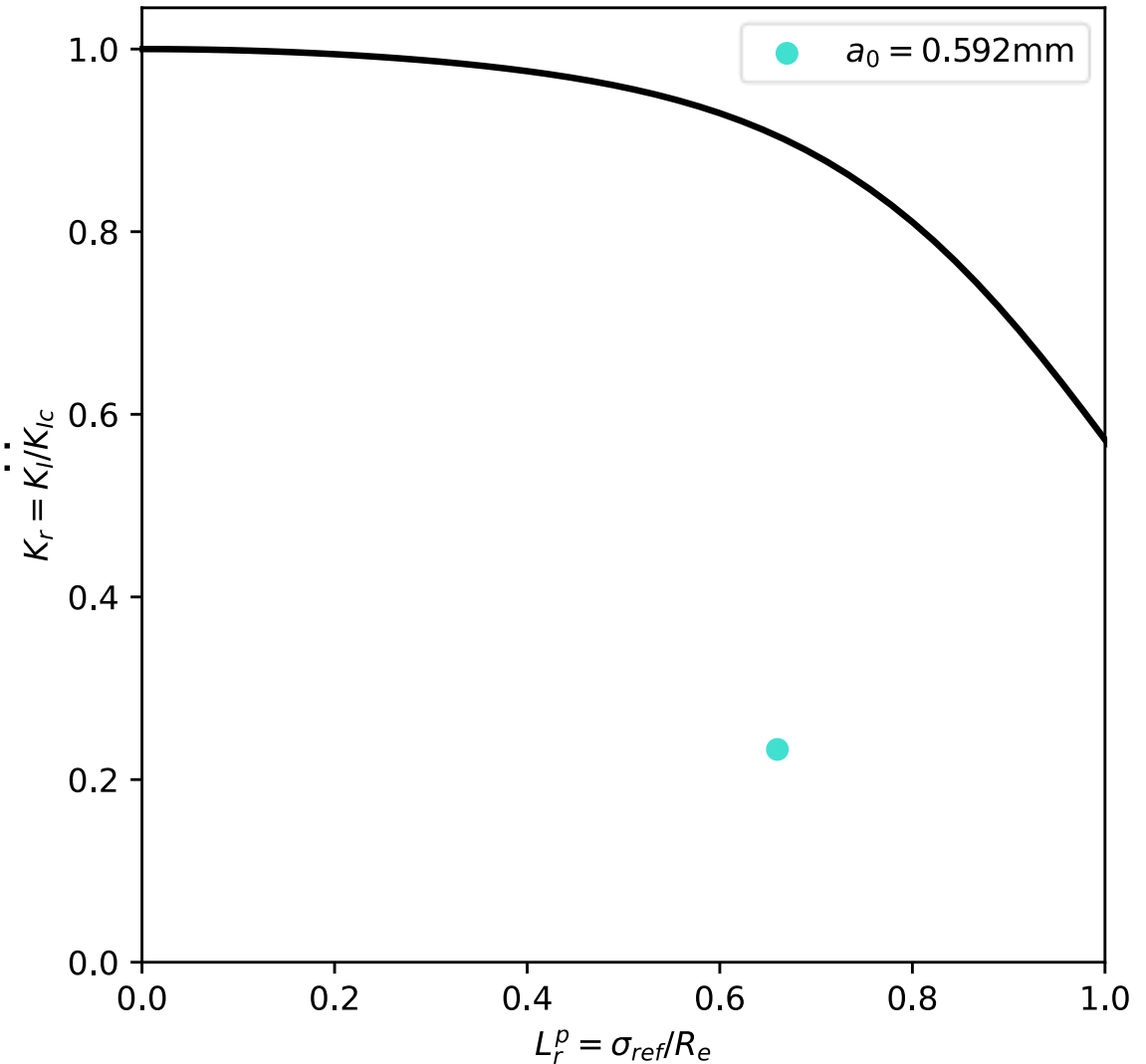
FAD: ASME FFS-1

3) Je trhlina přípustná?

Jednodušší ověření: $K_I < K_{Ic}$

Sofistikovanější ověření: FAD

- K tomu je třeba určit referenční napětí:
ASME FFS-1, konkrétně pro tuto trhlinu:
9C.5.10



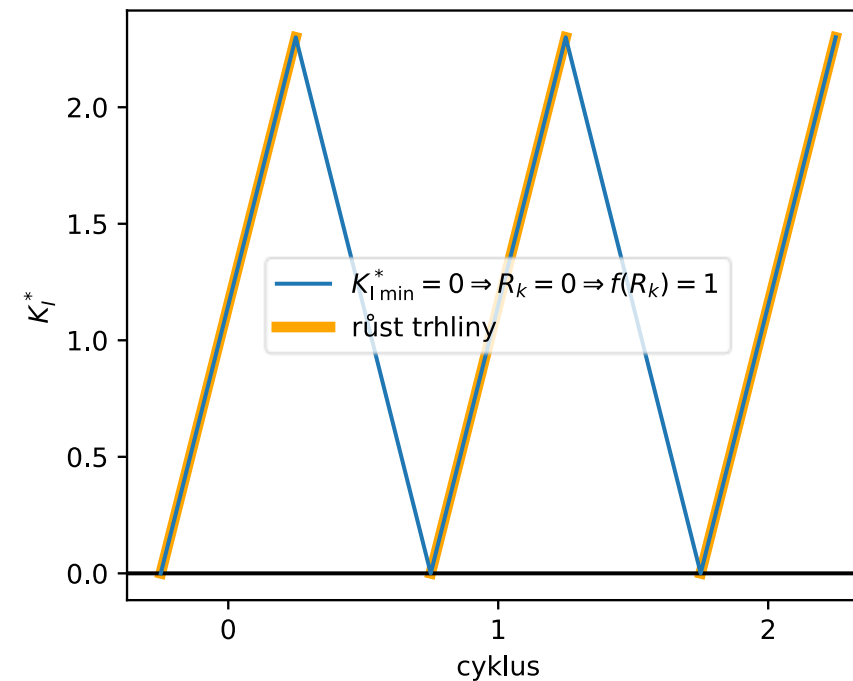
4) Dovolený počet cyklů

Je třeba simulovat růst trhliny pomocí Paris-Erdoganova vztahu (KD-430)

- $K_{I \text{ res}}$ – od zbytkového napětí
- Pro $R_k=0$ je $f(R_k)=1$
- Trhlina neroste pokud:
 - $K_{I \text{ max}}^* + K_{I \text{ res}} \leq 0$
 - nebo $\Delta K < \Delta K_{\text{th}}$ (threshold)
- Exponent m je bezrozměrný, C má pak ale mnohem komplikovanější jednotku: $[m/\text{cyklus} \cdot (\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}})^{-m}]$
 - pozor na rozdíl mezi m (exponent) a m (metr)

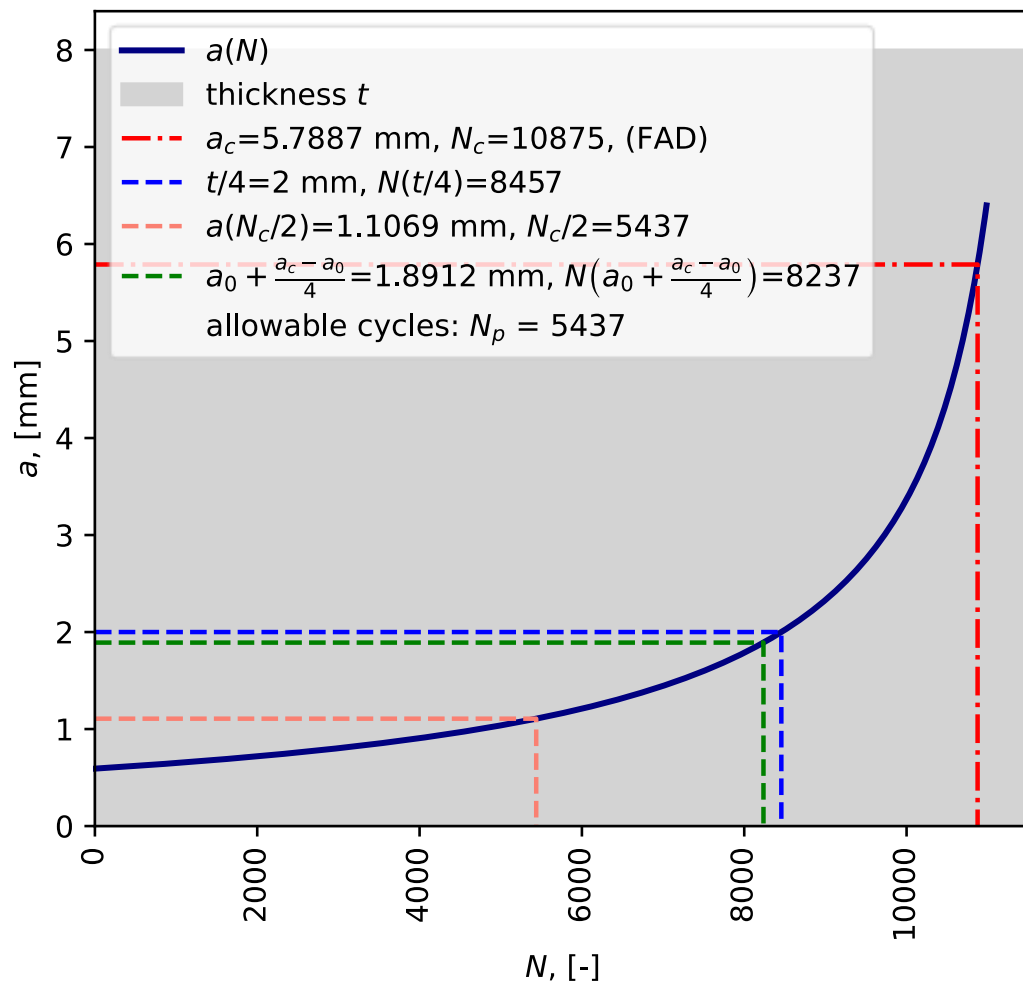
$$\frac{da}{dN} = C \cdot f(R_k) \cdot \Delta K^m$$

$$R_k = \frac{K_{I \text{ min}}^* + K_{I \text{ res}}}{K_{I \text{ max}}^* + K_{I \text{ res}}}$$

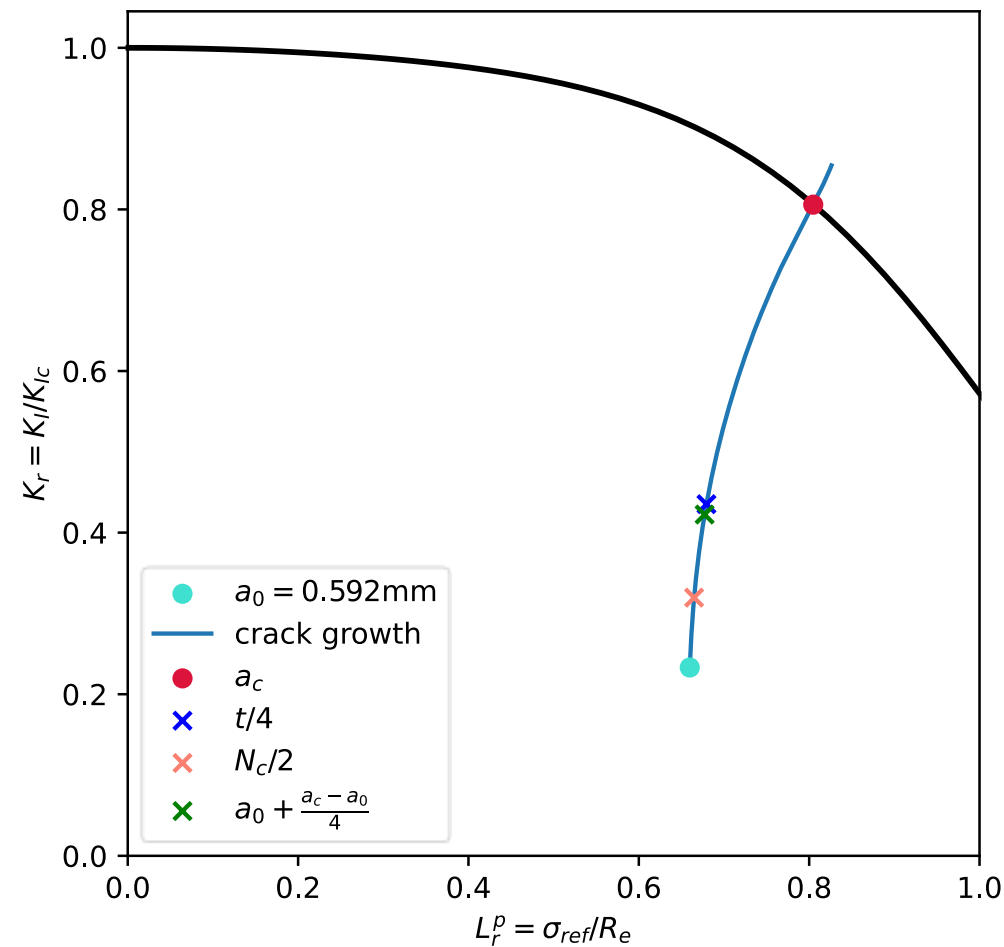


RŮST TRHLIN VE VODÍKOVÉM PROSTŘEDÍ

Crack assessment ASME BPVC.VIII.3 & FFS-1



FAD: ASME FFS-1



RŮST TRHLIN VE VODÍKOVÉM PROSTŘEDÍ

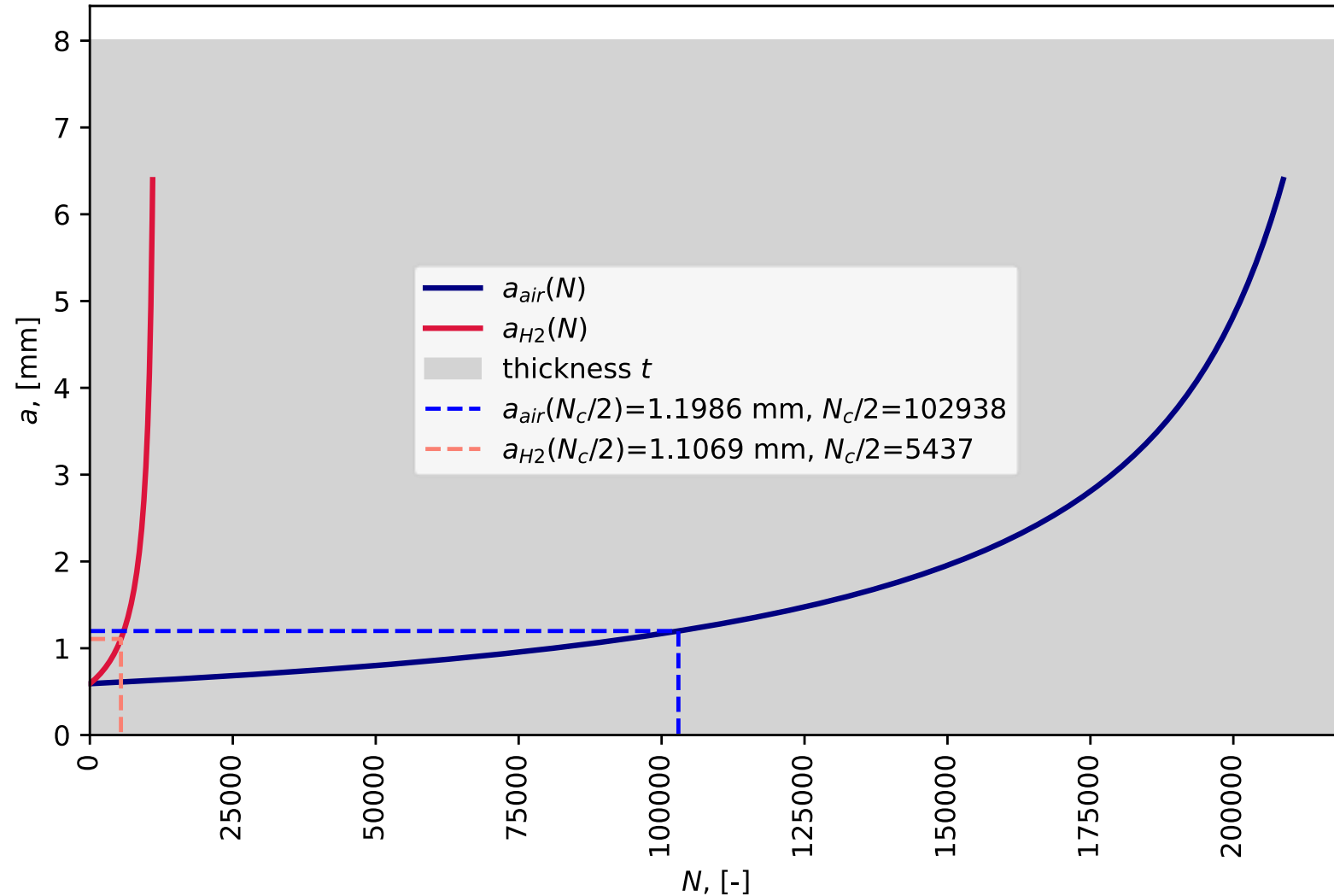
Crack assessment ASME BPVC.VIII.3 & FFS-1

Srovnání růstu trhliny
ve vzduchu a ve
vodíkovém prostředí

V řešeném příkladě
vyšly následující
dovolené počty cyklů:

- vzduch: 102938
- vodík: 5437

Růst trhliny je urychlen
H₂ prostředím asi 19x





Tomáš Létal

letal@fme.vutbr.cz

Anežka Michálková

Anezka.Michalkova@vutbr.cz

www.upi.fme.vutbr.cz

VÝSTUP BYL VYTVOŘEN V RÁMCI PROJEKTU „AKCELERACE ZELENÝCH DOVEDNOSTÍ A UDRŽITELNOSTI NA VUT V BRNĚ“ S REGISTRAČNÍM ČÍSLEM NPO_VUT_MSMT-2143/2024-5



TOTO DÍLO JE LICENCOVÁNO POD LICENCÍ CREATIVE COMMONS BY-NC-SA 4.0.
LICENČNÍ PODMÍNKY NAVŠTIVTE NA ADRESE
[HTTPS://CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-NC-SA/4.0/LEGALCODE.CS](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode.cs)

