



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**



# **ZÁKLADY DEGRADAČNÍCH PROCESŮ**

(název předmětu, studijní opory)

**učební text / scénáře / testy**

**Stanislav Lasek**

**Ostrava 2013**

Recenze: [Ing. Martin Kraus, Ph.D.](#)

Název: [Základy degradačních procesů](#)  
Autor: [doc. Ing. Stanislav LASEK, Ph.D.](#)  
Animace: Ing. Josef Hlinka  
Vydání: první, 2012  
Počet stran: [130](#)  
Náklad: [xx](#)

Studijní materiály pro studijní obor [Prograsivní technické materiály](#) Fakulty metalurgie a [materiálového inženýrství](#)

Jazyková korektura: nebyla provedena.

**Určeno pro projekt:**

Operační program Vzděláváním pro konkurenceschopnost

Název: ModIn - Modulární inovace bakalářských a navazujících magisterských programů na Fakultě metalurgie a materiálového inženýrství VŠB - TU Ostrava

Číslo: CZ.1.07/2.2.00/28.0304

Realizace: VŠB – Technická univerzita Ostrava

Projekt je spolufinancován z prostředků ESF a státního rozpočtu ČR

© [Stanislav Lasek](#)

© VŠB – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-3373-6

## Předmluva

Pro předmět Základy degradačních procesů v 5. semestru studijního oboru **Progresivní technické materiály** jste obdrželi studijní podklady, obsahující také modulární integrovanou studijní oporu (skriptum v elektronické formě).

### 1. Prerekvizity

Pro studium tohoto předmětu se předpokládá absolvování předmětu Nauka o materiálech a Základy pevnosti a pružnosti. V rámci předmětu jsou také využívány některé poznatky z předmětu Zkoušení materiálů a defektoskopie, z fyziky a chemie.

Poznatky z daného předmětu jsou dále rozšířeny a prohloubeny v rámci navazujícího předmětu Degradační procesy materiálů pro magisterské studium. Mnohé znalosti z předmětu Základy degradačních procesů lze využít v příbuzných předmětech nebo oborech (Úvod do expertizní činnosti, Návrh materiálu, Materiály pro náročné technické aplikace).

### 2. Cíle předmětu a výstupy z učení

Cílem předmětu je poznání základních degradačních procesů a mezních stavů materiálů. Charakterizace hlavních příčin a zákonitosti poškození materiálů, zejména při únavě, tečení, korozi a opotřebení. Seznámení se s kritickými nebo mezními parametry jednotlivých degradačních procesů a s jednoduchými výpočty odolnosti materiálů proti poškození.

Po prostudování předmětu by měl student získat tyto znalosti a dovednosti:

- Umět popsat základní degradační procesy materiálů a stanovit jejich příčiny.
- Poznat hlavní souvislosti mezi vlastnostmi materiálů, podmínkami namáhání a parametry degradačních procesů.
- Vyhodnotit odolnost vybraných konstrukčních materiálů proti porušení za zjednodušených předpokladů.
- Predikovat anebo přibližně vypočítat životnost vybraných konstrukčních částí.
- Aplikovat nabyté poznatky při rozborech poškození materiálů a dílců.

Se zaváděním a použitím progresivních materiálů se mohou objevit nové problémy s jejich poškozením v praxi. Poznatky z předmětu Základy degradačních procesů lze uplatnit jednak při rozborech poškození klasických i progresivních technických materiálů a jednak při jejich vývoji a hodnocení.

Předmět Základy degradačních procesů zahrnuje rozsáhlé oblasti problémů a pro jednotlivé procesy degradace existuje mnoho učebnic a monografií, z nichž některé jsou uvedeny v seznamu literatury. Dále je dostupná řada odborných časopisů, sborníků z konferencí s užším zaměřením a s novými poznatky. V poslední době také výrazně přibývá internetových informací i v oborech souvisejících s degradačními procesy materiálů. Opora by měla také napomoci se orientovat ve velkém množství poznatků a informací z oblasti degradačních procesů konstrukčních materiálů.

## **Pro koho je předmět určen**

Předmět je zařazen do bakalářského studia oboru Progresivní technické materiály, studijního programu Materiálové inženýrství (kód B3923), avšak může jej studovat i zájemce z jiného oboru, pokud splňuje předepsané prerekvizity.

Tato studijní opora je určena především pro studenty kombinované anebo distanční formy bakalářského studia, kteří mají v omezeném rozsahu bezprostřední výuku s vyučujícím. Opora je věnována úvodnímu studiu předmětu Základy degradačních procesů a má mít také motivační úlohu k dalšímu studiu.

## **Pokyny a instrukce ke studiu.**

Studijní opora je podle doporučení rozdělena na několik hlavních kapitol, každá obsahuje předepsané náležitosti: cíle studia, vlastní výklad, shrnutí poznatků anebo názvosloví. Časy věnované studiu jsou orientační a spíše průměrné, u jednotlivých studentů mohou být samozřejmě rozdílné podle poznatků z předchozího studia a znalostí z praxe. Na konci kapitol jsou pak shrnuty důležitější pojmy, které je nutno si osvojit a související otázky k tématu. Odpovědi na otázky se snažte napsat sami a pak je porovnat s odpověďmi ke konci opory. Některé odpovědi jsou napsány stručněji a mají nasměrovat studenta k pochopení dané problematiky, souvislosti apod.

Pro procvičení probrané látky a významných vztahů jsou dále uvedeny úlohy a příklady, jednak vyřešené a jednak k samostatnému řešení s výsledky pro vlastní kontrolu na konci opory. V závěru kapitol jsou uvedeny také testy pro další ověření získaných znalostí.

S ohledem na předepsaný rozsah studijní opory (120-140 normostran) jsou základní poznatky a souvislosti popsány v některých odstavcích poněkud zjednodušeně a stručněji z velmi rozsáhlé a rozmanité technické oblasti jako jsou degradační procesy materiálů. Některé stručněji napsané odstavce nebo podkapitoly mohou být tedy na úkor lepší srozumitelnosti. Nedílnou součástí této studijní opory jsou animace vybraných degradačních procesů s vlastním popisem, které přispívají k osvojení studované látky a rozšíření představ o poškození materiálu. Na konci jednotlivých kapitol je uvedena literatura, která byla použita pro přípravu učebního textu a obrázků a kterou lze čerpat k dalšímu studiu.

## **Způsob komunikace s vyučujícím**

Postupy řešení zadaných protokolů a jejich výsledky studenti mohou konzultovat s vyučujícím přímo v jeho pracovně, po výuce anebo prostřednictvím e-mailu, případně telefonicky. Protokoly s vypracovanými úlohami a příklady mohou posílat vyučujícímu e-mailem nebo doručit osobně, nejpozději týden před termínem zkoušky.

V případě nejasnosti, dotazů anebo připomínek kontaktujte, prosím, autora opory na e-mailové adrese (stanislav.lasek@vsb.cz) nebo telefonicky na č. 596 995 205.

## Při studiu každé kapitoly doporučujeme následující postup:



### Čas ke studiu: xy hodin

Na úvod kapitoly je uveden čas potřebný k prostudování látky. Čas je orientační a může vám sloužit jako hrubé vodítko pro rozvržení studia celého předmětu či kapitoly. Někomu se čas může zdát příliš dlouhý, někomu naopak. Jsou studenti, kteří se s touto problematikou ještě nikdy nesetkali a naopak takoví, kteří již v tomto oboru mají určité zkušenosti. Čas ke studiu nezahrnuje dobu potřebnou na řešení úloh, odpovědi na otázky a na test.



### Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat .....
- popsat ...
- vyřešit ....

Cílem je seznámení se základními pojmy, vztahy a závislostmi v dané kapitole (modulu). Po prostudování modulu by měl student být schopen orientovat se v základních poznatcích používaných při charakterizaci degradačních procesů materiálů. Dále jsou uvedeny dílčí cíle, kterých máte dosáhnout po prostudování této kapitoly – konkrétní dovednosti, znalosti.



### Výklad

Následuje vlastní výklad studované látky, zavedení nových pojmů, jejich vysvětlení, vše doprovázeno obrázky, tabulkami, řešenými příklady.



### Shrnutí pojmů kapitoly

Na závěr kapitoly jsou zopakovány hlavní pojmy, které si v ní máte osvojit. Pokud některému z nich ještě nerozumíte, vraťte se k nim ještě jednou. Významné pojmy jsou také zvýrazněny v textu.



### Otázky k probranému učivu

Pro ověření, že jste dobře a úplně látku kapitoly zvládli, máte k dispozici řadu teoretických otázek a také testy na konci jednotlivých kapitol.



## Úlohy k řešení

Pro lepší osvojení probrané látky jsou na konci kapitol zařazeny jednodušší úlohy anebo příklady pro samostatné řešení, které je nutné provádět pro zdárné zvládnutí studia dané kapitoly.



## Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

Tato studijní opora byla předepsána v rozsahu 120-140 normostran, takže obsahuje jen základní, důležité a prověřené poznatky. Pro podrobnější a další studium je možno využít některou z učebnic anebo monografií uvedených ke konci kapitoly. Další anebo novější poznatky a informace je možno samozřejmě čerpat z odborných časopisů a internetových zdrojů.



## Klíč k řešení

Odpovědi na otázky a výsledky zadaných úloh i testů jsou uvedeny za poslední kapitolou v Klíči k řešení. Používejte je až po vlastním řešení úloh, jen tak si sebekontrolou ověříte, zda jste obsah kapitoly skutečně zvládli.

Všem studentům přeji úspěšné absolvování tohoto předmětu

doc. Ing. Stanislav Lasek, Ph.D.

## Obsah:

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. ÚVOD K DEGRADAČNÍM PROCESŮM MATERIÁLŮ .....</b>                  | <b>9</b>  |
| 1.1. Výrobní a provozní degradace .....                                | 9         |
| 1.2. Mezní stavy materiálů .....                                       | 11        |
| Otázky ke kapitole 1 .....                                             | 12        |
| Literatura .....                                                       | 12        |
| <b>2. LOMOVÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ .....</b>                            | <b>13</b> |
| 2.1. Hlavní napěťově deformační charakteristiky .....                  | 14        |
| 2.2. Koncentrace napětí .....                                          | 15        |
| 2.3. Lomové chování materiálů .....                                    | 18        |
| 2.4. Faktor intenzity napětí a lomová houževnatost .....               | 20        |
| 2.5. Plastické zóny .....                                              | 22        |
| 2.6. Iniciace a růst mikrotrhlin .....                                 | 23        |
| 2.7. Energetické koncepce a přístupy .....                             | 25        |
| 2.9. Koncepce otevření čela trhliny .....                              | 27        |
| 2.10. Tranzitní lomové chování materiálů .....                         | 28        |
| Otázky ke kapitole 2 .....                                             | 32        |
| Úlohy ke kapitole 2 .....                                              | 33        |
| Test ke kapitole 2 .....                                               | 35        |
| Literatura .....                                                       | 36        |
| <b>3. ÚNAVA MATERIÁLU .....</b>                                        | <b>37</b> |
| 3.1. Úvod .....                                                        | 37        |
| 3.2. Změny mechanických vlastností .....                               | 38        |
| 3.3. Iniciace únavových trhlin .....                                   | 39        |
| 3.4. Šíření únavové trhliny .....                                      | 41        |
| 3.5. Nízkocyklová únava .....                                          | 43        |
| 3.6. Vlivy vrubů, povrchu, frekvence a středního napětí na únavu ..... | 44        |
| 3.7. Vliv korozního prostředí .....                                    | 46        |
| 3.8. Fraktografie únavových lomů .....                                 | 48        |
| Otázky ke kapitole 3 .....                                             | 52        |
| Úlohy ke kapitole 3 .....                                              | 52        |
| Test kapitole 3 .....                                                  | 55        |
| Literatura .....                                                       | 56        |

## **4. TEČENÍ MATERIÁLŮ ..... 57**

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1. Základní pojmy a závislosti .....                              | 57 |
| 4.2. Relaxace napětí .....                                          | 62 |
| 4.3. Extrapoláční metody .....                                      | 64 |
| 4.4. Žáropevnost .....                                              | 65 |
| 4.5. Základní mechanismy tečení .....                               | 66 |
| 4.6. Mapy mechanismů tečení .....                                   | 68 |
| 4.7. Porušení kovů a slitin za vyšší teploty. Lomy při tečení ..... | 70 |

|                            |    |
|----------------------------|----|
| Otázky ke kapitole 4 ..... | 73 |
| Úlohy ke kapitole 4 .....  | 73 |
| Test ke kapitole 4 .....   | 76 |
| Literatura .....           | 76 |

## **5. ZÁKLADY KOROZE KOVŮ ..... 77**

|                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1. Úvod .....                                             | 77  |
| 5.2. Elektrochemická koroze - základní pojmy a vztahy ..... | 78  |
| 5.3. Přepětí .....                                          | 81  |
| 5.4. Výměnný proud .....                                    | 83  |
| 5.5. Korozní reakce a diagramy .....                        | 83  |
| 5.6. Polarizace .....                                       | 87  |
| 5.7. Depolarizační reakce .....                             | 88  |
| 5.8. Pasivita .....                                         | 89  |
| 5.9. Druhy korozního napadení .....                         | 91  |
| 5.10. Koroze a galvanické články .....                      | 93  |
| 5.11. Atmosférická koroze .....                             | 95  |
| 5.12. Koroze ve vodách .....                                | 96  |
| 5.13. Koroze kovů v půdách .....                            | 97  |
| 5.14. Chemická koroze .....                                 | 98  |
| 5.15. Základní způsoby ochrany proti korozi .....           | 101 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| Otázky ke kapitole 5 ..... | 103 |
| Úlohy ke kapitole 5 .....  | 104 |
| Test ke kapitole 5 .....   | 108 |
| Literatura .....           | 110 |

|                                               |            |
|-----------------------------------------------|------------|
| <b>6. OPOTŘEBENÍ MATERIÁLŮ .....</b>          | <b>112</b> |
| 6.1. Povrch a jeho vlastnosti .....           | 112        |
| 6.2. Druhy opotřebení a jejich podstata ..... | 115        |
| 6.3. Adhezivní opotřebení .....               | 116        |
| 6.4. Abrazivní opotřebení .....               | 117        |
| 6.5. Erozivní opotřebení .....                | 119        |
| 6.6. Kavitační opotřebení .....               | 120        |
| 6.7. Vibrační opotřebení (fretting) .....     | 122        |
| 6.8. Únavové opotřebení .....                 | 123        |
| Otázky ke kapitole 6 .....                    | 125        |
| Úlohy ke kapitole 6 .....                     | 125        |
| Test ke kapitole 6 .....                      | 127        |
| Literatura .....                              | 127        |

|                                             |            |
|---------------------------------------------|------------|
| <b>7. POŠKOZENÍ MATERIÁLŮ ZÁŘENÍM .....</b> | <b>129</b> |
| 7.1. Vlivy záření na materiál .....         | 129        |
| 7.2. Formy poškození kovu .....             | 131        |
| 7.3. Důsledky ozáření .....                 | 132        |
| 7.4. Fotodegradace plastů .....             | 134        |
| Otázky ke kapitole 7 .....                  | 137        |
| Úlohy ke kapitole 7 .....                   | 137        |
| Test ke kapitole 7 .....                    | 138        |
| Literatura .....                            | 139        |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| <b>KLÍČ K ŘEŠENÍ .....</b> | <b>140</b> |
|----------------------------|------------|

*Odpovědi na otázky*

*Výsledky úloh a příkladů*

*Výsledky testů*

## 1. ÚVOD K DEGRADAČNÍM PROCESŮM MATERIÁLŮ



**Čas ke studiu:** 1 hodina

Mnohé součásti a zařízení jsou během provozu vystaveny různým zatížením, teplotám a prostředím, které vedou k nežádoucím změnám jejich vlastností a použitelnosti, tzn. k jejich **degradaci**. Při požadavku na zvyšování účinnosti energetických strojů a zařízení, snižování hmotnosti dopravních prostředků a spotřebního zboží dochází ke stále vyššímu namáhání materiálu s možností jeho poškození anebo porušení.



**Cíl** Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- Vymezit pojem degradace materiálu
- Uvést příklady výrobní a provozní degradace materiálu
- Rozlišit hlavní mezní stavy materiálu



**Výklad**

Proč studovat degrační procesy materiálů?

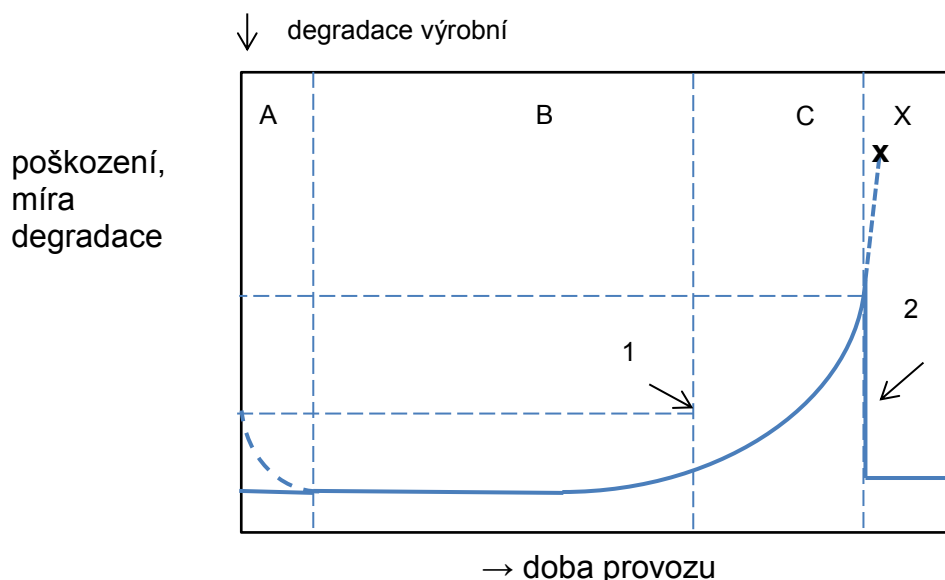
Se znalostí typů a porozumění mechanismů a příčin degračních procesů je možno činit opatření pro zabránění jejich výskytu. Můžeme vybrat vhodný odolný materiál nebo změnit konstrukční řešení anebo chránit materiál povlakem před poškozením.

**Degradace materiálu** zahrnuje procesy postupného, trvalého a nevratného znehodnocení či zhoršení požadované úrovně vlastností materiálu, které mohou snížit životnost a spolehlivost součástí, konstrukcí nebo zařízení. V mezním případě může degradace materiálu způsobit úplné selhání jejich funkce anebo havárii.

### 1.1. Výrobní a provozní degradace

Již v procesu výroby může docházet ke zhoršení některých vlastností materiálu, vzniku defektů, vad apod., vzhledem k technicky požadovanému, dosažitelnému anebo předepsanému stavu. V daném případě se používá pojem **výrobní degradace**. Problémy technologie, snahy po úsporách nebo nedodržení parametrů výroby se v případě ocelí mohou projevit snížením čistoty, výskytem segregací škodlivých prvků (P, S, Sn, ...) a vznikem nežádoucích fází. Dalším příkladem této degradace je vznik méně kvalitních svarových spojů z důvodu nevhodně zvolených parametrů a podmínek při svařování, zejména zhrubnutí a zkřehnutí struktury v tepelně ovlivněné oblasti. Podobně montážní nedostatky přispívají k výrobní degradaci.

Spolupůsobení podmínek (napětí, teplota, prostředí) během provozu vede k **degradaci provozní**. Mezi často se vyskytující degrační procesy patří zkrhnutí materiálu, únavové poškození, nežádoucí tečení, nadměrné opotřebení anebo napadení koroze. V řadě případů dochází ke kombinovanému (synergickému) působení degračních mechanismů. Např. lopatky plynových turbín jsou poškozovány tečením, koroze i únavou materiálu. Časový vývoj míry degradace je možno obecně znázornit křivkou degradace (obr. 1.1).



Obr. 1.1. Změna technického stavu zařízení (součásti) v závislosti na době provozu: A – projevy degradace výrobní, zjištěné často kontrolou nebo v „záběhu“, B – normální činnost, C – vývoj poškození, poruchy, X – havárie (lom), 1 – první záznam poškození, poruchy, 2 – oprava

Je zřejmé, že výrobní vady podmiňují, zpravidla urychlují další provozní degradaci. Z druhé strany, bezvadný výchozí materiál by obecně zpomalil degradaci, avšak neúměrně by zvyšoval cenu výrobku. Předkládaná studijní opora je zaměřena na základní procesy provozní degradace (dále zkráceně degradace).

Pojem degradace materiálu úzce souvisí s pojmy **stárnutí, destrukce, poškození, mezní stav, porušení materiálu**. Úvodní poznatky o degračních procesech jsou probírány v rámci předmětu nauka o materiálu anebo nauka o kovech.

V oblasti odolnosti plastů a pryží mají pojmy degradace, stárnutí, koroze své specifické obsahy:

**Stárnutí** – souhrn nevratných, zpravidla dlouhodobých, změn materiálu při daných podmínkách, hlavně vlivem teploty, světla, kyslíku. Stárnutí může mít záporný i kladný vliv na materiál (zpevnění).

**Degradace** (odbourávání) – souhrn rozkladných reakcí polymerů. Zahrnuje depolymerizaci, chemodegradaci (rozklad, destrukci plastu, odštěpení z makromolekul vlivem chemických látek a prostředí), fotodegradaci (porušení vazeb fotony), termodegradaci (rozklad vlivem

nadměrné teploty), biodegradaci (působením mikroorganismů, rostlin a živočichů) apod. Nezahrnuje bobtnání, korozní praskání za napětí, změny krystalinity.

Procesy degradace mají obecně záporný vliv na vlastnosti materiálu, ve srovnání s požadovanými anebo normovanými vlastnostmi daného materiálu.

**Koroze** – znehodnocování materiálu chemickým anebo fyzikálně chemickým působením okolního prostředí, které vede k nežádoucím změnám užitných vlastností. Zahrnuje korozi podmíněnou biologickými vlivy, bobtnání (zvětšení objemu při pronikání některých molekul z prostředí do polymeru) a korozní praskání.

## 1.2. Mezní stavy materiálů

**Mezní stav** je obecně takový stav, který je z hlediska funkce soustavy pro předepsanou povahu a délku služby nepřipustný. Mezní stavy součástí nebo konstrukcí se mohou vymezovat podle různých požadavků (technické, ekonomické, funkční, bezpečnostní).

Podle časového hlediska lze rozlišit:

a) **mezní stavy okamžité** - vznik mezního stavu závisí pouze na okamžitých hodnotách určujících parametrů soustavy, zatěžování a provozních podmínek, které se mohou měnit s časem, a jsou navzájem nezávislé. Typickým příkladem jsou náhlé křehké lomy.

b) **mezní stavy kumulativní** – jejich vznik závisí na průběhu zatěžování a podmínkách od počátku provozu až do poškození nebo zničení součástí. Vhodnými příklady jsou únava, tečení, koroze, opotřebení materiálu.

Mezní stav můžeme posuzovat jako vyústění procesu degradace, probíhajícího během určitého časového období. Mezní stavy jsou vratné nebo nevratné, skutečné nebo modelové, výpočtové.

Mezní stavy související s materiálem:

1. **Mezní stavy pružnosti** (po překročení meze pružnosti či meze kluzu vznikají nežádoucí trvalé plastické deformace, dochází ke změně rozměrů a tolerancí, narušení funkce součástí).
2. **Mezní stavy pevnosti** – při překročení meze pevnosti se poruší soudržnost materiálu. Porušení může mít rozsah mikroskopický nebo makroskopický, lokální anebo celkový. Poškození může nastat jako lom křehký, tvárný, únavový, korozní apod.
3. **Mezní stav únosnosti** – vztahuje se k celé konstrukci, kdy tvarově určitá soustava se mění na neurčitou následkem uvolnění vazeb a nečekaných podmínek (které mohou způsobit i zhroucení konstrukce).
4. **Mezní stav přetvoření** - nepřipustné přetvoření součástí, elastické nebo plastické (včetně otláčení).
5. **Mezní stav stability** – narušení stability tvaru dílce, např. při vzpěru tyče, zmáčknutí tenké trubky.

Návrhy strojů, vozidel i konstrukcí, které jsou ekonomické a bezpečné vyžadují jednak efektivní využití materiálu a jednak záruku, že nedojde k havárii konstrukce z důvodu

degradace materiálu. Poškození konstrukce nebo havárie zařízení bývají způsobené selháním materiálu, když je dosažen **mezní stav materiálu**. V mnoha případech pojmy degrační procesy materiálu a mezní stavy materiálu se nerozlišují, mají podobný obsah. Pojem mezní stavy je u nás v republice pravděpodobně staršího data.



### Shrnutí pojmů kapitoly

Po prostudování této kapitoly máte porozumět těmto odborným názvům a termínům: **Degradace, degradace materiálů, výrobní degradace, provozní degradace, stárnutí, degradace plastů, koroze**. Dále pochopit související pojmy: **mezní stav, mezní stavy okamžité a kumulativní, mezní stavy pružnosti, pevnosti, únosnosti, přetvoření a stability**. Uvedené pojmy jsou také zvýrazněny v textu.



### Otázky ke kapitole 1

K této úvodní stručné kapitole je jen několik otázek. Stručné odpovědi na otázky jsou na konci opory. Úlohy a testy jsou u dalších hlavních kapitol.

- 1.1. Objasněte pojem výrobní degradace materiálů.
- 1.2. Čím jsou charakterizovány provozní degradace konstrukčních materiálů?
- 1.3. Co rozumíme pod pojmem mezní stav materiálu?
- 1.4. Uveďte příklady mezních stavů materiálů.
- 1.5. Jaké jsou rozdíly mezi degrační a stárnutím polymerních materiálů?



### Literatura

- [1.1] KOUTSKÝ, J., Degradací procesy a predikce životnosti. ZU Plzeň, 1995, 167 s.
- [1.2] VLACH, B.: Mezní stavy materiálu, <http://www.zam.fme.vutbr.cz/~vlach/>
- [1.3] ASKELAND, D. R., The science and engineering of materials, PWS Publishing Company. Boston 1994.
- [1.4] PTÁČEK, L. a kol., Nauka o materiálu II, Akademické nakl. CERM, Brno, 2002, 392 s.
- [1.5] VOJTĚCH, D., Materiály a jejich mezní stavy. VŠChT Praha, 2010, 200 s.
- [1.6] PUŠKÁR, A., Mezní stavy materiálů a součástí. Veda, Bratislava 1989, 304 s.
- [1.7] KOUTSKÝ, J., JANDOŠ, F., VOJTĚCH, K. Lomy ocelových částí. SNTL, Praha 1976.
- [1.8] DOLEŽEL, B. Odolnost plastů a pryží. SNTL Praha 1981, 710 s.

## 2. LOMOVÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ



**Čas ke studiu:** 3 hodiny

Navrhování součástí nebo konstrukcí je obvykle spojeno s minimalizací možného porušení, snižování spotřeby materiálu a nákladů. Proto je důležité pochopit rozdílné procesy porušení – např. lomy z přetížení, únavu a tečení. Přitom je nutné respektovat pravidla, které mají být používána pro zabránění porušení v provozu.



**Cíl** Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- Popsat mechanismy šíření trhliny pro křehký a tvárný způsob porušení.
- Vysvětlit proč pevnost křehkého materiálu je mnohem nižší než teoretická.
- Definovat lomovou houževnatost slovy a pomocí vztahu; včetně souvisejících parametrů
- Rozlišit lomové chování materiálu za stavu rovinné deformace a rovinné napjatosti.
- Jmenovat a popsat hlavní rázové lomové zkoušky



**Výklad**

Velký rozmach výroby a použití ocelových konstrukcí byl v minulosti doprovázen jejich porušením a haváriemi (mostů, rozměrných zásobníků, lodí, kotlů, částí železničních vozidel, kolejnic apod.) Hlavní příčinou uvedených havárií byl výskyt defektů v materiálech, v některých případech také špatné konstrukční návrhy nebo nepředvídané provozní podmínky.

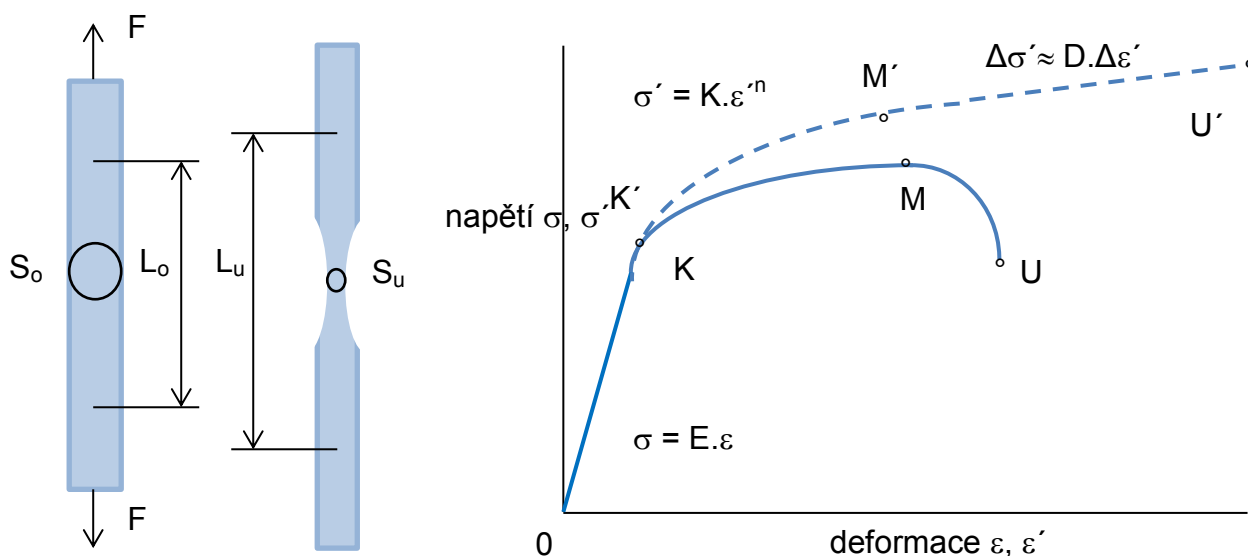
K dalším problémům (katastrofám v minulém století)) docházelo v důsledku náhlých křehkých lomů ve svařovaných konstrukcích. Hlavními iniciátory nebezpečných lomů byly materiálové defekty a konstrukční vruby, ve kterých dochází ke koncentraci napětí a ke vzniku trojosého stavu napjatosti. Lomy měly křehký charakter a k jejich vzniku přispěly změny složení a struktury materiálu v oblasti svarových spojů. Pro snížení či odstranění rizika křehkého lomu byly zdokonaleny technologie svařování a používány defektoskopické kontroly. Významné bylo též omezení výskytu míst s vysokou koncentrací napětí.

Vývoj ocelí s vyšší pevností umožňoval realizovat konstrukce s nižší hmotností, s menšími příčnými rozměry. Nevýhodou těchto ocelí je relativně nižší houževnatost, tj. menší odpor proti nestabilnímu šíření trhlin a tedy náchylnost ke křehkému lomu.

Následující kap. 2.1 je vhodná pro zopakování základních pojmů z oblasti pružnosti a pevnosti, potřebných pro studium dalších kapitol z oblasti porušení materiálů a lomové mechaniky.

## 2.1. Hlavní napětově deformační charakteristiky

Při popisu napětově deformačního a možného lomového chování materiálů se zpravidla vychází z tahových zkoušek a diagramů, obr. 2.1. Tahová zkouška spočívá v pomalém zatěžování zkušební tyče (vzorku, dílce, výrobku), zpravidla až do lomu, za účelem stanovení základních mechanických vlastností materiálu.



Obr. 2.1. Porovnání smluvních a skutečných tahových diagramů kovových materiálů. Rozdíly do meze kluzu jsou zanedbatelné. Smluvní (konvenční) diagram  $\sigma = f(\epsilon)$ . Skutečný (reálný) diagram  $\sigma' = g(\epsilon')$

Základní mechanické vlastnosti jsou stanoveny na základě smluvního **diagramu napětí  $\sigma$  - deformace  $\epsilon$**  a s využitím naměřených hodnot předepsaných rozměrů vzorku:

$$\text{Mez kluzu} \quad R_p = \frac{F_p}{S_0} [\text{MPa}], \quad (2.1a)$$

kde  $S_0$  je počáteční nosný průřez,  $F_p$  – síla na mezi kluzu (bod K)

$$\text{Mez pevnosti} \quad R_m = \frac{F_m}{S_0} [\text{MPa}], \quad (2.1b)$$

kde  $F_m$  je síla na smluvní mezi pevnosti (bod M)

$$\text{Tažnost} \quad A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 [\%], \quad (2.1c)$$

kde  $L_0$  je počáteční měřená délka tyče,  $L_u$  - po ulomení

$$\text{Kontrakce} \quad Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 [\%], \quad (2.1d)$$

kde počáteční průřez  $S_0 \perp F$ , plocha průřezu  $S_u$  – v místě lomu.

Smluvní mez pevnosti ( $R_m$ ) je užitečná pro klasifikaci a porovnání materiálů, pro konstrukční výpočty nosnosti anebo dimenzování (navrhování rozměrů) některých součástí a výrobků.

Pro přesnější popis lomového chování materiálu je nutno uvažovat **skutečná napětí**  $\sigma' = \frac{F}{S}$ , kde  $S$  je skutečný průřez kolmý na působící sílu  $F$  a **skutečné deformace**  $\epsilon' = \ln \frac{L}{L_0}$ , kde  $L$  je délka tyče při zatížení silou  $F$  a  $L_0$  je počáteční délka tyče (při  $F = 0$ ). Mezi smluvními a skutečnými parametry lze odvodit vztahy:  $\sigma' = \sigma(1+\epsilon)$  a  $\epsilon' = \ln(1+\epsilon)$ . Smluvní diagram lze pak transformovat na skutečný nebo naopak. **Skutečná pevnost** neboli **lomové napětí** je dáno vztahem

$$\sigma'_u = \frac{F_u}{S_u}, \quad (2.2)$$

kde  $F_u$  je síla v okamžiku před lomem.

Skutečná deformace v místě lomu (ve středu krčku), tj. **lomová deformace**

$$\epsilon'_u = \ln \frac{1}{1-\epsilon} \quad (2.3)$$

Do meze kluzu (přesněji úměrnosti) platí Hookův zákon  $\sigma = E \cdot \epsilon$ , resp.  $\sigma' = E \cdot \epsilon'$ , kde  $E$  je modul pružnosti v tahu. S rostoucí deformací se zvyšuje napětí nutné pro pokračování další deformace – dochází ke zpevňování. Z hlediska probíhajících fyzikálních procesů, jejichž projevem je zpevňování, je výhodné sledovat závislost skutečného napětí na skutečné deformaci.

Empirický Ramberg-Osgoodův vztah

$$\sigma' = K \cdot \epsilon'^n \quad (2.4)$$

platí v oblasti rovnoměrné plastické deformace (mezi body  $K'$  a  $M'$ ), kde materiálová konstanta  $K$  se nazývá též pevnostní parametr (součinitel) a  $n$  je exponent deformačního zpevňování, který charakterizuje intenzitu zpevňování plastickou deformací. Obecně  $n = 0 - 1$ , u kovů a slitin zpravidla:  $n = 0,1 - 0,5$ .

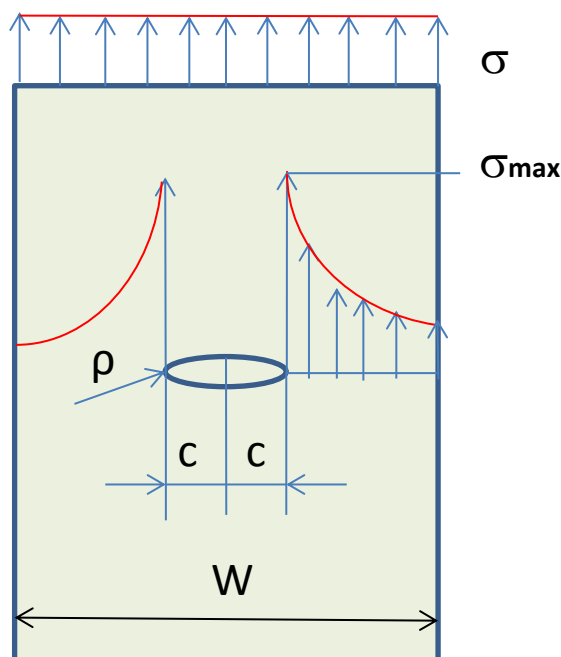
Pro nerovnoměrnou deformaci po vzniku krčku ( $K'-U'$ ) je možno použít přibližný aproximativní vztah mezi přírůstkem napětí a deformace  $\Delta\sigma' \approx D \cdot \Delta\epsilon'$ , kde  $D$  je modul zpevňování.

Skutečné napětí je zde průměrné tahové jednoosé napětí ve středu krčku (v okamžiku před lomem), v mikroskopických objemech materiálu lokální maxima napětí jsou mnohem vyšší, hlavně z důvodu koncentrace napětí na částicích, kolem mikroutin, mikrotrhlin apod.

Pro srovnání, při smluvní pevnosti oceli  $R_m = 500$  MPa, může být skutečná pevnost (lomové napětí)  $\sigma'_u = 1000$  MPa, přitom teoretická pevnost železa  $\sigma'_t \approx 15000$  MPa.

## 2.2. Koncentrace napětí

Při zatěžování součástí dochází k obtékání a koncentraci (zahuštění) silového toku kolem vrubů a otvorů, kde vznikají maximální napětí, která mohou způsobit porušení materiálu. Pro vyjádření nejvyššího napětí u vrubu byl zaveden součinitel koncentrace napětí ( $\alpha$ ), definovaný jako podíl maximálního napětí ( $\sigma_{\max}$ ) ke střednímu nebo nominálnímu napětí  $\sigma$ , viz. obr. 2.2.



Součinitel koncentrace napětí

$$\alpha = \frac{\sigma_{max}}{\sigma} \quad (2.5)$$

Pro tahové napětí a eliptický otvor v desce

$$\alpha = 1 + 2 \sqrt{\frac{c}{\rho}} \quad (2.6)$$

Pro kruhový otvor v desce:  $c = \rho$

$$\alpha = 1 + 2 \sqrt{\frac{c}{\rho}} = 3$$

Obr. 2.2. Schéma desky s eliptickým otvorem, hlavní delší osa otvoru je orientována kolmo na tahové napětí.

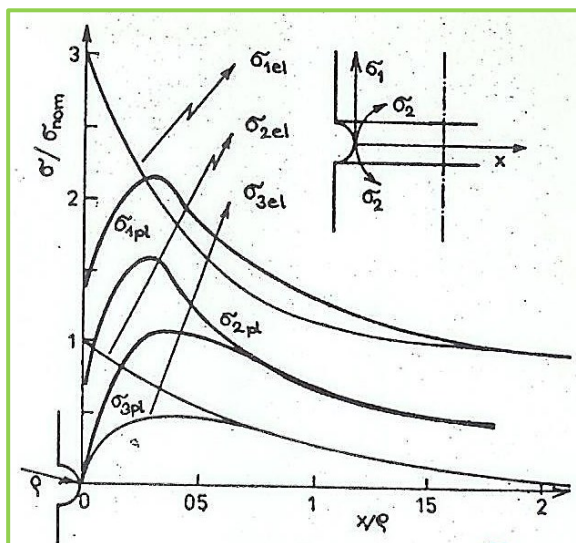
Poznámka: Řešení elastické napjatosti v okolí kruhového otvoru podal B. Kirsch v roce 1898 a tím položil základy k výpočtům koncentrace napětí v okolí vrubů a trhlin. Systematicky se koncentracemi napětí různých vrubů zabýval Neuber (1930-40), zakladatel učení o koncentracích napětí u vrubů. Nominální napětí se vztahuje ke skutečnému průřezu součásti v rovině defektu.

Součinitel koncentrace napětí  $\alpha$  platí jak pro elastické, tak pro elasticko-plastické pole napětí. V případě lineární elastického chování materiálu se pro rozlišení označuje jako teoretický součinitel koncentrace napětí  $\alpha_t$ , v případě elasto-plastického chování materiálu se značí  $\alpha_\sigma$ .

Podobně pro maximální deformace  $\varepsilon_{max}$  byl zaveden součinitel koncentrace deformace ve tvaru  $\alpha_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon}$ , kde  $\varepsilon$  je střední, nominální deformace. Mezi uvedenými součiniteli platí Neuberův vztah  $\alpha_t^2 = \alpha_\sigma \cdot \alpha_\varepsilon$ .

Podle daného vzahu zvýšení plastické deformace vede ke snížení špiček napětí. Příklady rozložení napětí u konstrukčního vrubu jsou uvedeny na obr. 2.3 a obr. 2.4.

V oblasti vrubů (drážek, přechodů, zaoblení) dochází ke vzniku trojosé napjatosti. Pro podrobnější popis koncentrace napětí jsou zavedeny parciální součinitelé koncentrace napětí ( $\alpha_{ijk}$ ). Uvedený symbol znamená, že v bodě anebo místě (i) je hodnota napětí ve směru (j) způsobena hodnotou vnějšího napětí ve směru (k):  $\alpha_{ijk} = \sigma_{ij}/\sigma_{ik}$  ( $j, k = 1, 2, 3$ ).



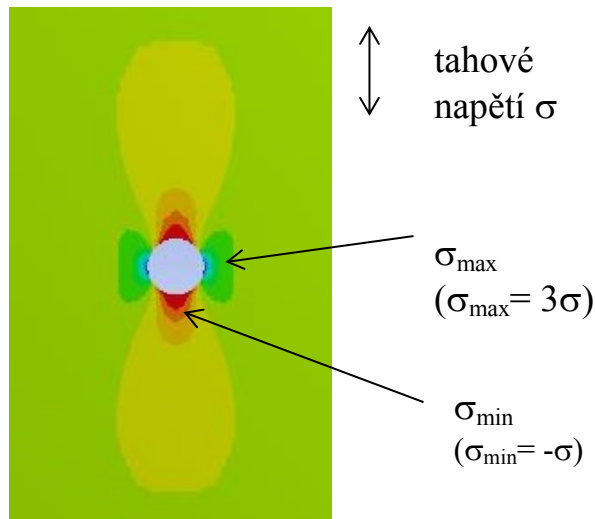
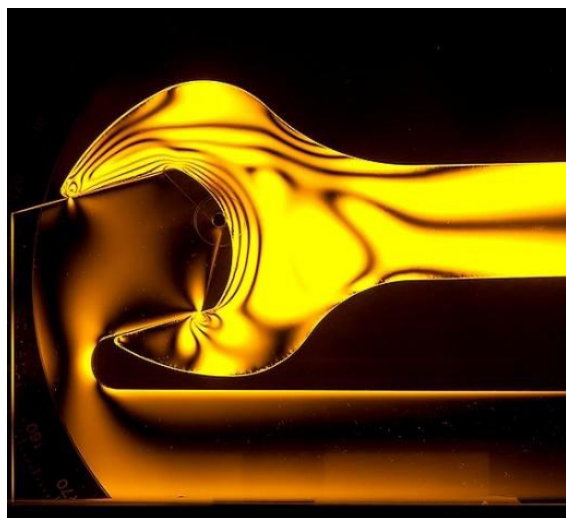
složky tenzoru napětí:

$\sigma_1$  – osové (axiální) napětí,  
 $\sigma_2$  – tečné (tangenciální) napětí  
 $\sigma_3$  – radiální napětí,  $\sigma_3 \parallel x$   
 $\sigma_{nom}$  – nominální (střední) napětí,

$\sigma_{iel}$  – elastický stav napjatosti,  
 $\sigma_{jpl}$  – elasto-plastický stav napjatosti  
 $i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$   
 $\rho$  – poloměr zaoblení vrubu

$$\sigma_{iel} = \sigma_{nom} \left[ 1 + 2 \cdot \left( \frac{\rho}{\rho + x} \right)^3 \right] \quad (2.7)$$

Obr. 2.3. Průběhy trojosých napětí před polokruhovým obvodovým vrubem na válcovité hřídeli. Rozdíly mezi lineárně elastickým a elasto-plastickým řešením.



Obr. 2.4 Zobrazení polí a koncentrací napětí pomocí fotoelasticimetrie (s polarizovaným světlem) a výpočetní metody (MKP) u kruhového otvoru.

Místa a důvody pro výskyt koncentrace napětí (shrnutí)

- *Náhla změna tvaru* tělesa vede ke změně od jednoosého anebo jednoduchého namáhání k víceosé a složité napjatosti
- *Konstrukční vruby* (záměrně vytvořené, mají v konstrukci určitou funkci) způsobují koncentrace napětí a víceosé stavy napjatosti
- *kontaktní lokální místa*.
- *Vady materiálu* - působí obdobným vrubovým účinkem
- Vměstky, precipitáty
- Póry, bubliny

- trhliny (mohou vzniknout např. při výrobě nebo při cyklickém namáhání, únavě)
- *Vlivy povrchu* (prohlubně po obrábění, drsný povrch, nerovnosti a důlky po korozi)

Pro ostré defekty anebo trhliny platí  $\rho \ll c$  a koncentrace napětí  $\alpha$  i maximální napětí  $\sigma_{\max}$  dosahují v čele defektu vysoké hodnoty. Pokud  $\sigma_{\max}$  přesáhne teoretickou pevnost, nastane šíření trhliny anebo lom. **Trhliny** jsou jedním z nejčastějších poškození především u odlitků, u svařenců a u tepelně zpracovávaných součástí. Trhliny snižují pevnost součástí, působí netěsnosti a u dynamicky namáhaných součástí vedou ke vzniku únavových lomů.

Pro velmi ostré trhliny by teoreticky  $\rho \rightarrow 0$ , potom  $\sigma_{\max}$  by stoupalo k nekonečnu ( $\sigma_{\max} \rightarrow \infty$ ) podle vztahu  $\sigma_{\max} = \sigma(1 + 2(\frac{c}{\rho})^{1/2})$ .

### 2.3. Lomové chování materiálů

Historicky v oblasti lomových procesů je možno uvažovat dvě hlavní koncepce, napětíovou a energetickou:

- a) Stanovení napětí kolem defektu – lokální překročení meze pevnosti materiálu v kořeni trhliny vede k narušení soudržnosti materiálu, k šíření trhliny a vzniku lomu.
- b) Energetická bilance – přebytek potenciální energie systému se využije na vytvoření nové lomové plochy. Obě poskytují přibližně stejné výsledky.

Lomy a mezní stavy je možno klasifikovat podle několika hledisek:

Podle velikosti plastické deformace: Tvárný (houževnatý), křehký (štěpný), smíšený

Trhliny a lomy: stabilní nebo nestabilní.

Podle podmínek degradačních procesů:

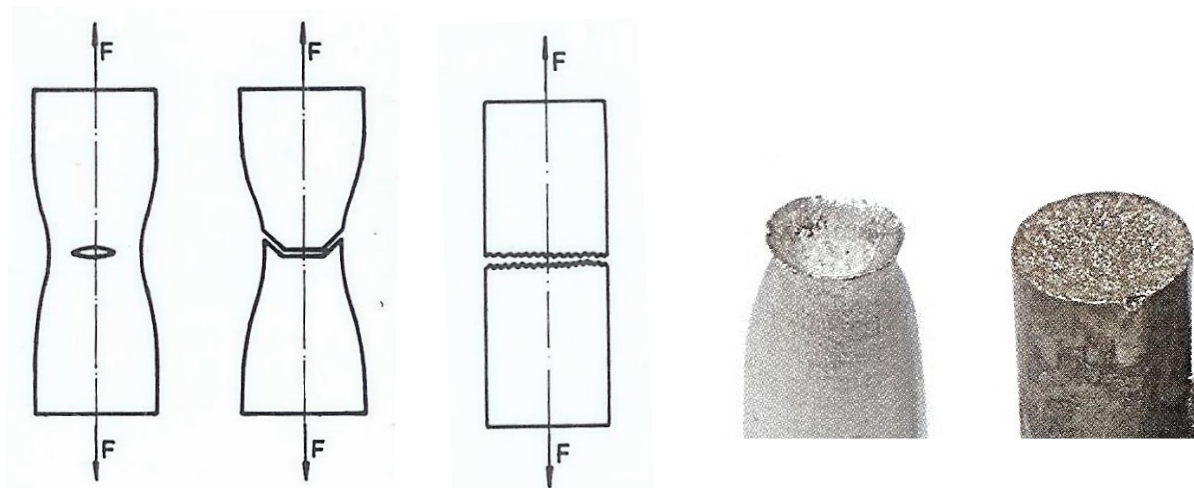
únavové lomy, korozní praskání, vodíkové praskání, lomy při tečení.

Podle šíření vzhledem k hranicím zrn: interkrystalické, transkrystalické, smíšené.

Příklady několika typických lomů a detailů lomových povrchů jsou uvedeny na obr. 2.5-2.7.

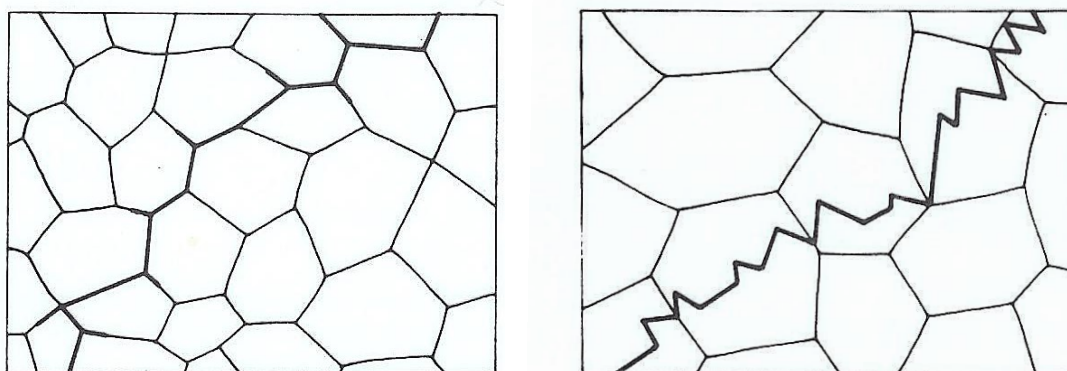
Zkoumáním trhlín a lomových ploch s ohledem na příčiny a mechanismy porušení, jakost materiálu a výskyt necelistvostí se zabývá technický obor **fraktografie**.

**Makrofraktografie** dává integrální obraz o lomovém procesu na základě makroskopických znaků lomové plochy, viditelných pouhým okem, pomocí lupy anebo světelného mikroskopu (stereomikroskopu) se zvětšením maximálně 100 x.

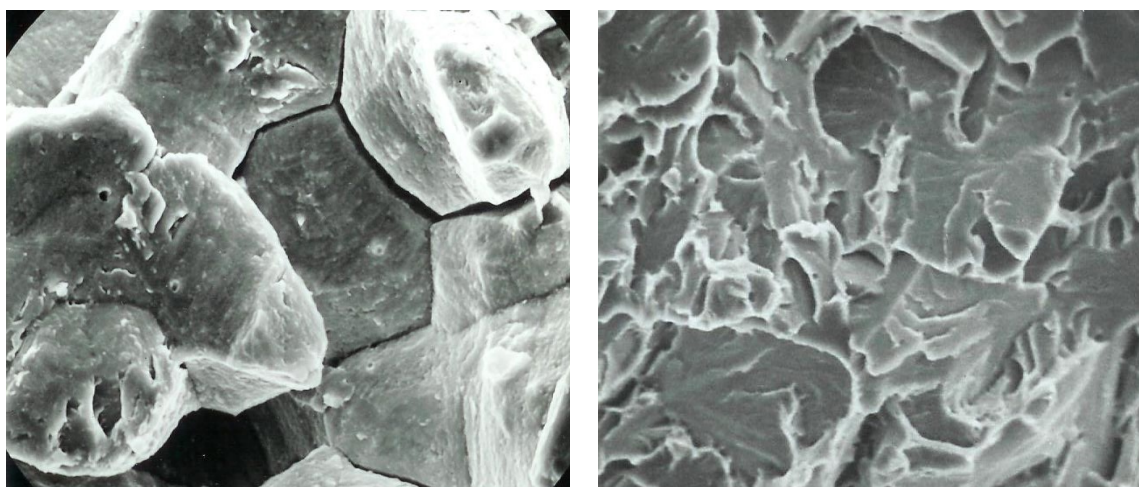


Obr. 2.5 Scéma tvárného a křehkého lomu – makroskopický pohled

**Mikrofraktografie** studuje lomovou plochu při vysokém zvětšení a získává informace o mechanismu porušování materiálu na základě mikroskopických znaků (stop), jako jsou krystalografické fazety, mikroskopické dutiny, únavové žlábký (proužky, striace), apod.



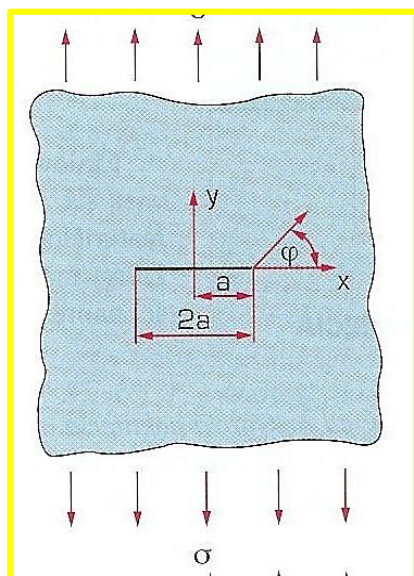
Obr. 2.6 Schéma křehkého interkrystalického a transkrystalického lomu (kolmý řez k lomu)



Obr. 2.7 Křehký lom – mikroskopický pohled a) mezikrystalový (interkrystalový), b) transkrystalový. V kovech s kubickou prostorově centrovanou mřížkou probíhá transkrystalové štěpení podél krystalografických rovin typu  $\{100\}$ .

## 2.4. Faktor intenzity napětí a lomová houževnatost

Na základě poměrně složitých výpočtů polí napětí a posuvů kolem čela ostré trhliny a popis úrovně koncentrace napětí u ostré trhliny byl zaveden faktor intenzity napětí  $K_I$  (pro tahové zatížení), jeden z hlavních parametrů lomové mechaniky. Podobně byly zavedeny faktory intenzity napětí  $K_{II}$  a  $K_{III}$  pro namáhání ve smyku nebo stříhu (obr. 2.8).



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

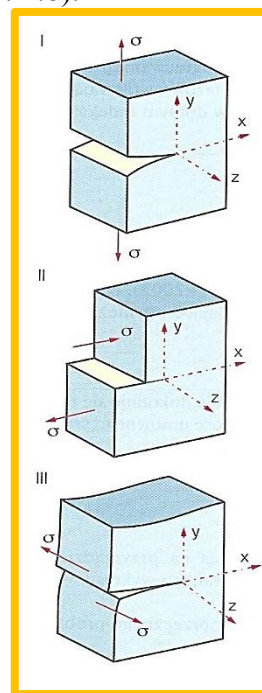
(2.8)

$$[\text{MPa} \sqrt{\text{m}}]$$

$f$  – tvarová funkce, závislá na geometrii tělesa, poměrné délce trhliny a rozložení zatížení, další parametry jsou patrné z obr. 2.8

$K_I$  umožňuje popis složek tenzoru napětí u čela trhliny (lineárně elastický materiál)

$$\text{obecně } \sigma_{ik} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot f_{ik}(\varphi) \quad (2.9)$$



Obr. 2.8. Schéma elementu materiálu s trhlinou při tahovém napětí.

Módy namáhání materiálu s trhlinou: I – tahový mód (tah), II – rovinný smykový mód (smyk) III – antirovinný smykový mód (stříh)

**Faktor intenzity napětí  $K_I$**  – je závislý na vnějším zatížení, napětí ( $\sigma$ ), na délce trhliny ( $a$ ), její orientaci a geometrii, na tvaru a způsobu zatížení tělesa. Charakterizuje též úroveň napětí před čelem trhliny, složky tenzoru napětí v závislosti na vzdálenosti  $r$  od čela trhliny a úhlu  $\varphi$ . Např. pro složku napětí  $\sigma_{yy} = \sigma_y$ , důležitou pro vznik a šíření lomu při tahu, byl odvozen vztah

$$\sigma_y = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cdot \cos \frac{\varphi}{2} \left[ 1 + \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \sin \frac{3\varphi}{2} \right] \quad (2.10)$$

**Kritická hodnota faktoru intenzity napětí  $K_I$**  pro vznik nestabilního lomu se jmenuje **lomová houževnatost  $K_{Ic}$** . Používá se také pro kvantitativní porovnání křehkosti materiálů. Čím je materiál křehčí, tím má nižší hodnotu lomové houževnatosti. Pomocí lomové houževnatosti můžeme také vypočítat další parametry lomového procesu.

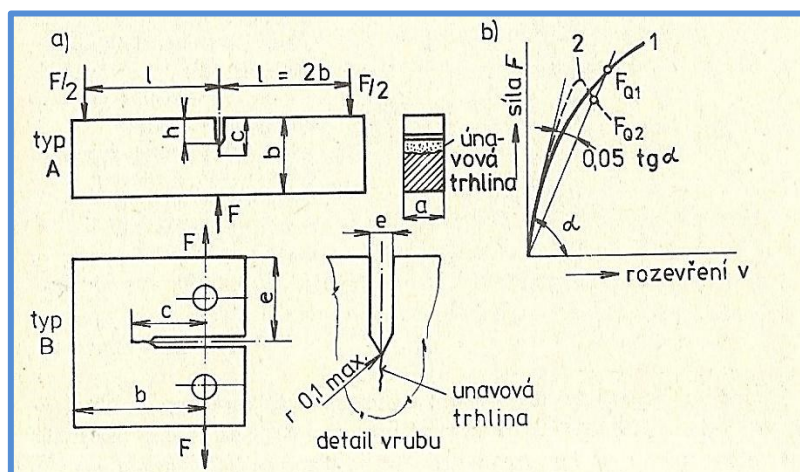
Hodnoty lomové houževnatosti jsou závislé na složení a struktuře materiálu a jsou snižovány vlivem škodlivých prvků (P,S) a působením vodíku. Z druhé strany  $K_{Ic}$  je také závislá na teplotě, rychlosti zatěžování a příčném rozměru tělesa ( $K_c$ )

Lomová houževnatost  $K_{Ic}$  umožňuje posoudit odolnost tělesa ke křehkému lomu. Materiál s trhlinou se neporuší, když  $K_I < K_{Ic}$ , nebo naopak loma nastane když  $K_I \geq K_{Ic}$ . Znalost lomové houževnatosti umožňuje řešit řadu úloh a problémů z oblasti křehkého porušení materiálů.

Pro naměřenou délku (a) spočteme kritické napětí  $\sigma_c$  dle vztahu  $K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi a} \cdot Y$ , tzn. materiál (dílec, součást) se neporuší nestabilním křehkým lomem, když reálné napětí  $\sigma < \sigma_c$ .

Nebo pro dané napětí  $\sigma$  spočteme kritickou délku defektu  $a_c$  dle  $K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi a_c} \cdot Y$ , materiál odolá křehkému nestabilnímu lomu, když  $a < a_c$ . Skutečnou délku trhliny (a) můžeme zjistit defektoskopickou metodou, zpravidla ultrazvukem.

**Lomovou houževnatost  $K_{Ic}$**  stanovíme na vzorcích dle norem, např. ČSN EN ISO 12737 Kovové materiály - Stanovení lomové houževnatosti při rovinné deformaci (2010).



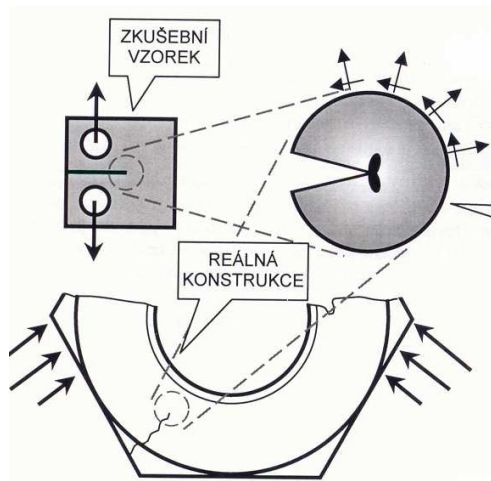
Obr. 2.9. Schéma zkoušky lomové houževnatosti  $K_{Ic}$

Základní postup při provádění zkoušky lomové houževnatosti:

- Změříme potřebné rozměry zkušebních těles, typu A nebo B, (tl.  $a = 10-100$  mm)
- Vzorky opatříme vrubem a vytvoříme ostrou únavovou trhlinu, o celkové délce  $c$ .
- Na trhacím stroji provedeme zatížení vzorku až do lomu. Způsob určení síly  $F_Q$  při různém tvaru závislosti ( $F-v$ ; 1,2 je vyznačen na obr. 2.9).
- Vypočteme předběžnou (provizorní) hodnotu, např.  $K_Q = \sigma_Q \sqrt{\pi c} \cdot Y$ , kde  $\sigma_Q = M_{0Q}/W_0$  (A, pro ohyb)
- Prověříme podmínky pro rovinnou deformaci (RD):  $a, c \geq 2,5 \left( \frac{K_Q}{Re} \right)^2$ ,  $b - c \geq 2,5 \left( \frac{K_Q}{Re} \right)^2$
- Pokud jsou splněny tyto podmínky pro RD, potom  $K_Q = K_{Ic}$ , tj. platná hodnota  $K_{Ic}$ .

S ohledem na náročnost provedení zkoušky lomové houževnatosti jsou činěny pokusy pro stanovení jejich hodnot pomocí menších vzorků s rázovým zatížením, pomocí výsledků vrubové houževnatosti anebo tahové zkoušky za vymezených podmínek.

Lomová mechanika popisuje pomocí jednoho nebo více parametrů stabilitu trhliny. Umožňuje přenos naměřených dat  $K_{Ic}$  ze zkušebních vzorků na reálné konstrukce.



Obr. 2.10. Lomová houževnatost materiálu vzorku a dílce je stejná (mechanická vlastnost), faktory intenzity napětí jsou rozdílné, podle rozložení zatížení, geometrie trhliny a tvaru tělesa.

Obecně s rostoucími hodnotami pevnosti nebo meze kluzu, hodnoty houževnatosti v rámci dané skupiny materiálů nebo vybraného materiálu vykazují klesající trend. S tím také souvisí poměrně široké rozmezí hodnot  $K_{Ic}$  různých skupin materiálu, tab. 2.1.

Tab. 2.1. Rozmezí hodnot lomové houževnatosti  $K_{Ic}$  vybraných materiálů

| materiál   | $K_{Ic}$          | materiál           | $K_{Ic}$          |
|------------|-------------------|--------------------|-------------------|
|            | [MPa $\sqrt{m}$ ] |                    | [MPa $\sqrt{m}$ ] |
| Oceli      | 30 – 220          | Litiny             | 5 - 20            |
| Ni slitiny | 70 - 160          | Technická keramika | 2 - 10            |
| Ti slitiny | 50 - 150          | Technické polymery | 0,5 - 7           |
| Al slitiny | 10 - 50           | Skla               | 0,5 - 1,2         |
| Mg slitiny | 10 - 20           | Beton              | 0,15 - 0,3        |

**Omezení** - lineární lomovou mechaniku nelze použít pro

- materiály s nízkou lomovou houževnatostí v oblastech krátkých trhlin,
- materiály s vysokou lomovou houževnatostí,
- omezení lineární lomové mechaniky na  $\sigma_c < \frac{2}{3} R_p$  ( $R_p$  – mez kluzu)

## 2.5. Plastické zóny

Oblast s plastickou deformací u čela trhliny, kde některá složka napětí překročí mez kluzu  $\sigma_{ij} \geq R_p$ , obr. 2.11. Pro přesnější analýzu tvaru zóny je nutno uvažovat smykové složky napětí a kritéria vzniku plastické deformace.

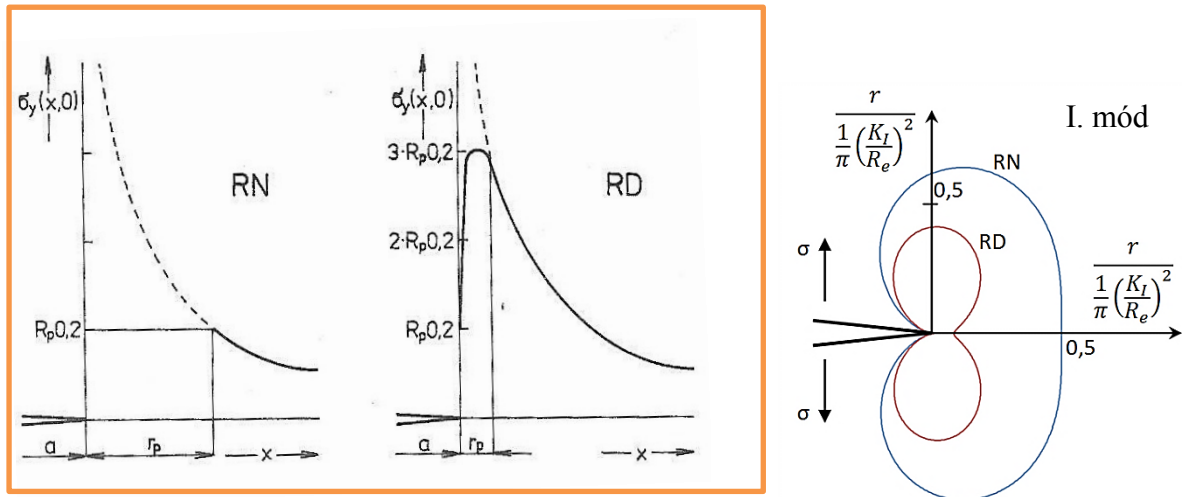
Na vytvoření plastické zóny se spotřebuje část elastické energie, plastická zóna zvyšuje povrchovou energii lomu a tedy houževnatost materiálu. Plastické zóna vede ke snížení

koncentrace napětí, k otupení špiček napětí před čelem trhliny, a tím omezuje vznik křehkého lomu. Podle vztahu  $\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}$  pro  $\sigma_y = R_p$  a  $r = r_p$  dostaneme snadno rozměr zóny

$$r_p = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K}{R_p} \right)^2, \quad (2.11)$$

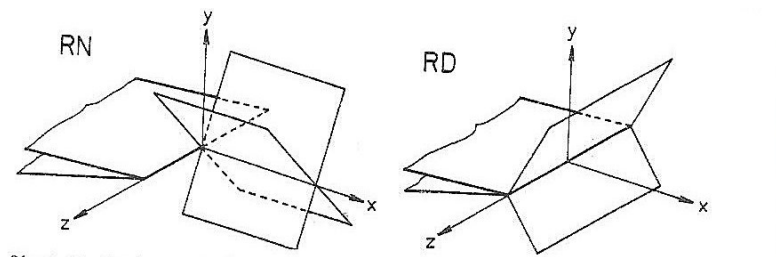
tj. velikost plastické zóny ve směru osy x, pro stav rovinné napjatosti RN (na povrchu).

Podobně pro stav rovinné deformace RD (uvnitř silné stěny)  $r_p = \frac{1}{6\pi} \left( \frac{K}{R_p} \right)^2$ .



Obr. 2.11. Průběhy napětí  $\sigma_y$  před čelem trhliny ve stavu rovinné napjatosti (RN) a rovinné deformace (RD). Porovnání tvaru a poměrné velikosti plastické zóny pro I. mód (tah).

U povrchu ve stavu RN je více aktivních skluzových systémů a snadnější plastická deformace než pro RD (ve středu stěny, kde je těž trojosý tahový stav napjatosti, obr. 2.12



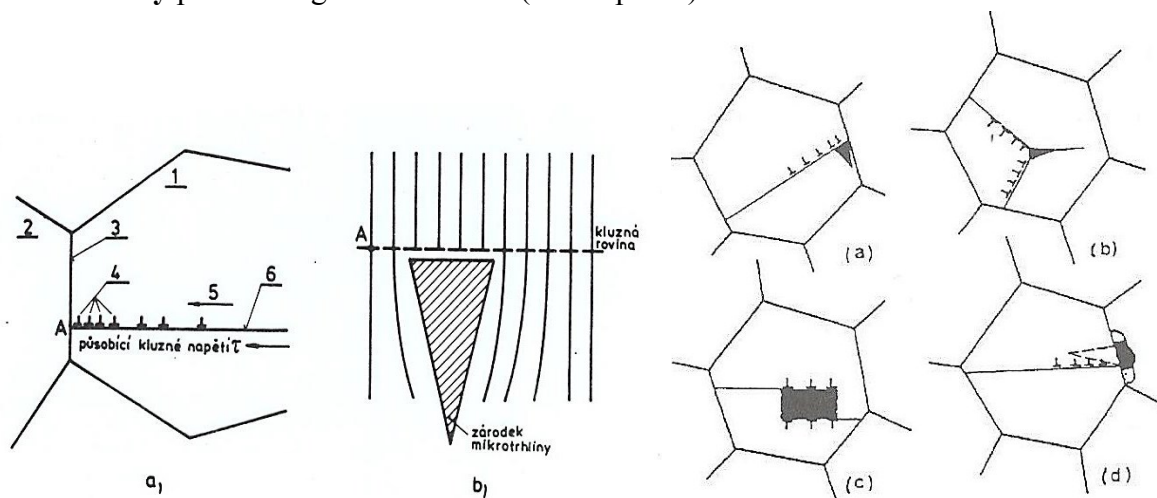
Obr. 2.12. Roviny maximálního smykového napětí před čelem trhliny ve stavu RN a RD.

Experimentální metody výzkumu plastické zóny: a) metoda leptání, b) rentgenografické metody, c) tenzometrické metody, d) rekrystalizační metody, e) sledování na elektronovém mikroskopu, f) pruhy moiré, g) interferenční mikroskopie (holografická interferometrie) h) fotoelasticimetrie, i) stereometrie, j) infračervená termografie, k) měření mikrotvrdosti.

## 2.6. Inicie a růst mikrotrhlin

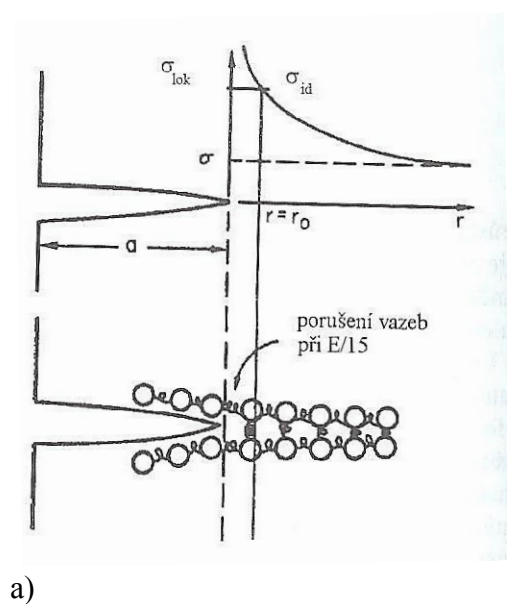
V kovových materiálech je možno iniciaci mikrotrhlin vysvětlit pomocí nahromadění dislokací, podle několika modelů, obr. 2.13. Další růst mikrotrhlin v křehkém materiálu je

podmíněn výskytem lokálním tahovým napětím, resp. dosažením **kritické velikosti mikrotrhliny** podle energetické bilance. (viz. kap. 2.7)



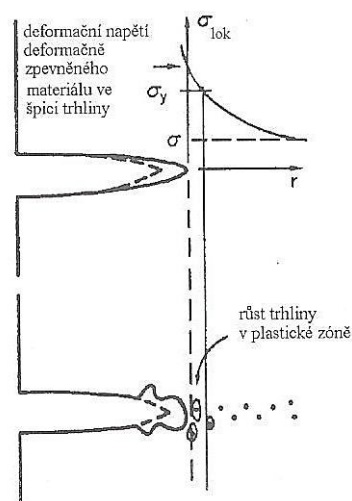
Obr. 2.13. Mikromechanismy iniciace mikrotrhlin nakupením hranových dislokací: 1, 2 - různě orientovaná zrna, 3 - hranice zrn, 4 - nahromadění dislokací před hranicí (překážkou), 5 - směr pohybu dislokací, 6- rovina kluzu. Další možnosti vzniku mikrotrhlin interakcí řad dislokací (případ (c) charakterizuje spíše vznik mikrodutiny, resp. nanodutiny).

Další rozvoj trhliny je závislý na možnosti plastické deformace a výskytu plastické zóny. V případě křehkého materiálu nastává zpravidla **štěpné porušení**, narušením meziatomových vazeb, obr. 2.14. V materiálu s možností plastické deformace nastává iniciace mikrodutin, jejich růst a propojování. Přitom se spotřebuje značné množství energie, vzniká obvykle **vysokoenergetický lom**.



a)

Obr. 2.14 Růst trhlin štěpným mechanismem, Porušení vazeb mezi atomy při překročení teoretické pevnosti u čela trhliny(a)



b)

Iniciace a růst trhlin tvárným (dutinovým) mechanismem, iniciace a propojení mikrodutin před čelem trhliny v procesní zóně (b)

## 2.7. Energetické koncepce a přístupy

Griffithova teorie křehkého lomu (1920) tvoří základ pro další energetické koncepce iniciace nebo šíření lomů. Předpoklad: Úbytek elastické energie v tělese v závislosti na délce (přírůstku) trhliny bude větší než přírůstek povrchové energie nově se tvořící trhliny. Pro jednotlivé formy a položky v energetické bilanci lze psát (zjednodušené odvození podle obr. 2.15):

$W_a$  – energie desky s trhlinou o délce ( $a$ )

$U_e$  – úbytek elastické energie růstem trhliny,  $U_e = \frac{\pi a^2 \sigma^2}{E}$

$W_s$  – povrchová energie trhliny,  $W_s = 4 \cdot \gamma \cdot a$ , kde  $\gamma$  [ $\text{Jm}^{-2}$ ] je povrchová energie materiálu

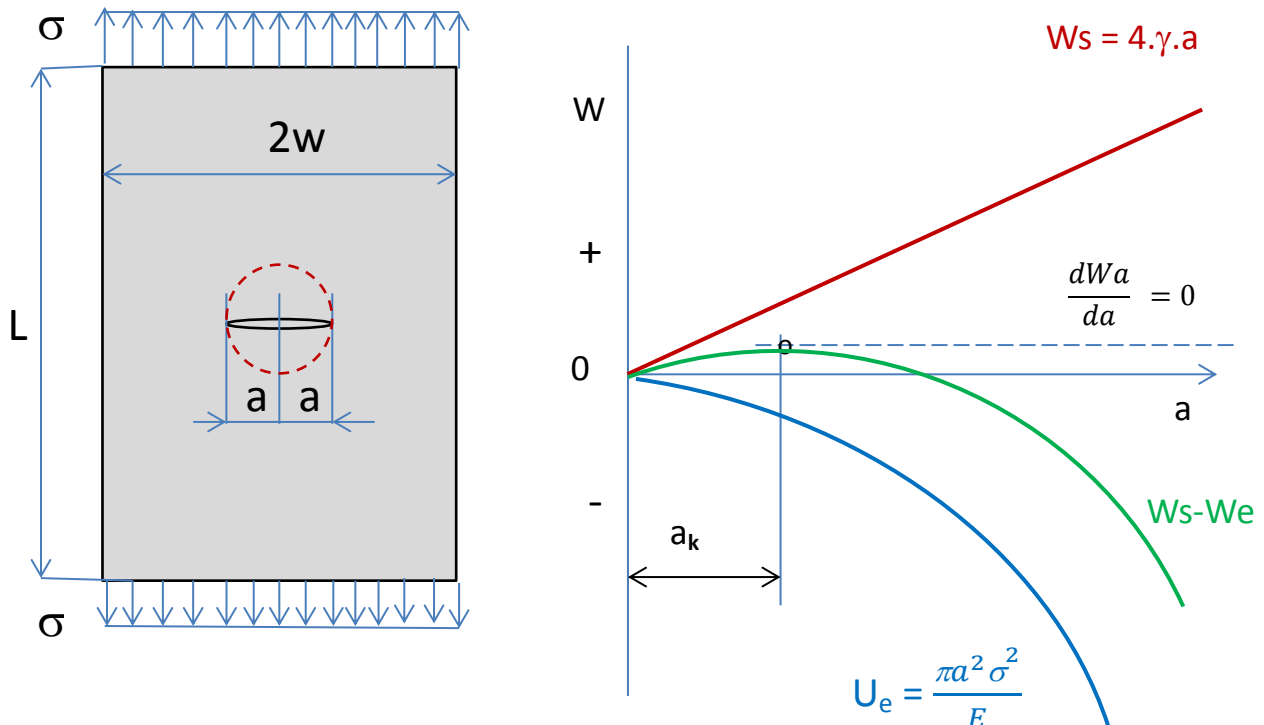
$W_o$  – energie systému bez trhliny ( $W_o = \text{konst.}$ )

Platí zde zákon zachování energie:  $W_a = W_o + W_s - U_e$  (2.12)

Podmínka stability trhliny:  $\frac{dW_a}{da} = 0 = 4 \cdot \gamma - \frac{2\pi a \cdot \sigma^2}{E}$ , odtud po úpravě  $a_k = \frac{2\gamma E}{\pi \sigma^2}$ , pro  $a < a_k$  nestabilní lom nenastane. Obdobně kritické napětí

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi a}} \quad (2.13)$$

přítom lom nevznikne pro napětí  $\sigma < \sigma_k$ , nestabilní lom nastane ihned pro  $\sigma \geq \sigma_k$ .



Obr. 2.15. Uvažujeme desku z křehkého materiálu (např. skla) s centrální trhlinou o délce  $2a$ , orientovanou kolmo na působící tahové napětí  $\sigma$ . Předpoklady:  $a \ll W$ ,  $a \ll L$ , (tl.  $B = 1$ )

Povrchová energie lomu křehkých materiálů se pohybuje v mezích řádově  $\gamma = 1-10 \text{ [Jm}^{-2}\text{]}$ , mluvíme proto **nízkoenergetických lomech**.

Pro srovnání, **vysokoenergetické lomy** (tvárné, houževnaté) mají efektivní hodnoty povrchové energie řádově  $\gamma_{ef} = 10^3-10^4 \text{ [Jm}^{-2}\text{]}$ .

### Hnací síla trhliny, odpor proti šíření trhliny

Tento energetický přístup rozšiřuje původní Griffithovou koncepci na materiály s částečnou plastickou deformací, s kvazi-křehkými lomy. Hnací síla (energie) trhliny je míra uvolňování elastické energie, která vstupuje do procesu šíření trhliny.

Hnací síla trhliny je vyjádřena vztahem

$$G = - \frac{dW_c}{da}, \quad (2.14)$$

kde celková mechanická energie  $W_c = W_e + W_p$ , přitom  $W_e$  - elastická energie,  $W_p$  – potenciální energie vnějších sil,

$W_p = W_F$  – práce vnějších sil.

Pro oblast čela trhliny lze odvodit pro RN  $G = \frac{a \cdot \sigma^2}{E} = \frac{K_I^2}{E}$ , anebo pro RD vztahy:

$$G = \frac{a \cdot \sigma^2}{E} (1 - \nu^2) = \frac{K_I^2}{E} (1 - \nu^2) \quad (2.15)$$

Odpor proti šíření trhliny

$$R = \frac{dW_\gamma}{da} \text{ (J/m}^2\text{)}, \quad (2.16)$$

kde  $W_\gamma$  - energie trhliny (J/m),  $W_\gamma = \frac{\gamma \cdot S}{B}$  (B-šířka vzorku, S – plocha lomu) zahrnuje povrchovou energii, dále energii na plastickou deformaci, na zvýšení teploty, na kinetickou energii materiálu. Podmínka stability pro elastoplastické materiály:  $G_c = R$

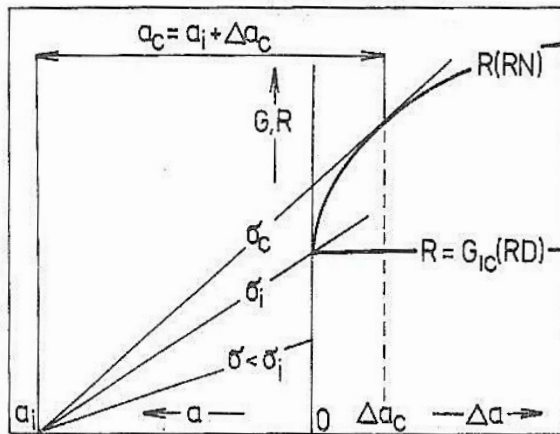
Odpor proti šíření trhliny  $R = \frac{dW_\gamma}{da} \text{ (J/m}^2\text{)}$  je energie potřebná k vytvoření lomové plochy jednotkové velikosti, která charakterizuje také lomovou houževnatost materiálu

$R = G_{Ic} = \frac{ac \cdot \sigma^2}{E} (1 - \nu^2) = \frac{K_{Ic}^2}{E} (1 - \nu^2)$  pro RD, podobně pro RN:

$$R = G_{Ic} = \frac{ac \cdot \sigma^2}{E} = \frac{K_{Ic}^2}{E} \quad (2.17)$$

**R – křivky jsou** závislosti odporu R na délce trhliny (a) anebo přírůstku ( $\Delta a$ ), tj.  $R = f(\Delta a)$ .

Vhodné grafické znázornění výše uvedených některých vztahů ( $G = \frac{a \cdot \sigma^2}{E}$ ) a schéma podkritického růstu počáteční trhliny (délky  $a_i$ ) do kritické velikosti ( $a_c$ ) je uvedeno na obr. 2.16



Obr. 2.16. Porovnání  $R$  křivek a kritických délek trhlin pro  $RN$  a  $RD$ . Snadnější šíření trhliny ve stavu rovinné deformace ( $RD$ ) ve srovnání s rovinnou napjatostí ( $RN$ ).

Další energetické úvahy o rozložení hustoty deformační elastické energie u čela trhliny vedly k vytvoření  $S$  - faktoru hustoty elastické energie, který je možno použít pro predikci směru nestabilního šíření trhliny v rámci lineární lomové mechaniky.

Pro materiály a dílce s větším rozsahem plastické deformace při zatížení je možno odolnost proti iniciaci stabilního i nestabilního lomu charakterizovat pomocí tzv.  $J$  - integrálu, který je odvozen a používán v rámci nelineární (elasto-plastické) lomové mechaniky.

## 2.9. Koncepce otevření čela trhliny

Tato koncepce má specifické postavení mimo dva hlavní směry (napětový, energetický) pro popis lomového chování materiálů. Níže jsou stručně uvedeny základní poznatky o dané koncepci. Velikost otevření trhliny ( $\delta$ , COD) je úměrná zatížení a schopnosti trvalé deformace materiálu v oblasti čela trhliny, obr. 2.17. Koncepce COD (resp. CTOD – crack tip opening displacement) je vhodná hlavně pro tvárné materiály. Čím větší je otevření čela trhliny a vzdálenosti mezi bočními plochami (lícemi) trhliny, tím snadněji a přesněji můžeme též stanovit kritickou hodnotu otevření čela trhliny. Otevření čela trhliny je úměrné velikosti plastické zóny u kovových materiálů.

Kritérium stability trhliny: **CTOD** < **CTOD<sub>c</sub>** (kritická hodnota pro nestabilní vznik lomu) nebo zkráceně  $\delta < \delta_c$ . Použití transformačních vztahů mezi CTOD a  $K$ , např.

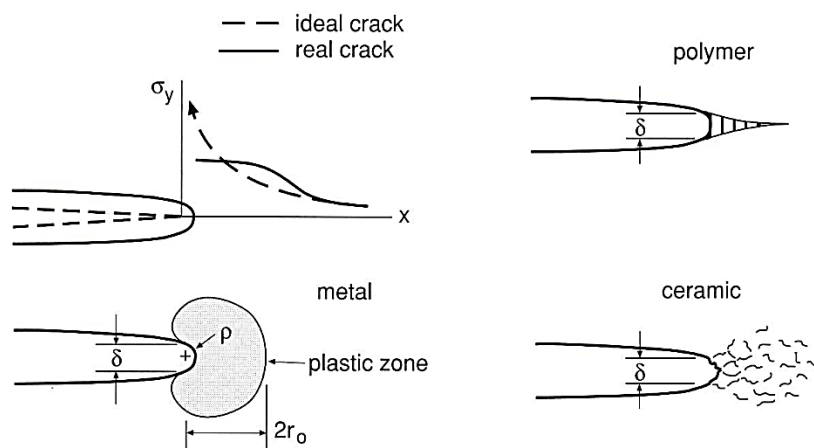
$$CTOD = \delta = \frac{K_I^2}{\lambda E R_p} \quad (RN), \quad (2.18)$$

kde  $\lambda = \pi/4 - 2$ , umožňuje nepřímé stanovení lomové houževnatosti **K<sub>Ic</sub>** pomocí **CTOD<sub>c</sub>**,

např. ze vztahu  $CTOD_c = \delta_c = \frac{K_{Ic}^2}{\lambda E R_p}$ , přitom je nutno ověřit podmínky platnosti **K<sub>Ic</sub>** pro uvedené rozměry

$$B, a, W - a \geq 0,1 \frac{K_{Ic}^2}{R_p^2}. \quad (2.19)$$

(B – šířka vzorku, a – délka trhliny, W- a rozměr části vzorku před trhlinou).



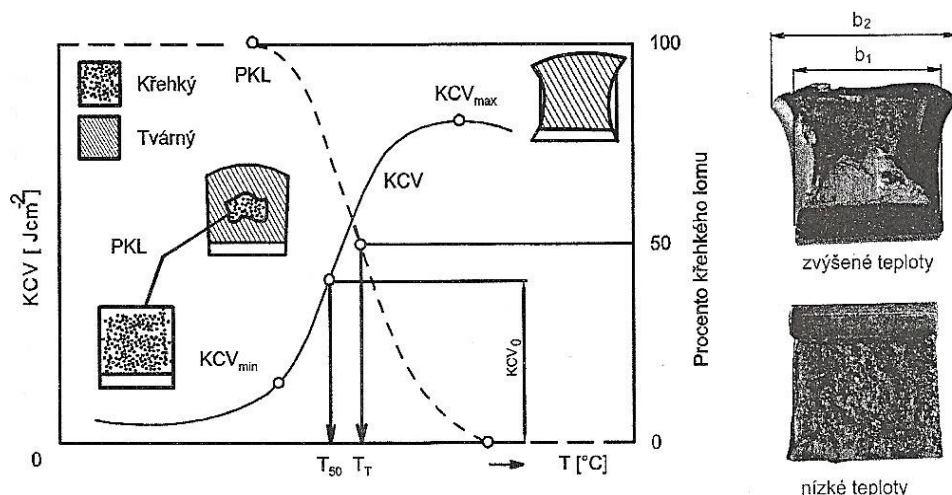
Obr. 2.17 Otupení a otevření čela trhliny u vybraných skupin materiálů.

## 2.10. Tranzitní lomové chování materiálů

Lomové zkoušky jsou používány pro zhodnocení metalurgické kvality a zejména pro posouzení vlivu technologických operací.

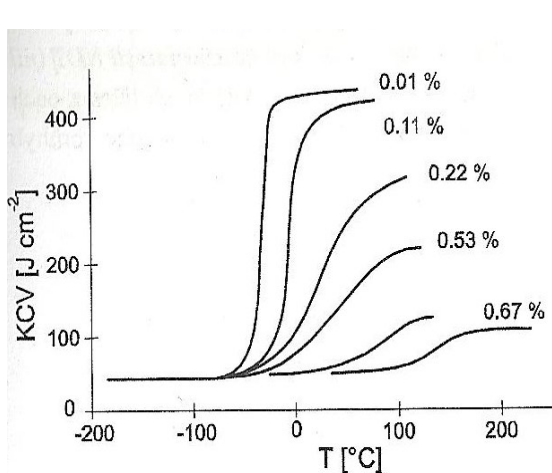
### Zkouška vrubové houževnatosti

Na obr. 2.18 jsou znázorněny obecně teplotní závislosti vrubové houževnatosti (KCV nebo KV) a podílu křehkého lomu. Tyto křivky jsou sestaveny proložení řady neměřených hodnot houževnatosti, resp. podílu křehkého lomu. Na obrázku jsou také naznačeny dvě možnosti stanovení tranzitní teploty  $T_t$ ,  $T_{50}$ . Škodlivý vliv uhlíku na snížení houževnatosti a nežádoucí zvýšení tranzitní teploty je dokumentován na obr. 2.19. Podobný negativní účinek vykazuje P, S a také povrchově aktivní prvky (Sn, Sb) i nadměrný obsah Cr. Nevhodné jsou také křehké fáze vyloučené podél hranic zrn ( $AlN$ ,  $Cr_{23}C_6$ ), nadměrné zpevnění oceli apod.

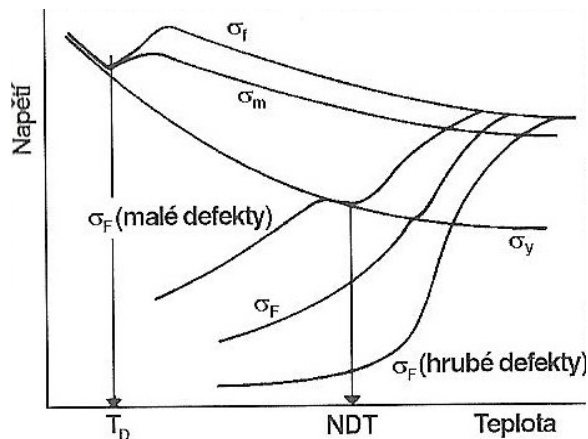


Obr. 2.18 Přechodová křivka vrubové houževnatosti (Vidalova křivka) konstrukční uhlíkové oceli a makrofraktografické snímky lomových ploch za nízkých a zvýšených teplot

Vliv teploty na pevnostní charakteristiky je schematicky znázorněn na obr. 2.20, kde lomové napětí pro hrubé defekty (větší ostré defekty, trhliny) ve zkřehnutém materiálu za nižší teploty představuje přibližně kritické napětí pro vznik nestabilního lomu.



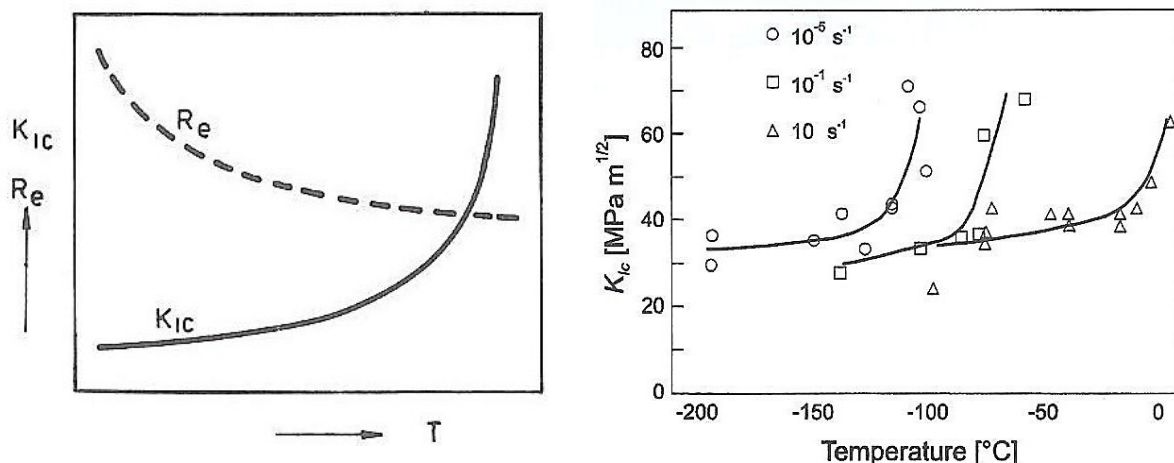
Obr. 2.19 Závislost vrubové houževnatosti na teplotě uhlíkových ocelí s rozdílným obsahem uhlíku



Obr. 2.20 Vliv teploty na mez kluzu  $\sigma_y$ , mez pevnosti  $\sigma_m$  a lomové napětí  $\sigma_f$  (bez defektu) nebo  $\sigma_F$  s defekty. NDT - teplota nulové tažnosti

### Změny lomové houževnatosti

Podobné teplotní závislosti jako vrubová houževnatost vykazuje také obecně lomová houževnatost u kovů s mřížkou kubickou prostorově centrovanou, obr. 2.21. V určitém teplotním intervalu nastává prudký pokles lomové houževnatosti a pod přechodovou teplotou je materiál ve křehkém stavu. Tendenci ke křehkému porušení s nižší hodnotou houževnatosti způsobuje také dynamické, resp. rázové zatížení (obr. 2.21).

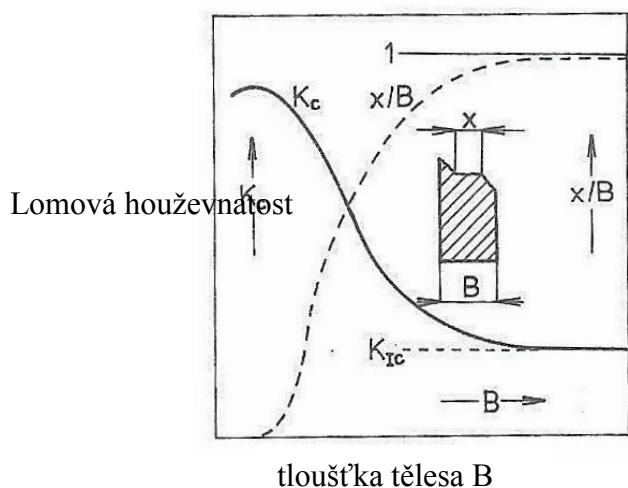


Obr. 2.21 Obecné teplotní závislosti lomové houževnatosti  $K_{Ic}$  a meze kluzu ( $R_e$ ). Konkrétní hodnoty a závislosti lomové houževnatosti nízkolegované oceli Mn-V-Nb na teplotě a rychlosti deformace.

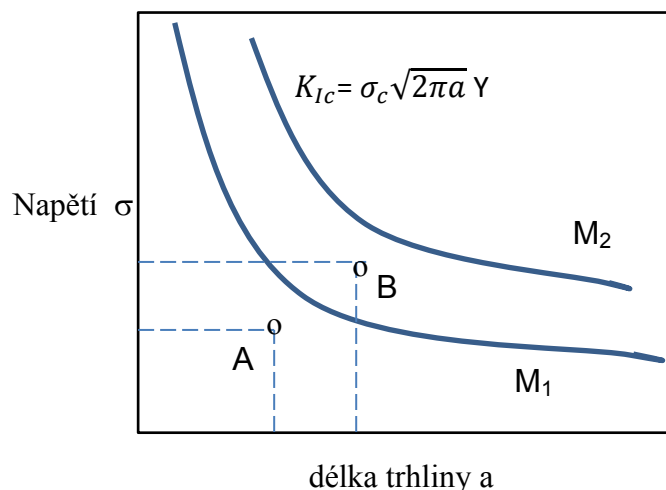
Podle vlivu rychlosti zatěžování na velikost  $K_{Ic}$  je možno rozlišit:

kvazistatické zatížení,  $dK_I/dt \leq 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$ , rychlé zatížení  $K_{Ic}(\tau)$   $dK_I/dt = 10\text{--}10^4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$ , a dynamické zatížení ( $K_{Id}$ ) -  $dK_I/dt \geq 10^5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Na hodnoty lomové houževnatosti má vliv také tloušťka stěny (obr. 2.22), což plyne s omezení plastické ve větších průřezích ve stavu rovinné deformace. Při splnění podmínek pro rovinnou deformaci označujeme tuto lomovou houževnatost jako  $K_{Ic}$ . Ve stavu rovinné napjatosti nebo ve smíšené oblasti jsou hodnoty houževnatosti vyšší, označovány symbolem  $K_c$ . S ohledem na bezpečnost a spolehlivost je třeba v praxi počítat s menší hodnotou  $K_{Ic}$ .



Obr. 2.22 Závislost lomové houževnatosti a podílu plochého lomu na tloušťce tělesa



Obr. 2.23 Grafické znázornění kritického napětí na délce trhliny při dané lomové houževnatosti

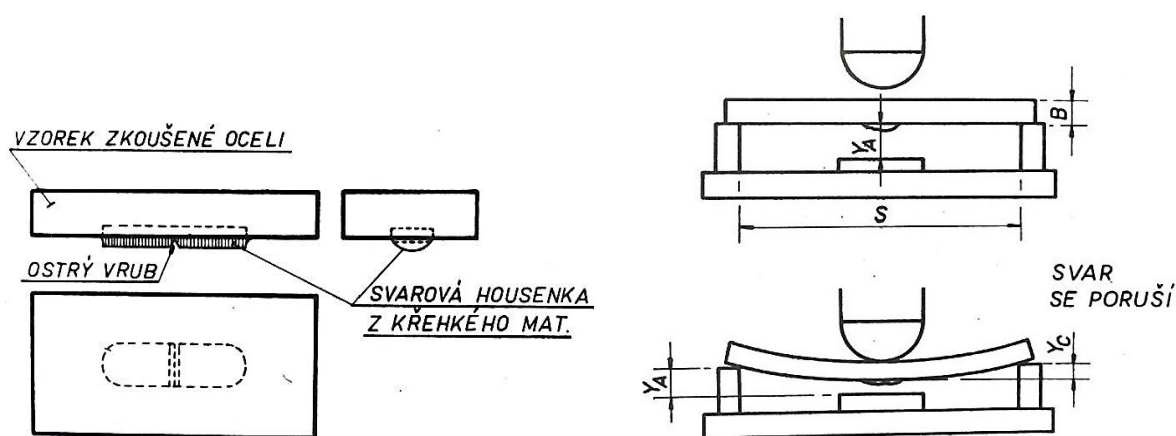
Pro grafickou interpretaci souvislosti mezi lomovou houževnatostí, délkou trhliny a napětím se používají závislosti vynesené na obr. 2.23. Při kombinacích tahových napětí a

délky trhliny pod danou křivkou (bod A), trhlina bude stabilní a náhlý křehký lom nenastane. Při dosažení dané křivky nebo překročení by nastal lom (bod B, vzhledem k materiálu M1). Obecně materiál M2 je odolnější proti křehkému nestabilnímu lomu ve srovnání s M1.

### Zkoušky teploty nulové houževnatosti NDT (*nil ductility temperature*)

Cílem této zkoušky je zjistit teplotu nulové houževnatosti, která vyjadřuje odolnost materiálu proti nestabilnímu šíření křehké trhliny.

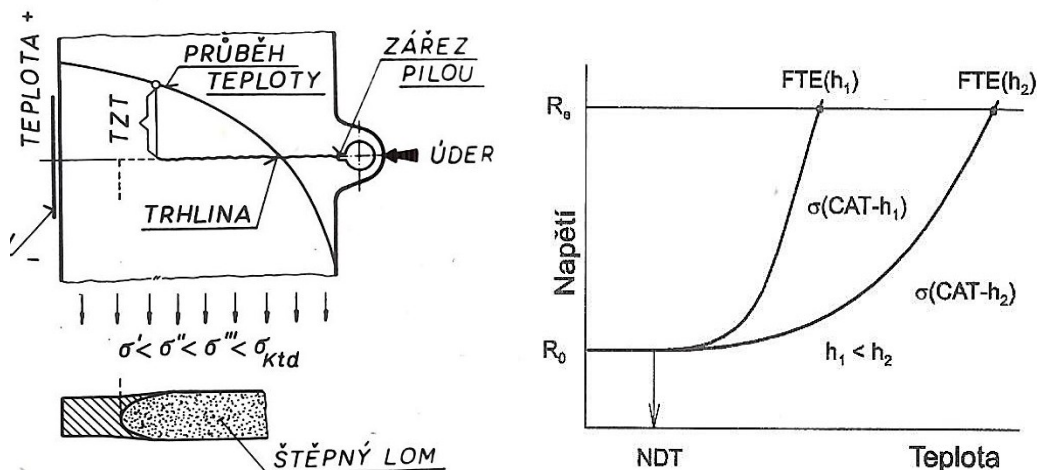
Princip zkoušky (obr. 2.22) spočívá v namáhání plochých (prizmatických) ocelových zkušebních těles trojbodovým ohybem dynamickou silou (nárazem) s omezeným průhybem. Zkušební těleso má na straně tahových napětí zhotovený křehký návar. V návaru je vyfrézovaný vrub, který slouží jako iniciátor lomu. Maximální průhyb tělesa ( $Y_A$ ) je podložkou omezen tak, aby na tahové straně se tahové napětí rovnalo hodnotě meze kluzu v tahu ( $R_p$ ) materiálu tělesa. Zkouška se provádí při různých teplotách. NDT je nejvyšší teplota, při které ještě lom přechází do základního materiálu.



Obr. 2.22 Tvar vzorku pro zkoušku DWT. Zatěžování vzorku pro zkoušku DWT,  $Y_A$  – průhyb na mezi kluzu v ohybu. Zkouška je vhodná pro svařované konstrukce.

### Zkouška teploty zastavení trhliny – Robertsonova zkouška.

Teplota zastavení trhliny (CAT – *crack arrest temperature*) - cílem je zjistit podmínky, při kterých se křehká trhlina zastaví. V konstrukci mohou existovat místa, kde se trhlina může snadněji iniciovat a nestabilně růst (např. oblast svařového spoje, nepříznivá kombinace trojosých napětí a nižší teploty, místní úder). Pak je žádoucí, aby se trhlina zastavila v oblasti základního odolnějšího materiálu a nedošlo k lomu (proniknutí trhliny celou stěnou) s možnými nežádoucími nebo katastrofickými důsledky, např. při úniku nebezpečných látek nebo radiace. Princip zkoušky a způsob vyhodnocení je znázorněn na obr. 2.23.



Obr. 2.23. Schéma zkoušky zastavení trhliny. Závislost teploty zastavení trhliny na působícím napětí pro dvě různé tloušťky tělesa. FTE - fracture transition elastic.

Čím vyšší je tahové působící napětí, tím vyšší je potřebná teplota pro zastavení trhliny. Zkouška respektuje také dynamiku šíření trhliny. Pro větší tloušťky stěny se trhlina zastavuje obtížněji, až při vyšší teplotě ve srovnání s menším průřezem (při stejném napětí).

Materiál pro konstrukci musí vyhovovat podmínce:  $TZT \leq T_{prov} - \Delta T_b$ , kde  $T_{prov}$  je provozní teplota,  $\Delta T_b$  - přírůstek teploty na bezpečnost a pro zohlednění rozptylu výsledků.



## Shrnutí pojmů kapitoly

Prostudováním dané kapitoly měli jste si osvojit tyto pojmy:

**Smluvní a skutečné napětí a deformace, lomové napětí, lomová deformace, součinitel koncentrace napětí, faktor intenzity napětí, lomová houževnatost, stav rovinné deformace, stav rovinné napjatosti, plastické zóny, otevření čela trhliny, povrchová energie, Griffithovo kritérium, kritické napětí, kritická délka trhliny, hnací síla trhliny, odpor proti šíření trhliny, R-křivky, mikromechanismy porušení, fraktografie, vrubová houževnatost, tranzitní teploty, teplota nulové houževnatosti (NDT), teplota zastavení trhliny (TZT).**



## Otázky ke kapitole 2

- 2.1. Jak jsou definována skutečná napětí a skutečné deformace při tahové zkoušce.
- 2.2. Jak je možno stanovit lomovou deformaci a lomové napětí?
- 2.3. Definujte součinitel koncentrace napětí. Jaké hodnoty dosahuje pro kruhový otvor?
- 2.4. Jaká je závislost součinitele koncentrace napětí na délce a ostroty (zaoblení) vrubu?
- 2.5. Jaké metody jsou používány pro stanovení polí napětí nebo deformací kolem vrubů a trhlin v součástech?

- 2.6. Podél kterých krystalografických rovin probíhá šíření štěpného lomu v mřížce kubické prostorově centrované?
- 2.7. Jaký trend obecně platí mezi lomovou houževnatostí  $K_{Ic}$  a hodnotou meze kluzu  $R_{p0,2}$  ( $R_e$ ) u téhož kovového materiálu (např. dané oceli po různém zpracování).
- 2.8. V jakém intervalu jsou zpravidla hodnoty lomové houževnatosti  $K_{Ic}$  pro hliníkové slitiny?
- 2.9. Proč plastická zóna pro stav rovinné deformace je menší než pro stav rovinné napjatosti?
- 2.10. Jaký platí vztah mezi otevřením čela trhliny ( $\delta$ ) a faktorem intenzity napětí ( $K_I$ ) ?
- 2.11. Jaké jsou podmínky anebo faktory podporující vznik nízkoenergetického křehkého lomu oceli?
- 2.12. Co znamená hnací síla trhliny  $G$  a odpor proti šíření trhliny  $R$ ?
- 2.13. Jaké znáte mikromechanismy křehkého porušení?
- 2.14. Proč se používá zkouška velkých těles na rázový ohyb (DWTT)?
- 2.15. Co můžeme stanovit anebo zjistit pomocí zkoušky TZT (CAT)?



## Úlohy ke kapitole 2

- 2.1. Poměrně velká tabule skla je vystavena tahovému napětí 40 MPa. Povrchová energie daného skla je  $0,3 \text{ J/m}^2$  a modul pružnosti  $E = 69 \text{ GPa}$ . Stanovte délku povrchové vady (orientované kolmo na napětí), která by způsobila lom.

**Řešení:** Pro řešení je možno použít Griffithův vztah pro kritické napětí  $\sigma_k = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi a}}$ .

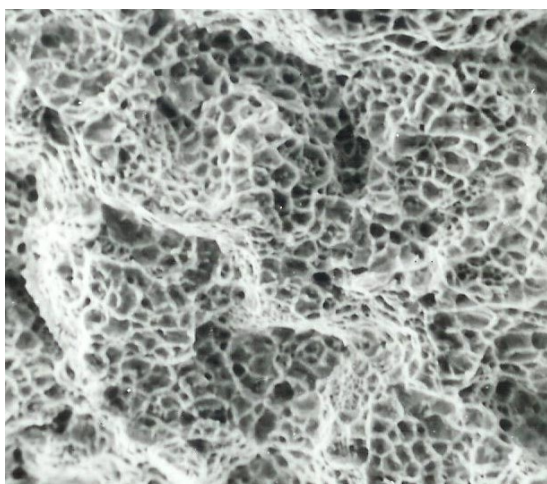
Po úpravě dostaneme pro kritickou délku trhliny při zadaném napětí  $\sigma$  vztah  $a_k = \frac{2E\gamma}{\pi\sigma^2} = \frac{2 \cdot (69 \times 10^9 \text{ N/m}^2) \cdot (0,3 \text{ N/m})}{\pi (40 \times 10^6 \text{ N/m}^2)^2} = 8,2 \times 10^{-6} \text{ m} = 0,0082 \text{ mm} = 8,2 \text{ }\mu\text{m}$

Poznámka: Numerický výpočet je vhodné provést zároveň se správnými jednotkami.

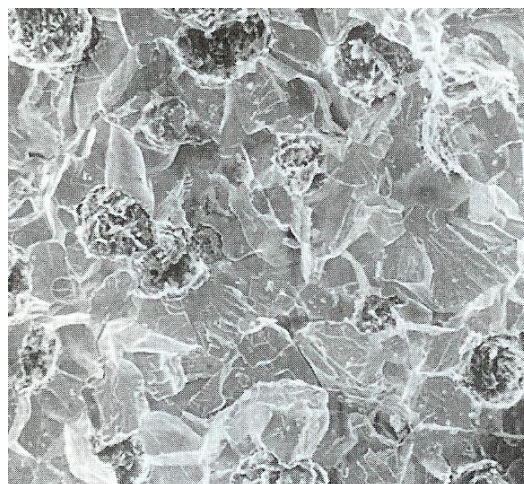
- 2.2. Keramická součást nesmí prasknout při napětí 13,5 MPa. Stanovte maximální přípustnou délku povrchové trhliny, když povrchová energie MgO je  $1,0 \text{ J/m}^2$ .
- 2.3. Odhadněte teoretickou lomovou pevnost křehkého materiálu, když je známo, že lom vznikne z povrchové trhliny elipsovitého tvaru o délce 0,5 mm a s poloměrem zaoblení  $5 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$ , když je aplikováno tahové napětí 103,5 MPa.
- 2.4. Vzorek z oceli s lomovou houževnatostí  $54,8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  má být vystaven napětí 1030 MPa. Praskne tento materiál, když je známo, že největší povrchová trhlina má délku 0,5 mm? Tvarový faktor má pro krátké povrchové trhliny hodnotu 1,12.

**Řešení:** Zadané parametry:  $K_{Ic} = 54,8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ,  $\sigma = 1030 \text{ MPa}$ ,  $a = 0,5 \text{ mm}$ ,  $Y = 1,12$ . Máme vypočítat kritické napětí  $\sigma_c$  a porovnat s napětím  $\sigma$ . Použijeme základní vztah pro lomovou houževnatost  $K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi a} \cdot Y$ , z něhož vypočteme  $\sigma_c$ . Např. přímo z rovnice  $54,8 = \sigma_c \sqrt{\pi \cdot 0,0005} \cdot 1,12$  dostaneme  $\sigma_c = 1235 \text{ MPa} > \sigma = 1030 \text{ MPa}$ , tzn. lom nevznikne.

- 2.5. Vypočtete zjednodušeně kritickou velikost ostré vnitřní trhliny v oceli s lomovou houževnatostí  $30 \text{ MPam}^{1/2}$ , když součást z této oceli je zatížena tahovým napětím 100 MPa kolmo na trhlínu.
- 2.6. Napište stručně postup při provádění a vyhodnocení zkoušky lomové houževnatosti materiálu, přitom uveďte základní vztahy a grafické závislosti.
- 2.7 Vypočtete kritickou délku trhliny ve tvrzeném plastu, u kterého byla zjištěna hnací síla trhliny  $G_c = 2,5 \text{ kJ/m}^2$  a modul pružnosti  $E = 2,0 \text{ GPa}$ . Deska je zatížena tahovým napětím 70 MPa kolmým k rovině trhliny.
- 2.8. Porovnejte velikost a tvar plastické zóny u čela trhliny pro stav rovinné deformace a rovinné napjatosti při tahovém módu zatížení. Nakreslete přibližně jejich tvary.
- 2.9. Jakou hodnotu součinitele koncentrace napětí  $\alpha$  má vrub U hluboký 2,0 mm, s poloměrem zaoblení 0,25 mm, při tahovém zatížení kolmo na vrub ?
- 2.10. Při poklesu teploty z  $20^\circ\text{C}$  pod teplotu NDT poklesla hodnota lomové houževnatosti 3 x. Jak se přitom změní kritická délka trhliny při stejném zatížení (napětí)?
- 2.11 Znázorněte graficky vliv napětí na teplotu zastavení trhliny pro vzorky v rámci Robertsonovy zkoušky. Vyznačte také vliv tloušťky tělesa na tuto teplotu.
- 2.12 Na snímcích detailů lomového povrchu jmenujte mikro-mechanismy porušení materiálu, stanovte orientačně velikosti strukturních součástí materiálu (zrna, částice; pokud jsou vidět) anebo rozměry fraktografických znaků (fazety, dutiny). Fotografie byly zhotoveny pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu. Zvětšení 1000 x.



a)

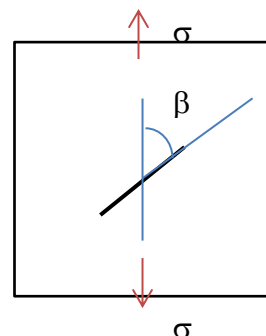


b)



## Test ke kapitole 2

- 1) Jakou hodnotu součinitele koncentrace napětí  $\alpha$  má válcovitý otvor při elastické deformaci desky v tahu. Otvor je ve středu široké a dlouhé desky, jeho osa je kolmo na plochu desky.  
a)  $\alpha = 3$ ,                      b)  $\alpha = 5$ ,                      c)  $\alpha = 7$ ,
- 2) Který je Neuberův vztah pro výpočet součinitele koncentrace napětí  $\alpha_\sigma$  při elasticko-plastické deformaci:  
a)  $\alpha_\sigma \cdot \alpha_t = \alpha_\varepsilon^2$ ,                      b)  $\alpha_\sigma \cdot \alpha_\varepsilon = \alpha_t^2$ ,                      c)  $\alpha_\varepsilon \cdot \alpha_t = \alpha_\sigma^2$   
( $\alpha_t$  – teoretický součinitel koncentrace napětí v elastické oblasti deformace,  $\alpha_\varepsilon$  – součinitel koncentrace deformace v oblasti elasticko-plastické deformace materiálu).
- 3) Rozvoj štěpného lomu v mřížce KSC (bcc) kovů a slitin probíhá podél rovin typu  
a)  $\{100\}$ ,                      b)  $\{110\}$ ,                      c)  $\{111\}$
- 4) Jakou hodnotu povrchové efektivní energie  $\gamma_{ef}$  mají řádově křehké materiály?  
a)  $\gamma_{ef} = 1-10 \text{ J/m}^2$ ,                      b)  $\gamma_{ef} = 10^2-10^3 \text{ J/m}^2$ ,                      c)  $\gamma_{ef} = 10^3-10^4 \text{ J/m}^2$
- 5) Jakou hodnotu povrchové efektivní energie  $\gamma_{ef}$  mají řádově houževnaté materiály?  
a)  $\gamma_{ef} = 1-10 \text{ J/m}^2$ ,                      b)  $\gamma_{ef} = 10^2-10^3 \text{ J/m}^2$ ,                      c)  $\gamma_{ef} = 10^3-10^4 \text{ J/m}^2$
- 6) Jak se mění hodnota faktoru intenzity napětí  $K_I$  na úhlu  $\beta$  u trhliny dle obrázku vpravo ( $K_I$  – pro zatížení kolmo na trhlínu)  
a)  $K_I(\beta) = K_I \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta$ ,                      b)  $K_I(\beta) = K_I \cdot \sin^2\beta$ ,                      c)  $K_I(\beta) = K_I \cdot \cos^2\beta$
- 7) Které oceli mají nejvyšší hodnoty houževnatosti při normální teplotě:  
a) austenitické,                      b) bainitické,                      c) nízkouhlíkové nelegované
- 8) Jaký trend obecně platí mezi hodnotami lomové houževnatosti  $K_{Ic}$  na mezi kluzu  $R_{p0,2}$  ( $R_e$ ) u téhož kovového materiálu (např. dané oceli po různém zpracování):  
a) stoupající,                      b) klesající,                      c) nelze stanovit z důvodu rozptylu  $K_{Ic}$
- 9) V jakém intervalu jsou zpravidla hodnoty lomové houževnatosti  $K_{Ic}$  pro hliníkové slitiny?  
a)  $K_{Ic} = 0,5 - 5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ,                      b)  $K_{Ic} = 10 - 50 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ,                      c)  $K_{Ic} = 20 - 200 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$
- 10) Transizní teplota DWTT je stanovena:  
a) podle podílu křehkého lomu 50%,                      b) podle podílu houževnatého lomu 75%,  
c) dle průměrné hodnoty energie spotřebované na lom zkušební tělesa  $(E_{\max} + E_{\min}) / 2$ ,
- 11) Při poklesu teploty z  $20^\circ\text{C}$  pod teplotu NDT poklesla hodnota lomové houževnatosti trojnásobně. Jak se změní kritická délka trhliny  $a_c$  při stejném zatížení (napětí)?  
a)  $a_c$  bude asi 3 x menší,                      b)  $a_c$  bude 6 x větší,                      c)  $a_c$  bude 9 x menší
- 12) Který z uvedených lomů má nejvyšší odpor proti šíření trhliny  $R$  (pro dané složení materiálu a teplotu, zpracování téhož materiálu může být různé):  
a) interkrystalický dutinový,                      b) transkrystalický dutinový                      c) smíšený křehký



- 13) Kritické smykové napětí  $\sigma_f$  pro iniciaci mikrotrhliny pomocí nakupení řady nebo řad dislokací je závislé na velikosti zrna ( $d$ ) podle zobecněného zjednodušeného vztahu:  
 a)  $\sigma_f = k/d^{1/2}$       b)  $\sigma_f = k/d$       c)  $\sigma_f = k \cdot d^{1/2}$  ( $k$  – materiálová konstanta)
- 14) Velikost plastické zóny ( $r_p$ ) u trhliny pro tahový mód zatížení lze vypočítat podle vztahu ( $K_I$  – faktor intenzity napětí,  $R_p$  – mez kluzu,  $E$  – modul pružnosti,  $\lambda = \pi/4-2$ ,  $\nu = 0,2-0,5$ )  
 a)  $\frac{K_I^2}{2\pi R_p^2}$ ,      b)  $\frac{K_I^2}{\lambda E R_p}$ ,      c)  $\frac{K_I^2}{E} (1-\nu^2)$
- 15) Při snížení teploty z 20°C na -50°C se snížila kritická hodnota hnací síly trhliny pětinasobně. Jak se změní kritická délka trhliny  $a_c$  při stejném zatížení (napětí)?  
 a)  $a_c$  bude asi 5 x menší,    b)  $a_c$  bude 5 x větší    c)  $a_c$  bude 25 x menší
- 16) Velikost otevření čela trhliny ( $\delta = \text{CTOD}$ ) lze vypočítat podle vztahu:  
 a)  $\delta = \frac{K_I^2}{2\pi R_p^2}$ ,      b)  $\delta = \frac{K_I^2}{\lambda E R_p}$ ,      c)  $\delta = \frac{K_I^2}{E} (1-\nu^2)$



## Literatura

- [1] KUNZ, J., Aplikovaná lomová mechanika, ČVUT Praha, Česká technika, 2005, 272 s.
- [2] KUČERA, J., Stručný úvod do mechaniky lomu, Část 1. Vruby a trhliny. Nestabilní lom. FS VŠB Ostrava, 1993, 106 s.
- [3] KUČERA, J., Stručný úvod do mechaniky lomu, Část II. Únava materiálu. FS VŠB Ostrava, 1994, 75 s.
- [4] ČSN EN ISO 12737: Kovové materiály - Stanovení lomové houževnatosti při rovinné deformaci (2010)
- [5] CALLISTER, D. W., Materials Science and Engineering. An Introduction. University Iowa, John Wiley & Sons, 2007, 721 p.
- [6] FELBECK, D. K., Atkins A.G., Strength and Fracture of Engineering Materials. Prentice Hall, Englewood, 1984, 542 p.
- [7] POKLUDA J. aj., Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek. PCDIR, Brno, 1994, 385 s.
- [8] ANDERSON, T.L., Fracture Mechanics. Fundamentals and applications, BAE, 2005, 621.
- [9] STRNADEL, B., Řešené příklady a technické úlohy z materiálového inženýrství. Ostravské tiskárny, 1998, 334 s.
- [10] STRNADEL, B. Nauka o materiálu II. Degradční procesy a design konstrukčních materiálů. ES VŠB-TU Ostrava, 2008, 280 s.
- [11] STRNADEL, B. et.al. New methods of damage and failure analysis of structural parts. Workshop, VŠB-TU Ostrava, 495 s. 2012. ISBN 978-80-248-2802-2
- [12] STRNADEL, B. et.al. New methods of damage and failure analysis of structural parts. Workshop, VŠB-TU Ostrava, 437 s. 2010. ISBN 978-80-248-2265-5
- [13] PUŠKÁR, A., Medzné stavy materiálův a sůčasť. Veda, Bratislava 1989, 304 s.

### 3. ÚNAVA MATERIÁLU



**Čas ke studiu:** 3 hodiny



**Cíl** Po prostudování tohoto odstavce budete umět

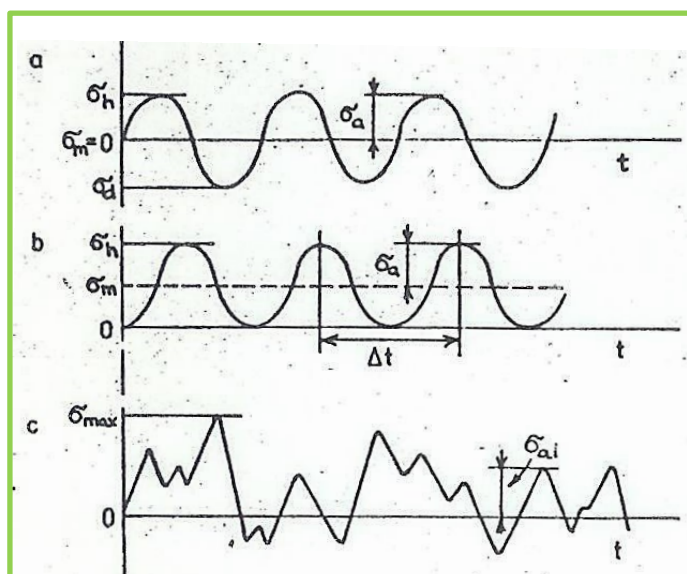
- Charakterizovat únavu a podmínky jejího vzniku.
- Na základě únavové křivky určitého materiálu, stanovit únavovou životnost anebo mez únavy.
- Popsat hlavní etapy únavového procesu
- Posoudit vliv koncentrace napětí a povrchu na únavové charakteristiky.
- Jmenovat hlavní činitele ovlivňující rychlost šíření únavových trhlin.



**Výklad**

#### 3.1. Úvod

Únava materiálů probíhá při cyklickém, střídavém namáhání mnohých součástí, dílců a konstrukcí. Typické příklady jsou klikové hřídele, dvojkolí kolejových vozidel, pružiny, valivá ložiska, ozubené kola, části letadel atd. Odhaduje se, že kolem 80% mechanických porušení a lomů v provozu souvisí s únavou materiálu. Pro popis cyklického namáhání jsou zavedeny určité parametry, obr. 3.1.



$\sigma_a$  – amplituda napětí

$\sigma_h$  – horní napětí

$\sigma_d$  – dolní napětí

$\sigma_m$  – střední napětí

$\Delta\sigma = 2 \cdot \sigma_a$  - rozkmit napětí

$\Delta t = T$  - časová perioda cyklu

$f = 1/T$  frekvence zatížení

$\sigma_{\max}$  – maximální náhodné napětí

$\sigma_{ai}$  – náhodná amplituda napětí

Součinitel asymetrie cyklu  $R = \frac{\sigma_d}{\sigma_h}$

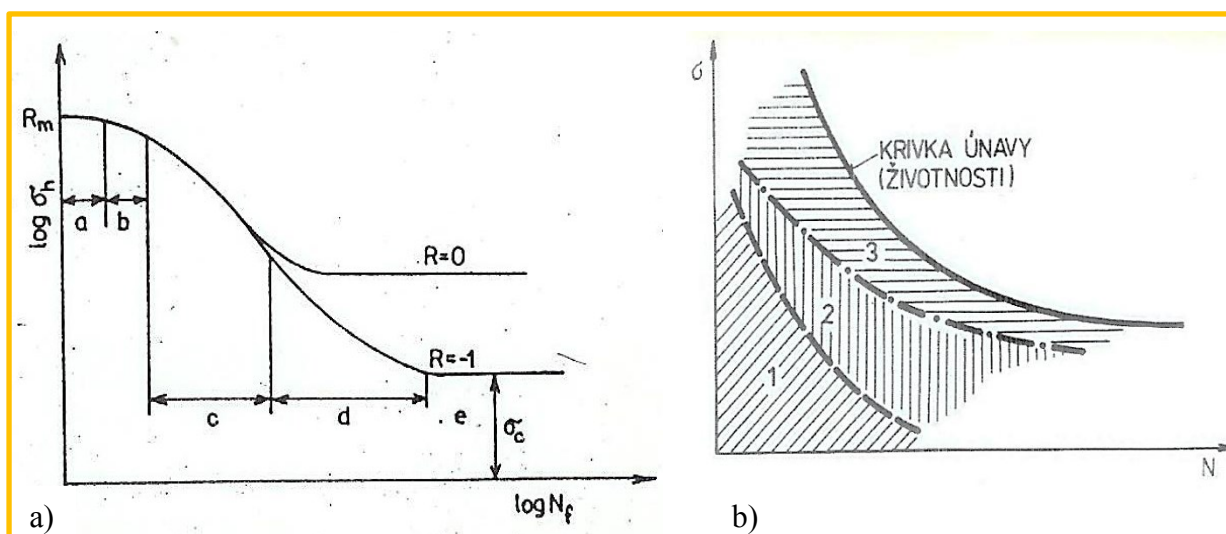
Obr. 3.1. Časový průběh základních typů cyklického namáhání materiálů: a - střídavý (souměrný) cyklus, b - míjivý cyklus, c - náhodné (stochastické) namáhání, střídavé nesouměrné.

Jednou z nejdůležitějších charakteristik únavy je Wöhlerova křivka (též S-N křivka), tj. závislost počtu cyklů do lomu na amplitudě napětí nebo na horním napětí (Obr. 3.2).

Doba do lomu (únavová životnost) je přímo úměrná počtu cyklů do lomu (cyklická životnost) a nepřímo úměrná dané frekvenci zatěžování  $t_f = N_f / f$

Únavový proces zahrnuje tyto etapy:

1. Změny mechanických vlastností
2. Inicie (nukleace)
3. Šíření mikrotrhlin,
4. Šíření (makro)trhlin – stabilní růst
5. Statický dolom – nestabilní růst



Obr. 3.2. Wöhlerova křivka pro střídané a míjivé zatěžování s vyznačením charakteristických oblastí a meze únavy ( $\sigma_c$ ). Oblasti:  $a$  – kvazistatický lom,  $b$  – cyklické tečení ( $R=0$ ),  $c$  – nízko-cyklová únava,  $d$  – vysokocyklová únava (pod mezi kluzu),  $e$  – oblast bezpečných namáhání ( $\sigma < \sigma_c$ ). Etapy rozvoje únavy materiálu: 1 – iniciace, 2 – šíření mikrotrhlin, 3 – šíření trhlin (b).

### 3.2. Změny mechanických vlastností

Změny mechanických vlastností při cyklickém zatížení jsou podmíněny změnami dislokační struktury materiálu, (buňkové struktury, perzistentní skluzová pásma, rovinné řady dislokací).

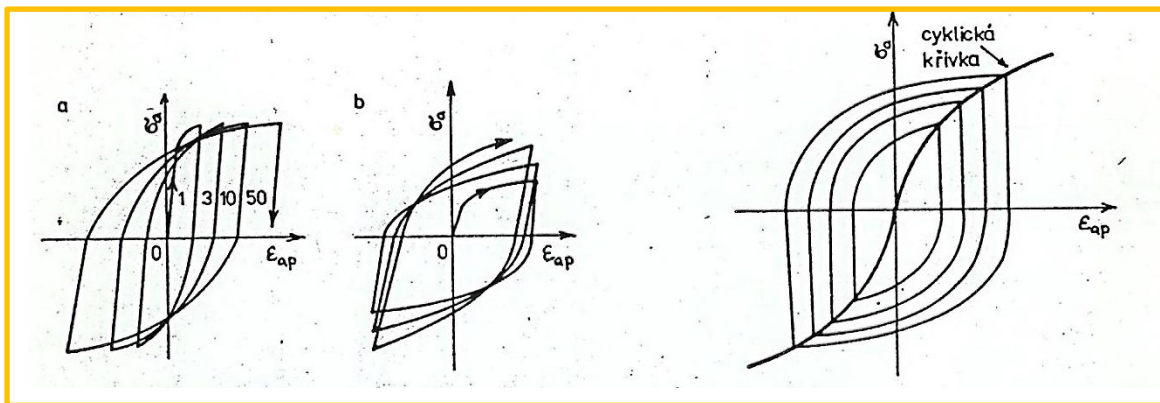
Kovové materiály zpevněné podléhají **cyklickému změkčení**, a naopak materiály změkčené při cyklickém zatížení se zpevňují. Orientačně pro zpevněné konstrukční oceli, když poměr meze pevnosti  $R_m$  k mezi kluzu  $R_p$  je pod 1,2 ( $R_m/R_p < 1,2$ ), nastává cyklické změkčení. Pro oceli měkčí s poměrem  $R_m/R_p > 1,4$  nastává cyklické zpevnění. U materiálu s poměrem v rozmezí 1,2 až 1,4 nelze změny způsobené cyklickým zatížením předvídat. Z hlediska cyklického zpevnění nebo změkčení graficky je možno porovnat tahový diagram (statická deformační křivka) s cyklickou deformační křivkou. K **cyklickému zpevnění** daného

materiálu dochází, když cyklická deformační křivka leží nad statickou, a naopak při cyklickém změkčení je cyklická deformační křivka pod statickou křivkou.

Mezi amplitudou napětí a amplitudou plastické deformace platí vztah

$$\sigma_a = K' \cdot \varepsilon_{ap}^{n'} \quad (3.1)$$

kde  $K'$  je koeficient cyklické pevnosti a  $n'$  je exponent cyklické pevnosti.



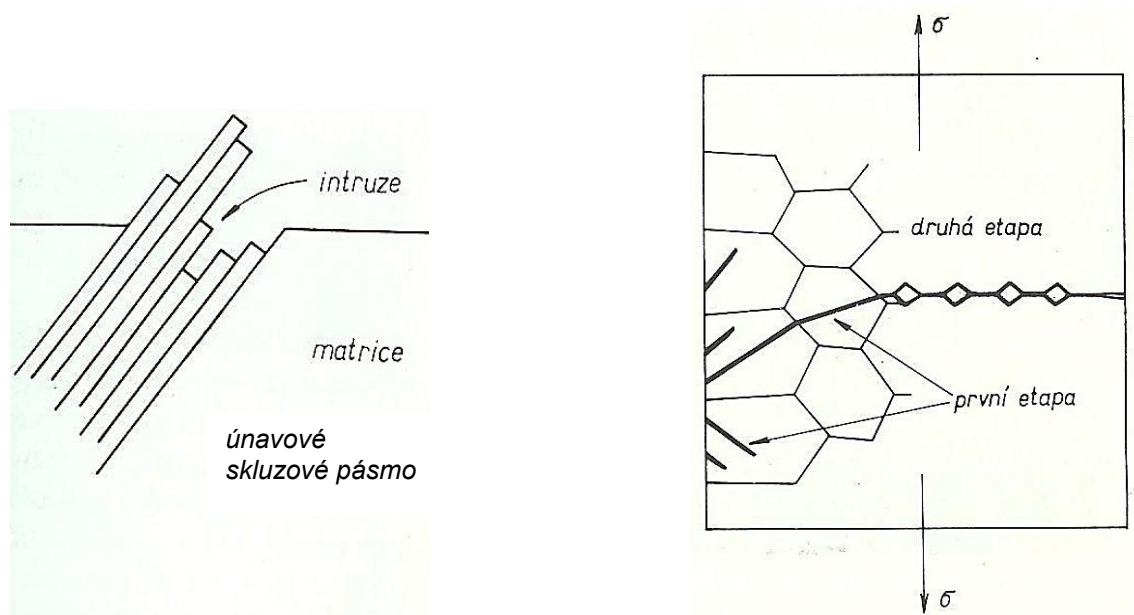
Obr. 3.3. Hysterezní smyčky pro a) měkký cyklus (změkčování materiálu), b) tvrdý cyklus zatěžování (zpevňování materiálu). Stabilizované hysterezní smyčky a cyklická deformační křivka – vpravo.

Při cyklickém střídavém zatížení dochází zpočátku při menším počtu cyklů k posuvu anebo změně tvaru hysterezní smyčky. Po určitém větším počtu cyklů dochází ke stabilizaci velikosti smyček podle amplitudy plastické deformace  $\varepsilon_{ap}$ , viz obr. 3.3. Spojením vrcholů hysterezních smyček dostaneme **cyklickou deformační křivku** (cyklickou křivku zpevnění). Tato křivka je významnou charakteristikou cyklického chování materiálu. Má podobný význam jako tahový diagram při statickém zatížení.

Plocha hysterezní smyčky je úměrná hustotě deformační energie přeměněné v průběhu jednoho cyklu převážně na energii tepelnou. Celková energie absorbovaná v jednotce objemu materiálu roste úměrně s počtem půlcyklů do lomu. Energie adsorbovaná materiálem v jednom zátěžném ustáleném cyklu je dána vztahem  $W_1 = k \cdot \sigma_a \cdot \varepsilon_{ap}$ , kde parametr  $k = f(n')$ .

### 3.3. Inicie únavových trhlin

**Inicie**, tj. proces vzniku únavových trhlin, zpravidla nastává na povrchu materiálu, kde jsou k tomu příhodné podmínky, obr. 3.4 Nerovnosti na povrchu pro obrábění, prohlubně vytvořené korozi jakož i konstrukční vruby nebo vady materiálů způsobují koncentrace napětí. V těchto místech pak snadněji vznikají únavové mikrotrhliny. Únavové trhliny mohou vznikat také uvnitř součástí nebo pod povrchem ve zpevněných anebo vysoko-pevných materiálech, které obsahují vnitřní vyšší koncentrátoři napětí, jako např. ostré vady, hrubé vměstky. Stadium iniciace zahrnuje nukleace mikrotrhlin a jejich propojování.



Obr. 3.4. Představa „kartového“ kluzu v perzistentním skluzovém pásmu. Schéma etap šíření únavové trhliny. Na povrchu je iniciováno několik trhlín, z nichž jedna se dále mohla šířit

V naprosté většině případů iniciace nastává skluzovým procesem na povrchu materiálu, vlivem smykové složky napětí, jejíž maximální velikost je zhruba  $45^\circ$  vzhledem k tahovému napětí, obr. 3.4. Během cyklického zatěžování dochází k pokluzu části materiálů a tvoří se vedle sebe prohlubně do materiálu (**intruze**) a výstupky nad materiál (extruze), viz obr. 3.4. Intruze představují koncentrátoři napětí a jejich prohlubováním se tvoří únavové mikrotrhliny, šířící se podél kluzových rovin. Určitou překážkou pro jejich další šíření představují hranice zrn. V první etapě na povrchu vzniká obvykle řada mikrotrhlín, z nichž největší nebo nejaktivnější procházejí přes hranice zrn a vlivem spolupůsobení smykových a tahových cyklických napětí se postupně stáčí do roviny kolmé na hlavní napětí. Ve druhé etapě je šíření únavových trhlín kolmo na tahové napětí, a je řízeno cyklickou plastickou deformací, způsobenou smykovými složkami napětí sdruženými s tahovým napětím. První etapa šíření bývá v rozmezí 5-10 zrn, podle úrovně a charakteru zatížení. Iniciace a šíření mikrotrhlín může nastat i pod mezí únavy (obr. 3.2), přitom trhliny makroskopických rozměrů zde nevznikají.

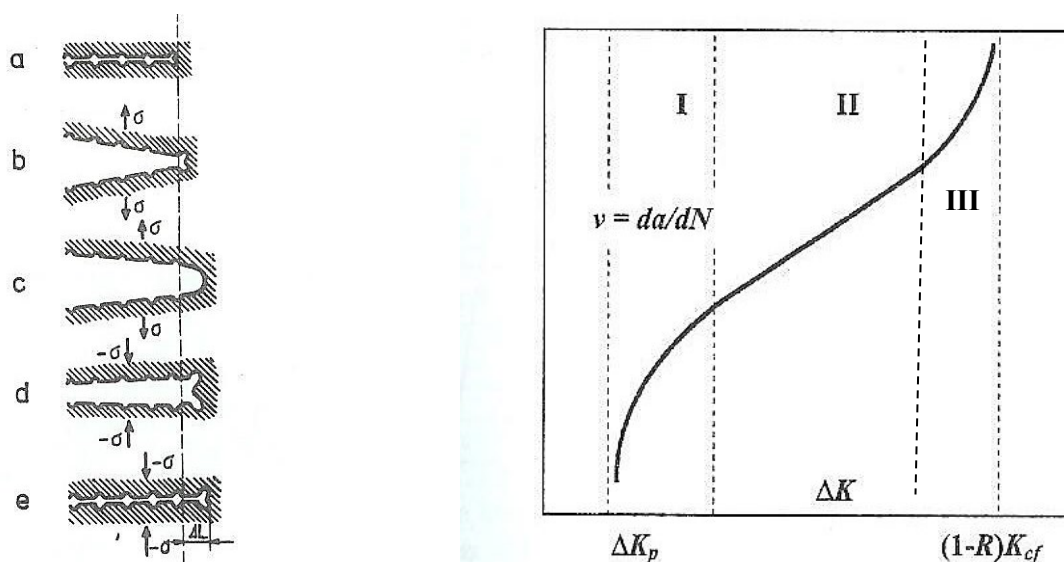
Pro **zamezení iniciace únavových trhlín** se používá několik opatření:

- snížení drsnosti povrchu, (např. jemným obráběním, leštěním),
- vytvoření tlakových pnutí na povrchu (kuličkováním, válečkováním, povrchovým kalením cementací, nitridací),
- zvýšení meze pevnosti, zejména povrchových vrstev, (mez únavy je úměrná pevnosti,  $\sigma_c \approx 0,3 R_m$ , pro střídavý cyklus  $R=-1$ ),
- zvýšení čistoty materiálu,
- snížení koncentrace napětí u konstrukčních vrubů.

### 3.4. Šíření únavové trhliny

Typický mechanismus šíření únavové trhliny prostřednictvím lokální cyklické plastické deformace je představen na obr. 3.5. Při šíření únavové trhliny dochází ke střídavému uzavírání a otevírání trhliny, přitom na povrchu se tvoří **žlábků**, zvané **striace**. Jednomu zátěžnému cyklu odpovídá zpravidla posuv čela trhliny o vzdálenost sousedních žlábků. Pomocí měření rozteče striací můžeme tedy zjistit rychlost šíření trhliny v daném lokálním místě.

Z makroskopického hlediska a podle lomové mechaniky je rychlost šíření únavové trhliny závislá na rozkmitu faktoru intenzity napětí  $\Delta K$  anebo amplitudě faktoru intenzity napětí  $K_a$  ( $\Delta K = 2 \cdot K_a$ ). Na obr. 3.5 je představena obecná závislost rychlosti šíření únavové trhliny  $v = da/dN$  na rozkmitu faktoru intenzity napětí  $\Delta K$ . Podle velikosti  $\Delta K$  a průběhu křivky se rozlišují tři etapy (stadia) rozvoje trhliny. Při velmi nízkých hodnotách  $\Delta K$  pod prahovou hodnotou  $\Delta K_p$  trhliny se nešíří. K šíření únavové (makroskopické) trhliny dochází nad prahovou hodnotou v prvním stadiu (I).



Obr. 3.5. Mechanismus vytváření žlábků ve II. etapě šíření únavové trhliny. Obecná závislost rychlosti šíření únavové trhliny  $v = da/dN$  na rozkmitu  $\Delta K$ .  $K_{cf}$  - lomová houževnatost při cyklickém zatížení. Závislost je zobrazena ve logaritmických stupnicích  $\log \Delta K$ -  $\log v$ .

Pro popis II. etapy stabilního šíření trhliny je používán Parisův vztah:

$$v = da/dN = C(\Delta K)^n, \quad (3.2)$$

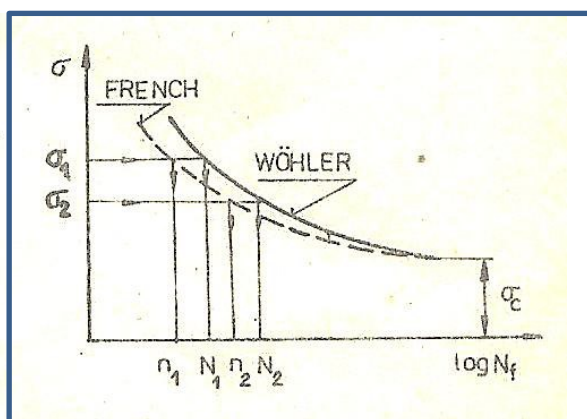
kde  $C$  – materiálová konstanta, parametr  $n = 2-5$ ,  $\Delta K = K_{max} - K_{min}$  rozkmit faktoru intenzity napětí. Přesněji je nutno uvažovat místo  $\Delta K$  efektivní hodnotu rozkmitu  $\Delta K_{ef}$ , vymezenou tahovou částí napětí a působením tlakových pnutí od plastické cyklické zóny. Použití daného vztahu podle lomové mechaniky je možné když plastická zóna na čele trhliny je malá v porovnání s délkou trhliny ( $r_p \leq a/50$ ) a odtud dále plyne  $\sigma_h \leq R_p/3$ .

V oblasti III. stadia dochází ke zrychlení rozvoje šíření únavové trhliny, v souvislosti s přetížením materiálu při snížení zbylého nosného průřezu. Vedle žlábků zde dochází ke vzniku tvárných dutin nebo štěpných fazet, které přispívají ke zrychlenému šíření trhliny ke

kritické velikosti. Při dosažení hodnoty lomové houževnatosti, ovlivněné cyklickým zatížením (v důsledku cyklického zpevnění nebo změkčení materiálu) dochází k nestabilnímu, zpravidla křehkému, lomu.

V první etapě šíření únavových trhlin má velký vliv mikrostruktura, střední napětí a prostředí, které v této etapě pomalého růstu působí delší dobu. Ve druhé etapě se projevuje relativně malý vliv mikrostruktury, středního napětí, prostředí a tloušťky. Ve třetí etapě zrychleného rozvoje trhlin má značný vliv mikrostruktura, střední napětí a tloušťka, přitom prostředí má malý vliv. Vliv teploty není jednoznačný, zpravidla v I. stadiu při zvýšení teploty (vzhledem normální pokojové teplotě) dochází ke snížení prahové hodnoty a zvýšení rychlosti trhliny, naopak ve III. stadiu se zvyšuje hodnota lomová houževnatosti s teplotou a zároveň klesá rychlost šíření trhliny.

**Frenchova křivka** (čára) poškození definuje ukončení iniciace mikrotrhlin do rozměru velikosti zrna po dosažení počtu cyklů  $n_i$ , při cyklickém napětí  $\sigma_i$ . Zjišťuje se dvoustupňovým zatěžováním, nejprve při napětí  $\sigma_i$  se vzorek podrobí vhodnému počtu cyklů  $n_i$  menšímu než by vedl k lomu  $N_i$  ( $n_i < N_i$ ) a ve druhém stupni se napětí sníží na mez únavy  $\sigma_c$ , a v zatěžování se pokračuje až do  $10^7$  cyklů. Pokud se vzorek zlomí, leží bod  $(\sigma_i, n_i)$  za Frenchovou křivkou, když se nezlomí, leží před ní. Podle zjednodušené představy, až do Frenchovy křivky není materiál poškozen.

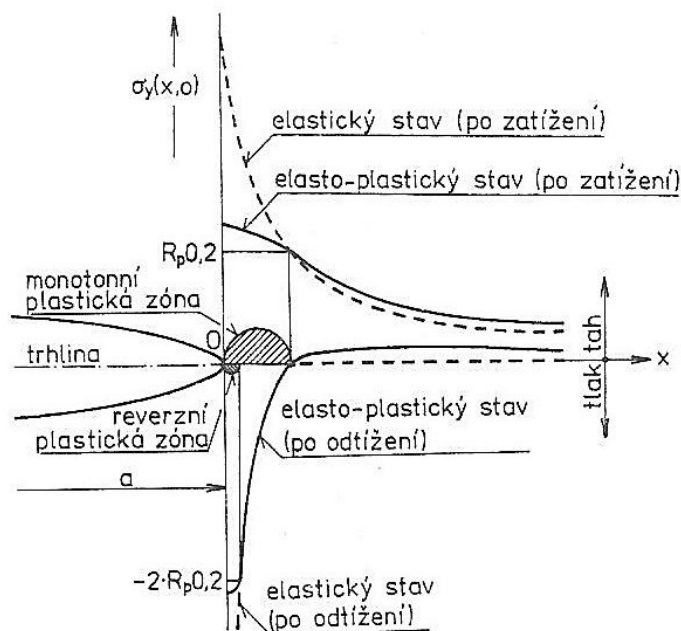


*Obr. 3.6 Porovnání Wöhlerovy a Frenchovy křivky*

Na rozdíl od staticky namáhaných materiálů je plastická zóna únavových trhlin složena z části odpovídající maximálním hodnotám tahového napětí  $\sigma_h$  a z části cyklické, jejíž rozměry jsou asi 4-5 x menší než zóny statické, obr. 3.7. Účinek těchto zón se projevuje na změnách rychlosti šíření trhlin při změnách amplitudy napětí.

Na rychlost šíření únavové trhliny má vliv střídání amplitudy nebo střední hodnoty při cyklickém zatížení. Pokud při stejné střední hodnotě dojde ke snížení amplitudy napětí v blocích velkého počtu cyklů, nastane nejprve výrazné snížení rychlosti šíření trhliny a pak její pozvolný nárůst na hodnotu odpovídající menší amplitudě napětí. Naopak při zvýšení amplitudy napětí dochází k výraznému přechodnému zvýšení rychlosti růstu únavové trhliny,

následované poklesem na hodnotu odpovídající stacionárnímu zatížení vyšší amplitudou. Tyto přechodové změny rychlosti se vysvětluje pomocí **cyklické plastické zóny**, kterou musí procházet trhlina při změnách úrovně napětí.



Obr. 3.7 Porovnání monotónní a reverzní (cyklické) plastické zóny na čele trhliny. Uzavírání čela trhliny z důvodu reverzní plastické zóny vede k zavedení efektivního rozkmitu faktoru intenzity napětí ( $\Delta K_{ef}$ ) při popisu rychlosti šíření únavových trhlin.

Větší plastická zóna při cyklickém zatížení znamená větší otevření trhliny a tím vyšší rychlost šíření trhliny ve tvárném kovovém materiálu (obr. 3.5).

### 3.5. Nízkocyklová únava

Probíhá při amplitudách napětí převyšujících mez kluzu materiálu, počet cyklu do lomu je do  $5 \cdot 10^4$  cyklů. Zpravidla strojní součásti jsou navrhovány tak, aby napětí bylo pod mezí kluzu. V některých oblastech materiálu, jako jsou konstrukční vruby, vady materiálu anebo defekty svarových spojů, může cyklické napětí překročit mez kluzu a objeví se zde cyklická plastická deformace. K vysokým střídavým namáháním některých součástí dochází v letecké technice.

Pro ustálený tvar hysterezní smyčky byly zjištěny empirické vztahy mezi amplitudami elastické a plastické deformace a počtem polocyklů ( $2N_f$ ) do lomu. Jedná se hlavně o **Manson-Coffinův vztah**

$$\epsilon_{ap} = \epsilon_f (2N_f)^c, \quad (3.3)$$

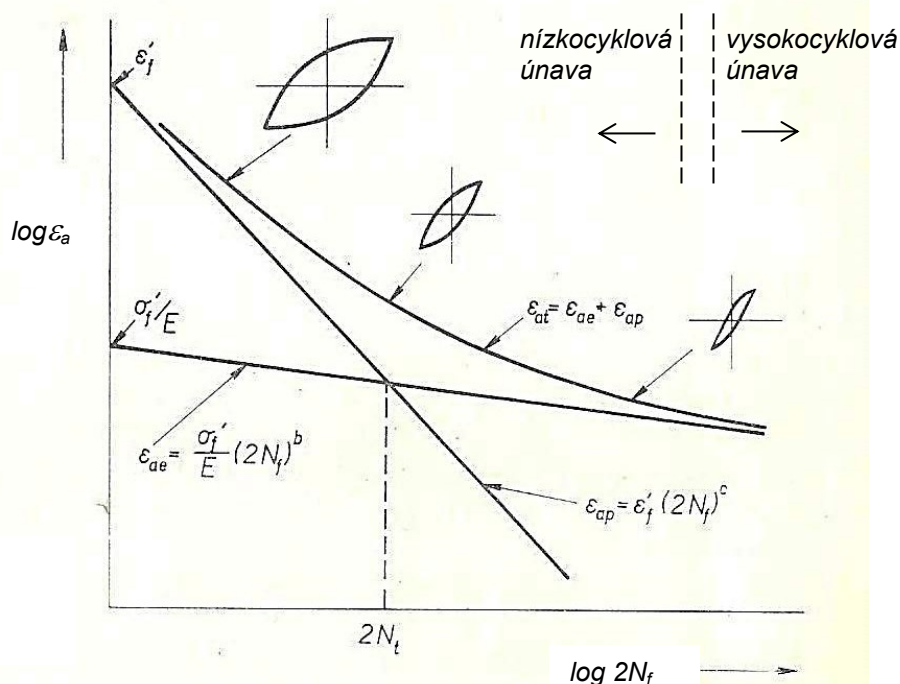
kde  $\sigma_f$  - součinitel únavové pevnosti,  $\epsilon_f$  - součinitel únavové tažnosti,  $c$  exponent únavové tažnosti (součinitel únavové životnosti),  $N_f$  - počet cyklů do lomu. Podobný vztah platí pro amplitudu elastické deformaci  $\epsilon_{ae} = \frac{\sigma_a}{E} = \frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^b$ , kde  $\sigma_f$  je materiálová konstanta zvaná únavová pevnost a  $b$  je exponent únavové pevnosti. Modifikovaný vztah deformačního

kritéria  $N_f^k \Delta \varepsilon_{pl} = C$ , kde  $N_f$  - počet cyklů do poškození,  $k$  - materiálová konstanta,  $C$  - materiálová konstanta (koreluje s odolností proti praskání).

Grafické znázornění a spojení obou vztahů je na obr. 3.8. Pro celkovou deformaci  $\varepsilon_{at}$  platí tedy vztah:

$$\varepsilon_{at} = \varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ap} = \frac{\sigma_a}{E} + \varepsilon_{ap} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c, \quad (3.4)$$

kde  $E$  je modul pružnosti.



Obr. 3.8. Schematický průběh křivek životnosti. Nízkocyklová únava platí přibližně do počtu půlcyklů  $\log 2N_t + (2 \div 3)$ , kde  $N_t$  je průsečík lineárních závislostí v logaritmických stupnicích. Pod  $2N_t$  převládá plastická deformace při únavě, nad  $2N_t$  elastická deformace.

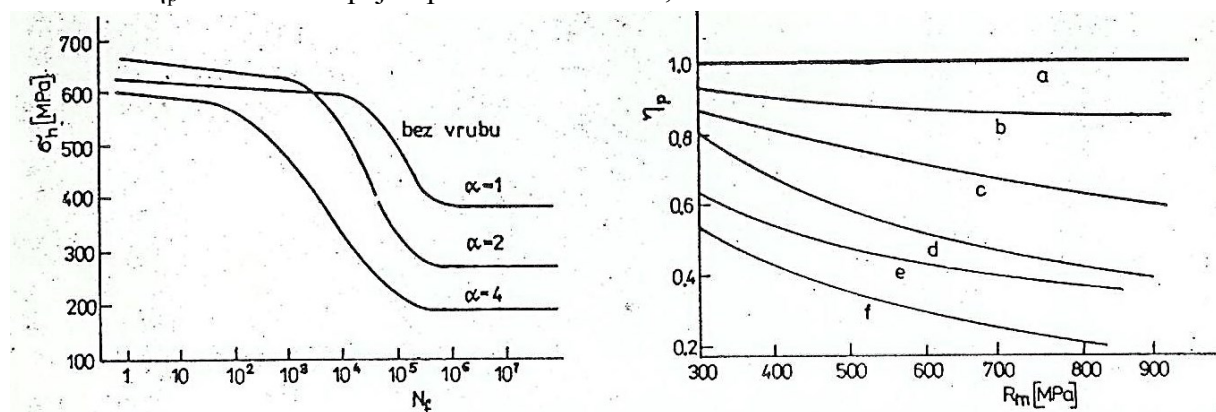
### 3.6. Vlivy vrubů, povrchu, frekvence a středního napětí na únavu

Únavové charakteristiky zpravidla klesají s velikostí koncentrace napětí a se snižováním kvality povrchu, obr. 3.9. Konstrukční vruby řádově snižují únavovou životnost a způsobují značný pokles meze únavy materiálu. Při opracování (obrábění) povrchu se tvoří nerovnosti, zejména stopy po nástroji a prohlubně, které jako koncentrátoři napětí snižují únavové vlastnosti materiálů, resp. součástí. Vlivem koroze na povrchu vznikají rovněž prohlubně anebo důlky, tzn. další koncentrace napětí. Skutečná mez únavy

$$\sigma_{cs} = \eta_p \cdot v_x \cdot \sigma_c / \beta, \quad (3.5)$$

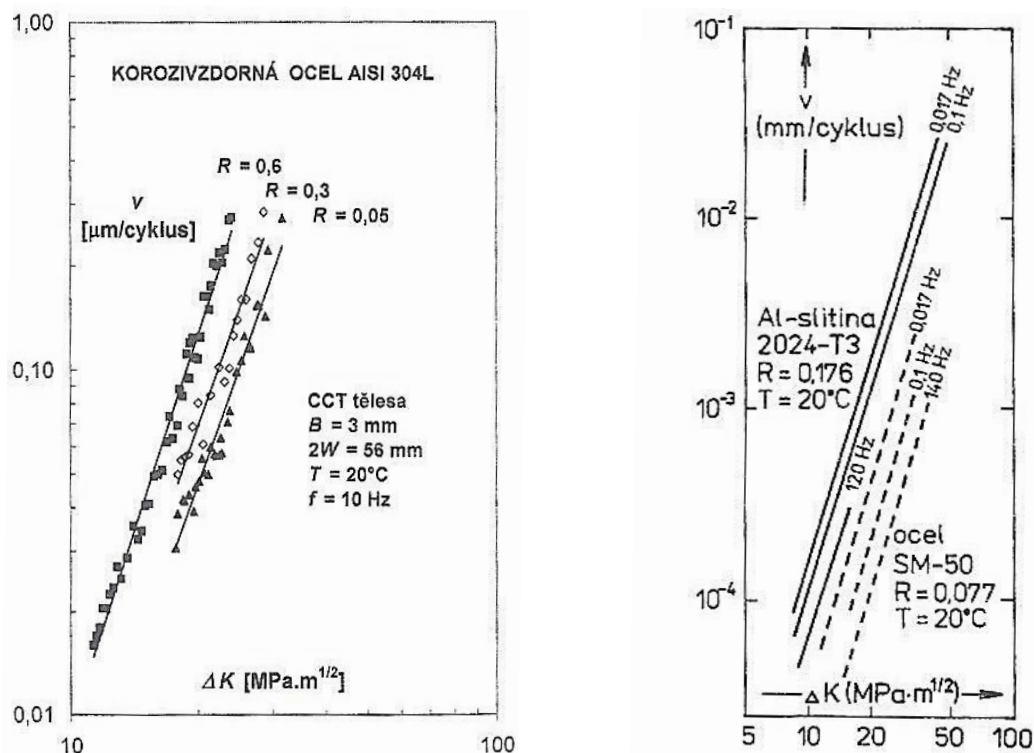
kde  $\sigma_c$  je základní mez únavy (pro válcovitý vzorek o průměru 10 mm s hladkým leštěným povrchem, při souměrně střídavém cyklu zatížení s frekvencí 10 Hz v inertním prostředí,  $\eta_p=1$ ),  $\eta_p$  - součinitel drsnosti povrchu,  $v_x$  - součinitel velikosti (pro ohyb a krut, zohledňuje gradienty napětí),  $\beta$  - součinitel vrubového účinku  $\beta=(\alpha_r-1) \cdot \xi+1$  ( $\xi$ -parametr vrubové citlivosti).

Pro hodnocení jakosti povrchu mají zásadní vliv místní koncentrace napětí, vzniklá po obrábění anebo v důsledku korozního působení vnějšího prostředí, při kterém vznikají rovněž prohlubně a důlky. Pro posouzení vlivu jakosti povrchu na mez únavy materiálu byl zaveden součinitel drsnosti povrchu ( $\eta_p$ ) dle vztahu  $\sigma_{cs} = \eta_p \cdot \sigma_c$ , kde význam  $\sigma_{cs}$  a  $\sigma_c$  je popsán výše. Součinitel  $\eta_p$  klesá se stoupající pevnosti materiálu, obr. 3.9.



Obr. 3.9. Křivky cyklické životnosti pro hladký vzorek a vrubované vzorky z austenitické oceli (vlevo). Závislosti součinitele drsnosti povrchu na mezi pevnosti konstrukčních ocelí: a – leštěno, b – broušeno na drsnost 4  $\mu\text{m}$ , c – na 100  $\mu\text{m}$ , d – okujený povrch, e – povrch ve styku s vodou, f – s roztokem NaCl.

Významné jsou také vlivy asymetrie cyklu ( $R = \sigma_d/\sigma_h$ ) frekvence zatížení ( $f$ ) na šíření únavových trhlin, obr. 3.10.

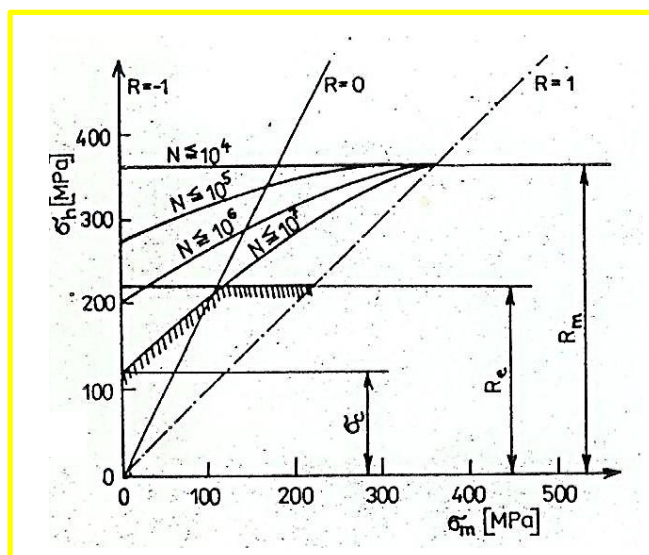


Obr. 3.10. Příklady vlivu asymetrie cyklu  $R$  a frekvence  $f$  [Hz] na rychlosti šíření trhliny  $S$  rostoucím součinitelem asymetrie cyklu stoupá střední hodnota napětí ( $\sigma_m$ ) při daném rozkmitu napětí ( $\Delta\sigma = 2 \cdot \sigma_a$ ,  $\Delta K = \Delta\sigma \sqrt{\pi a} Y$ ). S rostoucí frekvencí rychlost únavové trhliny  $v = da/dN$  (v jednotce  $\mu\text{m}/\text{cyklus}$ ) obecně klesá, naopak rychlost  $v = da/dt$  ( $\mu\text{m}/\text{s}$ ) stoupá

Vliv střední hodnoty cyklu, resp. statické složky napětí na mez únavy nebo cyklickou životnost materiálu znázorňuje graficky **Smithův diagram**, obr. 3.11.

Diagram je aplikován pro strojní součásti, šrouby, svary, úpravy povrchu apod. hlavně pro posouzení vlivu tahové statické složky napětí, působící ve směru cyklické složky.

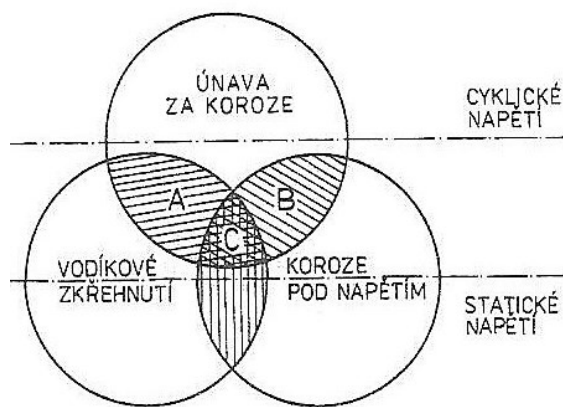
Pro sestrojení zjednodušeného diagramu je nutno znát hodnotu meze únavy při střídavém souměrném cyklu ( $R = -1$ ), mez kluzu ( $R_e$ ) a mez pevnosti ( $R_m$ ). Pro přesnější sestrojení diagramu je třeba také uvažovat mez únavy při mívivém cyklu ( $R=0$ )



Obr. 3.11. Smithův diagram nízkouhlíkové nelegované oceli (11373), doplněný křivkami cyklické životnosti.

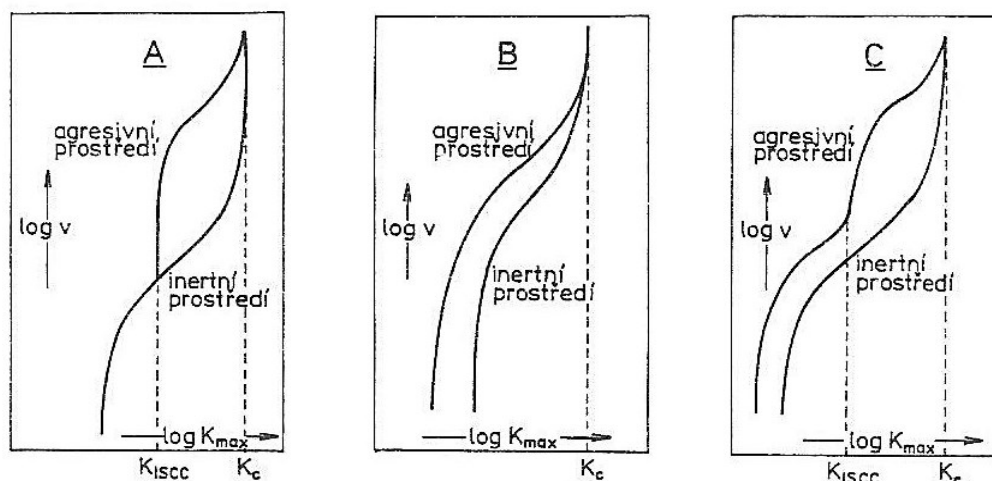
### 3.7. Vliv korozního prostředí

Vlivem korozního prostředí dochází obvykle ke zkrácení únavové životnosti a snížení meze únavy, přesněji časované meze únavy. Obecné schéma vzájemného působení korozního prostředí a mechanického (statického anebo cyklického) napětí je uvedeno na obr. 3.12.



Obr. 3.12. Schématické znázornění mechanismů porušení v případech současného působení mechanického napětí a agresivního prostředí

Základní možnosti zvýšení rychlosti šíření únavových trhlin v korozním prostředí jsou znázorněny na obr 3.13., v návaznosti na označení možností A,B,C na obr. 3.12. V prvním případě (A) rychlost šíření únavové trhliny je ovlivněna prostředím až nad prahovou hodnotou  $K_{ISCC}$  pro korozní praskání za napětí. Ve druhém případě (B) agresivní prostředí snižuje prahovou hodnotu amplitudy faktoru intenzity napětí  $K_{ap}$  (pro čistě mechanickou únavu) a zvyšuje rychlost šíření trhliny v celém rozsahu  $K_a$ , resp.  $K_{max}$  (obr. 3.13 b), představuje vlastní korozní únavu. Třetí případ (C) je určitou superpozicí dvou předchozích.



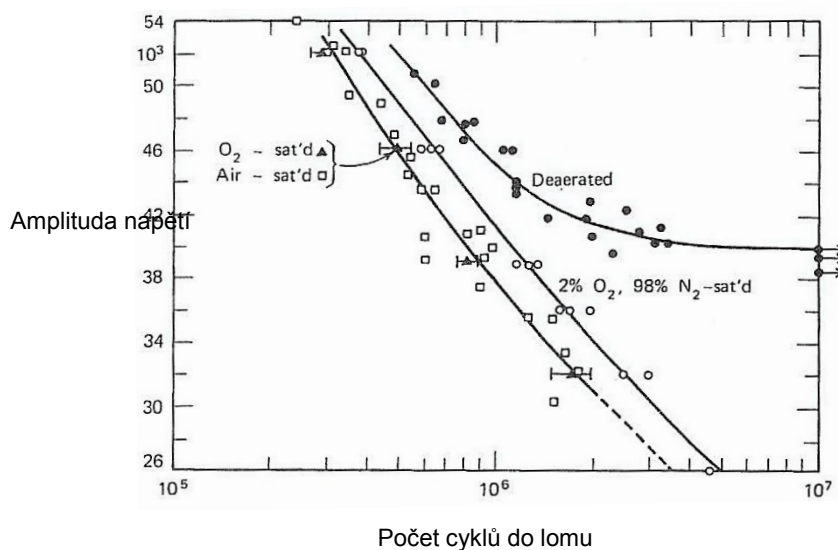
Obr. 3.13 Kombinace mechanické únavy s korozním prostředím na zvýšení rychlosti trhlin  
 A – Vliv korozního praskání, resp. vodíkového zkrěhnutí na šíření únavových trhlin  
 B – Vlastní korozní únava materiálu (interakce vlivů)  
 C – Kombinace uvedených mechanismů.

V tab. 3.1 jsou pro srovnání uvedeny lomové houževnatosti  $K_{Ic}$  konstrukčních materiálů, a **prahových hodnot pro stabilní rozvoj trhlin** za asistence korozního prostředí  $K_{IEAC}$  (EAC – environmental assisted cracking). Zobecněné označení  $K_{IEAC}$  zahrnuje korozní praskání ( $K_{ISCC}$ ) nebo vodíkové praskání ( $K_{IHIC}$ , anebo sirovodíkové  $K_{ISH}$ ). Problematika korozního praskání a vodíkové křehkosti je zde jen nastíněna, náležitě a podrobněji je uvedena v jiných předmětech a monografiích.

Tab. 3.1 Příklady kritických hodnot  $K_{IEAC}$  pro vybrané materiály a některá prostředí

| Materiál                 | Prostředí   | $R_{p0,2}$<br>[MPa] | $K_{Ic}$<br>[MPa.m <sup>1/2</sup> ] | $K_{IEAC}$<br>[MPa.m <sup>1/2</sup> ] |
|--------------------------|-------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Al-slitina 2024-T351     | 3,5% NaCl   | 325                 | 55                                  | 11                                    |
| Al-slitina 2024-T852     | mořská voda | 370                 | 19                                  | 15                                    |
| Al-slitina 7075-T6       | 3,5% NaCl   | 505                 | 25                                  | 21                                    |
| Al-slitina 7075-T7351    | 3,5% NaCl   | 360                 | 26                                  | 23                                    |
| Ocel 18Ni(300)-maraging  | roztok NaCl | 1 960               | 80                                  | 8                                     |
| CrNiMo ocel 4340         | roztok NaCl | 1 335               | 79                                  | 9                                     |
| Korozivodorná ocel 300M  | 3,5% NaCl   | 1 735               | 70                                  | 22                                    |
| Ti-slitina Ti-6Al-4V     | 3,5% NaCl   | 890                 | 99                                  | 45                                    |
| Ti-slitina Ti-8Al-1Mo-1V | 3,5% NaCl   | 745                 | 123                                 | 31                                    |
| Ti-slitina Ti-8Al-1Mo-1V | voda        | 855                 | 105                                 | 29                                    |

Vlivy vybraných prostředí (odvzdušněná voda, voda nasycená 98% N<sub>2</sub> + 2% O<sub>2</sub>, voda nasycená vzduchem a kyslíkem) na křivky únavové životnosti jsou znázorněny na obr. 3.14.



Obr. 3.14 Vliv rozpuštěného kyslíku v roztoku 3% NaCl při 25°C, na únavové chování oceli (0,18%C).

Obecně platí, čím vyšší je korozní agresivita prostředí, tím nižší jsou hodnoty parametrů únavové pevnosti a životnosti ve srovnání s inertním prostředím.

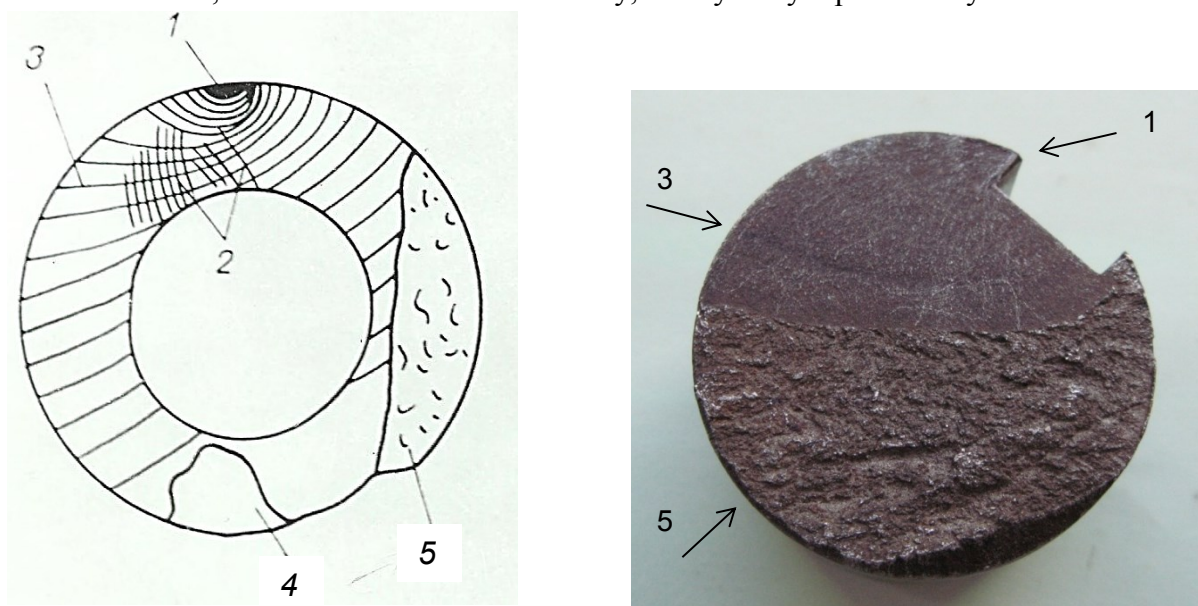
### 3.8. Fraktografie únavových lomů

Podle účelu výzkumu a použité techniky pozorování se fraktografie únavových poškození rozdělila do tří samostatných směrů:

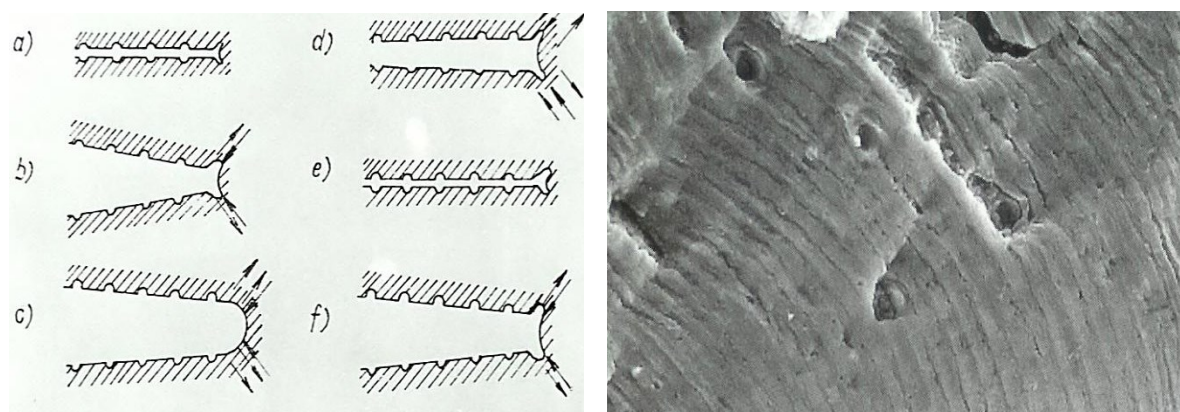
- Fraktografie šíření únavové trhliny, která zkoumá některé aspekty únavového poškození z hlediska kinetiky jeho rozvoje. Tato informace má praktický význam, neboť umožňuje posoudit nebezpečí vzniku anebo šíření trhliny, která může vést až k lomu a havárii.
- Makrofraktografie** poskytuje integrální obraz o lomovém procesu na základě makroskopických znaků lomové plochy (obr. 3.15), viditelných pouhým okem, pomocí lupy anebo světelného mikroskopu (stereomikroskopu) se zvětšením maximálně 100 x.
- Mikrofraktografie** studuje lomovou plochu při vysokém zvětšení a získává informace o mechanismu porušování a materiálu na základě mikroskopických stop, jako jsou únavové žlábký, polohy hranic zrn a kluzových rovin vzhledem na trhlínu, obr. 3.16

Povrch konečného nestabilního lomu (dolomu) je obvykle členitější a drsnější ve srovnání s oblastí stabilního šíření únavové trhliny, která se vyznačuje hladším povrchem (obr. 3.15). Fraktografické hodnocení únavových lomů se používá k výzkumným účelům a pro stanovení příčin poškození dílců v provozu. Podle makroskopického fraktografického rozboru je možno

zjistit kvalitativně úroveň zatížení, v některých případech i typ zatížení (tah, ohyb, krut, apod.) anebo úroveň koncentrátorů napětí. Zjednodušeně a logicky platí: čím větší je plocha konečného lomu, tzn. kratší kritická délka trhliny, tím vyšší bylo působící cyklické namáhání.



Obr. 3.15. Schéma únavového lomu s typickými znaky: 1 – iniciace a pásmo počátku (ohniska) lomu, 2 – sekundární stupínky a lemy, 3 – únavové (postupové) čáry, 4 – pásmo urychleného rozvoje lomu, 5 – pásmo dolomení. Hřídel Ø45 mm s drážkou, porušení únavovým lomem.



Obr. 3.16. Geometrické změny u vrcholu únavové trhliny během jednoho deformačního cyklu: a) nulové zatížení, b) malé tahové zatížení, c) maximální tahové zatížení, d) malé tlakové zatížení, e) maximální tlakové zatížení, f) malé tahové zatížení.

Typické mikroskopické striace (žlábkky) na lomovém povrchu. Stopy po částicích nebo jejich protínání únavovou trhlinou.

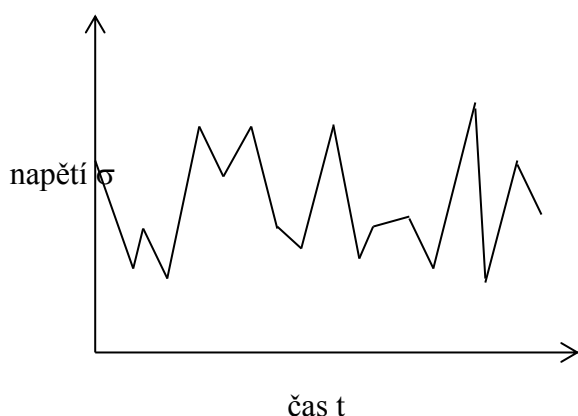
### 3.9. Odhady únavové životnosti

Po vzniku růstu schopné trhliny lze míru degradace či poškození definovat vztahem  $D = \frac{l}{l_f}$ , kde  $l$  je délka trhliny a  $l_f$  je kritická délka, při níž dojde k lomu tělesa.

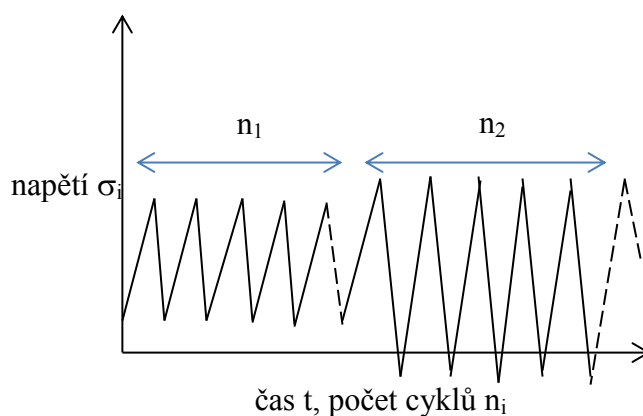
Pro většinu součástí je cyklické zatížení v průběhu jejich životnosti charakterizováno několika úrovněmi amplitudy ( $\sigma_a$ ) anebo několika středními hodnotami napětí ( $\sigma_m$ ). Např. vozidlo jezdící po nekvalitní vozovce tam a zpět (do práce a domů), s jednou, dvěma či více osobami. Nebo různě naložené vagóny vyvolávají rozdílné amplitudy střídavých napětí.

Průběhy napětí lze sdružit do vhodných bloků, charakterizovaných napětím ( $\sigma_{ai}$ ,  $\sigma_{mi}$ ) a počtem cyklů ( $n_i$ ).

V praxi převažují náhodné způsoby zatěžování (4/5 případů), náhodné průběhy zatížení se převahou určitých rozkmitů a středních hodnot napětí lze nahradit ekvivalentními bloky cyklických napětí, charakterizovanými svými počty cyklů při stejném cyklickém zatížení.



Obr. 3.17. Náhodný průběh zatížení



Obr. 3.18. Schéma zatížení po blocích cyklů  $n_i$

Z hlediska cyklické životnosti je vhodné uvažovat počty zátěžných cyklů  $n_i$  k celkovému počtu cyklu do lomu  $N_f$  na dané úrovni zatížení podle Wöhlerovy křivky (zpravidla pro pravděpodobnost lomu 50% nebo 5%). Poměrnou životnost (míru degradace) lze pak charakterizovat jako  $D_i = n_i/N_f$ , takže pro  $n_i = N_f$  lom nastane při  $D_i = 1$ .

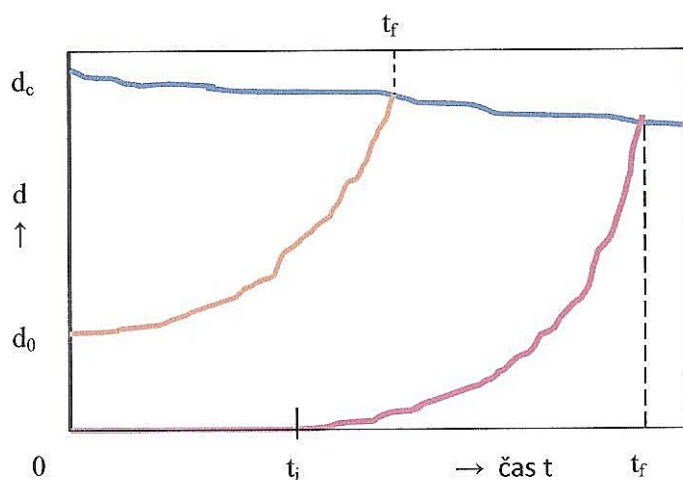
Sečteme-li dílčí poškození na jednotlivých hladinách lineárně, dostaneme poměrnou degradaci  $D = \sum_1^k D_i$ , neboli

$$D = \sum_1^k \left( \frac{n_i}{N_i} \right), \quad (3.6)$$

a v případě lomu při posledním počtu cyklů  $n_k$  by mělo teoreticky platit  $\sum_1^k \left( \frac{n_i}{N_i} \right) = 1$ . Výsledky ze zkoušek a praxe však ukazují, že tento součet je u různých materiálů a průběhů bloků cyklů v rozmezí 0,2 – 5.

K popisu kumulace únavového poškození vznikla celá řada hypotéz, jejichž výsledky nejsou spolehlivé. V praxi se dosud používá jednoduchá hypotéza, že poškození způsobené v každém cyklu (nad určitou mezí) lze lineárně sčítat. Tato jednoduchá koncepce **lineární kumulace únavového poškození** se nazývá Palmgren-Minerovou hypotézou.

Při použití defektoskopických metod pro sledování velikosti defektů a poznatků o mírném poklesu lomových parametrů v závislosti na čase lze do jisté míry predikovat také životnost pomocí závislosti na obr. 3.19. Pokud daný materiál neobsahuje na počátku defekty, pak doba iniciace trhliny (detekovatelné délky) je  $t_i$  a celková doba životnosti ( $t_f$ ) se zřejmě prodlužuje. V případě existence **apriorní vady** o počáteční délce ( $d_0$ ) dochází k výraznému poklesu životnosti dílce. Nelineární trendy v závislostech délky trhliny na čase se promítají také do nelineárních, často mocninných, vztahů pro výpočet kumulace poškození. Náhodné průběhy zatížení a provozních podmínek se projeví na uvedených křivkách jako určité nepravidelnosti či náhodné změny růstu délky defektu, resp. poklesu jeho kritické velikosti. Při zpracování výsledků ze zkoušek a měření na zařízeních a pro predikci životnosti jsou používány statistické metody.



Obr. 3.19. Souvislosti mezi délkou únavové trhliny ( $d$ ) a její kritickou délkou ( $d_c$ ) v materiálu. Doba iniciace ( $t_i$ ), doba do lomu ( $t_f$ ), počáteční délka defektu ( $d_0$ ).

Podobné závislosti jako pro únavové poškození (obr. 3.19) lze uvažovat i pro některé lokální druhy koroze, případně další degradační procesy, popsané v navazujících kapitolách.



### Shrnutí pojmů kapitoly 3

Po prostudování této kapitoly měly by Vám být jasné následující pojmy, vztahy a závislosti: **Cyklické zatížení, amplituda napětí, rozkmit napětí, součinitel asymetrie cyklu, Wöhlerova křivka, únavová pevnost, mez únavy, cyklická životnost, cyklické zpevnění, cyklické změkčení, cyklická deformační křivka, stadium iniciace, intruze, extruze, cyklická plastická deformace, šíření trhlin, striace, Parisův vztah, nízkocyklová a vysokocyklová únava, Manson-Coffinův vztah, Frenchova křivka, Smithův diagram, součinitel drsnosti povrchu, součinitel vrubového účinku, korozní únava, prahové hodnoty pro šíření trhlin, kumulace únavového poškození, hypotézy.**



### Otázky ke kapitole 3

- 3.1. Jak se mohou měnit pevnostní vlastností kovových materiálů při cyklickém zatěžování?
- 3.2. Jak vznikají intruze a extruze při střídavém namáhání kovových materiálů?
- 3.3. Jaké znáte způsoby omezení anebo potlačení iniciace únavového porušení?
- 3.4. Čím je charakterizována nízkocyklová únava?
- 3.5. Stručně vysvětlíte rozdíl mezi únavovými striacemi a postupovými čarami z hlediska velikosti a původu.
- 3.6. Na čem závisí rychlost šíření únavových trhlin v kovových materiálech?
- 3.7. Uveďte hlavní činitele, které mohou způsobit rozptyl hodnot únavové životnosti.
- 3.8. Pro jaké výpočty se používá Parisův vztah? Uveďte možnosti použití a omezení tohoto vztahu.
- 3.9. Jak se mění rychlost šíření únavové trhliny s frekvencí zatěžování?
- 3.10. Jak korozní prostředí ovlivňuje únavové charakteristiky materiálu?



### Úlohy ke kapitole 3

- 3.1. Zkouška únavy byla provedena při středním napětí 70 MPa a amplitudě napětí 210 MPa.
  - a) Vypočtete maximální a minimální úroveň napětí.
  - b) Vypočtete součinitel asymetrie cyklu R.
  - c) Vypočtete velikost rozkmitu napětí.
- 3.2. Údaje z únavové zkoušky určité oceli jsou dány v tabulce:

|                  |        |                 |        |                 |        |                 |        |        |
|------------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|--------|
| $\sigma_a$ [MPa] | 470    | 440             | 390    | 350             | 310    | 290             | 290    | 290    |
| $N_f$ [1]        | $10^4$ | $3 \times 10^4$ | $10^5$ | $3 \times 10^5$ | $10^6$ | $3 \times 10^6$ | $10^7$ | $10^8$ |

- a) Sestrojte S-N křivku (část Wöhlerovy křivky) použitím uvedených údajů
  - b) Jaká je mez únavy pro tuto křivku, resp. ocel?
  - c) Stanovte únavové životnosti při amplitudě napětí 415 MPa a 275 MPa.
  - d) Odhadněte únavovou pevnost při  $2 \times 10^4$  a  $6 \times 10^5$  cyklech.
- 3.3. Pevnost v tahu oceli je 1200 MPa a mez únavy při střídavém souměrném namáhání je 550 MPa. Tyč z dané oceli má být namáhána statickým napětím 600 MPa a zároveň amplitudou cyklického napětí 350 MPa. Sestrojte vhodný diagram a zdůvodněte, zda tyč bude poškozena únavovým procesem.
- 3.4. V oceli 1CrMoV pro výrobu rotorů energetických zařízení byla experimentálně zjištěna rychlost šíření únavové trhliny podle vztahu:  $\frac{dc}{dN} = 7,7 \cdot 10^{-12} \cdot \Delta K_I^3$ .  
Vypočtete přibližně cyklickou zbytkovou životnost dílce, když pomocí defektoskopie byla zjištěna na povrchu válcovitého rotoru polo-eliptická trhlina o hloubce 5 mm a šířce 20 mm, ležící v rovině procházející osou rotoru. Prahová hodnota rozkmitu faktoru intenzity

napětí je  $\Delta K_{Ith} = 5,0 \text{ MPa m}^{1/2}$  a lomová houževnatost této oceli je  $115 \text{ MPam}^{1/2}$ , nominální střídavé ohybové napětí je 90 MPa.

3.5. Popište lom součásti podle obrázku níže (měřítko 1:1), včetně možné příčiny porušení.



3.6. Jak se změní mez únavy ocelové tyče s pevností  $R_m = 500 \text{ MPa}$ , která má rezavý povrch se součinitelem drsnosti povrchu  $\eta_p = 0,7$ , když se tyč přebrousí a součinitel drsnosti povrchu dosáhne hodnotu  $\eta_p = 0,85$  (obr. 3.9). Základní mez únavy této oceli má hodnotu  $\sigma_c = 150 \text{ MPa}$ .

♦ **Řešení:** Je-li mez únavy ocelové tyče s leštěným povrchem  $\sigma_c = 150 \text{ MPa}$  ( $\eta_p \approx 1,0$ ), pak pro méně kvalitní, drsnější povrch je skutečná mez únavy nižší  $\sigma_{cs} = \eta_p \cdot \sigma_c$ , kde součinitel drsnosti povrchu  $0 < \eta_p \leq 1$ . Pro zkorodovaný povrch  $\sigma_{cs} = 0,7 \cdot 150 = 105 \text{ MPa}$ , pro broušený  $\sigma_{cs} = 0,85 \cdot 150 = 127,5 \text{ MPa}$ . Po broušení mez únavy se tedy zvýší o 22,5 MPa, tj. o 21%.

3.7. Hřídel kruhového průřezu o průměru  $d = 15 \text{ mm}$  s půlkruhovým obvodovým vrubem o poloměru zaoblení  $\rho = 1,0 \text{ mm}$  je namáhána střídavým ohybovým napětím 200 MPa. Jaká je skutečná mez únavy této hřídele, jestliže je její povrch leštěný ( $\eta_p = 0,95$ ) a součinitel velikosti pro ohybové namáhání má hodnotu  $v_x = 1,5$ .

♦ **Řešení:** Pro hřídel s půlkruhovým obvodovým vrubem (drážkou) je součinitel koncentrace napětí  $\alpha = 3$  (obr. 2.3) a součinitel vrubového účinku  $\beta = (\alpha_r - 1) \xi + 1 = 2,4$ , kde parametr vrubové citlivosti pro ocel ( $\xi = 0,7$ ). Pro zadané hodnoty  $\sigma_{cs} = \eta_p \cdot v_x \cdot \sigma_c / \beta = 0,59 \sigma_c$ .

Mez únavy dané hřídele bude asi 60% ze základní meze únavy  $\sigma_c$  (pro leštěnou hladkou tyč o stejném průměru, zatěžovanou ve střídavém tahu-tlaku). Zadané ohybové napětí 200 MPa se vztahuje na stejnou hřídel v místech bez vrubu. Toto napětí se nerovná mezi únavy  $\sigma_c$  (jejíž hodnota nebyla v rámci příkladu zadána).

- 3.8. Stanovte dobu do lomu ocelové desky o šířce 200 mm a tloušťce 3,0 mm, ve které je centrální trhlina o délce 10 mm. Lomová houževnatost oceli je  $K_{Ic} = 48 \text{ MPam}^{1/2}$  a mez kluzu  $Re = 1400 \text{ MPa}$ . Deska je zatěžována mívající silou  $F_{\max} = 80 \text{ kN}$  s frekvencí 3,0 Hz. Předpokládáme, že únavová trhlina se šíří z výchozí centrální trhliny podle Parisova vztahu s konstantami  $C = 10^{-10} \text{ MPa}^{-3} \text{ m}^{-1/2}$  a  $n = 3,0$ .

#### ♦ Řešení

Počáteční trhlina je relativně krátká ve srovnání se šířkou vzorku ( $2a/W = 10/200 = 0,05$ ), takže geometrický faktor  $Y = 1$ . Maximální, horní napětí je  $\sigma_h = F_{\max}/S = 80 \cdot 10^3 / 200 \cdot 3 = 133 \text{ MPa} = 0,095 \cdot Re$ . Minimální, dolní napětí je  $\sigma_d = 0$ . Únavová trhlina se bude šířit stabilně od počáteční délky  $a_o = 5,0 \text{ mm}$  (na obě strany) do kritické délky  $a_c$ , kterou vypočteme z rovnice pro  $K_{Ic}$ :  $K_{Ic} = \sigma_h \sqrt{\pi a_c} \cdot Y$ , pro zjednodušení výpočtu předpokládáme  $Y = 1$  (jinak  $Y = f(a/W)$  a výpočet je složitější). Pak kritická délka trhliny  $a_c = 41,3 \text{ mm}$ .

Podle Parisova vztahu:  $da/dN = C \cdot \Delta K^n$  je formálně  $dN = \frac{da}{C \cdot \Delta K^n}$  a životnost vypočteme pomocí integrálů z obou stran. Integrační meze zvolíme tak, aby počáteční délce trhliny  $a_o$  odpovídal nulový počet cyklů  $N_o = 0$ , a kritické konečné délce únavové trhliny  $a_c$  pak odpovídal počet cyklů  $N_c$ , tj. cyklická životnost.

$N_c = \int_0^{N_c} dN = \int_{a_o}^{a_c} \frac{da}{C \cdot \Delta K^n}$ , kde rozkmit  $\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \cdot Y = \sigma_h \cdot \sqrt{\pi a} \cdot Y$ , po úpravě dostaneme  $N_c = \frac{1}{C(\Delta \sigma \sqrt{\pi})^n} \int_{a_o}^{a_c} \frac{da}{(\sqrt{a} Y)^n}$ . Pro zjednodušení výpočtu  $Y = 1$  (nebo  $Y = \text{konst.}$ )

$$1) \text{ a pro zadané } n = 3,0 \text{ dostaneme } N_c = \frac{1}{C(\Delta \sigma \sqrt{\pi})^3} \int_{a_o}^{a_c} \frac{da}{(\sqrt{a})^3} = \frac{1}{C(\Delta \sigma \sqrt{\pi})^3} \left[ \frac{1}{\sqrt{a_o}} - \frac{1}{\sqrt{a_c}} \right].$$

Po dosazení a numerickém výpočtu  $N_c = 13970$  cyklů. Doba do lomu  $t_f = N_c/f = 77,6 \text{ min}$ .

Poznámka: Přesnější výpočet kritické délky trhliny s přihlédnutím k funkci  $Y = f(a)$  vede k výsledku  $a_c = 34,9 \text{ mm}$  a pro střední hodnotu  $Y = 0,5 \cdot (Y(a_o) + Y(a_c)) > 1$  dostaneme přibližně  $N_c = 12500$  cyklů. Tvarovou funkci (tvarový faktor) lze zde použít ve tvaru:  $Y = Y\left(\frac{a}{W}\right) = 1 + 0,128\left(\frac{a}{W}\right) - 0,288\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 1,525\left(\frac{a}{W}\right)^3$ , platí pro  $a/W \leq 0,7$  s přesností 0,5 %.

- 3.9. Prahová hodnota  $\Delta K_p$  klesá s rostoucím  $R$  podle vztahu  $\Delta K_p = (1-R)^\gamma \Delta K_{po}$ , kde  $\gamma$  je parametr závislý na materiálu a na prostředí ( $0 < \gamma < 1$ , např. pro perlitické oceli  $\gamma = 0,93$ , pro oceli s vysokou pevností  $\gamma = 0,71$ , pro martenzitické oceli  $\gamma = 0,53$ , v suchém vzduchu).

Pro perlitickou ocel vypočítejte prahovou hodnotu rozkmitu faktoru intenzity napětí  $\Delta K_p$  pro asymetrii cyklu  $R = 0,9$  a hodnotu  $\Delta K_{po}$ , když  $\Delta K_p = 4,0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  pro  $R = 0,7$ . Jaký je význam parametru  $\Delta K_{po}$ .

- 3.10. Která ze dvou modifikací tepelného zpracování oceli CrNiMo17-12-2 (17 341): A – 1050°C/1h/voda a B – 1050°C/1h/voda má vyšší odolnost proti nízkocyklové únavě,

když závislosti amplitudy celkové deformace ( $\epsilon_a$ ) na počtu cyklů do lomu ( $N_f$ ) mají tvary:

$$\epsilon_{aA} = 1,43 \cdot N_f^{-0,245} + 49,1 \cdot N_f^{-0,548}; \quad \epsilon_{aB} = 0,60 \cdot N_f^{-0,151} + 31,0 \cdot N_f^{-0,500}; \quad \epsilon_a = \epsilon_{ae} + \epsilon_{ap} = f(N_f)$$

- ♦ **Řešení:** Při porovnání modifikací tepelného zpracování z hlediska odolnosti proti únavě je vhodné sestavit tabulku vypočtených hodnot, případně nakreslit grafické závislosti:

| $N_f$           | $10^2$ | $10^3$ | $10^4$ | $10^5$ | $10^6$ |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\epsilon_{aA}$ | 4,40   | 1,38   | 0,465  | 0,175  | 0,0737 |
| $\epsilon_{aB}$ | 3,40   | 1,19   | 0,459  | 0,204  | 0,1060 |

Proti nízkocyklové únavě ( $10^2$ - $10^4$  cyklů) má vyšší odolnost varianta A.



### Test ke kapitole 3

- Součinitel asymetrie cyklu je definován vztahem  
a)  $\sigma_h/\sigma_d$ ,    b)  $\sigma_h/\sigma_d$ ,    c)  $\sigma_a/\sigma_m$
- Cyklické zpevňování je typické pro oceli a slitiny  
a) kalené,    b) popouštěné,    c) žíhané
- Při cyklickém změkčování za podmínky  $\sigma_a = \text{konst.}$  amplituda plastické deformace s počtem cyklů :  
a) stoupá,    b) klesá,    c) zůstává stejná
- Při iniciaci únavových mikrotrhlin v kovech je rozhodující cyklické:  
a) tahové napětí,    b) smykové napětí,    c) elastická energie
- Ve druhé etapě šíření únavových trhlin je rozhodující  
a) smykové napětí,    b) tahové napětí,    c) elastická deformace
- Ve druhé etapě šíření únavové trhliny probíhá  
a) transkrystalicky,    b) krystalicky,    c) interkrystalicky
- Manson-Coffinův vztah je vyjádřen ve tvaru:  
a)  $\epsilon_{ap} = \epsilon_f' (2N_f)^c$ ,    b)  $\epsilon_{ae} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b$ ,    c)  $\sigma_a = K' \cdot \epsilon_{ap}^{n'}$
- Hodnota součinitele vrubového účinku je ve srovnání s hodnotou součinitele koncentrace napětí u stejného vrubu:  
a) větší,    b) menší,    c) záleží na typu materiálu

- 9) Předchozí plastická deformace kovového materiálu obvykle mez únavy:
  - a) snižuje,    a) zvyšuje,    c) prakticky neovlivňuje
- 10) S rostoucí drsností povrchu téhož materiálu únavové charakteristiky obecně:
  - a) stoupají,    b) klesají,    c) záleží na průběhu drsnosti
- 11) Která povrchová úprava výrazně zvyšuje mez únavy a cyklickou životnost:
  - a) galvanické pokovení,    b) broušení,    c) nitridace
- 12) Jak se mění rychlost šíření únavové trhliny  $da/dN$  ( $\mu\text{m}/\text{cykl}$ ) s frekvencí zatěžování?
  - a) mírně klesá,    b) obecně stoupá,    c) závislost není jednoznačná



## Literatura

- [1] KUNZ, J., Aplikovaná lomová mechanika. ČVUT Praha, Česká technika, 2005, 272 s.
- [2] ANDERSON, T.L., Fracture Mechanics. Fundamentals and applications, BAE, 2005, 621
- [3] STRNADEL, B., Řešené příklady a technické úlohy z materiálového inženýrství. Ostravské tiskárny, 1998, 334 s.
- [4] KUČERA, J., Stručný úvod do mechaniky lomu. Část 1. Vruby a trhliny. Nestabilní lom. Část 2 Únava materiálu. FS VŠB Ostrava. 1993, 180 s.
- [5] Lomová mechanika – internetové výukové programy a informace
- [6] Engineering fracture mechanics – časopis, soudobé poznatky z lomové mechaniky
- [7] STRNADEL, B. Nauka o materiálu II. Degradační procesy a design konstrukčních materiálů. ES VŠB-TU Ostrava, 2008, 280 s.
- [8] KOUTSKÝ, J., Degradační procesy a predikce životnosti. ZU Plzeň (skripta), 1995, 167 s.
- [9] CALLISTER, D. W., Materials Science and Engineering. An Introduction. University Iowa, John Wiley & Sons, 2007, 721 p.
- [10] FELBECK, D. K., Atkins A.G.: Strength and Fracture of Engineering Materials. Prentice Hall, Englewood, 1984, 542 p.
- [11] POKLUDA, J. aj. Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek. PC-DIR, Brno, 1994, 385 s.
- [12] HERNAS, A. a kol., Žárupevné oceli a slitiny. VŠB-TU Ostrava, 2009, 389 s.
- [13] NĚMEC, J., SEDLÁČEK, J., Statistické základy pevnosti konstrukcí 1, Academia Praha, 1982, 316 s.
- [14] NĚMEC, J., SEDLÁČEK, J., Statistické základy pevnosti konstrukcí 2, Academia Praha 1982, 420 s.
- [15] SOJKA, J. Odolnost ocelí vůči vodíkové křehkosti. VŠB-TU Ostrava, 2007, 108 s.
- [16] KLESNIL, M., LUKÁŠ, P., Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání. Academia, Praha, 1976, 222s.
- [17] ASTM E647-91. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, 1991. In Annual Book of ASTM Standards, pp. 654-681.
- [18] PUŠKÁR, A., Medzné stavy materiálův a súčastí. Veda, Bratislava 1989, 304 s.

## 4. TEČENÍ MATERIÁLŮ



**Čas ke studiu:** 3 hodiny



**Cíl** Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- Popsat tečení (creep) materiálu a určit podmínky, při kterých se vyskytuje.
- Stanovit rychlost stacionárního tečení a dobu do lomu.
- Objasnit relaxaci napětí a její charakteristiky
- Vyřešit jednoduché úlohy z oblasti tečení materiálů.
- Vyřešit jednoduché úlohy z oblasti tečení materiálů.



**Výklad**

### 4.1. Základní pojmy a závislosti

**Tečení** materiálu je obecně definované jako pomalá plastická deformace materiálu vyvozená dlouhodobým působením mechanického napětí a teploty. Pro odborný termín *tečení* se používá také anglický název creep (kríp).

K tečení dochází při dosažení určitého napětí, které je zpravidla menší než mez kluzu, stanovená při tahové zkoušce za dané teploty. Teplota  $T$ , nad kterou nastává tečení, je závislá na skupině materiálů. Pro kovy a slitiny  $0,3 \cdot T_t \leq T$  (K), kde  $T_t$  je teplota tavení (K), pro keramické materiály nad  $0,6 T_t$ .

Tečení materiálů je možno tedy uvažovat jako proces narůstání trvalé deformace při působení stálého napětí a stálé teploty. Vztah mezi deformací  $\varepsilon$  a časem  $t$  při dané teplotě  $T$  a napětí  $\sigma$  lze vyjádřit obecně závislostí  $\varepsilon = f(t)$  pro dané podmínky ( $T = \text{konst.}$ ,  $\sigma = \text{konst.}$ ), obr. 4.1 Velikost deformace a rychlost tečení je tím vyšší, čím je vyšší teplota materiálu a působící napětí. Rychlost tečení je vyjádřena vztahem  $\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$ , anebo  $\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t}$ .

V závislosti na teplotě a napětí je možno rozlišit tyto oblasti tečení:

1. nízkoteplotní, logaritmické tečení probíhající při  $T \leq 0,3 T_t$ , ( $0,2 T_t \leq T \leq 0,3 T_t$ ),
2. vysokoteplotní, probíhající při  $T \approx 0,4 T_t$  a výše (pro slitiny niklu až do  $T \approx 0,8 T_t$ ),

Pro vyjádření velikosti deformace nízkoteplotního tečení na čase se obvykle používá vztah

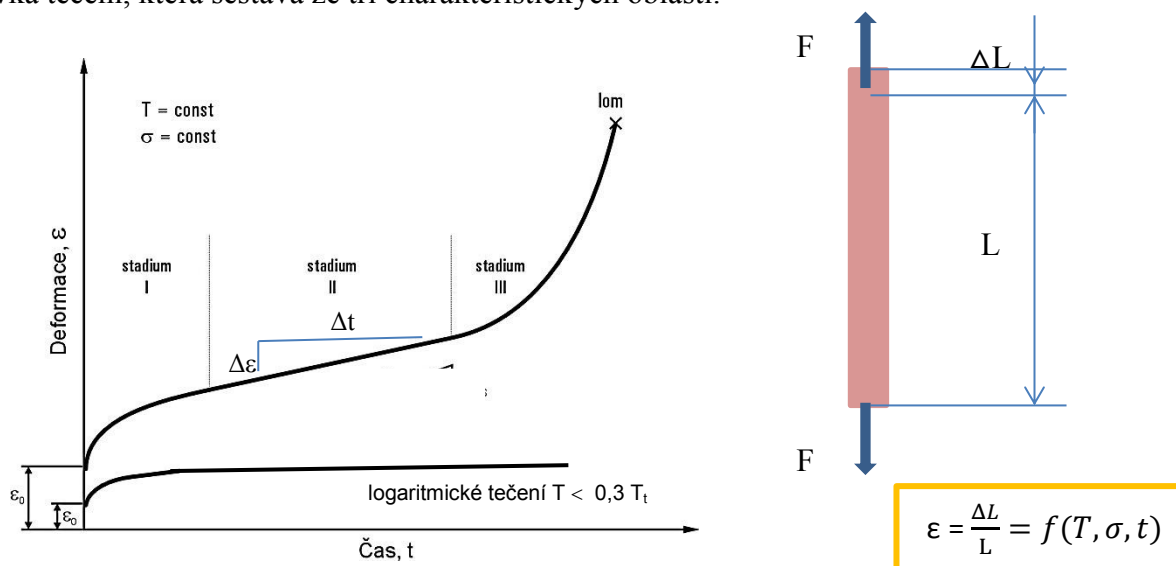
$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \alpha \cdot \ln(\gamma \cdot t + 1), \quad (4.1)$$

kde  $\alpha$ ,  $\gamma$  - materiálové parametry, závislé na teplotě a napětí.

Z praktického hlediska největší význam má vysokoteplotní tečení. Při zkoušce tečení bezprostředně po zatížení vzorku nastává pružná deformace, případně okamžitá plastická deformace nezávisle na čase (obr. 4.1). Počáteční část křivky tvoří okamžitá (prvotní,

počáteční) deformace  $\varepsilon_0$ , která vznikne při zatížení materiálu z nulové hodnoty napětí na danou hodnotu  $\sigma$ . Tato část deformace má zpravidla pružný charakter a její velikost je možno vyjádřit pomocí Hookova zákona,  $\varepsilon_0 = \varepsilon_e = \sigma/E_T$ , kde  $E_T$  je modul pružnosti při teplotě  $T$ .

Tečení se z makroskopického hlediska zobrazuje funkční závislostí deformace na čase, tj. křivkou tečení platnou pro dané podmínky namáhání ( $\sigma$ ,  $T$ ). Na obr. obr. 4.1 je uvedena úplná křivka tečení, která sestává ze tří charakteristických oblastí.



Obr. 4.1. Schéma reprezentující chování materiálů za nízké teploty  $T \leq 0,3 T_t$  a klasická křivka tečení materiálů při teplotě nad  $0,4 T_t$ . Schéma zatížení vzorku při zkoušce tečení.

Na křivce vysokoteplotního tečení jsou rozlišovány tři časové oblasti:

- I. stadium – **neustálené tečení** (primární, přechodové), ve kterém po vložení zatížení rychlost deformace klesá v důsledku zvýšení hustoty dislokací, při současně tvorbě nízkoúhlových hranic a subzrn.
- II. stadium – **ustálené tečení**, (sekundární tečení), ve kterém rychlost tečení je téměř konstantní a je nazývána stacionární rychlostí tečení. Toto stadium tečení má často nejdelší trvání. Je vysvětlováno rovnováhou mezi procesy deformačního zpevnění a zotavení.
- III. stadium - **zrychlené tečení** (terciální tečení), ve kterém rychlost deformace se postupně zvyšuje až do lomu, kterému předchází procesy poškození v důsledku strukturních změn a tvorby kavit, dutin, vnitřních trhlin a separace hranic zrn.

Velikost deformace na čase ve stadiu přechodného tečení lze popsat vztahem (Andradeovým zákonem):

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \beta t^m + \dot{\varepsilon}_s t, \quad (4.2)$$

kde  $\dot{\varepsilon}_s$  - rychlost stacionárního tečení,  $t$  – doba trvání deformace ve stadiu,  $\beta$ ,  $m$  – konstanty ( $m = 0,25-0,67$ , nejčastěji  $m = 1/3$ ). V literatuře je možno najít další vztahy pro matematický

popis průběhu tečení v této oblasti. Toto přechodové tečení není pro stanovení životnosti významné.

Ustálené tečení se vyznačuje téměř konstantní rychlostí deformace  $\dot{\epsilon}_s$ . Velikost plastické deformace, která vznikne při konstantní rychlosti deformace bude tedy  $\epsilon_{II} = \dot{\epsilon}_s(t - t_I)$ , kde  $t_I$  je konec prvního stadia tečení (resp. počátek druhého stadia). Ustálené tečení je směrodatné pro stanovení životnosti žáropevných materiálů.

Závislost  $\dot{\epsilon}_s$  na napětí lze vyjádřit několika způsoby:

Pro velmi nízká napětí  $\dot{\epsilon}_s = k_1\sigma$ , pro střední hodnoty napětí  $\dot{\epsilon}_s = k_2\sigma^m$ , pro vysoká napětí  $\dot{\epsilon}_s = k_3\exp(\beta\sigma)$ , kde  $k_1, k_2, k_3, \beta$  jsou konstanty,  $m$  je exponent, jehož hodnota bývá v rozmezí 3-8.

Závislost rychlosti stacionárního tečení na teplotě popisuje **Arrheniův vztah**:

$$\dot{\epsilon}_s = A \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad (4.3)$$

kde  $Q$  je efektivní aktivační energie procesu tečení (dominantního mechanismu),  $R$  - plynová konstanta,  $T$  - absolutní teplota,  $A = f(\sigma)$ .

Při vysokých teplotách a napětích může sekundární tečení chybět a primární tečení přechází přímo do terciálního.

Poslední III. stadium představuje **terciální (zrychlené) tečení**, vyznačující se postupným nárůstem rychlosti tečení a končící lomem. V terciálním stadiu tečení v důsledku nahromaděného poškození nastává v zatěžovaném tělese mezní stav charakterizovaný růstem efektivního napětí. Zvýšené napětí způsobuje zrychlení tečení a narušení plastické stability (vytváření místních necelistvostí a krčků), což nakonec vede k lomu. Matematický popis tohoto stadia je problematický, protože degradační procesy mají různou povahu - vznik a koagulace kavit, pórů a trhlin, porušení hranic zrn apod.).

Dobu do lomu lze odhadnout dle vztahu  $t_f = \frac{\epsilon_f}{\dot{\epsilon}_s}$ , kde  $\epsilon_f$  je creepová deformace do lomu.

Z hlediska inženýrského přístupu a životnosti materiálu nejdůležitější je II. stadium - ustálené tečení, i když vnitřní poškození rozhodující o životnosti při tečení se rozvíjí koncem II. stadia a ve III. stadiu.

**Křivka tečení  $\epsilon$ - $t$  (pro danou teplotu a napětí) je první, základní charakteristikou odolnosti materiálu proti tečení.**

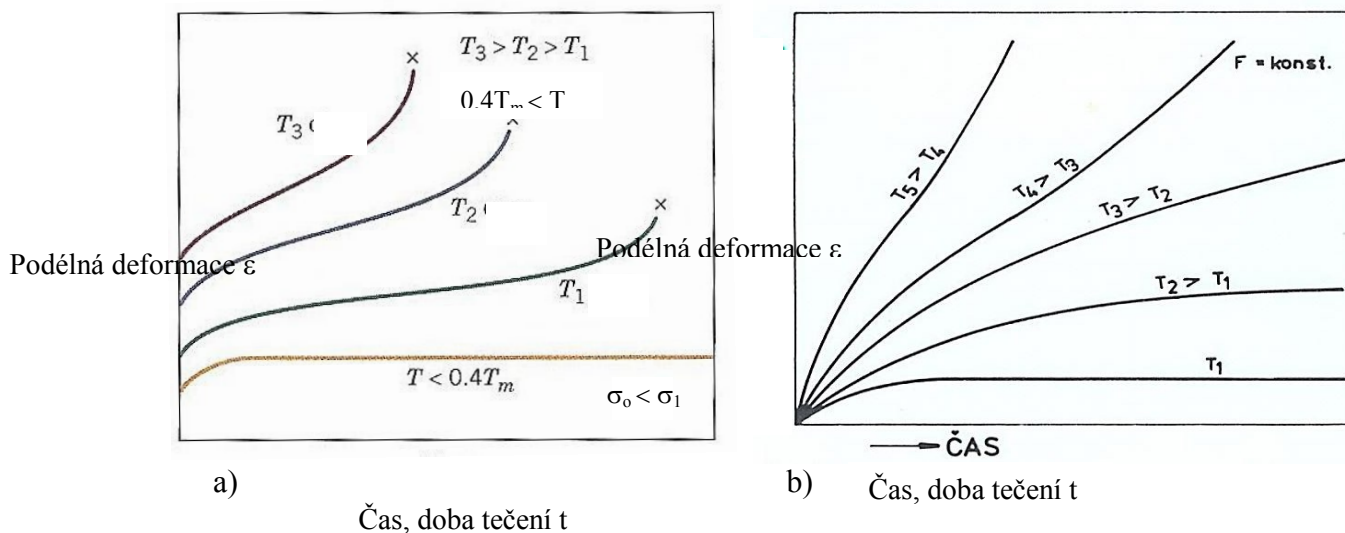
Na základě křivek tečení jsou stanoveny rovněž další materiálové charakteristiky a parametry tečení, např. závislosti rychlosti tečení na napětí nebo na teplotě. Snad nejdůležitějším parametrem ze zkoušek tečení je **rychlost stacionárního tečení**  $\dot{\epsilon}_s$ , znázorněna jako sklon sekundární části křivky tečení ( $\Delta\epsilon/\Delta t$ ), obr. 4.1.

Při zobecnění tyto závislosti je možno vyjádřit jako funkci parametrů:

$$\dot{\epsilon}_s = f_1(t, \sigma, T, S) \quad (4.4)$$

kde:  $\dot{\epsilon}_s$  - rychlost stacionárního tečení,  $\sigma$  - napětí,  $t$  - čas,  $T$  - teplota,  $S$  - struktura materiálu.

Rychlost deformace při zkouškách tečení je nízká a obvykle dosahuje  $10^{-12} - 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  (v závislosti na  $T$  a  $\sigma$ ). Křivky tečení pro různé úrovně napětí při  $T = \text{konst.}$ , nebo pro rozdílné teploty při daném zatížení ( $F = \text{konst.}$ ) jsou porovnány na obr. 4.2.

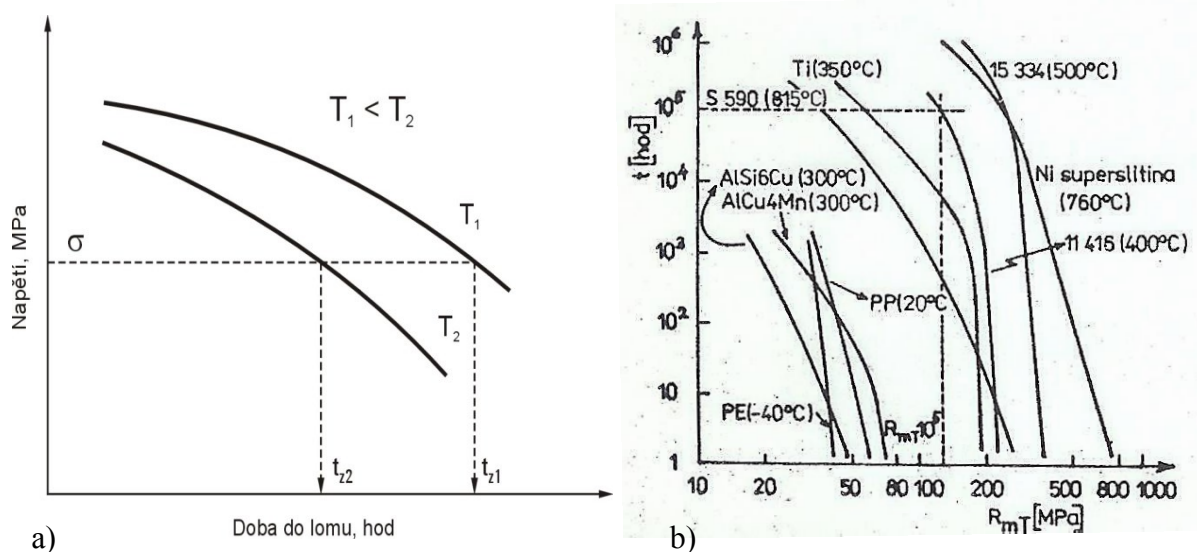


Obr. 4.2. Vliv napětí na křivky tečení (a). Porovnání průběhu deformačních křivek při zkouškách tečení kovového materiálu při konstantním zatížení a různé teplotě (b).

Základní charakteristikou pro porušení materiálu je **pevnost při tečení**  $R_{mT}/t/T$  (pro jednoosý stav napětí), představující stálé zatížení dělené počátečním průřezem vzorku (napětí  $\sigma = F/S_0$ ), které po uplynutí určité doby působení  $t$  [hod.] a při dané teplotě  $T$  [°C] způsobí přetržení vzorku. Pro případy, ve kterých jsou nepřijatelné určité trvalé deformace, důležitou vlastností je hodnota **meze tečení**  $R_T/t/\epsilon/T$ . Vyjadřuje stálé zatížení dělené počátečním průřezem vzorku, které po uplynutí určité doby působení  $t$  [hod.] od počátku zatížení, při dané teplotě  $T$  [°C] způsobí trvalou deformaci  $\epsilon$  vzorku, obvykle  $\epsilon = 1\%$ .

Např. konkrétní zápis pro mez tečení určité oceli je  $R_T 10^4 / 1/500 = 120 \text{ MPa}$  a pevnost při tečení  $R_{mT} 10^5 / 520 = 130 \text{ MPa}$ . Konkrétní hodnoty meze tečení a pevnosti při tečení jsou uváděny v normách jakosti (materiálových listech) žárovevých ocelí a v tabulkách.

**Druhou materiálovou charakteristikou pro pevnost při tečení je závislost  $\sigma - t$  (napětí ( $\sigma = R_{mT}$ ) - doba do lomu  $t_c$ ) vyznačená pro konstantní hodnotu teploty (obr. 4.3).**



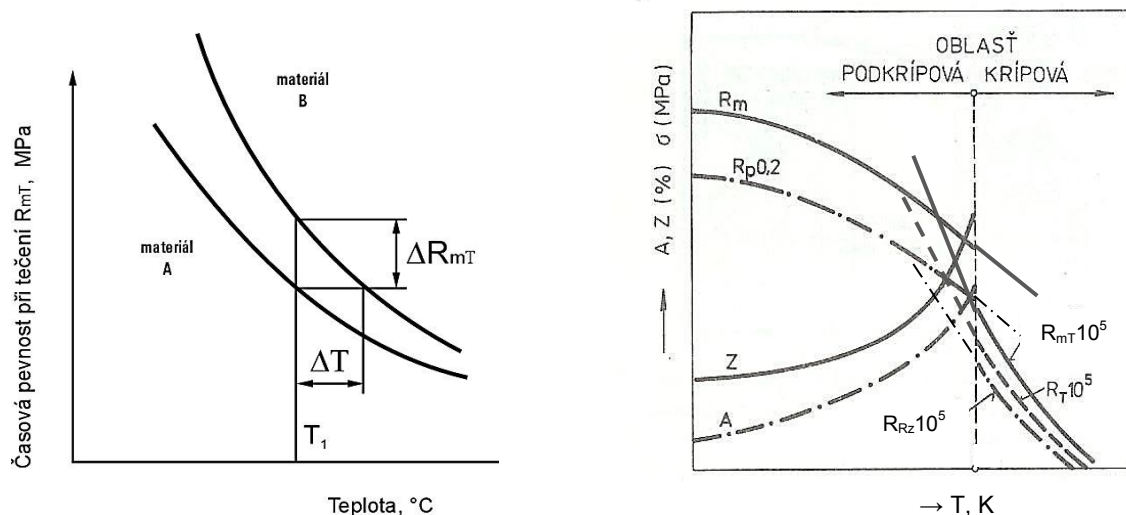
Obr. 4.3. Schematické charakteristiky odolnosti materiálů proti tečení v systému  $\sigma - t$  (a). Doba do lomu na působícím napětí při creepu vybraných konstrukčních materiálů (b)

Závislost časové pevnosti při tečení na teplotě  $R_{mT}/T = f(T)$  je další, pro inženýrské potřeby užitečnou charakteristikou vlastností materiálu za zvýšené teploty (obr. 4.4).

Tyto hodnoty stanoví základ pevnostních výpočtů dovolených napětí součástí, pracujících v podmínkách tečení, tzn. výše mezní teploty

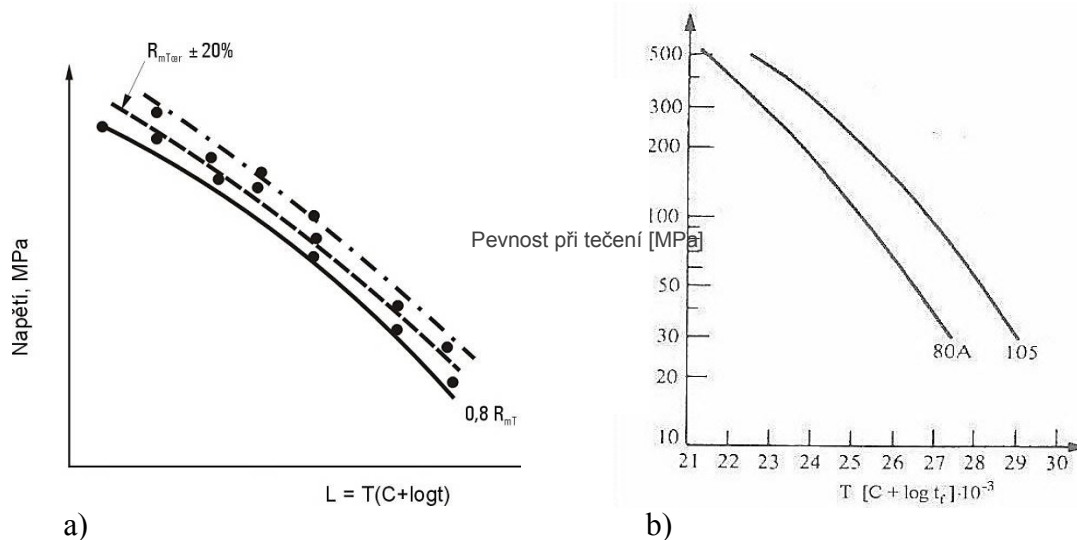
$$\sigma = \frac{R_{mT}}{k}, \quad (4.5)$$

kde  $k$  je součinitel bezpečnosti (1,5 - 1,65, pro tlaková potrubí).



Obr. 4.4. Schematické charakteristiky pevnosti při tečení materiálů v soustavě  $R_{mT}/T - T$  (a). Porovnání základních mechanických vlastností a creepových dlouhodobých na teplotě (b)

Závislost časové pevnosti při tečení  $R_{mT}$  v závislosti na L-M parametru je další univerzální charakteristikou pevnosti při tečení kovových materiálů (obr. 4.5).



Obr. 4.5. Schéma charakteristiky pevnosti materiálu při tečení jako funkce Larson-Millerova parametru  $LM = T(C + \log t)$ . Závislost meze tečení na LM parametru pro chromniklové slitiny.

V závislostech podle L-M parametru se předpokládá, že konstanta  $C$  nezáleží na napětí a možná i na materiálu. Původně bylo navrženo, že hodnota konstanty  $C$  má být 20. Výpočty a zkušenosti však ukázaly, že se může měnit od 17 do 23, podle typu materiálu. Např. pro austenitické oceli typu CrNi18-9 je v průměru  $C = 17$ , pro nízkouhlíkové nelegované oceli zpravidla  $C = 18$ , pro žárovevné CrMo oceli  $C = 23$ .

Z důvodu rozptylového pásma a potřebné bezpečnosti se uvažují a zobrazují závislosti mezi LM parametrem a napětím  $0,8 R_{mT}$ .

## 4.2. Relaxace napětí

Tečení materiálu velmi úzce souvisí s relaxací (snižováním) napětí.

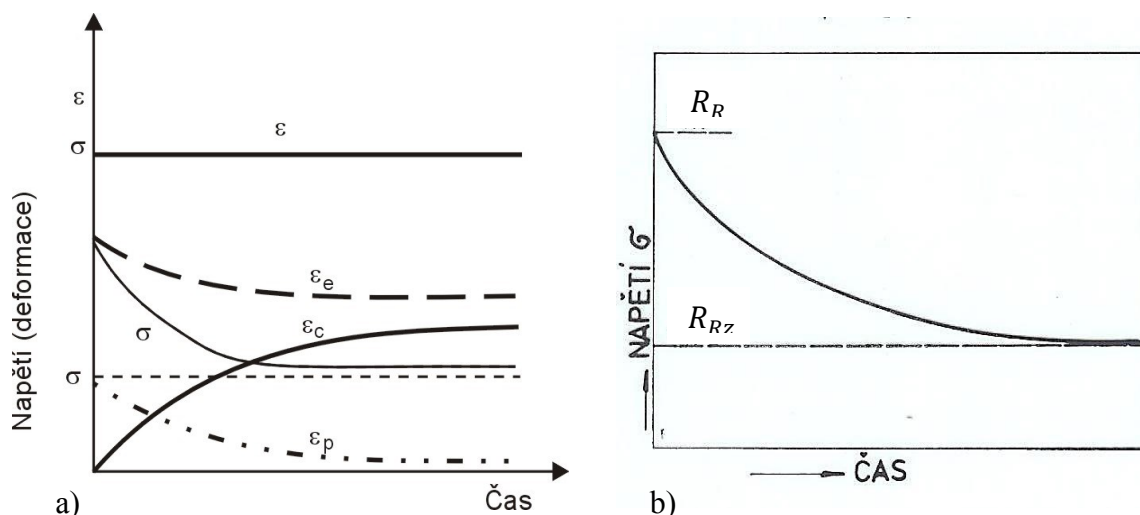
Jevy relaxace mají negativní vliv, např. ve šroubových spojích, kde mohou snižovat předpětí, dále při snižování síly na stlačení pružin anebo uvolňování lisovaných spojů. Kladně se relaxace projevuje při snižování vnitřních pnutí v odlitcích a svarových spojích, nebo při redukci napětí v systémech podrobených na počátku přetlaku. Pozitivní vliv relaxace se projevuje na snižování lokálních špiček vnitřních pnutí po kalení a při popouštění.

I když materiál makroskopicky se nedeformuje po přiložení počáteční deformace, tak v důsledku tečení pružná deformace se postupně zmenšuje na hodnotu odpovídající Hookovu zákonu. V určitém rozmezí tento případ je možno považovat za tečení při stálém snižování napětí, přičemž celková deformace anebo prodloužení zůstávají stejná, nezávislé na čase.

Celková deformace  $\varepsilon$  se skládá z pružné deformace  $\varepsilon_e = \sigma/E_T$ , počáteční plastické deformace  $\varepsilon_p$  (v některých případech) a na době závislé creepové (plastické) deformace  $\varepsilon_c$ , což schematicky ilustruje obr. 4.6. Obecná podmínka pro relaxaci je tedy:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_c = \text{konst} \quad (4.6)$$

V počátečním okamžiku  $t = 0$  je  $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$ , ( $\varepsilon_c = 0$ ) ale s uplynutím času se zvyšuje deformace trvalá  $\varepsilon_c$  z důvodu tečení, proto velikost  $\varepsilon_e + \varepsilon_p$  se zmenšuje, v důsledku čehož se zároveň zmenšuje napětí  $\sigma$ . V případě, že počáteční plastická deformace  $\varepsilon_p = 0$  (napětí  $\sigma < R_p(T)$ , mez kluzu při  $T$ ), je celková deformace  $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_c = \text{konst.}$ , přitom creepová deformace  $\varepsilon_c$  s dobou roste, a tedy elastická deformace  $\varepsilon_e$  musí klesat. To znamená, že napětí rovněž klesá a podle Hookova zákona platí  $\sigma = E \cdot \varepsilon_e$ , anebo přesněji  $\sigma(t) = E(T) \cdot \varepsilon_e(t)$ .



Obr. 4.6. Obecné schéma relaxace (a). Průběh napětí s časem při zkoušce relaxace v tahu.  $R_R$  - teoretické počáteční napětí,  $R_{Rz}$  - zbylé napětí (b)

Součástí anebo dílce, ve kterých probíhá relaxace napětí, se posuzují z hlediska odolnosti materiálu proti relaxaci pomocí výchozího a zbylého napětí.

**Výchozí napětí  $R_R$**  je napětí na počátku (v nulovém čase zkoušky), kdy celková deformace  $\varepsilon = \varepsilon_e$  (tj.  $\varepsilon_c = 0$  a  $R_R = E_T \cdot \varepsilon$ , kde  $\varepsilon$  je celková deformace,  $E_T$  modul pružnosti při teplotě  $T$ ). Symbol  $R_R$  se doplňuje údajem o teplotě  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) -  $R_R/T$ , např.  $R_R/450 = 120 \text{ MPa}$ .

**Zbylé napětí  $R_{Rz}$**  je napětí, které ve zkušební tyči zůstane po ukončení zkoušky. Jeho velikosti lze stanovit pomocí elastické deformace na konci zkoušky podle vztahu  $R_{Rz} = E_T \cdot \varepsilon_c$ . Zápis o zbylém napětí se doplňuje údajem o době zkoušky  $t(\text{h})$  a zkušební teplotě  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) -  $R_{Rz}T/t$ .

Uvedené parametry se používají zejména na šrouby přírub turbín, hlav válců motorů, na příruby potrubí tepelných médií, tepelně namáhaných pružin, předpínacích výztuží a podobných strojů a zařízení, při kterých nevzniká mezní stav porušení, ale během provozu může nastat poruchový stav poklesem přitlačného napětí a vznikem netěsnosti spojů, únikem tlakového média apod.

Relaxace je tedy úzce podmíněná tečením. Čím vyšší je velikost tečení, tím vyšší je i relaxace napětí. Relaxace napětí může také nastat při poklesu meze kluzu při ohřevu materiálu. Např. žíhání na odstranění pnutí. Podobně jako mez tečení byla zavedena mez relaxace.

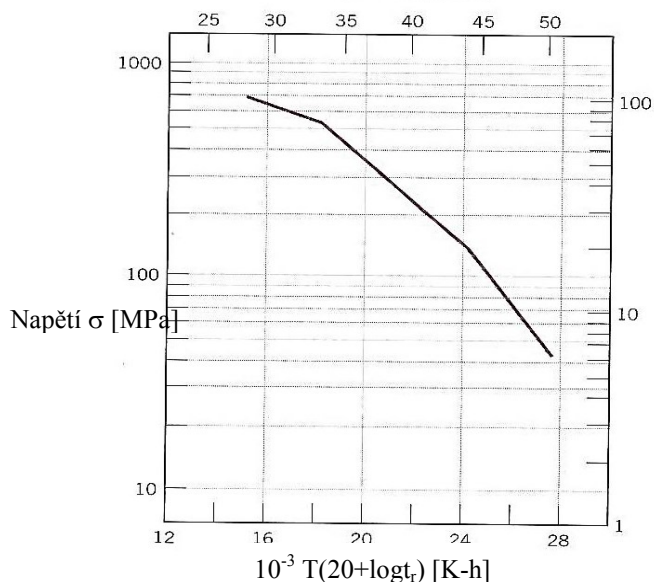
**Mez relaxace** je napětí, při kterém poklesne počáteční jeho velikost o určité % za dané teploty a během zvolené doby. Obecný zápis  $R_R \Delta t / \frac{\Delta \sigma}{\sigma} / T = \sigma$ , jednotky [hod/%/°C - MPa]. Konkrétní příklad zápisu:  $R_R 10^4 / 5 / 580 = 90$  MPa (při teplotě  $T = 580^\circ\text{C}$  a počátečním napětí  $\sigma = 90$  MPa poklesne jeho hodnota o  $\frac{\Delta \sigma}{\sigma} = 5\%$  (tj.  $\Delta \sigma = 4,5$  MPa) během doby 10000 hodin).

### 4.3. Extrapolační metody

Často vzniká požadavek získat údaje o tečení, které je nepraktické získávat z normálních laboratorních testů. Toto je zvláště aktuální pro dlouhé expozice (řádově roky). Jedním z řešení je provedení zkoušky tečení při teplotě poněkud vyšší než požadovaná, pro kratší dobu, a při srovnatelné úrovni napětí, a pak učinit vhodnou extrapolaci na pracovní podmínky. Běžně používaná extrapolace využívá Larson-Millerův (LM) parametr, definovaný vztahem

$$P = T \cdot (C + \log t_r), \quad (4.7)$$

kde  $C$  je konstanta (podle materiálu  $C = 18-23$ ),  $T$  – absolutní teplota v K, a  $t_r$  – doba do lomu (roztržení) v hodinách. Doba do lomu daného materiálu, měřená při stejném napětí, se výrazně mění podle teploty, přitom parametr zůstává konstantní. Na základě zkoušek tečení i výsledků z provozu mohou být sestaveny závislosti mezi napětím a L-M parametrem, viz. obr. 4.7. Použití daného parametru je ukázáno na následujícím příkladu.



a)



b)

Obr. 4.7. Závislost napětí na Larson-Millerově parametru pro ocel X40CrNiCoMoW21-20-19-4-4 (S-590) (a). Tečení způsobené místním přehřátím trubky (vyboulení, proděravění). Trubka z uhlíkové oceli na vodu v boileru (tlak 9,1 MPa), příčinou poškození – nánosy na vnitřní straně a menší přestup tepla (b.)

Nejvýznamnější a časově nejdelší je sekundární (ustálené) tečení, ve kterém je rychlost deformace ( $\dot{\epsilon} = d\epsilon/d\tau$ ) minimální a konstantní. Při výzkumu materiálových vlastností a predikci životnosti je rychlost stacionárního tečení dána obvykle vztahem

$$\dot{\epsilon}_s = A \cdot \sigma^m \cdot \exp(-Q/RT), \quad (4.8)$$

kde  $\sigma$  je napětí,  $T$  absolutní teplota,  $R$  – univerzální plynová konstanta,  $A$ ,  $m$  a  $Q$  jsou materiálové konstanty ( $A$  může zahrnovat vliv velikosti zrna a modulu pružnosti,  $m$  závisí na mechanismu tečení,  $Q$  je aktivační energie procesu tečení).

Doba životnosti některých zařízení se pohybuje v desítkách let, což je řádově  $10^5 - 10^6$  provozních hodin. Z hlediska zkoušení je však tato doba příliš dlouhá a potřebné hodnoty pevnosti při tečení anebo meze tečení se stanoví pomocí časové extrapolace ze zkoušek s mnohem kratší dobou expozice. Nejrozšířenější metoda extrapolace je založena na platnosti předchozí rovnice, na jejímž základě je možno odvodit Larson-Millerův parametr. Za předpokladu, že rychlost tečení je konstantní a platí  $\dot{\epsilon} = \epsilon/\tau$  (kde  $\epsilon$  je trvalá deformace na konci zkoušky dosažena za dobu  $\tau$ , platí pro deformaci 1% nebo do lomu), pak uvedenou závislost můžeme upravit na tvar

$$1/\tau = (A \cdot \sigma^m / \epsilon) \cdot \exp(-Q/RT), \quad (4.9)$$

Po logaritmování a dosazení  $C = (A \cdot \sigma^m / \epsilon)$  dostaneme po úpravě vztah

$Q/2,3R = T(C + \log \tau) = \text{konstanta (pro dané } \sigma) = \text{LM parametr}$ ,

Tento parametr udává při dané hodnotě napětí souvislost mezi teplotou a dobou. Pro určitou velikost napětí a dle hodnoty daného parametru určeného z experimentálních hodnot můžeme pro zvolenou teplotu odhadovat odpovídající čas, nebo naopak pro určitou dobu stanovit dovolenou teplotu. Na obr. 4.5 je vynesena na základě experimentálních výsledků mez pevnosti při tečení v závislosti na LM parametru pro dvě niklové slitiny.

#### 4.4. Žáropevnost

Pod pojmem **žáropevnost** je obsažen obecně soubor mechanických vlastností a materiálových charakteristik, především dlouhodobá pevnost při tečení, pevnost při tepelné i tepelně mechanické únavě, jakož i vlastnosti určující odolnost materiálů proti křehkému porušení za vyšší a vysoké teploty, jejich plasticita. Zjednodušeně, žáropevnost je odolnost proti tečení.

**Žáropevnost materiálu** (vztažená k mechanickým vlastnostem) rozhoduje o vhodnosti materiálu pro použití za teploty, nicméně o životnosti rozhodují rovněž jiné fyzikálně-chemické vlastnosti materiálů - žárovzdornost, odolnost proti korozi a erozi.

Lehké kovy, hlavně hliník, jsou používány v konstrukci spalovacích motorů automobilů i letadel, a pracují chlazené při teplotě kolem 120 - 250°C. Slitiny používané v konstrukcích **zařízení klasické energetiky** – a jsou to především oceli – pracují při teplotě přibližně od 300°C do 620°C. Ve většině případů konvenčních kotlů pracovní teploty v podmínkách tečení se nachází v intervalu 500 – 560°C (620°C). V jaderných elektrárnách rozmezí pracovních teplot součástí zařízení je mnohem širší a zahrnuje interval přibližně od 200 – 950°C, podle

typu reaktoru a použitého nositele energie. Stacionární plynové turbíny pracují nejčastěji při teplotě kolem 800°C. V zařízeních používaných v petrochemii jsou dosahovány teploty do 1000°C. Pro konstrukci novodobých leteckých motorů a mnoha zařízení chemického a metalurgického průmyslu jsou nezbytné materiály pro pracovní teploty kolem 1200°C i výše.

Obecně je požadováno, aby žárovevný materiál byl charakterizován vysokou teplotou tavení  $T_t$ . Přitom oba kovy, Fe a Ni, tvořící bázi nejčastěji používaných slitin odolných proti tečení, se nevyznačují zvláště vysokými teplotami tavení, zatímco kovy s nejvyššími teplotami tavení (Mo, Ta, W) nemohou nalézt širší uplatnění, hlavně z důvodu příliš nízké odolnosti proti oxidaci. Pro porovnání a volbu žárovevného materiálu lze použít diagramy v souřadnicích  $\sigma/E$  ( $\tau/G$ ) tzv. normalizovaného napětí na homologické teplotě  $T/T_t$ , charakterizujících mechanismy deformace a tečení daného materiálu (viz. kap. 4.6).

#### 4.5. Základní mechanismy tečení

Základní procesy vysokoteplotní deformace je možno rozdělit na procesy:

- řízené mechanickým namáháním a **podmíněné** tepelně aktivovaným **pohybem dislokací**,
- **kontrolované difúzi** a tedy podmíněné pohybem atomů nebo vakancí.

V průběhu tečení probíhají v zatíženém materiálu změny struktury v důsledku dlouhodobého účinku teploty a mechanického napětí. Průběh těchto změn může příznivě nebo nepříznivě ovlivnit zejména rychlost tečení a tím i životnost namáhané části.

Změny a **procesy při tečení** je možno rozdělit do čtyř skupin:

- zpevňování plastickou deformací
- změkčování (odpevňování) v důsledku tepelně aktivovaného zotavení,
- změny ve struktuře a substruktuře způsobené teplotou
- vznik pórů, kavit, mikrotrhlin apod.

Uvedené změny probíhají v závislosti na teplotě, napětí a mechanismu deformace při tečení. Podle dílčího účinku těchto faktorů může deformace při tečení probíhat dvěma způsoby:

- difuzním pohybem atomů (difuzní tečení),
- pohybem dislokací (dislokační tečení).

**Difuzní tečení** probíhá při nízkých a středních napětích a relativně vysokých teplotách. Uskutečňuje se difúzí v mřížce kovu, na hranicích zrn a na povrchu kavit. Model difuzního tečení v mřížce kovů, který vypracovali Hering a Nabarro je založen na představě, že při vysokých teplotách v elasticky deformovaném elementu materiálu (obr. 4.8) nastává v důsledku vysoké difuzní schopnosti migrace vakancí a intersticiálních atomů. Vakance se přesunují z oblasti, kde působí tahové napětí, do stlačených oblastí a základní atomy a interstice putují opačným směrem. Výsledkem difuze jsou trvalé změny tvaru elementu, tedy plastická deformace.

Zdroje a místa zániku vakancí jsou hranice zrn, difuzní cesty vedou vnitřkem zrn, obr. 4.8. Na tomto základě lze rychlost difuzního tečení podle Herring-Nabarrova modelu vyjádřit vztahem

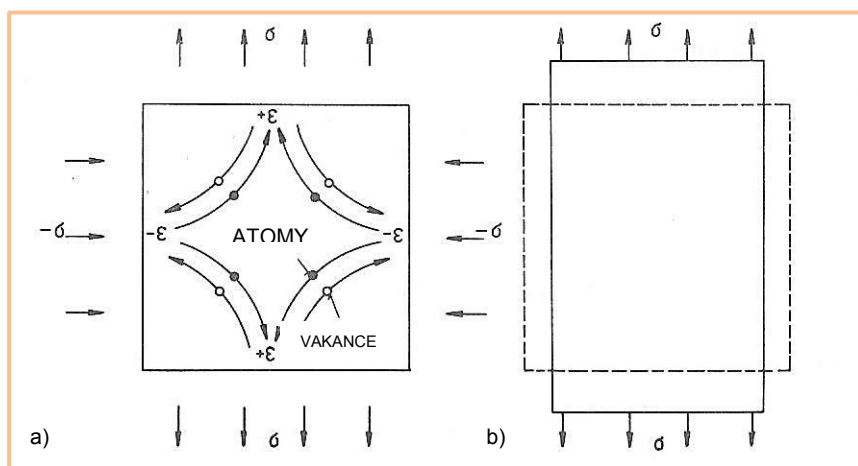
$$\dot{\epsilon} = \frac{10D\sigma b^3}{kTd^2}, \quad (4.10)$$

kde  $D$  je součinitel samodifuze (autodifuze) v objemu mřížky,  $\sigma$  - působící napětí,  $b$  - Burgersův vektor,  $d$  - střední průměr zrna,  $kT$  - součin Boltzmannovy konstanty a teploty. Uvedený vztah platí pro jednofázové soustavy.

Model difuzního tečení po hranicích zrn vede k popisu rychlosti tečení ve tvaru (Cobleův creep)

$$\dot{\epsilon} \approx \frac{D_B w \sigma b^3}{kTd^3}, \quad (4.11)$$

kde  $D_B$  je součinitel samodifuze hranicemi zrn,  $w$  - efektivní šířka hranice zrna.



Obr. 4.8. Model difuzního tečení mřížkou kovu, a) difuzní pohyb atomů a vakancí, b) změna tvaru po difuzi.

Oba **mechanismy difuzního tečení** probíhají paralelně. Z uvedených rovnic plyne, že podíl difuzního tečení po hranicích zrn bude tím větší, čím menší bude zrno a čím větší je podíl difuzních součinitelů  $D_B/D$ . Protože aktivační energie difuze po hranicích zrn má zhruba poloviční hodnotu aktivační energie mřížkové difuze, bude Cobleho mechanismus tečení probíhat při nižších teplotách než Herring-Nabarroův.

Dislokační tečení se vyjadřuje pomocí semiempirické závislosti

$$\dot{\epsilon} = A \frac{D_{GB}}{kT} \left(\frac{b}{d}\right)^p \left(\frac{\sigma}{G}\right)^n, \quad (4.12)$$

kde  $G$  je modul pružnosti ve smyku,  $A$ ,  $p$ ,  $n$  jsou konstanty, které lze zjistit experimentálně, Přitom mezi  $A$  a  $n$  platí empirický vztah  $\log A = -10,5 + 3,4.n$

U precipitačně anebo disperzně zpevněných kovových materiálů je pohyb dislokací výrazně omezen částicemi sekundární, minoritní fáze. Při poměrně vysokých homologických

teplotách mohou být částice druhé fáze překonávány tzv. **šplháním dislokací** – tj. kombinací difuze a pokluzu dislokací, obr. 4.9. Rychlost tečení je zde dána vztahem

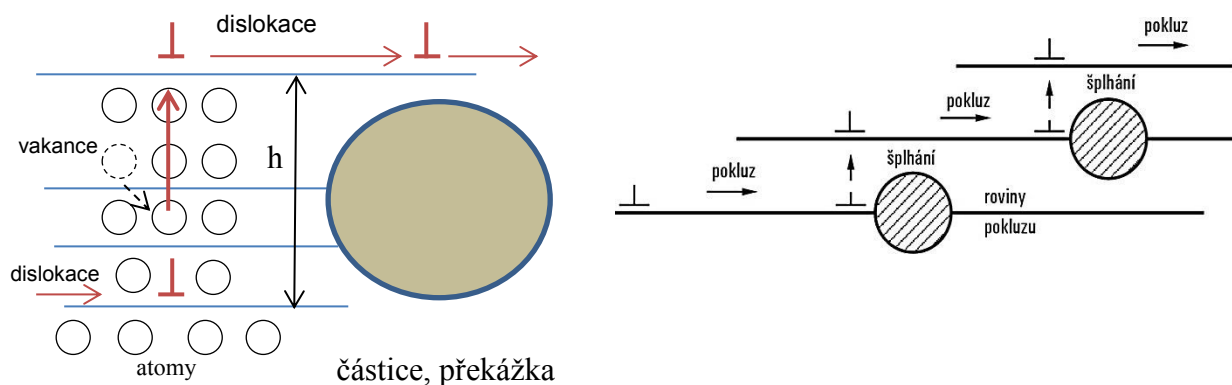
$$\dot{\epsilon} = A_D \frac{D\sigma b^3}{kTh^2}, \quad (4.13)$$

kde  $A_D$  je konstanta a  $h$  je střední délka (výška) šplhání dislokace. Význam dalších parametrů je stejný jako u předchozích vztahů. V předchozích vztazích se vyskytuje  $b^3$ , které je úměrné atomovému objemu  $\Omega$  ( $\Omega = kb^3 = k'a^3$ ,  $a$  – parametr mřížky). Místo  $b^3$  se též používá  $\Omega$ .

Při vyšších hodnotách napětí dislokace překonávají částice druhého fáze Orowanovým mechanismem za vzniku dislokačních smyček. Rychlost tečení zde stoupá se čtvrtou mocninou napětí:

$$\dot{\epsilon} = \frac{2\pi DG\lambda^2}{kTh} \left(\frac{\sigma}{G}\right)^4, \quad (4.14)$$

kde  $h$  je délka šplhání dislokační smyčky a  $\lambda$  je délka nakupení dislokací před částicí, srovnatelná se vzdáleností mezi částicemi.



Obr. 4.9. Schéma šplhání dislokací (šipky nahoru) během deformace za zvýšené teploty

Rychlost nízkoteplotního tečení, kontrolovaného pokluzem a šplháním, podporovaným difúzí jádry dislokací, je vyjádřena obecnou závislostí

$$\dot{\epsilon} = \rho b v \quad (4.15)$$

kde:  $v$  - rychlost pohybujících se dislokací, závislá na tepelně aktivovaných procesech ( $k$ ,  $T$ ,  $D$ ,  $\Omega$ ) a na mikrostrukturních faktorech,  $\rho$  – celková hustota pohyblivých dislokací.

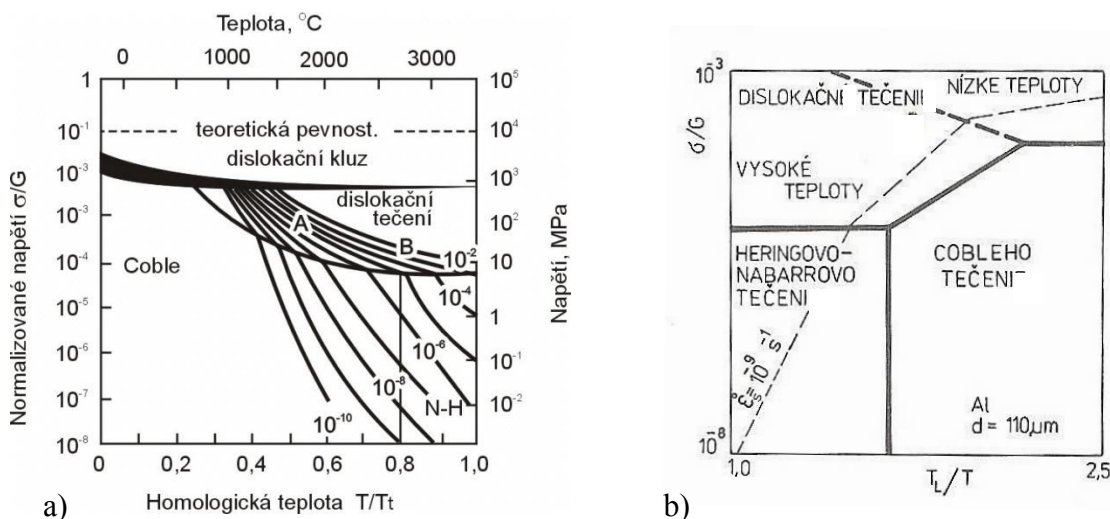
#### 4.6. Mapy mechanismů tečení

Mechanismy deformace při tečení je možno pro různé napětí a teploty znázornit **deformačními mapami**, graficky zobrazujícími a vymezujícími oblasti vnějších podmínek, při kterých se realizují anebo převládají určité mechanismy tečení. Příklady deformačních map jsou na obr. 4.10.

Konstrukce deformačních map je založena na předpokladu vzájemné nezávislosti uvedených mechanismů deformace (jejich souběžného působení) a vyplývá ze základních rovnic, popisujících závislosti rychlosti tečení, způsobeného jednotlivými mechanismy v závislosti na teplotě a napětí, na středním průměru zrna a eventuálně na jiných parametrech struktury. Každé z polí reprezentuje rozmezí podmínek nebo odpovídajících jim parametrů, při kterých daný mechanismus deformace rozhodujícím způsobem ovlivňuje rychlost deformace. Hranice dvou sousedních polí mapy představují tedy podmínky, při kterých mechanismy deformace, odpovídající těmto polím, ve stejné míře rozhodují o rychlosti deformace.

Deformační mapy jsou vždy sestaveny v semilogaritmických souřadnicích: napětí normované k modulu ve smyku  $\sigma/G$ , homologická teplota  $T/T_t$  (anebo  $T_t/T$ ) pro daný průměr zrna. Shora je deformační mapa omezena teoretickou (ideální) pevností. Při napětích nižších než je tato teoretická pevnost deformace probíhá pokluzem dislokací. Pokud deformace probíhá za nízké teploty a při vysokých napětích, pak procesy zotavení nehrají významnou roli.

Oblast A (difúze jádry dislokací) a B (difúze mřížkou) reprezentují rozmezí vnějších podmínek, při kterých převažuje dislokační tečení (obr. 4.10), v ostatních oblastech je dominantní difuzní tečení po hranicích zrn (Cobleovo tečení). Na mapách (obr. 4.10) jsou vyznačeny křivky konstantních rychlostí deformace. V oblasti dislokačního pokluzu tmavé pole (obr. 4.10 a) odpovídá podmínkám během tahové zkoušky.



Obr. 4.10. Deformační mapy mechanismů tečení wolframu (a) a hliníku (b)

Z deformačních map dále plyne, že Cobleho tečení převládá na hranicích zrn jemnozrné struktury. Pro jemnější zrna je oblast Cobleho difuzního mechanismu tečení rozsáhlejší. Praktický význam map spočívá v jejich využití pro účelné vytváření struktury materiálu s cílem zvýšení odolnosti proti tečení.

Mechanismy tečení se uplatňují podle výše **homologické teploty** ( $T/T_m$ , resp.  $T_m/T$ ) a **normalizovaného napětí** ( $\sigma/G$  nebo  $\sigma/E$ ), při dané velikosti zrna a struktuře. Umožňují

názorněji porovnat a hodnotit tečení materiálů. Při vyšším normalizovaném napětí dominují dislokační mechanismy (pokluzu dislokací a jejich omezení). Při nižším normalizovaném napětí – difuzní mechanismy (Cobleův creep – difuze po hranicích zrn, Nabarrův creep – difuze v objemu zrn). Šplhání dislokací je pak kombinací difuze vakancí a pokluzu dislokací.

#### 4.7. Porušení kovů a slitin za vyšší teploty. Lomy při tečení

**Lom při tečení**, který vzniká při zatížení tělesa v podmínkách dlouhodobého zatížení je výsledkem degradačních procesů, které během zatížení probíhají v materiálu. Na rozdíl od lomu při krátkodobé tahové zkoušce a při stejné teplotě, je lom při tečení výrazně odlišný. Materiál dlouhodobě namáhaný v podmínkách tečení, se porušuje bezdeformačním (kvazikřehkým) lomem při velmi nízké kontrakci ( $Z \leq 2\%$ ), jeho lomová plocha má nepravidelný povrch a je v průměru kolmá na směr zatížení. Samotný lom vzniká na konci terciálního tečení v důsledku snížení skutečného nosného průřezu a zvýšení rychlosti tečení. Při zkoumání struktury a vlastností materiálu během celého procesu tečení lze zjistit určité změny již v oblasti stacionárního tečení.

Celý lomový proces se skládá z těchto etap:

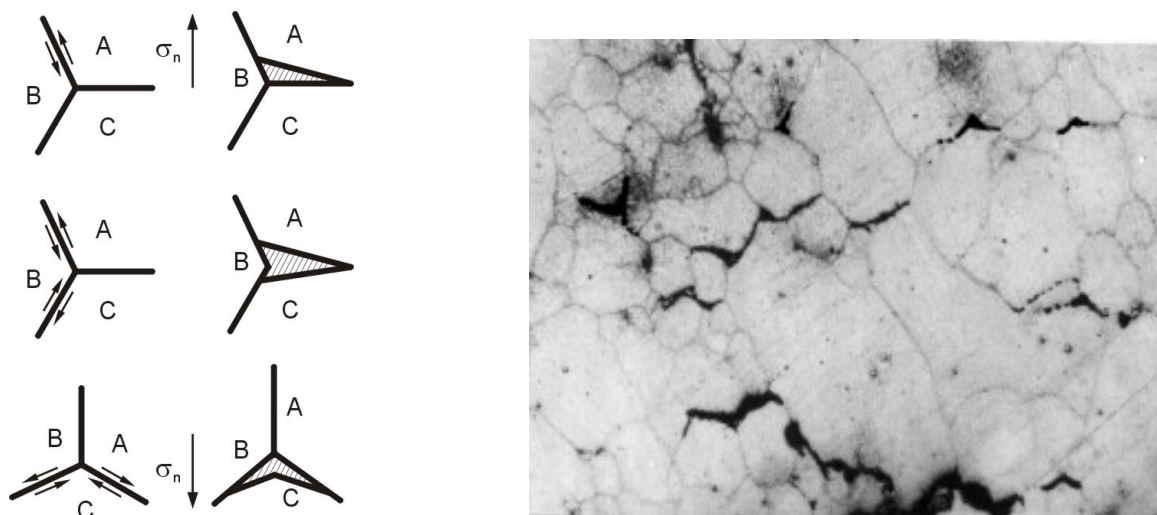
- vznik zárodků lomu (póry, mikrotrhliny apod.),
- růst těchto zárodků a jejich propojování až do kritické velikosti,
- vlastní lom v podobě šíření trhliny v místech s kritickými rozměry defektů.

Podle průběhu lomové čáry vzhledem k zrnům mohou vznikat v závislosti na teplotě, napětí anebo rychlosti tečení lomy transkrystalické nebo interkrystalické.

**Transkrystalický lom** vzniká při nižších teplotách, vyšších napětích a kratší době do lomu. Nastává vznikem mikroductin na částicích (inkluzích, precipitátech) uvnitř zrn. Tyto mikroductiny mohou dále růst a spojovat se do transkrystalových trhlín, které pak výstíjí do lomu. Doba do lomu je zde nepřímě úměrná rychlosti dislokačního tečení.

**Interkrystalický lom** vzniká při vyšších teplotách, při nižších napětích a při delších dobách do lomu. V závislosti na podmínkách tečení může interkrystalické porušení nastat dvěma základními způsoby – klínovými trhlínami a vznikem kavit.

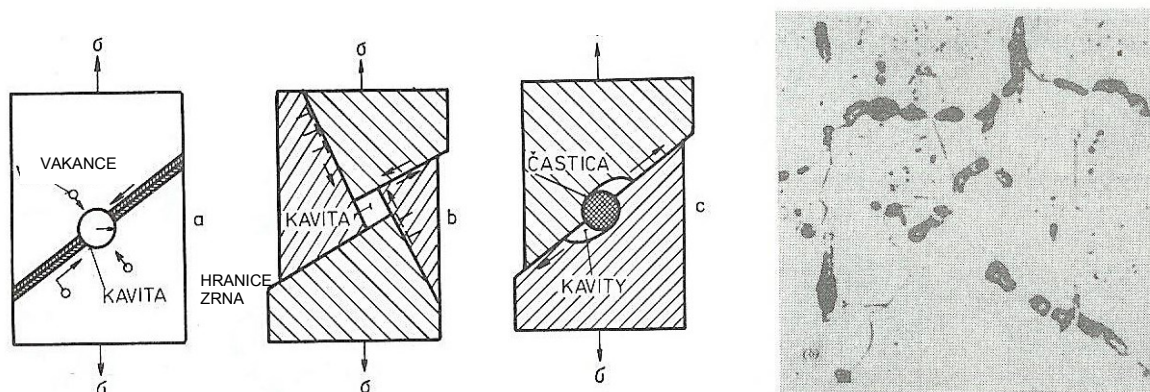
**Klínové trhliny** (W trhliny) vznikají v místech styku tří zrn, ve trojných bodech, při relativně vysokých napětích a nižších teplotách. Některé možnosti vzniku klínových trhlín jsou schematicky znázorněny na obr. 4.11. Od tahového napětí  $\sigma_n$  vznikají na hranicích zrn smyková napětí, které vyvolávají pokluzu po hranicích a vedou ke vzniku trhlín klínovitého tvaru (pokud v sousedním zrně nemůže dojít k plastické deformaci s relaxací smykových napětí).



Obr. 4.11. Modely generování klínových trhlin v trojných bodech zrn, klínové trhliny v oceli.

Při vysokých teplotách, nízkých napětích a dlouhých dobách do lomu vznikají na hranicích zrn mikroskopické dutiny oválného nebo protáhlého tvaru – **kavity**. Kavity vznikají přednostně na hranicích zrn, které se směrem hlavního normálového napětí svírají úhel  $45^\circ$  nebo  $90^\circ$ . Pravděpodobnými místy pro vznik kavit jsou hranice zrn a cizí částice v matrici kovu.

Proces vzniku kavity na hranicích zrn může probíhat kondenzací (nahromaděním) a koalescencí (spojením) vakancí v poli napětí, obr. 4.12. Kromě difuzního mechanismu mohou kavity vznikat pokluzy po hranicích zrn, způsobujícími výstupky při proniknutí kluzového pásu hranicí, na částicích druhé fáze na hranicích zrn, a to v důsledku skluzového mechanismu (obr. 4.12) anebo v důsledku migrace hranic zrn.



Obr. 4.12 Schéma různých způsobů vzniku kavit na hranicích zrn při tečení: a – kondenzací vakancí, b – průnikem skluzového pásu hranicí zrna, c – dekohezí hranice mezi matricí a částicí. Kavity, které vznikly při tečení po hranicích zrn (vpravo).

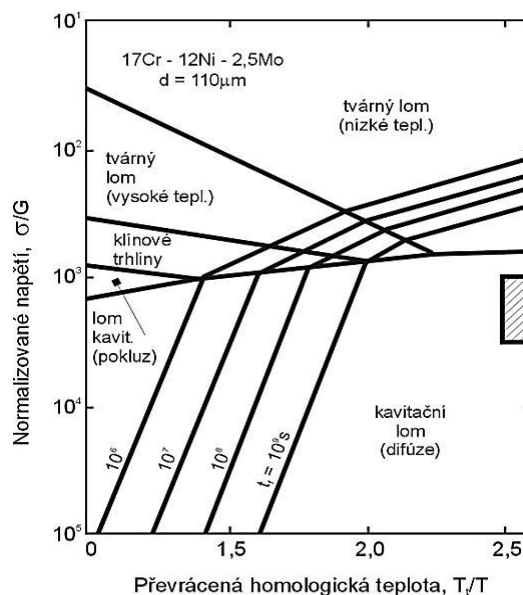
**Difuzní růst kavit** se uskutečňuje difúzí vakancí z okolí podél hranic zrn. Difuzně mohou kavity růst pokud jsou malé. Po dosažení určité velikosti roste kavita dále plastickou deformací. Doba do lomu je  $t_f = \frac{1-\xi}{1,48 \dot{\epsilon}}$ , kde  $\xi$  je kritický plošný podíl kavit na hranicích zrn.

Vztahy pro příslušné mechanismy lomů lze použít pro sestrojení **lomových map**. Při jejich konstrukci lze vycházet z modelových představ o mechanismu lomu a stanovit jednotlivé oblasti dominantních mechanismů, resp. z fraktografického rozboru dostatečného počtu experimentálních výsledků stanovit hranice oblastí jednotlivých mechanismů lomu.

Příklad lomové mapy pro ocel CrNiMo17-12-2 (AISI 316) je na obr. 4.13. Z rozboru lomové mapy je patrné, že při tečení této oceli rostou kavity převážně difuzně. Deformační růst kavit se uplatňuje pouze při vysokých teplotách a středních napětích ( $\sigma/G = 10^{-3}$ ).

Praktický význam deformačních a lomových map je v možnosti předpovídat deformační anebo lomový mechanismus pro dané podmínky namáhání. Umožňuje to vhodné zásahy do chemického složení a struktury za účelem snížení rychlosti tečení, resp. prodloužení doby do lomu.

Tečení materiálu může probíhat jak při tahových napětích, tak při tlakovém nebo smykovém namáhání. Tlakové (trojosé) složky omezují vznik trhlin anebo kavit a prodlužují dobu do lomu. Různé stavy napjatosti mohou tedy obecně urychlovat nebo naopak zpomalovat procesy tečení.



Obr. 4.13. Lomová mapa oceli typu 17Cr-12Ni-2Mo s velikostí zrna austenitu 110  $\mu\text{m}$  po tečení při  $T = 600^\circ\text{C}$ , sestrojená na základě výpočtů; šrafovaná oblast - zahrnuje podmínky práce jaderných reaktorů

Lomové mapy související s tečením mohou být zobrazeny také v souřadnicích normalizované napětí ( $\sigma/E$ ) a doba do lomu.



### Shrnutí pojmů kapitoly 4

Tečení kovových materiálů ovlivňuje: **teplota, napětí, rychlost difuze, velikost zrna, stabilní precipitáty, doba expozice**. Na základě naměřených **křivek tečení** jsou stanoveny **rychlosti tečení** a odvozeny další závislosti anebo parametry (**pevnost při tečení  $R_{mT}$ , mez tečení  $R_T$** ). Obecně platí, čím vyšší je **teplota tavení materiálu**, větší **zrno**, vyšší **modul pružnosti** (pevnější vazba mezi atomy) a menší difuze, tím lepší je **odolnost proti tečení**. Menší zrna umožňují větší **pokluzu hranic zrn** a zvyšují difuzi, což vede k vyšší rychlosti tečení. **Deformační mapy** ukazují oblasti dominantních mechanismů tečení v závislosti na **homologické teplotě a normalizovaném napětí**. **Relaxace napětí** probíhá jako tečení za konstantní celkové deformace a při poklesu napětí. **Klínové trhliny a kavity** vedou zpravidla k lomu při tečení (**creepový lom**). **Lomové mapy** vymezují oblasti hlavních mechanismů porušení soudržnosti. **Žárupevné slitiny** - slitiny pro použití za vysokých teplot, jsou odolnější proti tečení.



### Otázky ke kapitole 4

- 4.1 Jak je definována homologická teplota a normalizované napětí?
- 4.2 Čím je charakterizováno stacionární tečení?
- 4.3 Vysvětlete mez tečení v tahu.
- 4.4 Objasněte zbylé napětí při relaxaci.
- 4.5 Jakým mechanismem se uskutečňuje šplhání dislokací?
- 4.6 Jak vznikají kavity při tečení?
- 4.7 Jaké jsou rozdíly mezi deformační mapou a lomovou mapou při tečení?
- 4.8 Charakterizujte žárupevné oceli.
- 4.9 Vyjmenujte tři metalurgická/technologická opatření, která jsou používána pro zvýšení odolnosti proti tečení slitin kovů.
- 4.10 Jaké je pořadí technicky významných materiálů podle odolnosti proti tečení.



### Úlohy ke 4 kapitole

- 4.1 Stanovte přibližně teplotu, od které creepová deformace bude významná pro každý z následujících kovů: chrom, nikl, molybden, zinek, zlato a železo.

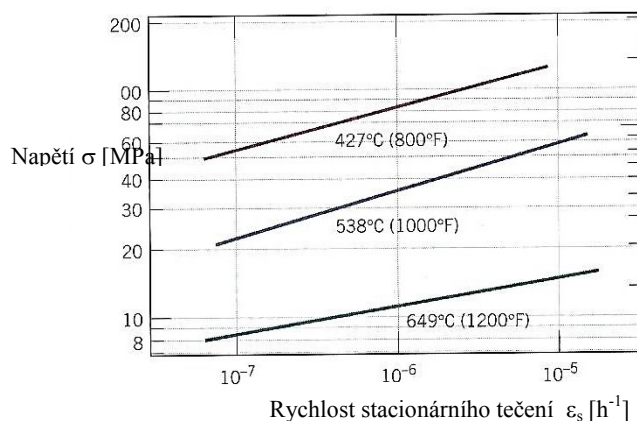
♦ **Řešení:** Tečení je významné od  $T = 0,4 T_m$ , kde  $T_m$  - teplota tavení v K. Např. pro Cr (z tabulek  $T_m = 1857^\circ\text{C} = 2130\text{ K}$ ) pak vypočteme  $T = 0,4 \cdot 2130 = 852\text{ K} = 579^\circ\text{C}$ . Podobně pro další uvedené kovy: Ni –  $418^\circ\text{C}$ , Mo –  $883^\circ\text{C}$ , Zn –  $4,2^\circ\text{C}$ , Au –  $262^\circ\text{C}$ , Fe –  $450^\circ\text{C}$ .

4.2 Naměřené údaje o tečení slitiny hliníku při 480°C a napětí 2,75 MPa jsou tabulce.

Vyneste závislost deformace ( $\varepsilon$ ) na čase a pak stanovte ustálenou nebo minimální rychlost tečení. Pozn.: Počáteční a okamžitá deformace není zahrnuta v tabulce.

| čas $t$ [h] | $\varepsilon$ [%] | čas $t$ [h] | $\varepsilon$ [%] | čas $t$ [h] | $\varepsilon$ [%] | čas $t$ [h] | $\varepsilon$ [%] |
|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|
| 0           | 0,0               | 10          | 5,5               | 20          | 8,8               | 30          | 13,6              |
| 2           | 2,2               | 12          | 6,2               | 22          | 9,5               | 32          | 15,3              |
| 4           | 3,4               | 14          | 6,8               | 24          | 10,3              | 34          | 17,7              |
| 6           | 4,1               | 16          | 7,5               | 26          | 11,2              |             |                   |
| 8           | 4,8               | 18          | 8,2               | 28          | 12,2              |             |                   |

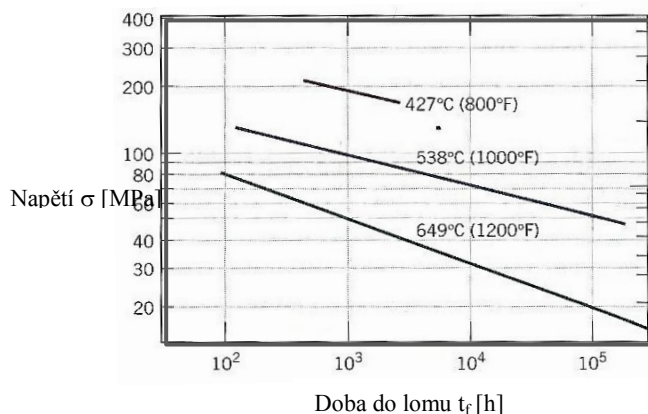
4.3 Vzorek dlouhý 1015 mm z nízkouhlíkové niklové slitiny (obr. 4.14) je vystaven tahovému napětí 70 MPa při 427°C. Stanovte jeho prodloužení po 10000 hodinách. Předpokládejme, že součet okamžitého prodloužení a prodloužení z primárního tečení je 1,3 mm.



Obr. 4.14. Souvislost mezi napětím a rychlostí tečení nízkouhlíkové niklové slitiny při uvedených teplotách.

4.4 Kruhová tyč o délce 635 mm a průměru 19 mm ( $\varnothing 19 \times 635$ ) z nízkouhlíkové slitiny niklu dosáhla celkové prodloužení 6,44 mm po expozici 5000hod při teplotě 538°C (obr. 4.14). Jaké tahové zatížení způsobilo dané prodloužení? Předpokládejme, že součet okamžitého prodloužení a primárního tečení je 1,8 mm.

4.5 Jestliže komponenta vyrobená z nízkouhlíkové niklové slitiny (obr. 4.15) je podrobena tahovému napětí 31 MPa při 650°C, odhadněte dobu do přetržení.



Obr. 4.15. Závislost doby do lomu na napětí slitiny niklu při uvedených teplotách.

- 4.6 Kruhová tyč vyrobená z nízkouhlíkové slitiny niklu (obr. 4.15) má průměr 19,1 mm. Stanovte maximální napětí, kterým může být zatížena, aby vydržela 10000 hodin při teplotě 538°C.
- 4.7 Odhadněte aktivační energii pro tečení ( $Q_c$ ) pro určitou slitinu, podle závislosti na obr. 4.14. Použijte údaje při napětí 55 MPa a teplotě 427°C a 538°C. Předpokládejme, že exponent napětí ( $n$ ) je nezávislý na teplotě.

♦ **Řešení:**

Pro řešení použijeme vztah  $\dot{\epsilon}_s = A \cdot \sigma^n \cdot \exp(-Q/RT)$ . Při napětí  $\sigma = 45$  MPa a teplotě  $T_1 = 427^\circ\text{C} = 700$  K je podle obr. 4.14 rychlost tečení  $\dot{\epsilon}_{s1} = 10^{-7} \text{ h}^{-1}$  a při  $T_2 = 538^\circ\text{C} = 811$  K přibližně  $\dot{\epsilon}_{s2} = 10^{-5} \text{ h}^{-1}$ . Pokud exponent ( $n$ ) a konstanta ( $A$ ) jsou nezávislé na teplotě, pak výchozí vztah můžeme rozepsat pro teplotu  $T_1$  a  $T_2$ : to znamená  $\dot{\epsilon}_{s1} = A \cdot \sigma^n \cdot \exp(-Q/RT_1)$  a podobně  $\dot{\epsilon}_{s2} = A \cdot \sigma^n \cdot \exp(-Q/RT_2)$ . Z uvedených dvou rovnic můžeme stanovit aktivační energii  $Q$  tak, že je podělíme (tím vypadne člen  $A \cdot \sigma^n$  a neznámé  $A$ ,  $n$ ).

$$\dot{\epsilon}_{s2}/\dot{\epsilon}_{s1} = \exp(-Q/RT_1)/\exp(-Q/RT_2) = \exp\left[\frac{Q}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right] \text{ a odtud po úpravě } Q = R \frac{\ln \frac{\dot{\epsilon}_{s2}}{\dot{\epsilon}_{s1}}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}.$$

Po dosazení zadaných hodnot a numerickém výpočtu  $Q = 190 \text{ kJ/mol}$ .

- 4.8 Stacionární rychlost tečení určité slitiny hliníku má při teplotě 200°C a napětí 55 MPa hodnotu  $2,5 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ , při stejné teplotě a napětí 69 MPa velikost  $2,4 \times 10^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Pokud je známa aktivační energie 140 kJ/mol, vypočtete rychlost stacionárního tečení při 250°C a napětí 48 MPa.
- 4.9. Použitím závislosti na obr. 4.7 stanovte dobu do lomu pro dílec vystavený napětí 140 MPa při teplotě 800°C. Konstanta  $C = 20$ .

♦ **Řešení:**

Podle obr. 4.7 při 140 MPa je hodnota L-M parametru  $24,0 \times 10^3$  (pro teplotu  $T$  v K, a dobu  $t_r$  v hod.), takže  $24,0 \times 10^3 = T \cdot (20 + \log t_r) = 1073(20 + \log t_r)$ , a řešením rovnice pro neznámý čas  $t_r$  dostaneme  $22,37 = 20 + \log t_r$ , odtud  $t_r = 233 \text{ h}$  (9,7 dní).

- 4.10 Uvažujme součást z oceli (obr. 4.7), která je vystavena napětí 55 MPa. Při jaké teplotě bude doba creepové životnosti (doba do přetržení) 20000 hodin ?
- 4.11 Na základě LM parametru pro ocel S-590 predikujte dobu do lomu součásti zatížené napětím 100 MPa při teplotě 600°C a 800°C (obr. 4.7).

**Test – kapitola č. 4**

- 1) Nízkoteplotní tečení nastává při teplotách ( $T_m$  - teplota tavení v K)
  - a)  $T \leq 0,3 T_m$ ,   b)  $T < 400 \text{ K}$ ,   c)  $T = (0,2-0,4) \cdot T_m$
- 2) Ve kterém stadiu je rychlost vysokoteplotního tečení téměř nezávislá na čase:
  - a) v prvním,   b) ve druhém   c) ve třetím
- 3) Závislost rychlosti tečení na napětí pro vysokoteplotní tečení má obvykle tvar:
  - a)  $\dot{\epsilon}_s = k \cdot \sigma$ ,   b)  $\dot{\epsilon}_s = k \cdot \sigma^2$ ,   c)  $\dot{\epsilon}_s = k \cdot \sigma^5$
- 4) Za nižších normalizovaných napětí a vyšších homologických teplot vznikne při tečení kovů lom:
  - a) transkrystalický,   b) tvárný dutinový,   c) interkrystalický
- 5) Která žárovevná ocel vykazuje nejlepší odolnost proti tečení (podle meze tečení):
  - a)  $R_T 10^5 / 1/470 = 120 \text{ MPa}$ ,   b)  $R_T 10^5 / 1/500 = 113 \text{ MPa}$ ,   c)  $R_T 10^5 / 1/470 = 123 \text{ MPa}$
- 6) Žáropevné oceli jsou zpravidla legovány:
  - a) Al, Si,   b) Mn, Ni,   c) Mo, V,
- 7) Larson-Millerův parametr je definován vztahem:
  - a)  $T \cdot \log(C + t_f)$ ,   b)  $T \cdot (C + \log t_f)$ ,   c)  $(T+C) \cdot \log t_f$
- 8) Oblast difuzního Cobleova tečení se při zjemnění zrna kovového materiálu:
  - a) zmenšuje,   b) zvětšuje,   c) posunuje se k vyšším teplotám
- 9) Která z uvedených slitin vykazuje nejlepší žárupevnost:
  - a) AlCu4Mg,   b) NiCr18Ti3Al,   c) TiAl6V4
- 10) Elastická složka deformace během trvání tečení při dané teplotě a daném tahovém napětí:
  - a) s časem stoupá,   b) je konstantní,   c) s dobou expozice klesá

**Literatura**

- [1] HERNAS, A. a kol., Žáropevné oceli a slitiny. VŠB-TU Ostrava, 2009, 389 s.
- [2] ČADEK, J., Creep kovových materiálů. Academia, Praha 1984,
- [3] CALLISTER W.D. JR., RETHWISCH D. G., Materials science and engineering: an introduction. New York: Wiley, 2007. 7th ed. 721 p., ISBN 978-0-471-73696-7.
- [4] STRNADEL B., Nauka o materiálu II. Degradací procesy a design konstrukčních materiálů. VŠB Ostrava, 2008. 1. vyd. 280 s. ISBN 978-80-248-1842-9.
- [5] DOBRZAŃSKI, L. A: Podstawy nauki o materialach i metaloznawstwo. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Gliwice: 2002. 1499 s. ISBN 83-204-2793-2.
- [6] KOUTSKÝ J., Degradací procesy a predikce životnosti. ZU Plzeň (skripta), 1995, 167 s.
- [7] POKLUDA J., aj. Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek. PC-DIR, Brno, 1994, 385 s. ISBN 80-214-0575-9

## 5. ZÁKLADY KOROZE KOVŮ

V této kapitole jsou uvedeny základní poznatky a vztahy z oblasti koroze. V zásadě mohou být aplikovány na všechny kovy a slitiny. Obsah je rozdělen do několika částí (podkapitol). V první části bude vysvětlena termodynamika korozních reakcí, která určuje, zda korozní reakce může probíhat nebo nikoli. Ve druhé části bude vysvětlena kinetika korozních reakcí, která určuje rychlost koroze. Dále jsou uvedeny hlavní druhy koroze podle mechanismu a prostředí a souvislosti mezi základními parametry koroze. Stručně jsou také uvedeny možnosti protikorozní ochrany.



**Čas ke studiu:** 4 hodiny



**Cíl** Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- Rozlišit mezi oxidačními a redukčními elektrochemickými reakcemi.
- Vysvětlit, co způsobuje základní druhy koroze,
- Popsat galvanické články, diagramy E-pH, korozní reakce.
- Stanovit rychlost koroze kovů pomocí proudové hustoty dané reakce.
- Pro každý ze základních typů koroze popsat povahu procesu poškození.
- Charakterizovat hlavní způsoby protikorozní ochrany.



**Výklad**

### 5.1. Úvod

Koroze je fyzikálně chemická interakce mezi materiálem a jeho okolním prostředím, která způsobuje nežádoucí změny vlastností materiálu a zpravidla vede ke zhoršení funkce zařízení, technického systému anebo k ovlivnění prostředí. Koroze je tedy samovolné znehodnocování materiálu, hlavně kovů, vlivem okolního prostředí. Příčinou korozního poškození materiálů jsou obecně fyzikálně chemické procesy a reakce na povrchu materiálu. Poznávání zákonitostí procesu koroze je úkolem teorie koroze, aplikacemi poznatků do praxe se zabývá hlavně korozní inženýrství. Pro správné navrhování, hospodárné a účinné řešení problémů ochrany proti korozi je potřebné získat nezbytné teoretické a technické znalosti.

**Ztráty způsobené korozí** a náklady na protikorozní ochranu se obvykle rozdělují na přímé a nepřímé. Mezi přímé ztráty patří hlavně zkorodovaný materiál, výměny anebo opravy poškozených zařízení a potrubí, dodatečné náklady na projekci, realizaci a údržbu protikorozní ochrany. Podle literárních pramenů celkové náklady spojené s korozí se pohybují

ve většině zemí mezi 3 až 4 % z hrubého domácího produktu. Podíl nákladů na povrchovou ochranu z celkových nákladů je např. pro automobily 15-20%, elektrotechniku 10% a na katodickou aktivní ochranu plynovodů a potrubí 8-15%. Nepřímé ztráty souvisí hlavně se zastavením nebo omezením výroby, např. z důvodu poškození potrubí a zastavení dodávky plynu, úniky produktů, případně s odstraňováním ekologických škod, havárií apod.

Pro zmenšení následků koroze je nutno využívat všechny poznatky z teorie a techniky protikorozní ochrany. Využitím těchto poznatků by se ušetřilo 20 až 40 % ročních nákladů na korozi. To však vyžaduje:

- stanovit investice na optimální protikorozní ochranu a nedopustit jejich snížení,
- zapojovat včas do projektové přípravy odborníky na protikorozní ochranu, aby získali podklady pro nejvhodnější protikorozní ochranu,
- rozvíjet výrobní základnu protikorozní ochrany,
- zlepšit výstupní kontrolu kvality protikorozní ochrany, pravidelně sledovat stav ochrany za provozu.

Obecně se rozlišuje pět základních způsobů **protikorozní ochrany**:

- **volba materiálu** pro dané prostředí a podmínky,
- **úprava prostředí** (snížením nebo odstraněním aktivních složek, přidavkem inhibitorů),
- **ochranné povlaky** anebo vrstvy (kovových, organických, anorganických),
- **konstrukční úpravy** (vhodné technologie, tvary a spojení částí),
- **elektrické ochrany** – hlavně katodická ochrana.

V technické praxi se tyto způsoby ochrany často kombinují nebo doplňují.

## 5.2. Elektrochemická koroze - základní pojmy a vztahy

Podle vnějších podmínek rozlišujeme obecně korozi chemickou, která probíhá v nevodivých prostředích, např. v suchých plynech za vyšších teplot, a korozi elektrochemickou ve vodivých prostředích (elektrolytech, taveninách) spojenou s přenosem náboje, tedy s výskytem elektrického proudu.

Při procesech koroze je možno rozlišovat **vnitřní a vnější činitele (faktory) koroze**: Mezi vnitřní činitele patří složení a struktura materiálu, stav povrchu a povrchová úprava. Mezi vnější činitele je zařazeno složení a pH prostředí, teplota, rychlost proudění nebo relativní rychlost mezi materiálem a prostředím, dále záření, okolní elektrická nebo magnetické pole.

Dále je potřebné rozlišovat termodynamiku a kinetiku (rychlost) koroze.

Základní názvosloví z oblasti koroze a protikorozní ochrany je uvedeno v normě ČSN EN ISO 8044 – Koroze kovů a slitin – **Základní termíny a definice**.

### Termodynamické možnosti koroze

Koroze může samovolně probíhat tehdy, když energie korozních produktů je nižší než energie původních činitelů korozního systému (tj. složek prostředí a materiálu, ze kterých vznikly korozní produkty). Míra snížení energie, přesněji rozdílu volné entalpie  $\Delta G < 0$ , je tedy hlavním kritériem uskutečnění koroze. Mezi změnou uvedené volné entalpie a rovnovážným potenciálem ( $E_r$ ) platí jednoduchý vztah:

$$\Delta G = - n.F.E_r. \quad (5.1)$$

Poznámka: Volná entalpie  $G$ , Giggsova energie, (J/mol) je funkcí teploty a tlaku, popisuje změny energie procesu v soustavě, zpravidla mezi výchozím a konečným stavem. Při korozi se používá pro porovnání, rozdíly energie mezi reagujícími složkami a vzniklými korozními produkty.

Pokud koncentrace rozpuštěných látek odpovídá jednotkové aktivitě, tlak je 1 atm (0,09806 MPa) a teplota 25°C, jsou podmínky považovány za standardní. Rovnovážné potenciály za těchto podmínek jsou pojmenovány jako standardní potenciály a jejich hodnoty pro kovy, nebo oxidačně-redukční reakce jsou uvedeny v tab. 5.1

**Tab. 5.1.** Hodnoty standardních potenciálů vybraných kovů (vzhledem k standardní vodíkové elektrodě SHE) a elektrodových reakcí.

| Elektrodová reakce                                                          | standardní<br>potenciál $E^0$ [V] | Elektrodová reakce                                   | standardní<br>potenciál $E^0$ [V] |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| $\text{Au}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Au}$                        | +1,420                            | $\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}$ | -0,250                            |
| $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$    | +1,229                            | $\text{Co}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Co}$ | -0,277                            |
| $\text{Pt}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pt}$                        | $\approx +1,2$                    | $\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cd}$ | -0,403                            |
| $\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag}$                            | +0,800                            | $\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}$ | -0,440                            |
| $\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$                    | +0,771                            | $\text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}$ | -0,744                            |
| $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4(\text{OH}^-)$ | +0,401                            | $\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Zn}$ | -0,763                            |
| $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$                        | +0,340                            | $\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}$ | -1,662                            |
| $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$                          | 0,000                             | $\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mg}$ | -2,363                            |
| $\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb}$                        | -0,126                            | $\text{Na}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Na}$     | -2,714                            |
| $\text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Sn}$                        | -0,136                            | $\text{K}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{K}$       | -2,924                            |

Hodnoty rovnovážného potenciálu (za nestandardních podmínek) se vypočítají podle Nernstovy rovnice, pro dílčí reakce  $\text{M} = \text{M}^{n+} + n\text{e}^-$ , obecně

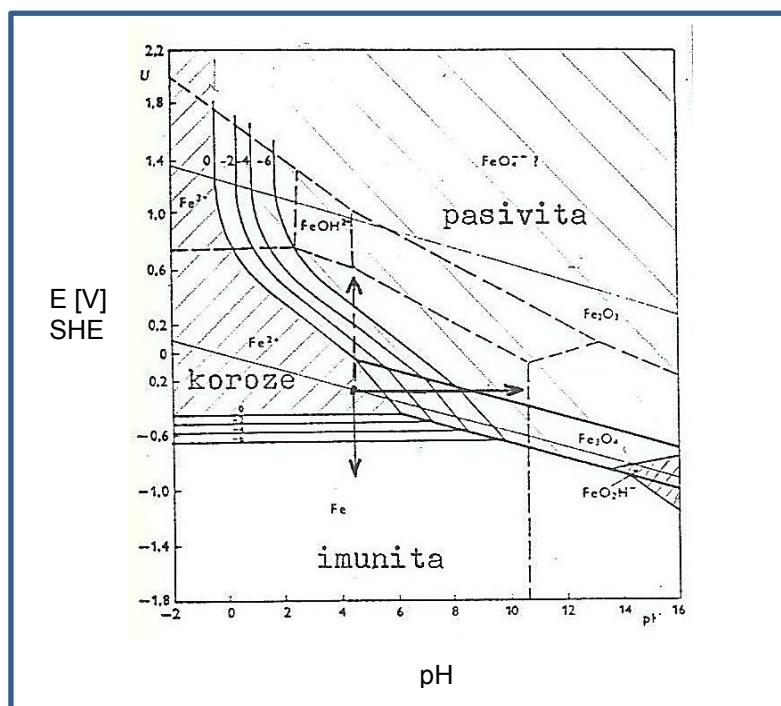
$$E_r(\text{M}^{n+}/\text{M}) = E^0(\text{M}^{n+}/\text{M}) + (RT/nF) \cdot \ln[a(\text{M}^{n+})],$$

$$\text{nebo jednodušeji: } E_r = E^0 + (RT/nF) \cdot \ln(a), \quad (5.2)$$

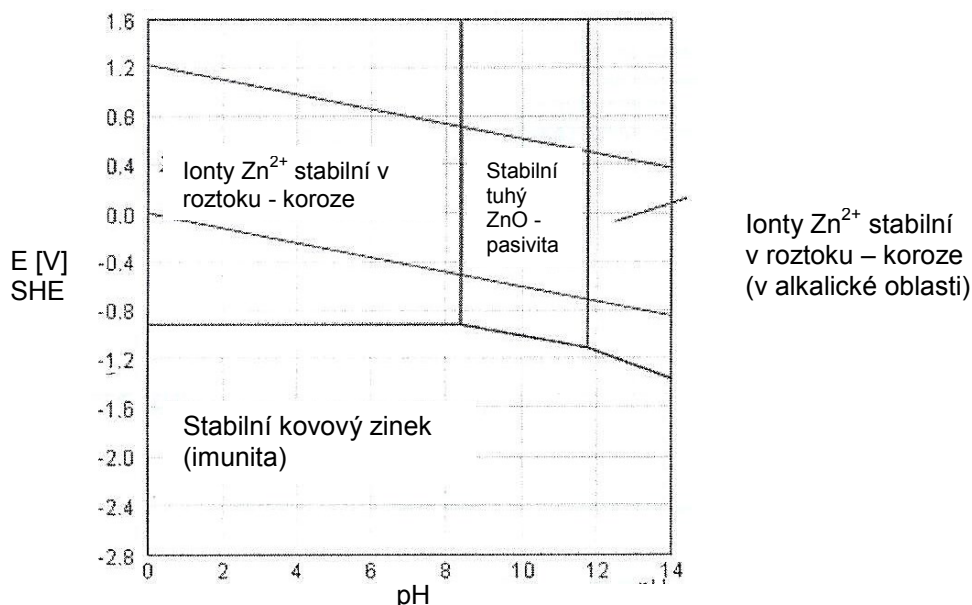
kde  $R$  je plynová konstanta ( $R = 8,314 \text{ J/mol}$ ),  $T$  absolutní teplota v K,  $n$  je počet elektronů jednoho atomu podílejících se na elektrochemické reakci (oxidační číslo) a  $F$  je Faradayova konstanta  $F = 9,6487 \cdot 10^4 \text{ C/mol}$ , poslední člen  $a(\text{M}^{n+})$  představuje aktivitu iontů kovu v roztoku. Aktivita je dána vztahem  $a = f \cdot c$ , kde  $c$  je koncentrace iontů a  $f$  je aktivitní koeficient. Pro zředěné roztoky hodnota aktivity se prakticky rovná koncentraci.

Poznámka Znaménko potenciálu může být kladné i záporné podle toho, jak je elektrodová reakce napsána. Podle mezinárodní konvence odpovídá znaménko v tabulkách redukčnímu směru reakce, např.  $\text{Zn}^{2+} + 2\text{e} \rightarrow \text{Zn}$ , takže  $E_o(\text{Zn}^{2+}/\text{Zn}) = -0,76 \text{ V}$ . Při obráceném průběhu reakce  $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}$  má hodnota potenciálu dle konvence opačné znaménko  $E_o(\text{Zn}/\text{Zn}^{2+}) = +0,76 \text{ V}$ .

Rozhodování o uskutečnitelnosti koroze a o afinitě kovu k oxidačnímu činidlu nám pro mnohá prostředí usnadňují diagramy  $E - \text{pH}$ , známé jako diagramy Pourbaixe (čteme Purbé). Z diagramu lze určit změny pH prostředí potřebné k převedení rozpustných korozních produktů v nerozpustné, a naopak. Naznačuje i změny potenciálu potřebné k převedení korozních produktů na nerozpustné produkty o vyšším mocenství a pro jejich redukci na kov. Diagramy tak poskytují teoretické podklady pro anodickou nebo katodickou ochranu, úpravu prostředí apod. (obr. 5.1 a 5.2). Stupnice potenciálu  $E$  je vztažena k standardní vodíkové elektrodě (SHE).



Obr. 5.1. Diagram potenciál  $E - \text{pH}$  pro soustavu železo – voda (25°C) s vyznačením oblastí koroze, imunity a pasivity. Šipky vyznačují možnosti protikoroziční ochrany změnou potenciálu nebo úpravou prostředí. Katodická ochrana – posuv potenciálu z oblasti koroze do oblasti imunity. Úprava prostředí – zvýšení pH do oblasti pasivity, do alkalické oblasti. Anodická ochrana – u některých pasivovatelných kovů zvýšení potenciálu z oblasti koroze do oblasti pasivity (málo používané).



Obr. 5.2. Diagram  $E - pH$  pro zinek. Popis z termodynamického hlediska. Koroze zinku může probíhat v kyselé anebo v alkalické oblasti.

Teoretické termodynamické úvahy a diagramy  $E-pH$  o korozi se týkají hlavně tendenci materiálu korodovat a zpravidla souvisí s možností působení galvanických článků. Na druhé straně nelze z nich odvodit rychlosti (kinetiku) koroze a související životnosti součástí. Rychlosti koroze je nutno stanovit experimentálně na základě laboratorních zkoušek anebo za reálných podmínek při monitorování koroze.

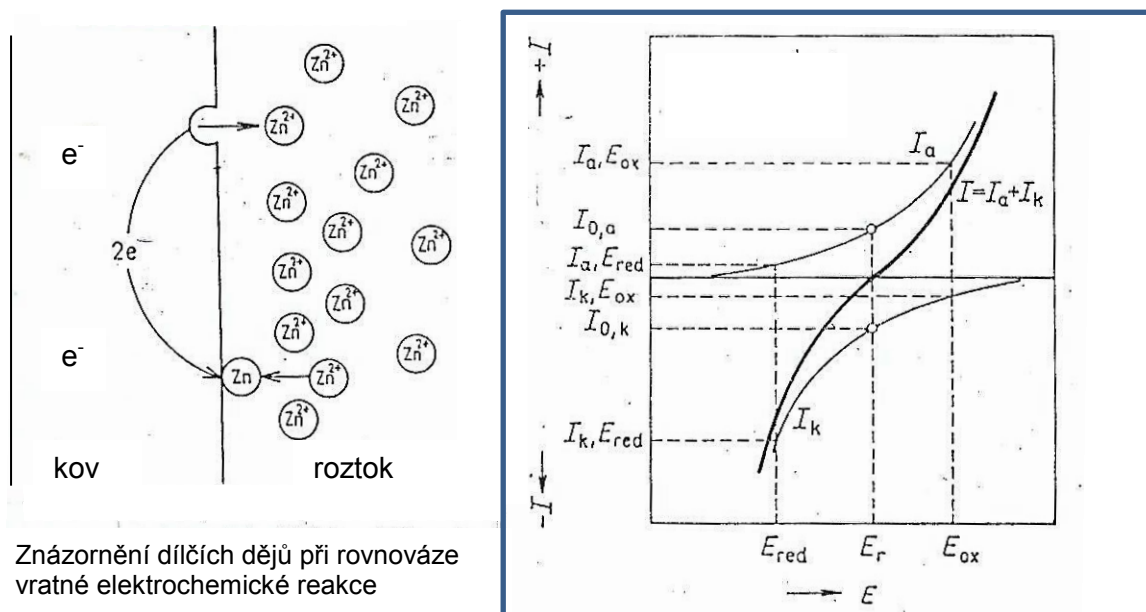
### 5.3. Přepětí

Jestliže má elektrochemická reakce nabýt v jednom směru rychlosti odlišné od rovnovážné, musí elektrochemická reakce probíhat při jiném než rovnovážném potenciálu. Je výhodou, že rychlost reakce lze měřit pomocí elektrického proudu ( $I$ ). Závislosti proudu na potenciálu  $I = f(E)$ , nebo naopak  $E = f(I)$  se znázorňují polarizačními křivkami. Rychlost oxidačních a redukčních reakcí bude záviset na rozdílu mezi potenciálem, při kterém reakce probíhá ( $E$ ) a rovnovážným potenciálem ( $E_r$ ). Uvedený rozdíl se označuje u vratných reakcí jako přepětí (obr. 5.3a):

$$\eta = E - E_r \quad (5.3)$$

Za nerovnovážných podmínek mohou elektrochemické reakce probíhat jen tehdy, když v prostředí budou od povrchu kovu odváděny ionty kovu (pro oxidační směr) nebo když budou ionty kovu k povrchu přiváděny (pro redukční směr). Na průběhu elektrochemické reakce se tedy podílejí dva dílčí děje - vlastní povrchová elektrochemická reakce a přenos reagujících látek v prostředí. Těmito fyzikálními a elektrochemickými procesy je omezována celková rychlost reakce a uvedené omezení rychlosti se vztahuje k přepětí.

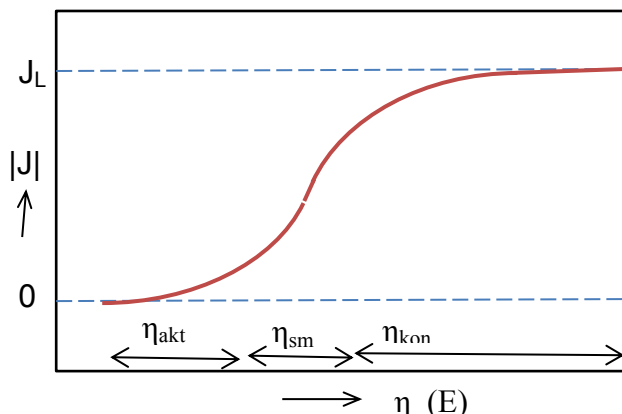
Rozlišuje se přitom přepětí aktivační a přepětí koncentrační. Aktivační přepětí souvisí s aktivační energií pro přechod iontu kovu z povrchu materiálu do roztoku, koncentrační předpětí s transportem (prostřednictvím difuze, migrace, konvekce) potřebného množství redukčních složek prostředí k elektrodě pro udržení katodického děje.



Obr. 5.3a Rovnovážný potenciál  $E_r$  a výměnný proud  $I_0$  vratné elektrochemické reakce. Za rovnováhy je součet proudů dílčích reakcí  $I_{0,a} + I_{0,k}$  roven nule.

Aktivační přepětí se vztahuje na omezení rychlosti povrchové elektrochemické reakce, která je řízena překonáním určité aktivační energie (bariéry). Vztah mezi aktivačním přepětím  $\eta_{\text{akt}}$  a rychlostí reakce vyjádřené proudovou hustotou  $J$  je  $\eta_{\text{akt}} = \pm \beta \cdot \log J/J_0$ , kde  $\beta$  je konstanta,  $J_0$  je výměnná proudová hustota, znaménko (+) se vztahuje k anodické a (-) ke katodické reakci.

Koncentrační přepětí je spojeno s přenosem aktivních složek koroze v prostředí k povrchu elektrody. Hlavní příčinou je ustavení koncentračního gradientu reagující látky, jejíž částice jsou přenášeny z roztoku k povrchu difúzí. Elektrochemická reakce je pak vymezena limitní difúzní proudovou hustotou  $J_L = n c D F / \delta$ , kde  $c$  je koncentrace difundující látky v objemu roztoku,  $D$  je její součinitel difúze,  $\delta$  – tloušťka mezní difúzní vrstvy,  $n$  a  $F$  mají obvyklý význam. S teplotou stoupá hodnota  $D$ , a s rostoucí rychlostí proudění klesá  $\delta$  a tím se zvyšuje **limitní difúzní proudová hustota**  $J_L$  (Obr. 5.3b).



Obr. 5.3b Souvislost mezi proudovou hustotou ( $J$ ) elektrochemické reakce a přepětím  $\eta$ . Oblast aktivačního  $\eta_{\text{akt}}$ , koncentračního  $\eta_{\text{kon}}$  a smíšeného  $\eta_{\text{sm}}$  přepětí.

Souvislost mezi rychlostí elektrochemické reakce ( $J$ ) a koncentračním přepětím je dána vztahem  $\eta_{\text{kon}} = 2,3(RT/nF) \cdot \log(1 - J/J_L)$ . Aktivační přepětí se uplatňuje zejména při menších rychlostech reakcí, koncentrační přepětí při vyšších rychlostech procesu (Obr. 5.3b).

## 5.4. Výměnný proud

Vratná elektrochemická reakce, např.  $\text{Fe} = \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ , probíhá za rovnováhy v obou směrech (stejnou rychlostí) při **rovnovážném vratném potenciálu**  $E_r$ . Atomy a ionty kovu se za rovnováhy navzájem zaměňují. Aby zůstala zachována rovnováha a elektrická neutralita, musí se rychlost dílčí oxidační reakce (anodická) rovnat rychlosti dílčí redukční reakci (katodické). Protože rychlost elektrochemické reakce lze charakterizovat množstvím uvolněných nebo spotřebovaných elektronů, je výhodné vyjadřovat rychlost elektrickým proudem. Rychlost vzájemné výměny oxidačních a redukčních látek za rovnováhy je určována **výměnným proudem**  $I_0$ , který je roven rychlosti dílčích reakcí, tj. anodické  $I_{0,a}$  a katodické  $I_{0,k}$ , platí tedy rovnost  $I_0 = I_{0,a} = -I_{0,k}$  (obr. 5.3a).

Namísto proudu ( $I$ ) se uvádějí na korozních diagramech proudové hustoty (označení  $J$  nebo  $j$  v jednotkách  $\text{A/m}^2$  nebo  $\text{mA/cm}^2$ ), které jsou vhodnější při popisu mnoha korozních dějů. Obecně **proudová hustota**  $J = I/S$ , kde  $S$  je plocha, kterou prochází proud  $I$  (kolmo na  $S$ ).

Nesouhlas mezi korozním chováním a jeho postavením v řadě standardních potenciálů je v reálných podmínkách často určován tím, že potenciál je ovlivněn pasívní vrstvou, která se tvoří na povrchu kovu. Potenciál pak může mít hodnotu značně rozdílnou od potenciálu uvedeného v řadě standardních potenciálů, kde se předpokládá povrch v aktivním stavu. Tato skutečnost je rozhodující pro chování hliníku a titanu, nebo korozivzdorných ocelí, které jsou v neutrálních elektrolytech a mnoha dalších prostředích v pasívním stavu.

## 5.5. Korozní reakce a diagramy

K určení rychlosti korozních reakcí se využívá stejného principu jako při odvozování rovnovážného vratného potenciálu a výměnného proudu. Vychází se ze dvou zásad:

1. V kovu ani elektrolytu se nemůže hromadit elektrický náboj, tj. **podmínka elektro-neutrality**.
2. Proudové anodické a katodické reakce musí být rovny při korozním potenciálu  $E_{\text{kor}}$  (viz. obr. 5.4):  $I_{\text{kor}} = I_{0,a} = -I_{0,k} = |I_{0,k}|$  přitom celkový proud  $I = I_a + I_k = 0$

Každou korozní reakci lze rozdělit na dvě dílčí elektrochemické reakce:

Oxidaci kovu – anodickou reakci  $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$

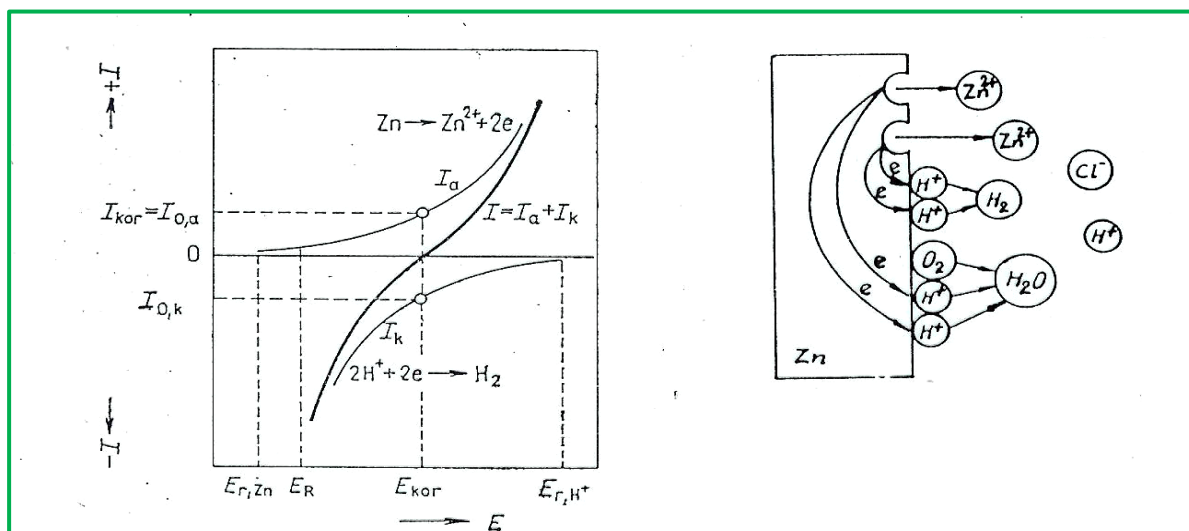
Redukci oxidačního činidla (tzv. depolarizátoru) z roztoku

– katodickou redukci  $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$

Anodickou reakcí je každá korozní reakce, při které je kov oxidován na kovy a která produkuje počet elektronů odpovídající valenci kovu.

**Rovnovážné podmínky** obou dílčích reakcí jsou dosaženy při jejich rovnovážných potenciálech  $E_{r,\text{Me}}$  a  $E_{r,\text{H}_2}$ . Na povrchu kovu, který je dobrým vodičem, však nemohou

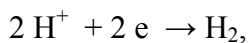
probíhat elektrochemické reakce při různém potenciálu. Proto obě dílčí reakce budou probíhat při smíšeném, jinými slovy korozním potenciálu  $E_{kor}$ , který leží mezi oběma krajními hodnotami - rovnovážnými potenciály. Při tomto potenciálu jsou obě dílčí reakce polarizovány, takže u anodické reakce převládá rychlost oxidačního směru při potlačení rychlosti redukčního směru. U katodické reakce naopak převládá rychlost redukčního směru. Měřitelná technicky významná rychlost anodické reakce začíná při potenciálu počátku anodického rozpouštění  $E_R$  (obr. 5.4).



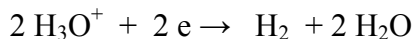
Obr. 5.4. Rovnost proudů dílčí anodické reakce  $I_{0,a}$  a dílčí katodické reakce  $I_{0,k}$  při korozním potenciálu  $E_{kor}$ . Korozní proud  $I_{kor} = I_{0,a}$  je úměrný rychlosti koroze. Znázornění koroze kovu (Zn) s vodíkovou depolarizací.

Jako katodické reakce se může uplatnit každá redukční reakce, která může za daných podmínek probíhat a jejíž rychlost je vyšší než rychlost zpětné redukce rozpustných iontů kovu. Obecně to mohou být tyto reakce:

Redukce vodíkových iontů

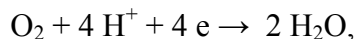


anebo přesněji

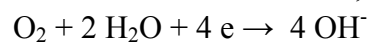


Redukce kyslíku

- v kyselém prostředí

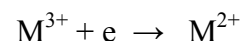


- v neutrálním a alkalickém prostředí

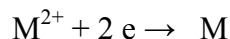


Redukce kationtů

- na níže mocné ionty



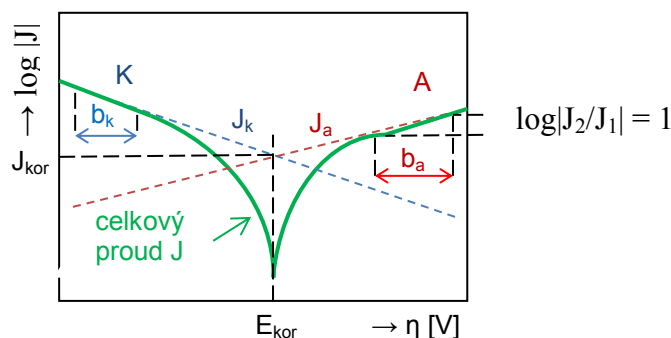
- na kov



Rychlost koroze se zvětšuje s rostoucím rozdílem mezi oxidačně-redukčním potenciálem kovu a oxidačně-redukčním potenciálem prostředí a se snadností průběhu obou dílčích reakcí, tj. s jejich klesající polarizovatelností (se zvětšujícím se sklonem polarizační křivky  $I = f(E)$ ). U anodického rozpouštění kovů se obvykle neuplatňuje koncentrační polarizace.

Samovolná elektrochemická koroze kovu, tj. jeho oxidace proběhne, když prostředí obsahuje složku schopnou redukce a oxidačně-redukční potenciál této dílčí reakce je vyšší než oxidačně redukční potenciál reakce kovu. Např. na Cu není možná koroze bez kyslíku, neboť reakce  $\text{H}^+/\text{H}_2$  má nižší potenciál než reakce mědi  $\text{Cu}/\text{Cu}^{2+}$ .

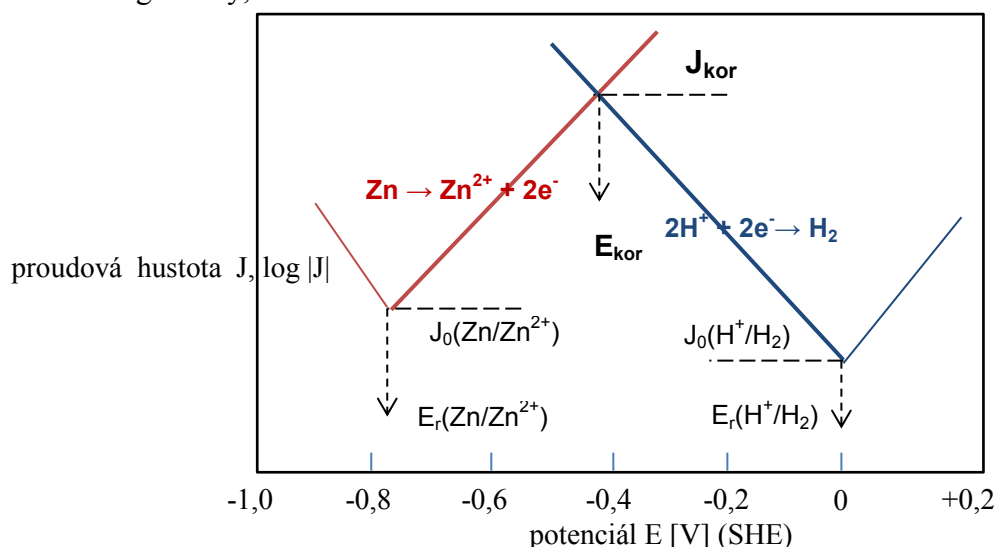
Polarizační křivky (obr. 5.4) je výhodné vynášet v semilogaritmických stupnicích, obr. 5.5. V oblasti aktivační polarizace získáme lineární závislosti logaritmu absolutní hodnoty proudové hustoty na potenciálu, resp. přepětí (polarizaci). Pro anodickou nebo katodickou část křivky platí Tafelovy vztahy:  $\eta = \beta \cdot \ln(J/J_{\text{kor}})$  nebo  $\eta = a + b \cdot \log|J|$ .



Obr. 5.5. Obecný polarizační diagram s možností stanovení korozního potenciálu  $E_{\text{kor}}$  a hustoty korozního proudu  $J_{\text{kor}}$ .

Z uvedeného polarizačního diagramu může být stanoven korozní potenciál  $E_{\text{kor}}$ , kde anodický a katodický proud jsou stejné velikosti a korozní proud  $J_{\text{kor}}$ , který je úměrný rychlosti koroze. Je velmi obtížné měřit anodické a katodické křivky pro určitou reakci nezávisle. Běžně je naměřena polarizační křivka celého systému, zahrnující sumární proud ( $J = J_a + J_k$ ), ze které lze stanovit korozní potenciál a rychlost koroze.

Souvislosti mezi korozním potenciálem  $E_{\text{kor}}$ , korozní proudovou hustotou  $J_{\text{kor}}$  a rovnovážnými (redox  $E_r$ ) potenciály a výměnnými proudovými hustotami ( $J_0$ ) lze znázornit graficky, obr. 5.6.



Obr. 5.6. Kinetika elektrodových reakcí zinku v kyselém roztoku; reakce oxidace a redukce jsou řízeny aktivační polarizací.

Důležitým parametrem je **polarizační odpor**  $R_p$ , který je nepřímo úměrný rychlosti rovnoměrné koroze kovů při korozním potenciálu:  $J_{kor} = B/R_p$ , kde  $B$  je konstanta. Polarizační odpor může být používán pro sestavení pořadí odolnosti slitin, povrchových úprav, inhibitorů apod. vůči rovnoměrné korozi. Polarizační odpor  $R_p$  je definován vztahem

$$R_p = \frac{\partial \Delta E}{\partial J}, \quad (5.5)$$

kde malý rozdíl potenciálu  $\Delta E = E - E_{kor}$ , je spojen se změnou proudové hustoty  $j$  při polarizačním měření. Pro stanovení  $R_p$  norma (ASTM G59) předepisuje záznam polarizační křivky v rozmezí  $\Delta E = \pm 30$  mV od korozního potenciálu a s nízkou rychlostí polarizace ( $dE/dt = 0,6$  V/h). Velikost polarizačního odporu je úměrná směrnici tečny k polarizační křivce v bodě ( $E = E_{kor}$ ,  $J = 0$ ) v souladu s Ohmovým zákonem  $R_p = \Delta E / \Delta J$  (obr. 5.4).

Hmotnost ( $m$ ) rozpuštěného kovu při elektrochemické korozi je přímo úměrná jeho náboji ( $Q$ )

$$m = A_e \cdot Q,$$

kde elektrochemický ekvivalent:  $A_e = \frac{M}{n \cdot F}$ ,  $M$  – molární hmotnost,  $n$  – oxidační číslo

(mocenství) iontů,  $F$  – Faradayova konstanta ( $F = 95,6$  kC/mol), a prošlý náboj  $Q = I \cdot t$ , při konstantním proudu  $I$  za dobu  $t$ . Spojením obou vztahů dostaneme **Faradayův zákon**:

$$m = \frac{M \cdot I \cdot t}{n \cdot F} \quad (5.6)$$

Faradayův zákon umožňuje výpočty rychlosti elektrochemické koroze, hloubky korozního napadení, používá se také pro výpočty tloušťky galvanicky nanesených povlaků.

Podle Faradayova zákona dostaneme pro rychlost elektrochemické koroze vztahy:

$$r_c = \frac{M \cdot J}{n \cdot F} \quad \left[ \frac{g}{m^2 \cdot s} \right] \quad \text{nebo pro hloubku průniku:} \quad h = 3,27 \cdot \frac{M \cdot J}{n \cdot \rho} \quad [\text{mm/rok}], \quad (5.7)$$

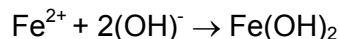
kde  $J$  – proudová hustota,  $\rho$  – měrná hmotnost (hustota) materiálu,

### Spřažené reakce

Anodické tj. vlastní korozní reakce a katodické reakce jsou vzájemně spřaženy (vázány) podmínkou **zachování elektroneutality**:  $J_a + J_k = 0$ . Takový stav je obdobný stavu u vratných reakcí, který byl popisován v předchozích kapitolách, kdy došlo k zastavení sumární reakce za rovnovážného potenciálu. U spřažených reakcí se však reakce při dosažení korozního potenciálu nezastaví, neboť dílčí katodická i dílčí anodická proudová hustota odpovídají průběhu různých reakcí (obr. 5.4 a 5.7).

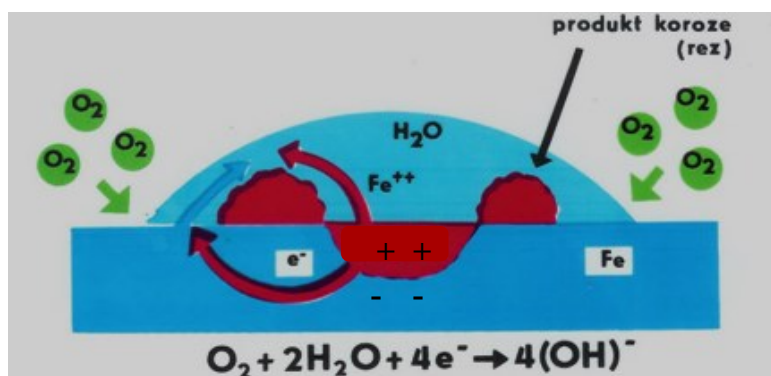
Při reakci kovů s elektrolyty dochází k oxidaci kovu, např. železa nebo nelegované oceli na železnaté ionty  $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$  a k redukci některé složky prostředí, např. vodíkových iontů na vodík  $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$ . Každá z uvedených elektrochemických reakcí může sama o sobě probíhat i v opačném směru a za určitých podmínek dosáhnout rovnováhy. Rovnováha každé dílčí reakce je spojena s rovnovážným elektrodovým potenciálem  $E_r$ , který se zřetelem k charakteru reakcí je také nazýván jako rovnovážný oxidačně-redukční potenciál.

sekundární reakce



(tvorba rzi)

primární korozní reakce



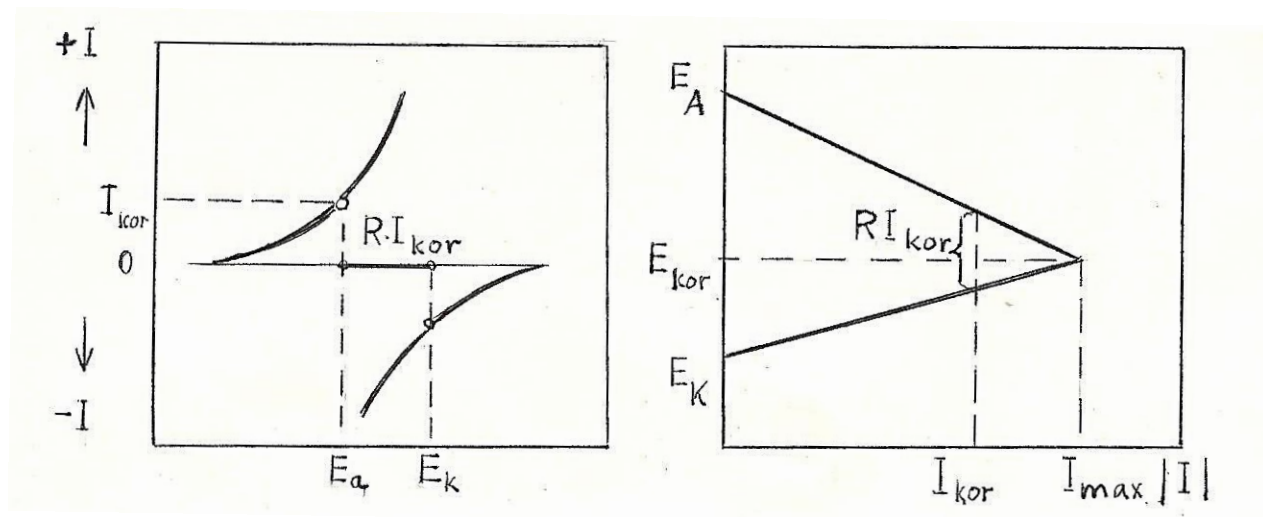
Obr. 5.7. Schéma koroze kovu (železa, oceli) s kyslíkovou depolarizací a transportními procesy, např. difuze kyslíku, přenos náboje.

## 5.6. Polarizace

V průběhu elektrochemických a zejména korozních reakcí může docházet k nahromadění kladného náboje na straně roztoku a záporného náboje (elektronů) v kovu, dojde tedy k vytvoření **elektrické dvojvrstvy**, která zpomaluje nebo zastavuje vlastní korozní proces. Tento žádaný jev lze vysvětlit působením přitažlivých elektrostatických sil mezi záporně nabitým povrchem a kladnými ionty. Aby reakce mohla dále pokračovat, je nutno aby v prostředí se vyskytovaly ionty nebo molekuly, které budou spotřebovávat (vázat na sebe) přebytečné elektrony z kovu a tím zmenšovat účinek elektrostatického pole na brzdění reakcí. Polarizaci je možno také zmenšit a reakce udržovat zapojením elektrod do vnějšího elektrického okruhu s potenciostatem, který bude odvádět elektrony z kovové pracovní elektrody.

V této souvislosti se polarizace také vztahuje ke koroznímu potenciálu  $\xi = \Delta E = E - E_{\text{kor}}$ . Pro kladné hodnoty  $\Delta E > 0$  mluvíme o anodické polarizaci, kdy převládá reakce v anodickém směru ( $I_a > I_k$ ), obr. 5.4. Záporné hodnoty  $\Delta E$  pak odpovídají katodické polarizaci.

Při existenci potenciálového rozdílu mezi dvěma elektrodami dochází k průchodu proudu. S průchodem proudu ohmickým odporem je spojen vznik spádu napětí, jeho součástí je ohmická polarizace  $E_{\text{ohm}} = R \cdot I$ , kde  $R$  je elektrický odpor prostředí mezi oběma elektrodami. Ohmická polarizace ovlivňuje korozní děje v případech, kdy dochází k průchodu proudu v elektricky špatně vodivých prostředích. Může dosahovat tak vysokých hodnot, že zastavuje činnost např. korozních článků. Vznik a působení ohmické polarizace lze přiblížit na korozním diagramu (obr. 5.8).



Obr. 5.8 Elektrický odpor  $R$  prostředí zmenšuje korozní proud  $I_{kor}$  a potenciály anody a katody se ustavují na rozdílných hodnotách,  $E_A$  a  $E_K$ . Znáznornění ohmické polarizace ve dvou formách korozních diagramů.

Potenciál izolovaných elektrod - anody a katody je vyznačen jako  $E_A$ ,  $E_K$ . Při jejich spojení, tj. při vzniku korozního článku, dojde k ustavení korozního potenciálu  $E_{kor}$ , při kterém dochází ke korozi proudem  $I_{max}$ . Vzhledem k uplatnění ohmické polarizace se však rychlost koroze sníží na hodnotu danou proudem  $I_{kor}$ , potenciály obou elektrod se odlišují o hodnotu  $R \cdot I_{kor}$ .

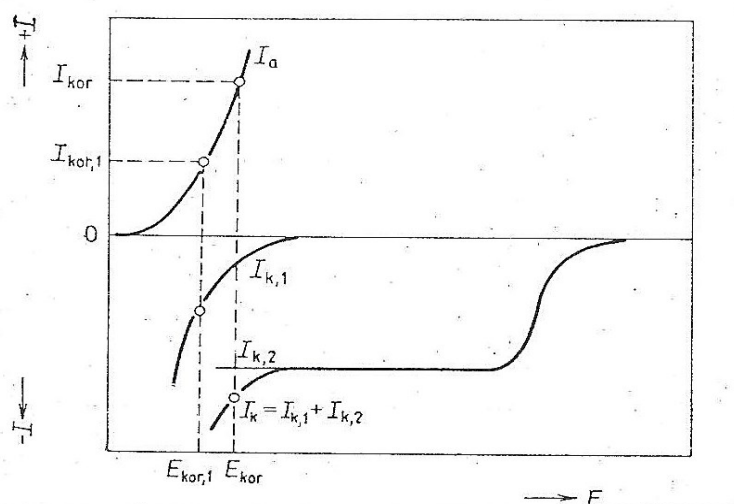
Elektroodové děje jsou brzděny i dalšími formami polarizace, jako koncentrační polarizace, ovlivněná transportními jevy (difuze, migrace, konvekce), polarizace související přímo s příslušnou elektrodovou reakcí, případně i předřazenou chemickou reakcí.

### 5.7. Depolarizační reakce

V některých roztocích je přítomno několik aktivně působících složek. Katodické redukce se účastní ty oxidačně-redukční systémy roztoku, jejichž oxidačně-redukční potenciál je vyšší než potenciál korozní. Celkový proud katodické reakce  $I_k$  je součtem proudů redukce jednotlivých oxidačně-redukčních systémů  $I_{k,i}$  ( $I_k = I_{k,1} + I_{k,2} + I_{k,3} + \dots$ ). Polarizační křivky se proto sčítají. Protože celkový proud je větší než proud redukce jednotlivých oxidačně-redukčních reakcí, může být anodická reakce rychlejší, takže koroze je intenzivnější (obr. 5.9).

Podobně celkový proud anodického rozpouštění kovového materiálu  $I_a$  může být součtem jednotlivých proudů ( $I_{a,j}$ ) pro různé fáze nebo prvky v materiálu ( $I_a = I_{a,1} + I_{a,2} + I_{a,3} + \dots$ ). Přitom korozní (smíšený) potenciál se ustaví na hodnotě, když platí rovnost

$$I_a = |I_k| \quad (5.8)$$



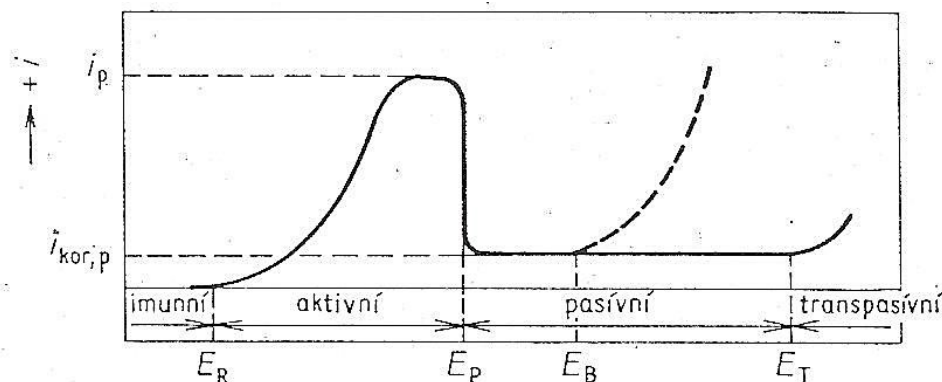
Obr. 5.9 Zvětšení korozního proudu  $I_{kor}$  při účasti dvou oxidačně-redukčních systémů  $I_{k,1}$  a  $I_{k,2}$  na katodické reakci  $I_k$ . Příklad smíšené (vodíkové a kyslíkové) depolarizace.

Kationty některých kovů v prostředích s určitou hodnotou pH nebo v roztocích obsahujících některé anionty se nerozpouštějí. Proto na povrchu kovu vznikají nerozpustné korozní produkty. Vzniklá vrstva brzdí přenos hmoty a zvyšuje polarizaci dílčích reakcí. Proto koroze kovů za vzniku nerozpustných korozních vrstev probíhá pomaleji než za vzniku rozpustných produktů.

## 5.8. Pasivita

Na některých kovech a slitinách (např. hliník, titan, nerezavějící oceli) se za podmínek jejich vyšší afinity k určitým složkám prostředí anebo při vyšších potenciálech sníží jejich chemická aktivita a koroze se podstatně zpomalí, což je způsobeno vznikem tuhé, velmi tenké, kompaktní a přilnavé povrchové vrstvičky - **pasivního filmu** (tloušťky řádově v nanometrech) korozních produktů přímou reakcí kovu s kyslíkem, vodou nebo aniontem roztoku. Např.  $2\text{Cr} + 6\text{OH}^- = \text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{O} + 6\text{e}^-$ .

Stav snížené chemické aktivity se označuje jako **pasivita**, přechod do tohoto stavu jako pasivace. Přechod do pasivního stavu je charakterizován pasivačním potenciálem  $E_p$  a pasivační proudovou hustotou  $j_p$ . **Pasivační potenciál** je potenciál, nad kterým je dosaženo pasivity. **Pasivační proudová hustota** je maximální hustota proudu anodické reakce, kterého tato reakce při potenciálu počátku pasivace dosahuje. V oblasti pasivity je rychlost koroze v pasivním stavu - hustota proudu v pasivním stavu  $j_{kor,p}$  - prakticky nezávislá na potenciálu. Oblast pasivity končí potenciálem **transpasivace**  $E_T$  nebo potenciálem vylučování kyslíku. Nad  $E_T$  se rychlost anodické reakce zvyšuje (obr. 5.10).



Obr. 5.10. Polarizační křivka pasivovatelného kovu s charakteristickými hodnotami a oblastmi koroze v imunním, aktivním a transpasivním stavu.

$j_p$  - pasivační proudová hustota,  $j_{kor,p}$  - hustota proudu koroze v pasivním stavu,  $E_R$  - potenciál počátku anodického rozpouštění,  $E_P$  - potenciál počátku pasivace,  $E_B$  - potenciál bodové koroze (pittingu),  $E_T$  - potenciál počátku transpasivace

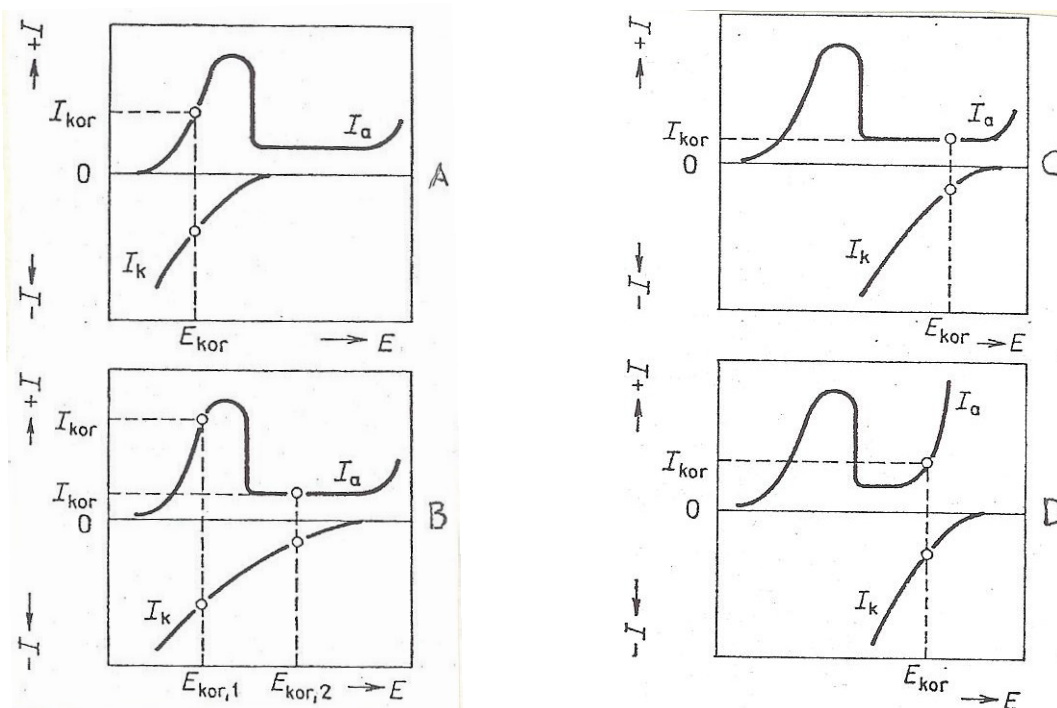
Na anodické křivce **pasivovatelného kovu** lze pak rozlišit oblast koroze v aktivním, pasivním a transpasivním stavu. Její průběh je ovlivňován složením elektrolytu, teplotou a prouděním. **Pasivační potenciál  $E_P$**  charakterizuje snadnost pasivace kovu a určuje minimální oxidační schopnost prostředí nutnou pro jeho pasivaci.

Korozní chování pasivovatelného kovu je opět závislé na oxidačně redukčním potenciálu kovu a prostředí a na rychlosti anodické a katodické reakce. O tom, jakou rychlostí a v jakém stavu bude koroze probíhat, rozhoduje korozní potenciál, ustavující se za podmínky  $I_a = -I_k$ .

Kov koroduje v aktivním stavu, když oxidačně-redukční potenciál prostředí leží mezi (elektrodovým) potenciálem kovu a jeho pasivačním potenciálem ( $E_{r,Me} < E_{redox} < E_P$ ) (obr. 5.11a).

K **samovolné pasivaci** kovu dochází, když oxidačně-redukční potenciál prostředí  $E_{redox}$  je ušlechtilejší než pasivační potenciál, ale zápornější než transpasivační potenciál, a když proud katodické reakce při pasivačním potenciálu je větší než kritický pasivační proud ( $E_P < E_{redox} < E_T$ ,  $I_K < I_P$ ) obr. 5.11c. Je-li splněna první podmínka, ale proud katodické reakce je menší než pasivační proud, není pasivní stav stabilní (obr. 5.11b). Pokud je oxidačně-redukční potenciál prostředí ušlechtilejší než transpasivační potenciál ( $E_{redox} > E_T$ ), probíhá koroze v transpasivním stavu.

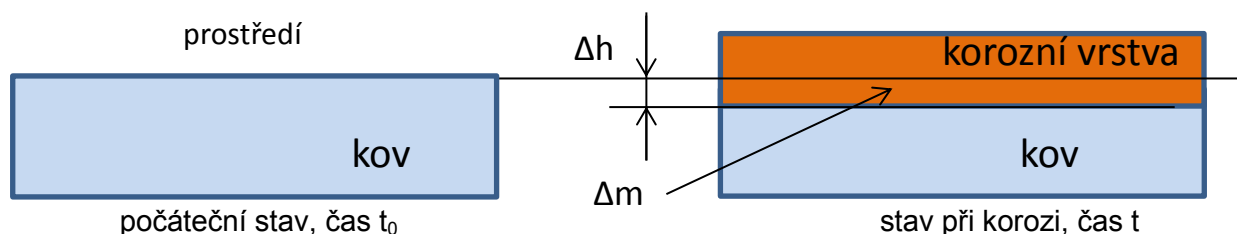
Při místním narušení pasivního stavu aktivními složkami (aktivátory) dochází k bodové korozi. K bodové korozi může docházet pouze tehdy, když oxidačně-redukční potenciál prostředí je větší než potenciál bodové koroze ( $E_{redox} > E_B$ ), obr. 5.11d.



Obr. 5.11. Polarizační křivky dílčích anodických ( $I_a$ ) a katodických reakcí ( $I_k$ ) pasivovatelného kovu (b) při jeho korozi: A - v aktivním stavu, B - v nestabilním pasivním stavu, C - v pasivním stavu, D - při bodové korozi.

## 5.9. Druhy korozního napadení

**Rovnoměrná koroze** je nejběžnějším druhem korozního napadení. Materiál pod plochou vystavenou prostředí ubývá téměř stejnoměrně. Při malé aktivitě korozního prostředí může korozní napadení zpočátku začínat na několika místech povrchu, ale plocha zasažené části se časem rozšiřuje a napadení nakonec pokryje celý povrch. Životnost zařízení, které bude podléhat rovnoměrné korozi, se snadno vypočítá z rychlosti koroze vyjádřené rozměrovým úbytkem materiálu za jednotku času. Snížení nosnosti dílců nebo pevnosti materiálu je úměrné koroznímu úbytku materiálu (obr. 5.12).



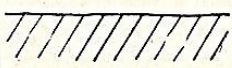
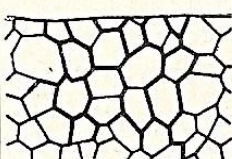
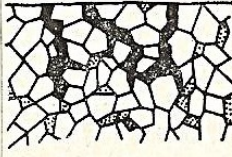
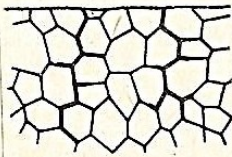
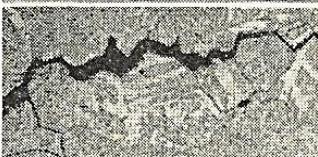
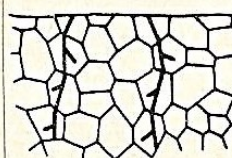
Obr. 5.12. Schematické znázornění rovnoměrné koroze. Hmotnostní úbytky ( $\Delta m$ ) a rozměrové úbytky ( $\Delta h$ ) základního materiálu způsobené korozi. Doba expozice v prostředí  $\Delta t = t - t_0$ .

Rychlosti rovnoměrné koroze mohou být vyjádřeny několika způsoby a v různých jednotkách:

$$r_c = \frac{\Delta m}{\Delta t \cdot S} \left[ \frac{mg}{m^2 \cdot s} \right], \left[ \frac{g}{m^2 \cdot d} \right], \text{ nebo } r_c = \frac{\Delta h}{\Delta t} \left[ \frac{mm}{rok} \right], \left[ \frac{\mu m}{rok} \right] \quad (5.7)$$

přitom  $\Delta m = S \cdot \Delta h \cdot \rho$ , kde  $S$  je exponovaná plocha,  $\rho$  – hustota materiálu,  $\Delta t$  – doba působení prostředí. Technicky přijatelná rychlost rovnoměrné koroze je zpravidla  $0,1 \text{ mm/rok}$ .

Místní narušení pasivního filmu způsobuje často **bodovou korozi** (pitting) ve formě důlků, jejichž průměr na povrchu může být menší než jejich hloubka, obr. 5.13. Bodová koroze může být nebezpečná, protože vede k proděravění materiálu, aniž by ubyla významně hmota kovu.

| Forma koroze                    | Charakteristický projev                                                             | Projev na příčném řezu                                                               |                                                                                                                                |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| rovnoměrná                      |    |    | koroze konstrukční oceli na atmosféře (5 ×)                                                                                    |
| důlková a bodová                |    |    | důlková koroze korozivzdorné feritické oceli 1Cr13 v parách s chloridy (100 ×)                                                 |
| mezikrystalová                  |  |  | mezikrystalová koroze korozivzdorné austenitické oceli 1Cr18Ni8 (100 ×)                                                        |
| selektivní                      |  |  | selektivní koroze fáze beta vyloučené souvisle mezi zrny fáze alfa mosazi Cu72Zn25Al3As (200 ×)                                |
| mezikrystalové korozní trhliny  |  |  | mezikrystalové korozní trhliny nízkolegované stabilizované feritické oceli vzniklé v roztoku $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (50 ×) |
| transkrystalové korozní trhliny |  |  | transkrystalové korozní trhliny austenitické korozivzdorné chrommanganové oceli vzniklé v roztoku $\text{MgCl}_2$ (200 ×)      |

Obr. 5.13. Porovnání hlavních druhů koroze – schéma, metalografické snímky a příklady

**Bodová koroze** je často obtížně zjištěitelná, protože důlky bývají překryty korozními produkty. Rozsah bodové koroze i její rychlost se obtížně stanoví. Velikosti důlků jsou nahodilé, závislé na poloze a velikosti napadeného povrchu. Důlky v materiálu též oslabují nosný průřez a působí jako koncentrátoři napětí, které také usnadňují vznik trhlin.

Nehomogenity složení korozního prostředí u povrchu kovu, způsobené rozhraním fází, úsadami mechanických nečistot nebo korozních produktů a zejména štěrbin v konstrukci (šroubové spoje, styky stejných kovů) vyvolávají **štěrbinovou korozi**. Působí podobně negativně jako bodová koroze, hlavně na oceli v pasívním stavu a v přítomnosti chloridů.

Zvýšená aktivita na hranicích zrn způsobuje jejich rychlejší napadení, zvané **mezikrystalová koroze**. Její intenzita se vyjadřuje hloubkou průniku podél hranic zrn, nikoliv hmotnostními úbytky. Výsledkem mezikrystalové koroze je rozpad slitiny na jednotlivá zrna, jejich odpadávání z materiálu a prakticky ztráta mechanických a dalších vlastností kovu (obr. 5.13).

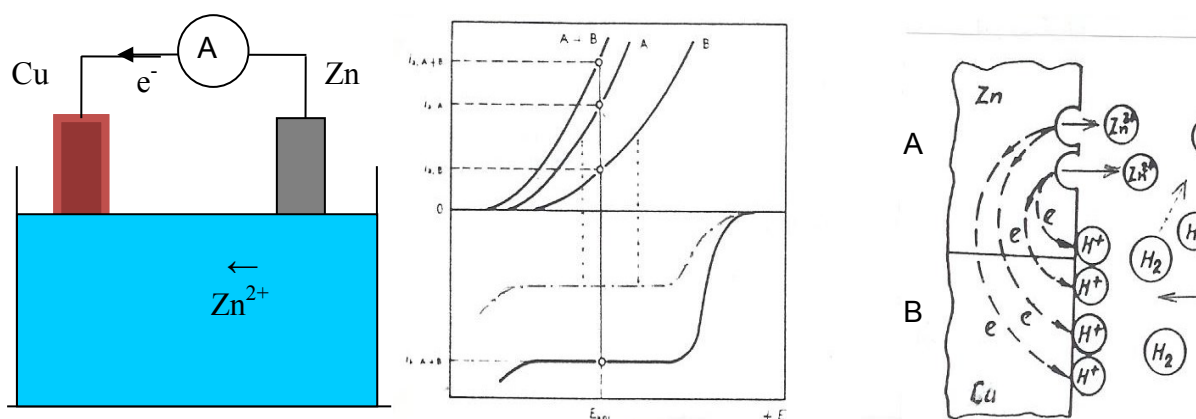
U vícefázových slitin s výrazně rozdílnou aktivitou fází nebo u tuhých roztoků s rozdílnou ušlechtilostí jejich kovových prvků může docházet k **selektivní korozi**. Při ní je přednostně napadána jedna strukturní nebo chemická složka slitiny s nižší ušlechtilostí, obr. 5.13. Ze struktury slitiny mizí rozpustná fáze nebo atomy kovu. Materiál křehne, ztrácí pevnost a při proniknutí této koroze stěnou se stává propustným.

Působení tahového napětí a specifického prostředí nebo působení cyklického napětí a korozního prostředí může vyvolat vznik trhlin a lomů. Toto napadení se nazývá **korozní praskání** nebo **korozní únava**. Trhliny mají křehký charakter, probíhají kolmo na směr hlavního napětí, často pod mezí kluzu materiálu. Stanoví se doby do lomu nebo rychlosti šíření trhlin v souvislosti s životností zařízení, potrubí apod. Korozní praskání může být také způsobeno vodíkem, který proniká do materiálu, např. při katodické ochraně.

## 5.10. Koroze a galvanické články

V řadě případů k zintenzivnění koroze kovového materiálu dochází vlivem **galvanických makročlánků**, anebo **mikročlánků**. V podstatě existují dvě příčiny vzniku galvanických korozních článků.

1. Při vodivém spojení různých materiálů v důsledku rozdílných standardních potenciálů vzniká **galvanický článek**. Na obr. 5.14 je schematicky zobrazen článek vzniklý spojením mědi a zinku (tzv. **bimetalový článek**). Vzhledem k tomu, že zinek je méně ušlechtilý ve srovnání s mědí, bude docházet k jeho oxidaci (anodické rozpouštění, koroze), zatímco na mědi budou probíhat redukční děje. Podle prostředí může docházet k vodíkové nebo kyslíkové depolarizaci, eventuálně může probíhat smíšená depolarizace. Při spojení rozdílných kovů je koroze urychlována na méně ušlechtilém kovu a zároveň zpomalována na ušlechtilejším kovu.



Obr. 5.14. Koroze v makročlánku sestávajícím ze dvou kovů Cu a Zn, obecně A + B. Při společném korozním potenciálu  $E_{kor}$  je součet všech dílčích proudů roven nule; na méně ušlechtilý kov (A) však připadá větší podíl korozního proudu oproti kovu B.

Uvažujme dílčí elektrochemické reakce zahrnující oxidaci určitého kovu  $M_a$  a redukci jiného kovu  $M_b$ :  $M_a \rightarrow M_a^{n+} + ne^-$  a  $M_b^{n+} + ne^- \rightarrow M_b$ . Celková sumární reakce je tedy  $M_a + M_b^{n+} \rightarrow M_a^{n+} + M_b$ .

Potenciál článku je závislý na teplotě  $T$  a molární koncentraci (aktivitě) iontů  $[M_a^{n+}]$  a  $[M_b^{n+}]$  podle Nernstovy rovnice:

$$\Delta E = E_b^0 - E_a^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[M_b^{n+}]}{[M_a^{n+}]} \quad \text{nebo při pokojové teplotě } \Delta E = E_b^0 - E_a^0 + \frac{0.0592}{n} \log \frac{[M_b^{n+}]}{[M_a^{n+}]},$$

kde  $R$  je plynová konstanta,  $n$  – počet elektronů zúčastněných v každé reakci (polo-článku), Faradayova konstanta  $F = 96,5 \text{ kC/mol}$ . Reakce budou probíhat spontánně v uvedených směrech, pokud  $\Delta E$  bude kladné. Při záporném  $\Delta E$  směr reakcí bude opačný.

Vznik galvanického článku není vázán pouze na vodivé spojení dvou různých materiálů. Ke vzniku galvanického článku může docházet na stejném materiálu z důvodu rozdílné plastické deformace na různých místech povrchu, rozdílných teplot nebo výskytu aktivních a pasivních oblastí na povrchu.

Často vlivem vměstků, nečistot a dalších nehomogenit materiálu dochází přímo na povrchu ke vzniku lokálních galvanických **mikročlánků**, což se projeví nerovnoměrnou korozí v místech, kde probíhá oxidace. Např. v ocelích měkké ferit je obvykle anodou a koroduje rychleji vzhledem k cementitu, který se stává katodou v mikroskopickém měřítku.

2. Korozi způsobují nebo podporují též **koncentrační články**. Jejich vznik můžeme např. popsat na případu koroze potrubí. Potrubí uložené v zemi prochází rozdílným půdním profilem, jehož složení se mění, a tím se mění i složení půdního elektrolytu. Potrubí v těchto případech působí současně jako elektroda a současně jako vodič. V místech o vyšší koncentraci půdního elektrolytu dochází k oxidaci kovu. Výsledkem tohoto procesu je korozní narušení potrubí. Častým případem vzniku koncentračního článku je tzv. **článek s diferenční aerací** (rozdílným provzdušněním). Např. stěna nádrže přichází do styku s

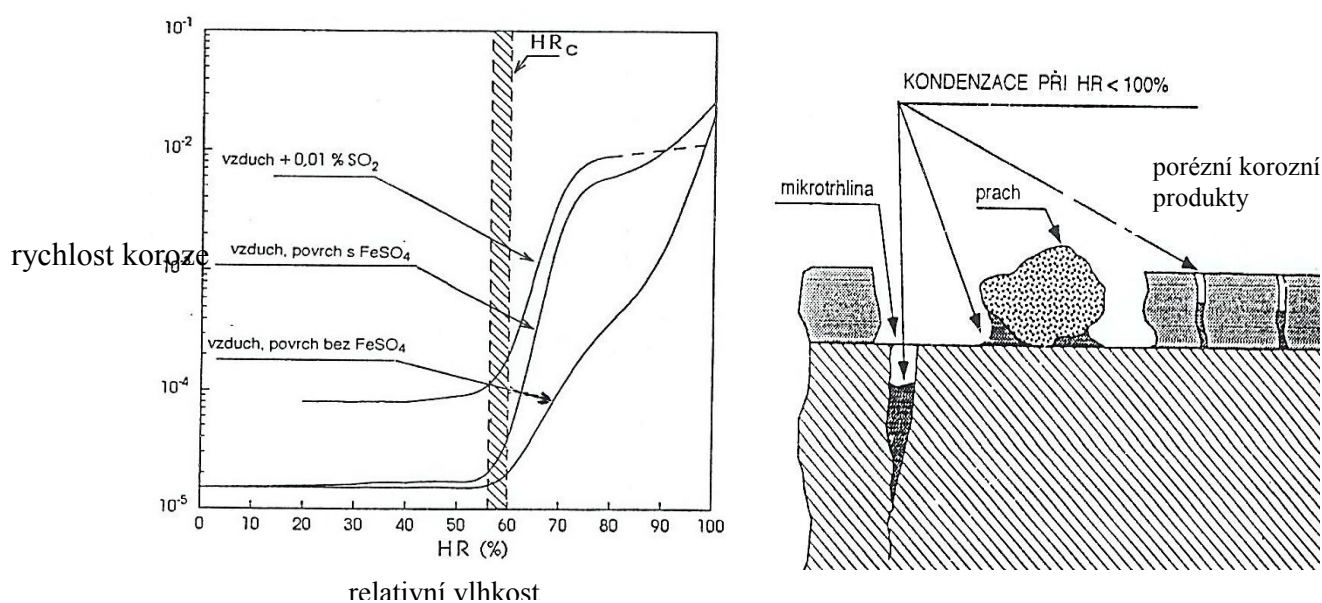
elektrolytem, v němž se obsah rozpuštěného kyslíku mění v závislosti na vzdálenosti od povrchu. Místa, kde má kyslík obtížnější přístup, zůstávají aktivní (anodická) a korodují podstatně rychleji oproti katodickým (anebo pasívním) místům, která jsou ve styku s provzdušněným roztokem, kde mohou probíhat depolarizační reakce (obr. 5.16).

### 5.11. Atmosférická koroze

Korozní prostředí jsou atmosféry, přírodní vody, vodné roztoky (solí, kyselin a louhů), roztavené soli, horké plyny tekuté kovy, rozpouštědla a také lidské tělo. Podle rozsahu, atmosférická koroze způsobuje největší ztráty, kolem 70% ze všech nákladů na korozi a protikorozní ochranu. Nadměrná (nadkritická) vlhkost atmosféry, povrchový elektrolyt s rozpuštěným kyslíkem jsou primární korozní činitelé atmosférické koroze, která je v podstatě elektrochemickou korozí, obr. 5.15. Atmosférickou korozi významně zrychlují nečistoty v ovzduší, hlavně sloučeniny síry ( $\text{SO}_2$ ) v průmyslových oblastech a chlorid sodný zejména v přímořské atmosféře. Kovy nejčastěji používané a zpravidla odolné v atmosférických podmínkách jsou slitiny hliníku, mědi a pozinkované nelegované oceli.

Podle doby ovlhčení, tj. výskytu elektrolytu na povrchu, a obsahu korozně aktivních nečistot (stimulátorů koroze) je podle norem rozlišujeme pět stupňů korozní agresivity (C1 – velmi nízká, C2 – nízká, C3 – střední, C4 – vysoká, C5 – velmi vysoká).

**Stupeň korozní agresivity** v určitém místě můžeme stanovit na základě gravimetrické metody pro vybrané kovové materiály (nelegovaná ocel, zinek, měď, hliník) nebo pomocí tabulek pro naměřené hodnoty doby ovlhčení, obsahu nebo spádu  $\text{SO}_2$  a NaCl s použitím příslušné normy (ČSN ISO 9223).



Obr. 5.15. Vliv relativní vlhkosti a  $\text{SO}_2$  na atmosférickou korozi.  $\text{HR}_c$  – kritické hodnoty relativní vlhkosti. Místa snadnější kondenzace vlhkosti a vzniku elektrolytu (vpravo)

## 5.12 Koroze ve vodách

Pod pojmem voda ve smyslu korozního prostředí zahrnujeme nejen chemicky čistou vodu, ale především nejrozličněji koncentrované vodné roztoky s obsahem látek, které se do vody dostávají při jejím koloběhu v přírodě a v průmyslu. Přírodní vody působí agresivně nejen na stavby a lodě, ale jejich agresivita se přenáší i na vody průmyslové, které jsou z nich získávány a také na pitnou vodu.

**Přírodní vody** lze rozdělit na vody sladké, mořské, minerální a na vody brakické (sladké vody znečištěné mořskou vodou). Pro průmyslové účely je přírodní voda používána buď neupravená nebo po úpravě. **Průmyslové vody** lze rozdělit podle užití na vody energetické (jsou vždy upravené), chladicí (upravené i neupravené), technologické (vody, které jsou přidávány do technologických roztoků) a na vody odpadní. Agresivita průmyslových vod je dále ovlivněna buď úmyslnými úpravami anebo látkami, které se do vody dostávají během užívání nebo jsou koncentrovány při cirkulaci. Přestože jsou na různé druhy vod kladeny rozdílné požadavky, je řada společných faktorů, které ovlivňují agresivitu vody.

Působením čisté vody (odvzdušněné) na kovový povrch dochází jen k minimální korozi. Za průběh korozních reakcí ve vodě jsou odpovědné hlavně příměsi, které vždy v různé míře voda v přírodních i provozních podmínkách obsahuje.

**Agresivita vody** je ovlivněna obsahem kyslíku i dalších agresivních plynů, množstvím a typem rozpuštěných solí, přítomností organických látek a mikroorganismů, pH, teplotou, rychlostí proudění a obsahem pevných částic.

Důležitou složkou ovlivňující agresivitu vody je i oxid uhličitý. Působí pokles pH a v kyselých vodách se pak mohou uplatňovat i jiné druhy depolarizace než je kyslíková. Přítomností  $\text{CO}_2$  je také negativně ovlivněn inhibiční účinek iontů  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{HCO}_3^-$ . Pokles pH vody a podobný účinek způsobuje i oxid siřičitý, rozpuštěný ve vodě ze znečištěné atmosféry. Sulfan a amoniak mohou být zase příčinou korozního praskání ocelí. Soli rozpuštěné ve vodě mění hydrolyzou pH roztoku, zvyšují vodivost, ovlivňují tvorbu vrstev na povrchu kovu a mohou být příčinou nerovnoměrných forem koroze. Vzhledem k tomu, že koncentrace solí rozpuštěných ve vodě je s výjimkou mořské vody poměrně malá, je relativně nízká i vodivost vody. To má za následek i častý výskyt nerovnoměrného napadení.

**Soli rozpuštěné ve vodách** mají rozdílné účinky na korozi.

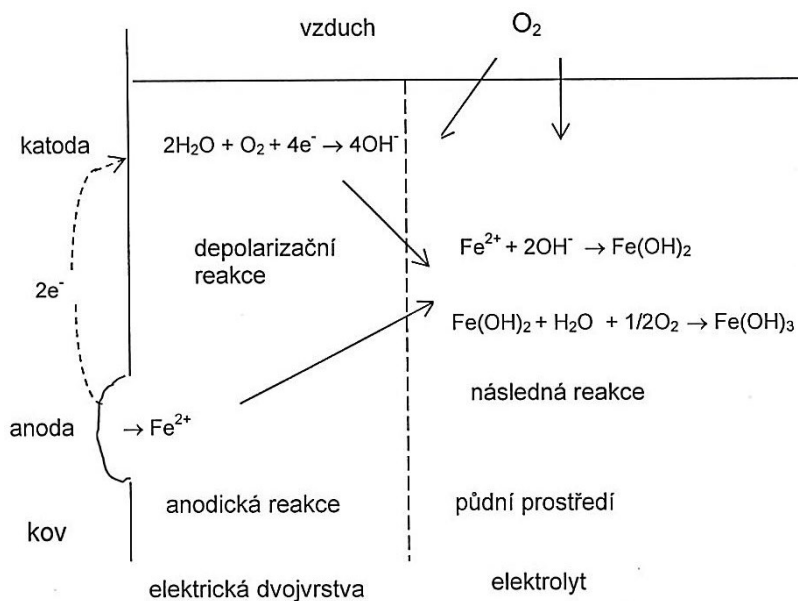
Soli alkalických kovů (KCl, LiCl, KJ, NaBr,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) působí podobně jako NaCl. Kyselé soli ( $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{NiSO}_4$ ,  $\text{FeCl}_2$ ,  $\text{MnCl}_2$ ) snižují pH. Amonné soli ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) komplexotvorně zvyšují korozi. Alkalické soli ( $\text{pH} > 10$ , NaOH,  $\text{NaPO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) zpomalují korozi.

Některé oxidační soli ( $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{CuCl}_2$ ) zrychlují korozi, jiné ( $\text{Na}_2\text{CrO}_4$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{FeO}_4$ ) korozi zpomalují. Ochranné nerozpustné vrstvy může vytvářet  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ .

Vliv  $\text{CO}_2$  na uhličitánovou rovnováhu:  $\text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{CO}_3$  ( $\approx 1\%$  z  $\text{CO}_2$ ), disociace  $\text{H}_2\text{CO}_3 = \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$  ( $k_1$ ) a  $\text{HCO}_3^- = \text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$  ( $k_2$ ) a v přítomnosti kationtů  $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- = \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ . Nadbytečný  $\text{CO}_2$  je označován jako agresivní.

### 5.13. Koroze kovů v půdách

Korozi v půdách je možno považovat za korozi elektrochemickou a proto lze využít všechny poznatky uvedené v předchozích kapitolách. Půda z korozního hlediska je poměrně složitý systém, tvořený tuhými, plynnými a kapalnými fázemi. Základní význam má kapalná fáze, představovaná vodním roztokem - elektrolytem s různým množstvím rozpuštěných plynů a dalších složek. Korozi v půdách je možno rozdělit na *prostou půdní korozi* (Obr. 5.16), *mikrobiální korozi* a *korozi bludnými proudy*.



Obr. 5.16. Korozní článek s diferenční aerací. Schematické znázornění korozního děje v půdě - prostá půdní koroze.

Půdní atmosféra má zpravidla vyšší obsah dusíku a oxidu uhličitého a nižší obsah kyslíku, než normální atmosféra. Je to způsobeno nižší propustností půdy, proto se vzrůstající hloubkou obsah plynů, pronikajících z vnější atmosféry klesá. Poměrně vyšší zastoupení dusíku a oxidu uhličitého je způsobeno činností mikroorganismů a rostlin. Provzdušnění půdy se pohybuje ve velmi širokých mezích, rozdíly jsou též v provzdušnění stejného druhu půdy.

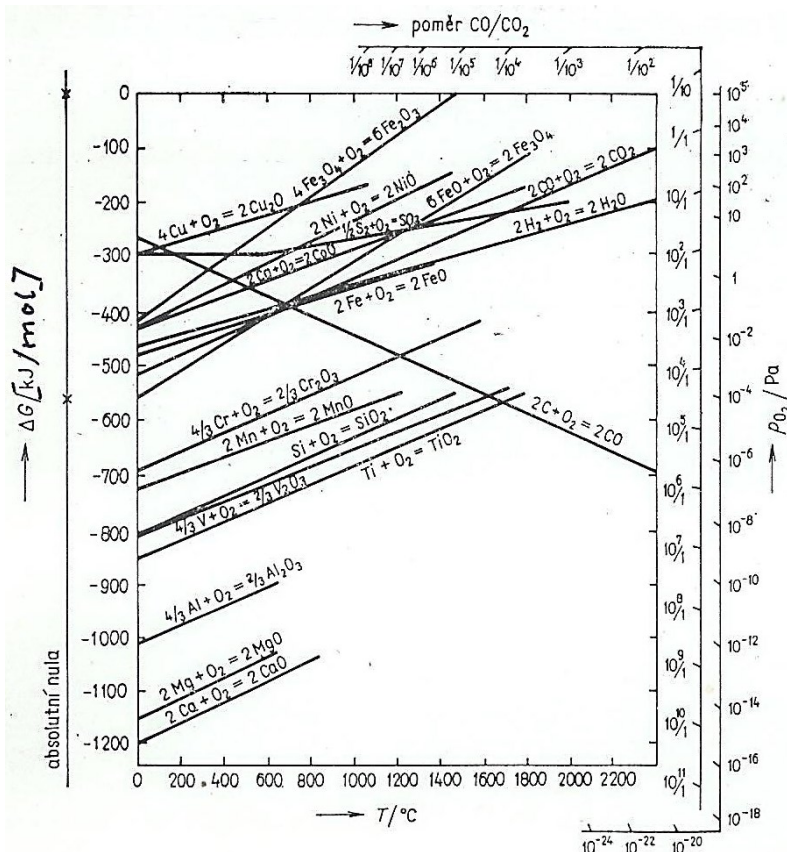
Sama půda má různé chemické složení, čímž je ovlivněn i charakter vody obsažené v půdě. Významnou roli hraje rovněž struktura půdy, protože na ní je závislá vzájemná výměna plynné fáze mezi půdou a atmosférou.

Vlhkost půdy tvoří voda, obsažená v půdních pórech a dutinách. Její pH se mění podle složení půdy, ale nemá na průběh koroze zásadní vliv, pokud se nejedná o vody výrazně alkalické nebo kyselé, které mohou pronikat do půdy ze stok, odpadních jímek, z kyselých dešťů apod.

### 5.14. Chemická koroze

Chemická koroze se vyskytuje hlavně v plynných prostředích za vyšších teplot, případně v nevodivých kapalných prostředích. Produkty chemické koroze tvoří zpravidla vrstvy na povrchu, které ovlivňují další rozvoj korozního procesu. Koroze v horkých plynech přináší ztráty v chemickém a energetickém průmyslu, v automobilové dopravě a letectví (motory, turbíny, spaliny). Tato koroze způsobuje rovněž ztráty v procesech výroby kovů, hlavně z důvodu tvorby okujů při tváření za tepla a během tepelného zpracování.

Informace o možnosti korozních reakcí poskytují termodynamické údaje, obvykle **změny volné entalpie**. Přehledné znázornění změn volných entalpií ( $\Delta G$ ) korozních reakcí v závislosti na jejich teplotě poskytují **Ellinghamovy diagramy**, obr. 5.17. Čím vyšší je pokles  $\Delta G$ , tím stabilnější vznikají oxidy, tím vyšší je afinita daného kovu ke kyslíku. Z diagramu lze zjistit, které oxidy budou vznikat přednostně a jaké jsou možnosti vnitřní oxidace. Nelze však zjistit rychlost oxidace, která je závislá na povaze a ochranných vlastnostech korozních produktů (oxidy, okuje), transportních procesech (difuze, migrace vlivem elektrického pole) a dalších parametrech (teplota, tlak, rychlost proudění).



Obr. 5.17. Ellinghamův diagram pro reakci vybraných kovů s 1 molem kyslíku

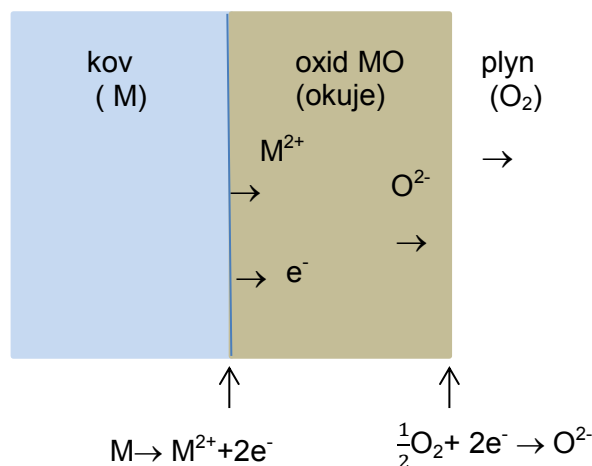
Významným parametrem vymezujícím možnosti chemické koroze je poměr mezi molárním objemem oxidu ( $V_O$ ) a atomovým objemem kovu ( $V_M$ ), z něhož oxid vzniká. Podle Pilling-Bedworthova pravidla platí: pokud poměr  $V_O/V_M < 1$  pak vrstva zplodin není celistvá

a neposkytuje ochranu. Když poměr  $V_O/V_M > 1$ , pak vzniklá vrstva může mít ochranné vlastnosti. Při nadměrných poměrech ( $V_O/V_M > 3$ ) dochází k praskání a odpadávání vrstvy, z důvodu vnitřního pnutí a nadzvedávání vrstvy. Příklady uvedených poměrů jsou v tab. 5.2

Tab. 5.2. Hodnoty Pilling-Bedworthova poměru pro vybrané kovy (n – neposkytuje ochranu)

| kov | oxid                           | poměr  | kov | oxid              | poměr  | kov | oxid                           | poměr  |
|-----|--------------------------------|--------|-----|-------------------|--------|-----|--------------------------------|--------|
| Li  | Li <sub>2</sub> O              | 0,58 n | Ag  | Ag <sub>2</sub> O | 1,59 n | Fe  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2,14   |
| Mg  | MgO                            | 0,80 n | Cu  | Cu <sub>2</sub> O | 1,64   | Cr  | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2,07   |
| Cd  | CdO                            | 1,21 n | Ni  | NiO               | 1,65   | Nd  | NdO <sub>2</sub>               | 2,61 n |
| Al  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,28   | Ti  | TiO <sub>2</sub>  | 1,73   | Mo  | MoO <sub>3</sub>               | 3,40 n |
| Zn  | ZnO                            | 1,55 n | Fe  | FeO               | 1,80 n | W   | WO <sub>3</sub>                | 3,40 n |

Základní představu o vytváření vrstvy oxidů poskytuje obr. 5.18. Tvorba oxidu MO (obecněji  $M_xO_y$ ) může probíhat od rozhraní plyn/oxid nebo kov/oxid anebo v celém objemu vrstvy oxidu.



Obr. 5.18. Schematické znázornění procesu oxidace povrchu kovu v plynu.

Výsledná reakce  $M^{2+} + O^{2-} \rightarrow MO$ , zjednodušená celková reakce  $M + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow MO$ .

Odolnost proti oxidaci za vysokých teplot je dále závislá na přilnavosti vrstvy ke kovu, na rozdílu koeficientů tepelné roztažnosti, na vysokoteplotní možnosti plastické deformace vrstvy, na difuzi iontů vrstvou, elektrické vodivosti vrstvy, defektnosti a teplotě tavení vrstvy. Uvedené faktory také ovlivňují **rychlost – kinetiku oxidace** v plynech. Rychlost reakcí bývá stanovena zpravidla pomocí přírůstků hmotnosti, a je obvykle vztažena na jednotku plochy a času. Pro technickou praxi je také důležitý úbytek tloušťky kovového materiálu.

Když vzniká neporézní a přilnavá vrstva oxidu, rychlost růstu vrstvy je řízena difuzí iontů. Existuje pak **parabolická závislost** mezi změnou hmotností ( $m$ ) a časem expozice ( $t$ ) při dané teplotě (tj. izotermická oxidace), obr. 5.19

$$m^2 = k_2 \cdot t, \quad (5.8)$$

kde parabolická konstanta  $k_2$  je nezávislá na čase, záleží na teplotě podle Arrheniova vztahu:

$$k = A \cdot \exp(-E/RT), \quad (5.9)$$

kde  $E$  – aktivační energie procesu,  $A$  – konstanta (před exponenciální člen, frekvenční faktor),  $T$  – absolutní teplota,  $R$  – plynová konstanta.

Při oxidaci kovu, kdy vrstvy jsou porézní, odpadávají nebo stékají (jako nízko-tavitelná eutektika směsi oxidů) a tedy neposkytují bariéru proti korozi, závislost má lineární trend, tedy

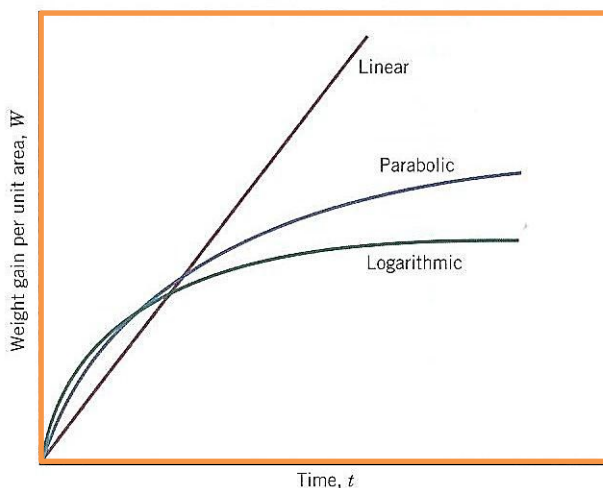
$$m = k_1 \cdot t, \quad (5.10)$$

kde  $k_1$  je konstanta závislá na teplotě. Za daných podmínek kyslík má neomezený přístup k reakci s nechráněným povrchem. Tento lineární trend vykazuje např. Na, K, Ta a mnohé kovy za nejvyšších teplot.

Třetí typ kinetiky je pozorován pro velmi tenké vrstvy oxidů (obecně do 100 nm), které jsou tvořeny při relativně nízkých teplotách, při spolupůsobení vnitřní intenzity elektrického pole. Závislost váhových přírůstků na době má logaritmický tvar

$$m = k_4 \log(k_5 \cdot t + k_6), \quad (5.11)$$

kde  $k_i$  jsou opět konstanty. Tento logaritmický průběh oxidace byl zaznamenán na Al, Cu a Fe při poměrně nízkých teplotách ( $T < 100^\circ\text{C}$ ).



Obr. 5.19. Hlavní zákony kinetiky růstu korozní vrstvy – lineární, parabolický a logaritmický. Závislosti změny hmotnosti materiálu na době expozice v plynném prostředí za vyšší teploty.

Většina kovů tvoří několik oxidů, ve kterých má kov různé oxidační číslo. Oxid nejjednodušší kyslíkem se vyskytuje u rozhraní vrstvy s kovem, oxid nejbohatší kyslíkem na rozhraní s plynem, atmosférou. Např. vrstvy oxidů na železe se skládají ze tří sloučenin ( $570^\circ\text{C}$ – $1000^\circ\text{C}$ ). Na vnějším povrchu vzniká hematit  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , střední vrstvu tvoří magnetit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  a vnitřní vrstvu nejbližší železu tvoří wüstit  $\text{FeO}$ .

Většina ocelí oxiduje velmi rychle, zejména nad  $600^\circ\text{C}$ , což způsobuje vysoká difuzní pohyblivost iontů železa i kyslíku oxidickou vrstvou. Odolnost oceli proti oxidaci za vyšších teplot (**žáruvzdornost**) je možno zvýšit legováním chromem (15-25%), křemíkem a hliníkem (< 5%). Tyto prvky vytvářejí ochranné oxidické vrstvy - např.  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Přítomnost sloučenin síry ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  i v malém množství, 0,01-0,1%) zhoršuje korozní odolnost. Vznikají vrstvy se sulfidy, které mají menší přilnavost a více strukturních poruch.

### 5.15. Základní způsoby ochrany proti korozi

1. **Volba vhodného materiálu pro dané podmínky**
2. **Úprava korozního prostředí odstraněním aktivní korozní složky nebo přidáním inhibitoru koroze**
3. **Konstrukční řešení – vhodný tvar součástí, vhodný způsob jejich spojení**
4. **Elektrochemické způsoby ochrany**
5. **Vytváření ochranných povlaků a vrstev – kovových, nekovových**

1. Volbou vhodného materiálu lze pro předem známé provozní podmínky vznik koroze téměř vyloučit, nebo velmi značně omezit. Známým příkladem je požití korozivzdorných ocelí, neželezných kovů a nekovových materiálů (plasty) namísto běžných druhů konstrukčních ocelí. Zvláštní poznámku si zasluhují nízkolegované konstrukční oceli třídy 15 se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi. Této odolnosti je dosaženo vhodnou kombinací přísadových prvků (Cu, Ni, Cr) při jejich relativně malém obsahu a poněkud zvýšeném obsahu P (v ČSN byla zavedena 15 217, 15 127, obchodní název Atmofix A, Atmofix B).

2. Známými příklady úpravy korozního prostředí je např. ochranná atmosféra v průmyslových pecích, odstranění vlhkosti v obalové technice pomocí vodotěsného obalu s vloženým vysoušedlem (silikagel), úprava vody pro energetická zařízení apod. Např. výrazné snížení obsahu kyslíku ve vodě v uzavřených systémech.

Jinou možností je úprava korozního prostředí přidáním inhibitoru koroze. Inhibitor je látka, jejíž přídavek do korozního prostředí významně zmírňuje rychlost koroze. Tímto způsobem se upravuje zpravidla kapalně prostředí. Inhibitory jednak vytvářejí na povrchu kovu ochrannou vrstvu, jednak omezují agresivitu prostředí úpravou jeho složení.

Pro záměrnou tvorbu nerozpustných produktů anebo ochranných tenkých vrstev (filmů) se používají **inhibitory**, zejména v uzavřených technologických okruzích. Vodní prostředí se upravuje přísadky hydroxidů, uhličitany pro zvýšení pH (alkalizace). **Inhibitory anodické** (např. dusitany, chromany) zpomalují anodickou dílčí reakci, a podobně **katodické inhibitory** zpomalují především katodické reakce, tvoří např. vrstvy s hydroxidem vápenatým nebo zinečnatým. **Difuzní inhibitory** na fázovém rozhraní kov-korozní prostředí brzdí difuzi iontů nebo molekul a tím zpomalují korozní proces (křemičitany, želatina). Povrchové inhibitory adsorbují na povrchu a zabraňují výstupu iontů z kovu (dusíkaté a sirné organické sloučeniny) nebo reagují s kovem za vzniku ochranné vrstvičky (chromany, křemičitany, fosforečnany). V plynárenství se inhibitory používají při těžbě a skladování plynu na ochranu vnitřních povrchů potrubních rozvodů.

3. Významný vliv na omezení koroze má vhodná konstrukce součástí anebo zařízení.

- a) Zabránění vzniku korozního článku vložením izolantu mezi spojované i spojovací součásti.

- b) Odvedení kondenzující vlhkosti či srážkové vody vhodným odkapním plechem nebo otvorem, zabránění jejich zatékání do konstrukce.
  - c) Rozdílná koncentrace roztoku v nádobě a roztoku přiváděného do nádoby může způsobit korozi její stěny v exponovaném místě (koncentrační makročlánek). při konstrukci zařízení je vždy třeba omezit na nejmenší možnou míru výskyt míst, ve kterých se mohou hromadit nečistoty, kaly, vlhkost, atd.
4. Elektrochemické ochrany dělíme na katodické a anodické. Častěji užívané jsou ochrany katodické, např. pro potrubí a další úložná zařízení v zemi.

Princip katodické ochrany spočívá ve vytvoření elektrického okruhu, ve kterém je chráněné zařízení katodou. Tento způsob se užívá zpravidla pro chránění zařízení z konstrukčních nelegovaných ocelí, uložených ve vlhkých půdách a ve vodách. Chrání se tak např. potrubí, nádrže, kovová přehradní zařízení, lodě apod. V menší míře se takto chrání i složitější průmyslová zařízení.

První možností je připojení vnějšího zdroje proudu polarizovaného tak, aby chráněné zařízení bylo katodou. Ochranný proud má intenzitu od několika desetin ampéru až do cca 200 ampér; napětí je zpravidla nejvýše 20 voltů. Pomocná anoda se rozpouští a korozní produkty mohou znečistit roztok (prostředí).

Druhou možností je vytvoření umělého galvanického článku. Chráněný kov (katoda) je vodivě spojen s jiným kovem (anodou), který má v daném prostředí negativnější potenciál než chráněný kov. Korozně aktivnější kov (Zn, Mg, Al) se nazývá protektor, užívá se též názvu obětovaná anoda, neboť proud potřebný k ochraně vzniká v důsledku jejího rozpouštění.

5. Nejvíce používanou ochranou materiálu proti korozi je vytváření protikorozních povlaků na nechráněných materiálech. Tento způsob ochrany je velmi různorodý a tvoří samostatné technologické odvětví. Podrobněji jsou různé způsoby vytváření povlaků a vrstev probírány v předmětech koroze a protikorozní ochrana anebo vlastnosti a úpravy povrchů.

## Souhrn

Korozí rozumíme obecně znehodnocení materiálu chemickým nebo fyzikálně chemickým působením prostředí. Korozní degradaci může podléhat téměř každý materiál a vzniklé korozní poškození má za následek ovlivnění použitelnosti, životnosti a spolehlivosti konstrukčních prvků, často celého výrobku nebo zařízení. Korozní odolnost kovových materiálů je často způsobena pasivací, vznikem ochranného povlaku (oxidického filmu) na povrchu kovu reakcí s okolním prostředím. Pokud dojde k narušení pasivity, projeví se to obvykle korozním napadením. V mnoha případech pak vznikají lokální druhy koroze.

Je zřejmé, že studium koroze má velmi komplexní charakter a cílem analýzy korozního děje je určit nejdůležitější faktory, které budou korozní děj ovlivňovat.

Koroze je významným technicko-ekonomickým problémem a cílem protikorozní ochrany je minimalizace korozních ztrát a včasná obnova anebo oprava poškozených zařízení.



### Shrnutí pojmů kapitoly 5

**Anoda:** Elektroda, na které probíhá převážně oxidace, tj. kde jsou produkovány elektrony (anodická reakce)

**Katoda:** Elektroda, na které probíhá převážně redukce, tj. kde jsou spotřebovány elektrony (katodické reakce).

**Elektrochemické reakce:** Reakce, která zahrnuje přenos (transfer) náboje v chemickém stavu, např. z kovového  $\text{Al}^0$  na iontový  $\text{Al}^{3+}$  nebo naopak,  $\text{Al} = \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$ .

**Anodická neboli oxidační reakce:** Elektrochemická reakce, při které jsou uvolněny elektrony.

**Redukce nebo katodická reakce:** Elektrochemická reakce, která spotřebuje elektrony.

**Standardní potenciál, Nernstova rovnice, elektrochemická řada potenciálů, korozní galvanické články, diagramy E-pH (Pourbaixe), přepětí, polarizace, polarizační odpor, korozní rychlosti, Faradayovy zákony, pasivita, druhy koroze, bodová koroze, mezikrystalová koroze, korozní praskání, atmosférická koroze, koroze ve vodách a půdách, chemická koroze, žárovzdornost materiálů, způsoby protikorozní ochrany, korozivzdorné oceli, katodická ochrana, inhibitory.**



### Otázky ke kapitole 5

- 5.1 Na čem bude záviset korozní poškození?
- 5.2 Jaké budou důsledky korozního poškození?
- 5.3 Způsobí výměnný proud korozní úbytek kovového materiálu?
- 5.4 Vyjmenujte vnější a vnitřní činitele koroze.
- 5.5 Uveďte tři příklady korozních galvanických článků.
- 5.6 Vyjmenujte a charakterizujte alespoň tři druhy lokálního korozního napadení.
- 5.7 Celkové přímé náklady na korozi a protikorozní ochranu jsou odhadovány na (uveďte % hrubého domácího produktu)
- 5.8 Kdy se uplatňuje elektrochemický mechanismus koroze?
- 5.9 Napište dílčí elektrochemickou reakci, která představuje vlastní korozní děj železa.
- 5.10 Podle jakého vztahu (rovnice) můžeme vypočítat hodnotu rovnovážného potenciálu?
- 5.11 Jak je definováno aktivační přepětí?
- 5.12 Čím je ovlivněno koncentrační přepětí?
- 5.13 Jakým způsobem stanovíme polarizační odpor?
- 5.14 Charakterizujte limitní proudovou hustotu.
- 5.15 Jaký je vztah mezi rychlostí koroze a polarizačním odporem?



### Úlohy ke kapitole 5

- 5.1. Vypočítejte rovnovážný potenciál zinkové elektrody  $\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Zn}$  pro aktivitu iontů 0,125 při teplotě 25°C. Standardní potenciál dané elektrody  $E_0 = -0,763 \text{ V}$ . Univerzální plynová konstanta  $R = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , Faradayova konstanta  $F = 96,5 \text{ kC mol}^{-1}$ .

♦ **Řešení:**

Hodnota elektrodového potenciálu závisí na vlastnostech kovu, teplotě a aktivitě (koncentraci) kationtů podle Nernstovy rovnice

$$E_r = E^0 + (RT/nF) \cdot \ln(a),$$

kde  $E^0$  je standardní potenciál,  $T$  – teplota v Kelvinech,  $n$  – počet vyměňovaných elektronů,  $a$  – aktivita kationtů ( $a = a(\text{Me}^{n+})$ ).

Po vyčíslení konstant a přechodu na dekadický logaritmus  $E_r = E^0 + (0,0591/n) \cdot \ln(a)$ .

Potenciál zinkové elektrody:  $\text{Zn}^{2+}(0,125)/\text{Zn}$  pro reakci  $\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Zn}$ . Výpočet:

$E(\text{Zn}^{2+}/\text{Zn}) = -0,763 + 0,0591/2 \cdot \log 0,125 = \underline{-0,790 \text{ V}}$ . Při mnohonásobném snížení aktivity (koncentrace), poklesne hodnota rovnovážného potenciálu velmi málo.

- 5.2. Jaká je rychlost koroze železa v jednotkách  $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  a  $\text{mm}/\text{rok}$ , když proudová hustota  $J = 1,0 \text{ A/m}^2$ . Hustota  $\rho = 7,8 \text{ Mg/m}^3$ , Faradayova konstanta  $F = 96\,494 \text{ C/mol}$ , počet elektronů vyměněných v reakci  $z = 2$  (oxidační číslo).

♦ **Řešení:** Podél Faradayova zákona úbytek hmotnosti kovu  $\Delta m$  při proudu  $I$  za dobu  $\Delta t$  je dán vztahem  $\Delta m = M \cdot I \cdot \Delta t / F \cdot n$ . Odtud rychlost koroze  $r_c = \Delta m / (S \cdot \Delta t) = MJ/nF$ , kde  $M$  je molární hmotnost,  $J = I/S$  proudová hustota,  $F$  – Faradayova konstanta,  $n = 2$  (pro  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ ). Po dosazení:  $r_c = MJ/nF = 55,85 \text{ (g/mol)} \times 1,0 \text{ (A/m}^2\text{)} / (2 \cdot 96500 \text{ As/mol}) = 28,9 \cdot 10^{-5} \text{ g/(m}^2\text{s)} = 0,289 \text{ mg/(m}^2\text{s)}$ .

- 5.3. Před zkouškou koroze v kondenzační komoře byla na vzorku plechu (rozměry  $100 \times 50 \times 1 \text{ mm}$ ) z nelegované oceli naměřena hmotnost 39,1542 g. Po zkoušce trvající 42 cyklů (1 cykl = 16 hodin v komoře + 8 hodin na vzduchu v laboratoři) a po odstranění korozních produktů na celém vzorku hmotnost 35,0421 g. Jaká je po přepočtu průměrná rychlost rovnoměrné koroze  $r_c$  v  $\text{mm}/\text{rok}$  (hustota  $\rho = 7,80 \text{ Mg/m}^3$ ).

♦ **Řešení:**

Nejprve vypočteme hmotnostní úbytek  $\Delta m = m - m_0 = 39,1542 - 35,0421 = 4,1121 \text{ g}$  za 42 cyklů = 42 dní. Za jeden rok, tj. za 365,25 dní, je pak úbytek  $\Delta m_r = 35,76 \text{ g}$  na vzorku. Exponovaná plocha celého vzorku  $S = 10300 \text{ mm}^2 = 0,0103 \text{ m}^2$  (uvažujeme obě plochy vzorku  $2 \times 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} = 10000 \text{ mm}^2$  i boční plochu  $2(100+50) \times 1 = 300 \text{ mm}^2$ ).

Nyní můžeme vypočítat úbytek hmotnosti na  $1,00 \text{ m}^2$  za rok, tj.  $\Delta m_r/S = 35,76 \text{ g} / 0,0103 \text{ m}^2 = 3471,8 \text{ g/m}^2$ . Pro hustotu  $\rho = 7,80 \text{ Mg/m}^3 = 7800 \text{ kg/m}^3 = 7,80 \cdot 10^6 \text{ g/m}^3$  a pomocí trojčlenky dostaneme rychlost koroze  $r_c = \underline{0,445 \text{ mm/rok}}$ . (jestliže hmotnosti  $7,80 \cdot 10^6 \text{ g}$

na  $1,0 \text{ m}^3$  odpovídá výška  $1,0 \text{ m} = 1000 \text{ mm}$ , pak hmotnosti  $3471,8 \text{ g}$  (na  $1,0 \text{ m}^2$  odpovídá úbytek  $0,445 \text{ mm}$ ).

Rychlost koroze lze vypočítat také přímo podle vztahu  $r_c = \Delta m / (\rho \cdot S \cdot \Delta t) = 4,1121 / (7,8 \cdot 10^6 \cdot 0,0103 \cdot 42) = 1,219 \cdot 10^{-6} \text{ m/den} = \underline{0,445 \text{ mm/rok}}$ .

5.4. Hořík koroduje v mořské vodě rychlostí  $1,45 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  ( $\text{d} = \text{den}$ ). Jaká je střední rychlost koroze v  $\text{mm/rok}$ ? Hustota Mg je  $1740 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , molární hmotnost  $24,31 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

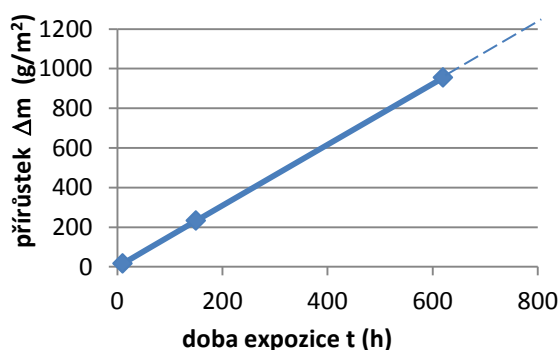
♦ **Řešení:** Hmotnostní úbytek způsobený korozí  $\Delta m = S \cdot \Delta h \cdot \rho$  ( $S$  – plocha napadená korozí,  $\Delta h$  – hloubka úbytku materiálu,  $\rho$  – hustota materiálu). Odtud pro rychlost koroze ve váhových jednotkách dostaneme  $r_c = \Delta m / (\Delta t \cdot S) = \Delta h \cdot \rho / \Delta t$ , kde podle zadání  $r_c = 1,45 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  ( $\text{g}$  na  $\text{m}^2$  za den) a tedy rychlost koroze v délkových jednotkách  $r'_c = \Delta h / \Delta t = 365 r_c / \rho = 3,04 \cdot 10^{-4} [\text{m/rok}] = \underline{0,304 \text{ mm/rok}}$ .

5.5. V tabulce jsou uvedeny váhové přírůstky během oxidace určitého kovu za vyšší teploty:

|                           |      |       |       |
|---------------------------|------|-------|-------|
| Čas [hod]                 | 10   | 150   | 620   |
| $\Delta m [\text{g/m}^2]$ | 15,4 | 232,4 | 953,7 |

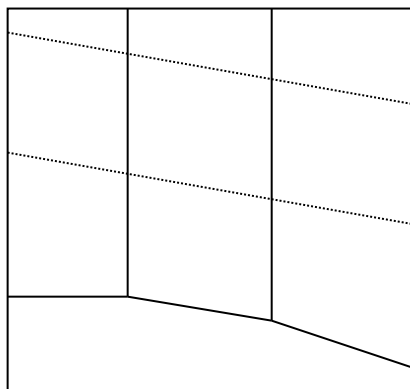
- Určete, zda kinetika oxidace odpovídá, lineárnímu, parabolickému nebo logaritmickému vztahu.
- Vypočtete dále  $\Delta m$  po době 1200 hodin.

♦ **Řešení:** Vyneseme závislost  $\Delta m = f(\Delta t)$ , která odpovídá lineárnímu vztahu:  $\Delta m = k \cdot \Delta t$ , Konstanta  $k = \Delta m / \Delta t = 953,7 / 620 = 1,538 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$ . Pro 1200 hodin bude  $\underline{\Delta m = 1846 \text{ g/m}^2}$ .



5.6 Jak se změní hodnota rovnovážného elektrodového potenciálu Zn při desetinásobném snížení koncentrace iontů  $\text{Zn}^{2+}$  v roztoku ( $E_0 = -0,763 \text{ V}$ ,  $R = 8,314 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $F = 96,48 \text{ kC} \cdot \text{mol}^{-1}$ ).

5.7 Popište diagram E-pH pro Al v čisté vodě a vyznačte jednotlivé oblasti (pasivita, aktivita, koroze, imunita) včetně oblasti vylučování kyslíku a vodíku.

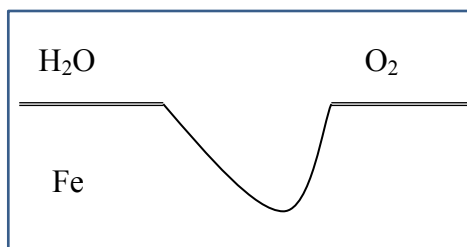


5.8 Silnější ocelový plech o ploše  $654 \text{ cm}^2$  byl ponořen do mořské vody. Po jednom roce byl zjištěn úbytek hmotnosti  $485 \text{ g}$  z důvodu koroze. Jaká je střední rychlost koroze v daném případě (v jednotkách  $\text{mm/rok}$  a  $\text{g/m}^2\text{den}$ )? Měrná hmotnost Fe je  $7,8 \text{ Mg/m}^3$ , molární hmotnost  $55,86 \text{ g/mol}$ .

5.9 Jaký korozní úbytek nelegované oceli způsobí bludný proud  $1,0 \text{ A}$  za rok?

5.10 Jaká je celková rychlost koroze zinku ( $M = 65,37 \text{ g.mol}^{-1}$ ,  $\rho = 7,13 \text{ g.cm}^{-3}$ ) v  $\text{mm/rok}$ , když hmotnostní úbytek je  $1,0 \text{ g.m}^{-2}$  za den ?

5.11 Napište alespoň 3 dílčí elektrochemické reakce procesu růstu korozních bodů v oceli ve vodním prostředí. Na obrázku také vyznačte, kde tyto reakce probíhají.



5.12 Technicky přijatelná rychlost rovnoměrné koroze materiálů je obvykle  $0,1 \text{ mm/rok}$ . Vypočítejte, jaký tomu odpovídá ekvivalentní hmotnostní úbytek pro měď (v jednotce:  $\text{g na m}^2$  za rok, tj.  $[\text{g.m}^{-2}\text{a}^{-1}]$ , hustota Cu:  $\rho = 8930 \text{ kg/m}^3$ , molární hmotnost  $M = 63,54 \text{ g/mol}$ ).

5.13 V tabulce jsou uvedeny korozní přírůstky během oxidace slitiny niklu za vyšší teploty

|                                   |      |      |       |
|-----------------------------------|------|------|-------|
| čas (hod)                         | 10   | 30   | 100   |
| $\Delta m \text{ (g/m}^2\text{)}$ | 5,27 | 8,57 | 15,26 |

- a) Určete, zda kinetika oxidace odpovídá, lineárnímu, parabolickému nebo logaritmickému vztahu.
- b) Vypočtete dále  $\Delta m$  po době 600 hodin.

5.14. Stanovte rozdíl potenciálu článku Cd-Ni při 25°C, když koncentrace  $\text{Cd}^{2+}$  a  $\text{Ni}^{2+}$  jsou 0,05M a  $10^{-3}\text{M}$ . Porovnejte výsledek pro stejný standardní článek. Elektroda Ni je ponořena v roztoku  $\text{Ni}^{2+}$  a Cd v roztoku  $\text{Cd}^{2+}$ . Roztoky jsou odděleny membránou propustnou pro ionty obou kovů. Který kov za daných podmínek bude oxidovat.

♦ **Řešení:** Za standardních podmínek Cd bude oxidovat (korodovat jako méně ušlechtilý kov) a Ni redukovat dle řady standardních potenciálů:  $\text{Cd} \rightarrow \text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^-$  a  $\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}$ , tedy rozdíl  $\Delta E = E^0(\text{Ni}) - E^0(\text{Cd}) = -0,250 \text{ V} - (-0,403 \text{ V}) = +0,153 \text{ V}$  (dle Tab. 5.1; a tedy směr uvedených reakcí je potvrzen).

Pro zadané koncentrace, předpokládáme stejný směr reakcí, a pak rozdíl  $\Delta E = E^0(\text{Ni}) - E^0(\text{Cd}) + \frac{0,0592}{n} \log \frac{[\text{Ni}^{2+}]}{[\text{Cd}^{2+}]} = -0,250 \text{ V} - (-0,403 \text{ V}) + \frac{0,0592}{2} \log \frac{[10^{-3}]}{[0,05]} = +0,103 \text{ V}$ .  
 Reakce tedy proběhnou spontánně v daném směru, tj.  $\text{Ni}^{2+} + \text{Cd} \rightarrow \text{Ni} + \text{Cd}^{2+}$ .

5.15. Vypočtete Pilling-Bedworthův poměr pro hořčík, vanad a zinek. Podle vypočtené hodnoty stanovte, zda vytvořené vrstvy oxidů (okuje) budou mít ochranný charakter. Hustoty a molární hmotnosti uvedených kovů a hustoty jejich oxidů jsou v tabulce.

| kov | $M_M$<br>[g/mol] | hustota kovu $\rho_M$<br>[Mg/m <sup>3</sup> ] | oxid                          | hustota oxidu $\rho_O$<br>[Mg/m <sup>3</sup> ] |
|-----|------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------|
| Mg  | 24,31            | 1,74                                          | MgO                           | 3,58                                           |
| V   | 50,94            | 6,36                                          | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 3,36                                           |
| Zn  | 65,37            | 7,13                                          | ZnO                           | 5,61                                           |

♦ **Řešení:** Pro reakci kovu a kyslíku  $x\text{M} + \frac{y}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{M}_x\text{O}_y$  je P-B poměr  $r = \frac{V_O}{V_M} = \frac{M_O \rho_M}{x M_M \rho_O}$ ,

neboť obecně molární objem  $V = M/\rho$ . Při výpočtech uvažujeme molární hmotnost kyslíku  $M(\text{O}) = 16,0 \text{ g/mol}$ . Pro  $\text{Mg} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{MgO}$  je  $M(\text{MgO}) = 40,31 \text{ g/mol}$ ,  $x = 1$  a tedy  $r(\text{Mg}) = 0,80 < 1,0$ , takže vrstva nemá ochranné vlastnosti, je pórovitá a nepokryje povrch. Podobně pro vanad dostaneme  $M(\text{V}_2\text{O}_5) = 181,9 \text{ g/mol}$ ,  $x = 2$  a tedy  $r(\text{V}) = 3,38$ , tj. příliš objemné oxidy odpadávají. Pro Zn je  $M(\text{ZnO}) = 81,37 \text{ g/mol}$  je poměr  $r(\text{Zn}) = 1,58$ ; vrstva ZnO může mít ochranné vlastnosti.

**Test ke kapitole 5**

- 5.1. Celkové ztráty způsobené korozí jsou odhadovány
- na 5-8 % hrubého domácího produktu
  - na 2-4 % HDP
  - 15-20 % z nákladů na výrobu
- 5.2. Elektrochemický mechanismus koroze se uplatňuje
- hlavně při korozi za vysokých teplot
  - v prostředí, které má charakter elektrolytu
  - pouze ve vodných prostředích
- 5.3. Oxidace je obecně charakterizována jako reakce, při které
- látka přijímá elektrony
  - látka ztrácí elektrony
  - látka reaguje pouze s kyslíkem
- 5.4. Označte reakci, která představuje korozní děj
- $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$
  - $\text{Fe} - 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$
  - $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$
- 5.5. Standardní potenciály v řadě napětí jsou vztaženy
- k libovolné referenční elektrodě
  - vůči nasycené kalomelové elektrodě
  - vzhledem k vodíkové elektrodě
- 5.6. Kovy ušlechtilé mají standardní potenciál
- záporný,    b) kladný,    c) menší, než vodík
- 5.7. Na základě daných hodnot standardního potenciálu označte správný průběh reakce.  
 $E_o(\text{Fe}) = -0,44 \text{ V}$ ,  $E_o(\text{Cu}) = 0,337 \text{ V}$
- $\text{Cu}^{2+} + \text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{Cu}$
  - $\text{Cu} + \text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe} + \text{Cu}^{2+}$
  - $\text{Cu}^+ + \text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + \text{Fe}^{2+}$
- 5.8. Hodnoty rovnovážného potenciálu elektrody lze určit
- z Faradayových zákonů
  - z Nernstovy rovnice
  - podle tabulek v oboru fyzikální chemie
- 5.9. V elektrolytu bylo naměřeno  $\text{pH} = 5,5$ . Jedná se o prostředí
- kyselé,    b) zásadité    c) neutrální

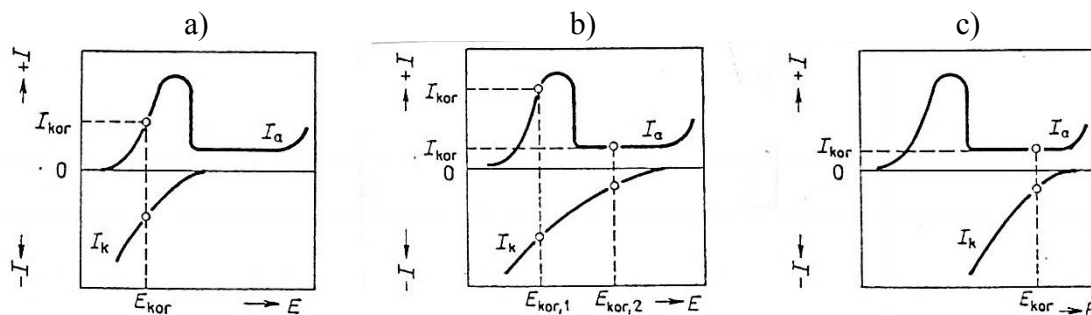
5.10. Depolarizační reakce při korozi kovů je děj:

- a) oxidační, b) redukční, c) smíšený

5.11. Při ustavení korozního potenciálu platí:

- a)  $I_a = -I_k$ , b)  $I_a = I_k$ , c)  $I = I_a - I_k$

5.12. Který z uvedených diagramů vyjadřuje korozi v aktivním stavu?



5.13. Vodivé spojení ocelového a měděného konstrukčního dílce je z hlediska koroze:

- a) výhodné, b) nevýhodné, c) korozi dílce nijak neovlivní

5.14. Určete místo zvýšeného korozního napadení v případě kapky na povrchu uhlíkové oceli:

- a) na okraji kapky, b) uvnitř kapky, c) na počátku na okraji kapky, později ve středu

5.15. Výměnná proudová hustota  $J_0$  odpovídá v korozním diagramu:

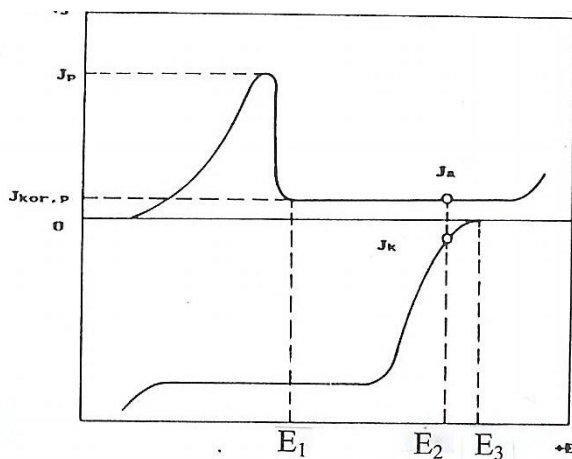
- a) pouze potenciálu anodické reakce  
b) rovnovážnému potenciálu  
c) pouze potenciálu katodické reakce

5.16. Jaký je přibližně průřez či hloubka koroze železa při proudové hustotě  $1,0 \text{ A/m}^2$  za 1 rok (např. při korozi ocelového potrubí bludným proudem).

- a) 0,1 mm, b) 1 mm, c) 10 mm

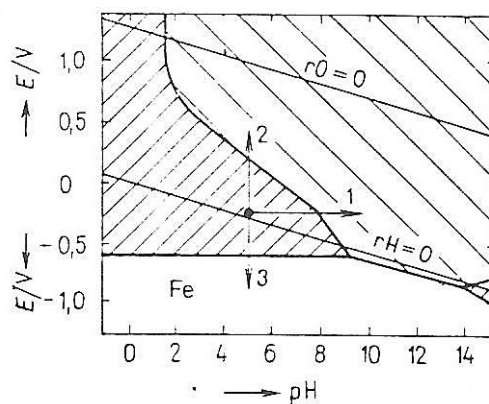
5.17. Na polarizační křivce určete potenciál, kdy dochází k pasivaci kovu.

- a) potenciál  $E_1$ , b) potenciál  $E_2$ , c) potenciál  $E_3$



5.18. Podle Pourbaixova diagramu E-pH určete stav železa při  $\text{pH} = 5$  a  $E = -0,3 \text{ V}$ :

a) Fe se nachází v pasivním stavu, b) Fe je v oblasti koroze, c) Fe je v oblasti imunity



5.19. Dle diagramu E-pH železa určete potenciál tak, aby byl kov chráněn, pokud  $\text{pH} = 3$ .

a)  $E \leq 0 \text{ V}$ , b)  $E > -0,44 \text{ V}$  c)  $E < -0,7 \text{ V}$

5.20. Pozinkovaný ocelový plech ve vlhké půdě nejrychleji koroduje v kontaktu s

a) hliníkem, b) mědí, c) titanem



### Literatura a další zdroje informací

- [1] BARTONÍČEK, R. a kol.: Koroze a protikorozi ochrana. Academia, Praha 1966, 720 s.
- [2] BARTONÍČEK, R.: Navrhování protikorozi ochrany. SNTL, Praha, 1980, 287 s.
- [3] ČÍHAL, V.: Korozivzdorné oceli a slitiny, Praha, Academia, 1999, 437 s.
- [4] ČERNÝ, M. a kol.: Korozní vlastnosti kovových konstrukčních materiálů. SNTL, Praha 1984, 260 s
- [5] MOHYLA, M.: Technologie povrchových úprav kovů, FS VŠB-TU Ostrava, 1995, 150 s.
- [6] ČÍHAL, V.: Korozivzdorné oceli a slitiny, skripta FMMI VŠB-TU Ostrava, 1992, 324 s.
- [7] KALEDOVÁ, A.: Metody testování vlastností povlaků. S. Univ. Pardubice, 2001, 248 s.
- [8] GROYSMAN, A.: Corrosion for Everybody. Springer, 2010, 368 p.
- [9] ČÍHAL, V.: Mezikrystalová koroze oceli a slitin, SNTL Praha, 1984, 355 s.
- [10] UHLIG, H., REVIE, W: Corrosion and corrosion control, J. Wiley Sons, New York, 1984.
- [11] DOLEŽEL, B.: Odolnost plastů a pryží. SNTL, Praha 1981.
- [12] DOBRÝ, O., PALEK, L.: Koroze betonu ve stavební praxi. SNTL Praha 1988.185 s.

- [13] LAI, G. Y.: High-Temperature Corrosion and Materials Applications. ASM International, Ohio, 2007, 461 p.
- [14] LANDOLT, D.: Corrosion et chimie de surfaces des métaux. PPUR, Lausanne, 1993, 552 p.
- [15] KREIBICH, V.: HOCH, K.: Koroze a technologie povrchových úprav, FS ČVUT Praha, 270 s
- [16] KOCICH, J., TULEJA, S.: Korózia a ochrana kovov. ALFA Bratislava, 1983, 132 s.
- [17] MARCUS, P. OUDAR, J.: Corrosion mechanisms in theory and practice. Marcel Dekker, Inc., New York, 1995, 641 p.
- [18] KRAUS, V., Povrchy a jejich úpravy. ZU Plzeň, 2000, 218 s.
- [19] ČSN ISO 9223 – Koroze kovů a slitin. Korozní agresivita atmosfér. Klasifikace.

**Internetové možnosti studia koroze:**

Korozní inženýrství (VŠChT Praha)

[www.povrchari.cz](http://www.povrchari.cz)

[povrchoveupravy.cz](http://povrchoveupravy.cz)

[www.corrosion.com](http://www.corrosion.com)

[www.corrosionsource.com](http://www.corrosionsource.com)

Alumatter (část koroze)

## 6. OPOTŘEBENÍ MATERIÁLŮ



**Čas ke studiu:** 2 hodiny



**Cíl** Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- Pojmenovat a rozlišit hlavní druhy opotřebenění.
- Popsat základní parametry a veličiny opotřebenění.
- Zvolit vhodné typy kovových materiálů se zvýšenou odolností proti určitému opotřebenění
- Orientovat se v problematice opotřebenění materiálů



### Výklad

**Opotřebenění** je trvale nežádoucí změna povrchu (rozměrů) způsobená vzájemným působením funkčních povrchů nebo funkčního povrchu a okolního media. Projevuje se jako odstraňování nebo přemísťování částic z opotřebovaného povrchu mechanickými účinky, popřípadě doprovázenými i jinými jevy (např. chemickými, elektrochemickými, elektrickými).

Odolnost proti opotřebenění je důležitá materiálová vlastnost, která má velký technický a ekonomický význam. Je to schopnost tenké povrchové vrstvy materiálu odolávat účinkům vnějších sil, které působí v procesu opotřebenění. Přestože k opotřebenění dochází účinkem mechanických sil, není možno opomenout další významné činitele, které v procesu opotřebenění působí, např. vlhkost, teplota, koroze, druh maziva a které mají fyzikálně-chemickou povahu.

Procesy opotřebenění se zabývá vědní obor **tribologie**, která ve vzájemné vazbě řeší problematiku tření, opotřebenění a mazání. Tribologie, jako vědní obor, má interdisciplinární charakter v návaznosti na poznatky z fyziky, chemie, mechaniky a nauky o materiálu.

### 6.1. Povrch a jeho vlastnosti

Povrch vzniká na fázovém rozhraní a je definován fyzikálně-chemickým stavem, mechanickými vlastnostmi a geometrickými charakteristikami či parametry.

#### Fyzikálně chemický stav povrchu

Vznikem povrchu se poruší původní rovnováha sil mezi atomy, která platí pro atomy uvnitř krystalu. Na povrchu krystalu je každý atom obklopen menším počtem sousedních atomů než uvnitř, proto jsou energetické stavy atomů na povrchu vyšší. Povrchové atomy mají větší schopnost chemicky reagovat a atomy nebo molekuly fáze, která je obklopuje. Zvýšená chemická reaktivita plyne z tendence povrchových atomů přejít do nižšího energetického stavu (snížení volné entalpie), resp. se snahy povrchového atomu obnovit

symetrii silového pole, v němž se nachází. Různé krystalografické orientace mřížky vzhledem k povrchu se projeví rozdílnými hodnotami povrchové energie. Atomy na povrchu budou v takové poloze, při které je povrchová energie minimalizována. Proto v hloubce několika atomových vrstev dochází k deformaci mřížky a fyzikálně chemický stav a vlastnosti kovu v této povrchové oblasti jsou jiné než v ostatním objemu.

Fyzikálně-chemická reaktivita povrchu závisí na jeho chemickém složení, stavu struktury apod. a má značný význam při procesech opotřebení.

### Mechanické vlastnosti povrchu

Mechanické vlastnosti určité vrstvy povrchu materiálu jsou hlavně popsány jeho tvrdostí, resp. mikrotvrdostí. Z hlediska opotřebení má hodnota tvrdosti povrchu značný význam pro většinu druhů opotřebení, avšak vztahy mezi tvrdostí a opotřebením nemají všeobecnou platnost. Tvrdost jako pomocné kritérium se pro určité druhy opotřebení může použít na hodnocení odolnosti materiálu proti opotřebení, zejména jako mechanická vlastnost stavu struktury na povrchu. Na druhé straně nadměrně vysoká tvrdost je obvykle spojena se sníženou houževnatostí materiálu, tedy s rizikem křehkého popraskání povrchu anebo povrchové vrstvy a jejím odpadáváním (vydrolováním) nebo promáčknutím na měkkém základním materiálu.

### Tření funkčních povrchů

Při relativním pohybu dvou těles, která se dotýkají anebo při pohybu tělesa zatíženého normálovou silou  $F_n$  na podložce vzniká v oblasti styku povrchů silový odpor  $F_t$ . Síla  $F_t$  je orientována v každém místě kolmo k normálové síle  $F_n$  a nazývá se třecí silou (třením). Velikost třecí síly je přímo úměrná působící normálové síle  $F_n$  a nezávisí na ploše dotyku:

$$F_t = \mu \cdot F_n. \quad (6.1)$$

Konstanta úměrnosti  $\mu$  se nazývá **součinitel tření**. Podle vzájemného pohybu funkčních povrchů je možno rozlišit **součinitel kluzného tření** (smykového nebo vlečného tření, obr. 6.1) a **součinitel valivého tření** ( $\mu_r$ ), který je dán podílem výstřednosti  $e_m$  normálové síly  $F_n$  a reakce podložky  $F_n'$ , přitom platí rovnováha momentu síly:  $F \cdot R = F_n \cdot e_m$  (obr. 6.1). Síla, která udržuje těleso v rovnoměrném pohybu je vzhledem k třecí síle orientovaná opačně (záporně) a má menší hodnotu než síla, která je nutná k uvedení téhož tělesa do pohybu. Proto také součinitel za klidu (pro uvedení ze stavu klidu do pohybu), tj. **statický součinitel tření**  $\mu_s$  je větší než součinitel tření za pohybu, **kinetický součinitel tření**  $\mu$ .



Obr. 6.1. Schéma pro definice součinitele kluzného a valivého tření.

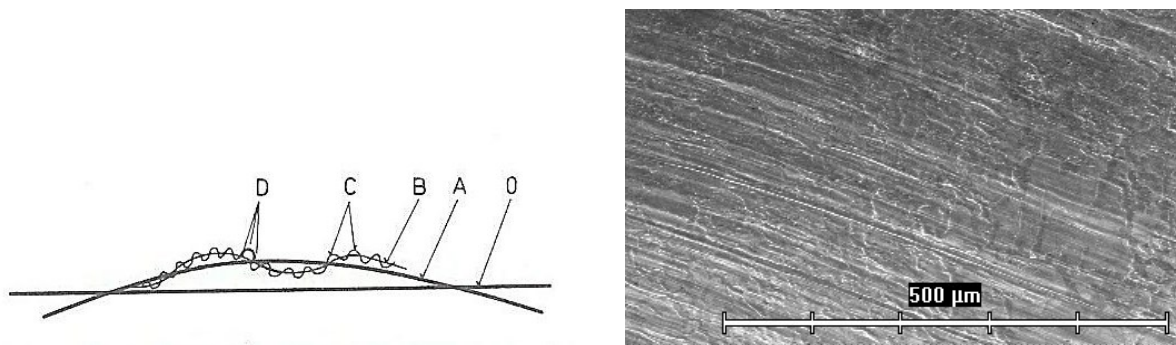
Statický součinitel tření tělesa na nakloněné rovině je determinován sklonem roviny  $\alpha$ , kdy se těleso uvede samovolně z klidu do pohybu  $\mu_s = \tan \alpha$ . Hodnoty součinitele kluzného suchého tření se pohybují obvykle v intervalu  $\mu = 0,1-1$ , hodnoty součinitele valivého tření jsou řádově nižší ( $\mu_r = 0,01-0,1$ ).

Kinetický součinitel kluzného tření s rostoucí rychlostí relativního pohybu funkčních povrchů obecně klesá. Práce třecí síly po dráze se přemění hlavně na teplo a opotřebení materiálu.

Tření je způsobené adhezivními silami mezi povrchem a tělesem a zvyšována překonáváním místních nerovností a drsností povrchu. Obecně dále platí, čím větší je tření při vzájemné pohybu těles, tím vyšší je míra opotřebení, resp. otěru.

### Nerovnosti povrchu

Ideálně rovný povrch se prakticky nedá dosáhnout na žádném materiálu. Každý reálný povrch tuhého tělesa má určité nerovnosti a odchylky od nominálního povrchu, daného výkresovou dokumentací. Nerovnosti povrchu se vyjadřují geometrickými odchylkami od ideálně hladkého povrchu. Prakticky se rozlišují čtyři druhy nerovností, které jsou schematicky znázorněny na obr. 6.2. Přímka zobrazuje myšlený idealizovaný povrch (0 – nominální povrch, bez vad a nerovností), čára A makroskopické odchylky tvaru od rovinnosti nebo od požadovaného tvaru, čára C znázorňuje mikroskopickou drsnost nebo vlnitost a čára D submikroskopické, případně nanometrické nerovnosti definované fyzikálním stavem a uspořádáním povrchových atomů, při kterém dosahují energeticky stabilní stav.



Obr. 6.2. Část profilu povrchu. Druhy geometrických nerovností povrchu (A – odchylka tvaru, B – vlnitost, C – drsnost, D – nanoskopické nerovnosti. Povrch po otěru s nerovnostmi.

Pro praktické účely se nerovnost povrchu určuje hlavně aritmetickou **drsností povrchu**  $R_a$ , která je definována jako aritmetický průměr absolutních odchylek od odstředivé čáry profilu ( $R_a = \sum_1^n |y_i|/n$ ). Podrobnosti a další charakteristiky drsnosti jsou uvedeny v normách. Nerovnosti povrchu a drsnost mají významnou úlohu v mnoha procesech opotřebení, podmiňují např. skutečnou velikost kontaktní plochy, místní koncentrace napětí v oblasti výstupků. Na druhé straně, vlivem opotřebení se mění geometrické charakteristiky povrchu.

Základní přímo měřitelné veličiny, kterými se hodnotí opotřebení, jsou označovány písmenem **W (wearing)** s indexy upřesňujícími jejich vymezení anebo jednotky, tab. 6.1.

Tab. 6.1. Veličiny používané pro hodnocení opotřebení

| opotřebení | označení | jednotka      | Rychlost opotřebení | Otěr (intenzita opotřebení) |
|------------|----------|---------------|---------------------|-----------------------------|
| délkové    | $W_l$    | $\mu\text{m}$ | $w_l = W_l/t$       | $W_l/L$                     |
| hmotnostní | $W_h$    | mg            | $w_h = W_h/t$       | $W_h/L$                     |
| objemové   | $W_o$    | $\text{mm}^3$ | $w_o = W_o/t$       | $W_o/L$                     |

Opotřebení v délkových jednotkách  $W_L$  představuje úbytek rozměru (tloušťky) součástí, který nastal během určité doby ( $t$ ) anebo po dráze pohybu součásti ( $L$ ) při otěru (opotřebení).

Kromě uvedených veličin se používají také poměrné parametry, kterými se vyjadřuje poměrná odolnost proti opotřebení porovnáním měřených hodnot zjištěných na vzorcích zkoušeného materiálu s hodnotami měřenými na etalonu (např. z měkké oceli 12013, 100HV). **Poměrné opotřebení je obecně definováno poměrem opotřebení etalonu a vzorku**

$$\psi = W(\text{etalon})/W(\text{vzorek}), \quad (6.2)$$

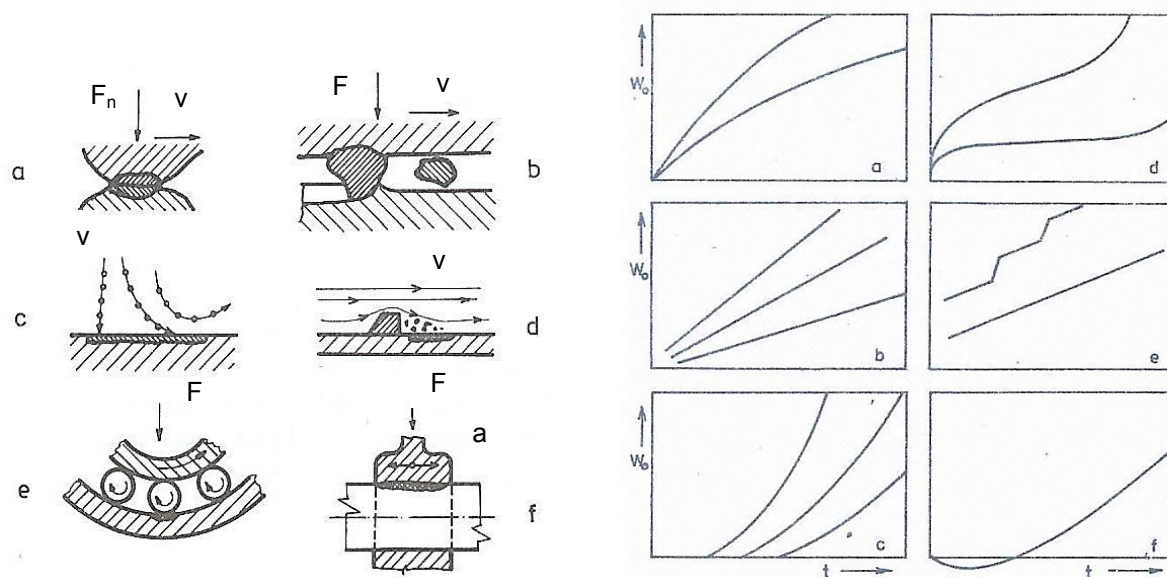
které platí pro váhové, objemové i délkové vyjádření velikosti opotřebení. Např. pro poměrné váhové opotřebení je možno psát vztah  $\psi_h = W_{he}/W_{hv}$ . Poměrné objemové opotřebení pro abrazi může být označeno jako  $\psi_{oabr}$  – poměrné abrazivní opotřebení.

## 6.2. Základní druhy opotřebení a jejich podstata

Podle způsobu jakým opotřebení nastává, rozlišujeme šest základních druhů opotřebení:

**Adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové a vibrační opotřebení.**

Jednotlivé druhy opotřebení jsou schematicky znázorněny a porovnány na obr. 6.3.



Obr. 6.3 Základní druhy opotřebení (schéma): a – adhezivní, b – abrazivní, c – erozivní, d – kavitační, e – únavové, f – vibrační. Typické časové závislosti základních druhů opotřebení.

Ve skutečnosti se často jednotlivé uvedené druhy opotřebení navzájem kombinují a modifikují za podmínek, při kterých se proces opotřebení uskutečňuje (teplota, koroze, mazivo).

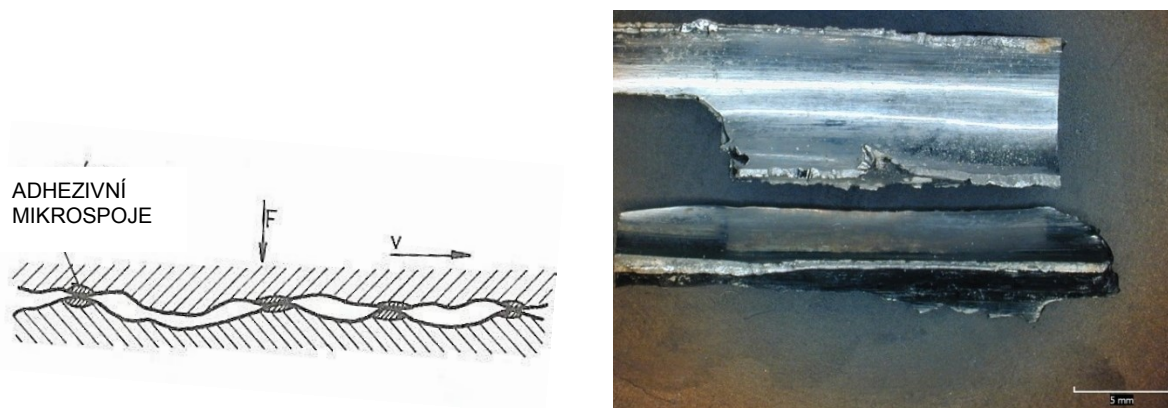
V procesech opotřebení se částice opotřebovaného povrchu

- přemísťují v rámci jednoho povrchu (zejména plastickou deformací),
- přemísťují (přenášejí) na druhý povrch,
- oddělují (vytrhávají) z povrchu.

Účinkem těchto změn se zhoršuje kvalita povrchu, v důsledku čehož přestává povrch plnit svoji původní funkci. Z toho plyne, že škodlivý účinek opotřebení může nastat i bez úbytku hmotnosti anebo měřitelné změny rozměru funkčního povrchu.

### 6.3. Adhezivní opotřebení

Nastává při relativním pohybu dvou funkčních povrchů, které jsou k sobě přitlačovány určitou silou. Adhezivní opotřebení se vyskytuje na třecích plochách kluzných ložisek, na brzdných destičkách nebo kotoučích, na součástech ve vodících drážkách strojů. V důsledku mikronerovností obou povrchů nedochází ke styku povrchů na celé ploše, ale jen na malých dotykových ploškách (obr. 6.4), přičemž se výstupky nerovností intenzivně elasticky a plasticky deformují. Při vzájemném pohybu obou povrchů dochází ke tření, při kterém se vrcholky nerovností mohou porušit a na porušených styčných plochách se vlivem adhezivních sil tvoří mikroskopické spoje (obr. 6.2 a, 6.3). Ke styku funkčních povrchů při působení tlakové síly dochází jen na skutečné (reálné) ploše  $A_r$ , která je menší než nominální (obrysová) plocha kontaktu  $A_n$ , přitom  $A_r = A_n \cdot N_n = F_n / H$ , kde  $N_n$  je normalizovaná tlaková síla ( $N_n = N / A_n H$ ),  $H$  je tvrdost podložky v Pa,  $F_n$  – působící tlaková normálová síla (obr. 6.3).



Obr. 6.4. Princip adhezivního opotřebení. Opotřebení (otěr) matrice peletizačního lisu, ztenčení stěny a přetržení oslabeného dílce mezi kruhovými otvory.

Adhezivní opotřebení nastává porušením těchto mikrospojů, ke kterému dochází na původní ploše dotyku obou mikroskopických nerovností anebo pod povrchem jednoho z dvojice materiálů (delaminace). Druhý případ je častější, neboť povrchové vrstvy se přitom

deformačně zpevňují a jejich pevnost je vyšší než pevnost podpovrchových vrstev. Tímto mechanismem se mohou částice jednoho materiálu přenést na povrch druhého.

Adhezivní opotřebení lze účinně snížit mazáním funkčních ploch ložisek, kdy mazivo přenáší tlaková napětí, snižuje koncentrace napětí v místech výstupků a snižuje tření.

Velikost adhezivního opotřebení je možno stanovit podle experimentálně stanovené závislosti mezi objemovým otěrem  $W_o$ , působící silou  $F$ , délkou kluzné dráhy  $L$  a mezním tlakem  $p_m$ , který je přibližně roven tvrdosti měkkého materiálu.

$$W_o = K_{adh} \frac{F^\alpha L}{3p_m}, \quad (6.3)$$

kde  $\alpha$  je bezrozměrný exponent ( $\alpha = 0,6-1,0$  dle tvaru oddělených částic) a  $K_{adh}$  je součinitel adhezivního opotřebení. Pro čisté povrchy jsou hodnoty  $K_{adh}$  obvykle v rozmezí  $0,1 - 0,001$  (dvojice stejných kovů) pro povrchy s mazivem hodnota  $K_{adh}$  klesá řádově na  $10^{-6} - 10^{-7}$ .

Při vyšších relativních rychlostech povrchů dochází ke zvýšení teploty povrchů a oxidaci, což rychlost adhezivního opotřebení zvyšuje. Při vysokých relativních rychlostech a vyšších hodnotách normalizované síly (tlaku) se adhezivní opotřebení realizuje s natavením povrchových vrstev nebo zadřením, způsobeným vznikem spojů mezi funkčními povrchy.

Při nadměrných rychlostech pohybu a při pomalém odvodu tepla z oblasti třecích ploch může také docházet k přehřátí až lokálnímu natavení povrchu a k zadření.

Tab. 6.2. Hodnoty součinitele adhezivního opotřebení pro vybrané kombinace materiálů (tření bez maziva, kluzná rychlost 1,8 m/s,  $F = 3,1\text{N}$ )

| Dvojice materiálu             | $K_{adh}$           | Dvojice materiálu                     | $K_{adh}$           |
|-------------------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|
| Měkká ocel – měkká ocel       | $7 \cdot 10^{-3}$   | kalená nást. ocel – kalená nást. ocel | $1,3 \cdot 10^{-4}$ |
| Ms60 – kalená nástrojová ocel | $6 \cdot 10^{-4}$   | PTFE – kalená nástrojová ocel         | $2,5 \cdot 10^{-5}$ |
| Ms70 – kalená nástrojová ocel | $1,7 \cdot 10^{-4}$ | PE – kalená nástroj ocel              | $1,3 \cdot 10^{-7}$ |

Z tabulky 6.2 je zřejmé, že hodnoty  $K_{adh}$  klesají s rostoucím rozdílem materiálů třecí dvojice. To má své opodstatnění v případech, kdy je zajištěno náležité mazání a odvod uvolněných částic cirkulujícím čištěným mazivem. Pokud nejsou uvedené podmínky splněny, pak je vhodnější použít kluzné dvojice tvořené tvrdými materiály (např. cementovaná nebo nitridovaná ocel, vrstvy TiC, WC). Není však vhodné použít pro kluzné dvojice dvou stejných materiálů.

#### 6.4. Abrazivní opotřebení

Podstatou abrazivního opotřebení je oddělování částic z funkčního povrchu jednoho tělesa působením tvrdého a drsného povrchu druhého tělesa anebo účinkem tvrdých samostatných částic při pohybu mezi oběma povrchy, obr. 6.2 b. Abrazivní opotřebení tedy způsobuje trvalou nežádoucí změnu povrchu součástí způsobenou vzájemným silovým účinkem funkčních povrchů, nebo funkčního povrchu a abrazivního media, projevující se hlavně rýhováním a odřezáváním částic z povrchu tělesa. Abrazivní opotřebení vzniká zejména za podmínek práce strojů na těžbu a zpracování různých surovin a stavebních materiálů, jako

jsou zuby lopat rypadel a bagrů, dílce drtičů a mlýnů kamení, rudy, uhlí apod. Tento druh opotřebení také nastává na čepech, ozubeních, pístních kroužcích, vodících plochách strojů, pokud se mezi funkční plochy a do maziva dostanou tvrdé částice z okolí. Takové částice mohou narušovat povrch funkčních ploch mikro-řezáním, rýhováním a podpovrchovými trhlinkami.

Objemový otěr je úměrný přitlačné síle  $F$  (nutné pro částečné vniknutí částice do materiálu), dráze působení abraze o délce  $L$ , a nepřímo úměrný tlaku  $p_m$ , který je nutný pro plastickou deformaci povrchové vrstvy ( $p_m \approx HV$ )

$$W_o = K_{abr} \frac{FL}{\pi p_m}, \quad (6.4)$$

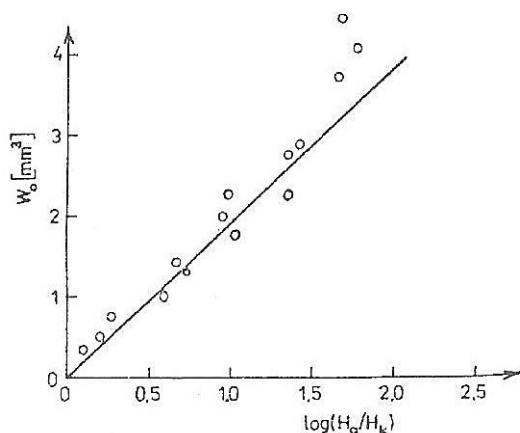
kde  $K_{abr}$  je součinitel abrazivního opotřebení, jehož velikost je v rozmezí  $2 \cdot 10^{-1}$  až  $2 \cdot 10^{-2}$  a v případě abraze mezi funkčními povrchy v mezích  $10^{-2} - 10^{-3}$ .

Objemový otěr stoupá při dané síle také s rostoucí velikostí částic abraziva, přitom do velikosti cca 100  $\mu m$  dochází nejprve k prudkému nárůstu otěru, a při velikostech částic nad 100  $\mu m$  je nárůst otěru pozvolný a téměř lineární v závislosti na velikosti částic, obr. 6.5b.

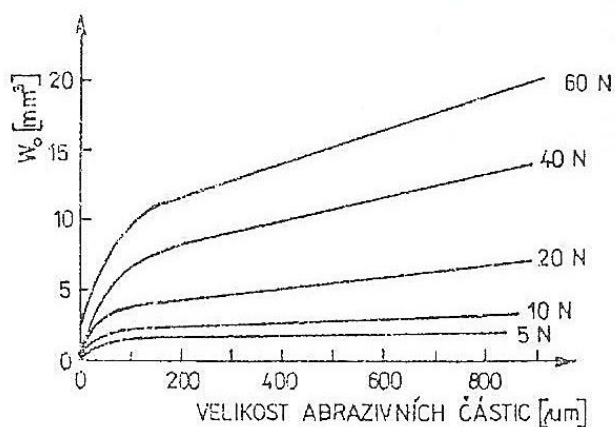
Objemový otěr je rovněž závislý na podílu tvrdosti abraziva  $H_a$  a tvrdosti materiálu povrchu funkční části  $H_k$  podle vztahu

$$W_o = K_1 \log(H_a/H_k), \quad (6.5)$$

ve kterém  $K_1$  je pro dané vnější podmínky abraze konstanta. Uvedený vztah je graficky znázorněn pro tři různé tvrdosti abraziva ( $SiO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $SiC$ ) a některé materiály na obr. 6.5a.



Obr. 6.5a Závislost mezi objemovým otěrem kovových materiálů a podílem tvrdosti abraziva a kovu.



Obr. 6.5b Závislosti objemového otěru nástrojové uhlíkové oceli na velikosti abrazivních částic a na zatížení vzorků.

Při posuzování materiálů v podmínkách abraze je třeba rozlišovat, zda je **abrazivo rozpojené** či rozdrobené (písek, popel, zemina) nebo je **celistvé**, tj. tvořené kompaktními tuhými tělesy (kamenivo, beton, kusy uhlí, kvádry). V této souvislosti pak rozlišujeme nízkonapěťovou a vysokonapěťovou abrazi, pro rozpojené, resp. celistvé abrazivo.

Odolnost proti abrazi kovových materiálů lze významně zlepšit legováním, tepelným zpracováním anebo povrchovou úpravou. Legováním ocelí karbidotvornými prvky (Cr, V, W) a vhodným zpracováním se zvyšuje ve struktuře objemový podíl tvrdé fáze, která významně snižuje opotřebení. Nejvyšší odolnost proti abrazivnímu opotřebení mají oceli

s martenzitickou strukturou s vysokým podílem karbidické fáze. Mezi nejodolnější oceli proti abrazivnímu opotřebení s požadavkem vyšší houževnatosti patří manganové austenitické oceli (s obsahem 1,2 - 1,3 % C a 12 – 13 % Mn - **Hadfieldova ocel**, pro části strojů pracujících v kamenitém terénu). Na této oceli dochází v povrchových vrstvách za vysokých tlaků a rázů k transformaci metastabilního austenitu na odolný martenzit, s vysokou hustotou dislokací, zejména vrstevných chyb. Pro korby nákladních automobilů byly vyvinuty otěruvzdorné nízkolegované oceli značené HARDOX 400 a HARDOX 500. Otěruvzdorné jsou také **ledeburitické nástrojové oceli** (X200Cr12).

Odolnost materiálu proti abrazivnímu opotřebení se většinou hodnotí poměrnou odolností proti objemovému otěru ( $\psi_{abr}$ ), jehož hodnoty jsou pro vybrané materiály a etalony uváděny v tabulkách.

Pro adhezivní nebo abrazivní opotřebení v určitém rozmezí podmínek platí **Archardův zákon**

$$W_n = K_a \cdot p_n, \quad (6.6)$$

kde normalizované opotřebení  $W_n = W_o / L \cdot A_n$  ( $A_n$  – nominální plocha kontaktu,  $L$  – délka otěru) a normalizovaný plak  $p_n = F / A_n H$ , resp. normalizovaná tlaková síla ( $F$  – tlaková síla,  $H$  – tvrdost povrchu materiálu),  $k_a$  – bezrozměrná Archardova konstanta pro adhezi nebo abrazi. Bezrozměrné jsou také parametry  $W_n$  a  $p_n$ .

## 6.5. Erozivní opotřebení

Jeho základem je poškozování povrchů částicemi nesenými proudícím plynem nebo kapalinou, anebo samotným proudícím plynem, párou nebo kapalinou, obr. 6.3c a 6.6. Účinkem erozivního opotřebení nastává rýhování exponovaných ploch a oddělování povrchových částic materiálu. Pro tento druh opotřebení je typická nerovnoměrnost opotřebení povrchu.

Erozivní opotřebení unášenými částicemi se vyskytuje

- v proudu kapaliny, např. částice písku ve vodě, v potrubí, v čerpadlech, v turbínách apod.
- v proudu plynů, např. částice prachu v plynovém potrubí, ve ventilátorech anebo v kompresorech.

Opotřebení přímým účinkem proudících kapalin a plynů částicemi vodních kapek a mokré páře se vyskytuje zejména v parních turbínách a potrubích. Např. náběhová hrana lopatky v kondenzační nízkotlaké části parní turbíny je vystavena erozivnímu účinku vodních kapek, které mají rychlost dopadu až 300 m/s.

V důsledku rozdílné hustoty proudícího média a unášených částic, dochází k erozi přednostně v místech změny směru proudění (kolena, ohyby).

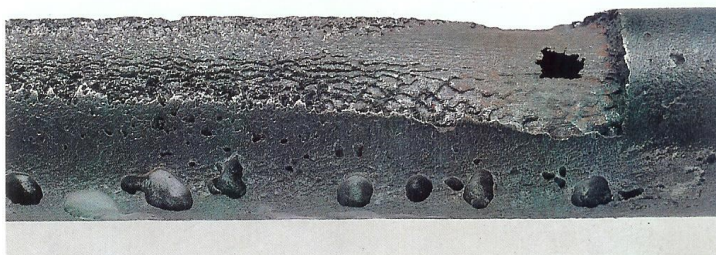
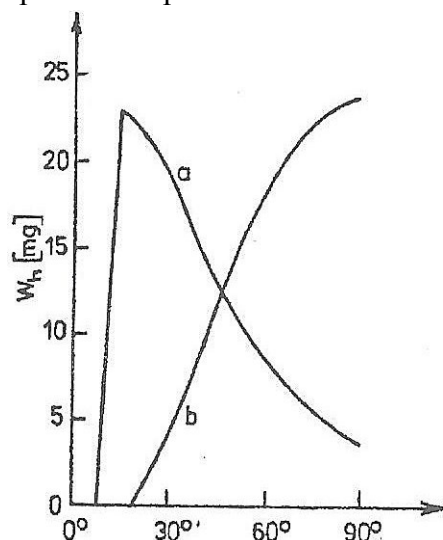
Erozivní opotřebení se vyskytuje také u průtočných částí hydraulických strojů, potrubí pro dopravu hydro-směsí, u pneumatických zařízení a míchacích lopatek. Objevuje se rovněž u lopatek proudových motorů, kde dochází k poškozování prachovými částicemi, kapkami vody, krystalky ledu apod.

Objemový úbytek materiálu při erozi ( $W_o$ ) závisí na rychlosti dopadajících částic ( $v$ ), na

jejich hmotnosti ( $M$ ) a na úhlu dopadu na povrch ( $\alpha$ ) podle vztahu

$$W_o = \frac{Mv^2 \cos^2 \alpha}{6Xp_h}, \quad (6.7)$$

kde  $X = l/h$  je poměr mezi délkou a hloubkou rýhy vytvořené částicí na povrchu a  $p_h$  je horizontální složka tlaku částice na funkční povrch. Uvedený vztah platí pro houževnaté materiály s mnohem nižší tvrdostí, než je tvrdost erozivních částic a pro úhly dopadu  $15-30^\circ$ . Při větších úhlech dopadu a pro materiály s nízkou houževnatostí tento vztah neplatí. V těchto případech lze pro odhad hmotnostního otěru ( $W_h = W_o \cdot \rho$ ) na úhlu dopadu použít obr. 6.6.



*Nahoře erozivní napadení s perforací trubky, kolmo na proudění.*

*Obr. 6.6. Závislost hmotnostního podílu otěru při erozivním opotřebení na úhlu dopadu částic SiC na materiál: a) měkký a houževnatý, b) tvrdý a křehký. Eroze vodními kapkami v páře (rychlost 37 m/s, tlak 10 MPa, při 495°C). Nízkolegovaná ocel 13CrMo4-4, trubka Ø25 mm.*

Zatímco u tvrdých, křehkých materiálů velikost otěru s úhlem dopadu částic roste, u měkkých houževnatých materiálů naopak dochází s rostoucím úhlem dopadu (větším než  $15^\circ$ ) k poklesu hodnoty otěru. Při malých úhlech dopadu je tedy potřebné navrhovat lépe materiály tvrdé, anebo s odpovídající povrchovou úpravou – vysokolegované chromové litiny s obsahem 21-25% Cr, litiny typu Cr-Mo 15-2, slinuté karbidy, cementované a nitridované oceli, oceli s galvanicky nanesenými tvrdými vrstvami, návary tvrdokovů apod. Při velkých úhlech dopadu jsou naopak vhodné materiály měkké a houževnaté – plasty, pryže, vyžihané oceli.

## 6.6. Kavitační opotřebení

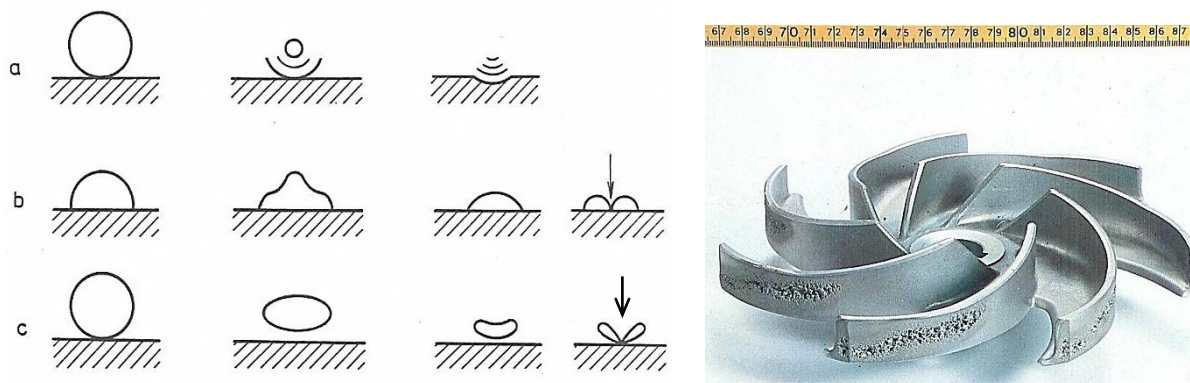
Podstata kavitace spočívá ve vznikaní a zanikání (implozi) kavitačních bublin v proudící kapalině při náhlé změně tlaku, která nastane z důvodu změny rychlosti kapaliny anebo hydrodynamických podmínek proudění.

Kavitační opotřebení se objevuje na povrchu oběžných kol čerpadel, vodních turbín nebo lodních šroubů, na vstřikovacích tryskách, na částech hydraulických a míchacích zařízení, v okruzích chlazených kapalinou. Kavitace je vyvolána oddělováním částic z povrchu jako následek opakovaného vzniku a zanikání bublin v kapalině. Kavitace se obvykle objevuje

v místech, kde se porušuje kontinuita proudu a kde dochází k zániku kavitačních dutin.

Základní podmínkou vzniku kavitační dutiny je pokles tlaku v kapalině pod tlak nasycených par kapaliny při dané teplotě. Kavitace tedy vzniká tam, kde jsou náhlé změny v rychlosti proudění kapaliny, nebo v kapalině vystavené vyššímu podtlaku. Kavitační bubliny vznikají např. v zúžených částech potrubí, kde výrazně stoupá rychlost proudění kapaliny a naopak zanikají v místech s rozšířeným průřezem. Experimentálně bylo prokázáno, že doba zániku bubliny (imploze) je řádově  $10^{-5}$  až  $10^{-3}$  s, a rychlost hydrodynamických rázů je přes 300 m/s. Průměry kavitačních bublin 0,05-5 mm. Podle výpočtů se odhaduje velikost implozního tlaku na  $10^2$ - $10^3$  MPa.

Vznik mechanických sil při kavitaci objasňují v podstatě dva modely, obr. 6.7. Mechanismus poškozování rázovými vlnami, šířícími se v radiálním směru od zanikajících kavitačních bublin musí probíhat v bezprostřední blízkosti povrchu.



Obr. 6.7. Modely imploze kavitační bubliny: a) schéma působení rázové vlny při zániku kavitační bubliny, b) změny tvaru bubliny vlivem proudění u povrchu, c) vznik mikropaprsku. Příklad kavitace lopatek míchadla. Kavitace vede dále k proděravění a destrukci součástí.

Později bylo prokázáno, že počáteční proudění kolem pohybující se zanikající bubliny přechází v rychlý pohyb, který vytvoří mikropaprsek, který svým dynamickým účinkem poškozuje povrch. Střídavé úder kapalin od mnoha implozí bublin na stejném místě způsobují únavové poškození, zpevňování povrchu a odpadávání částic materiálu.

Hmotnostní úbytek materiálu při kavitaci závisí hlavně na rychlosti proudící kapaliny ( $v$ ) a na době ( $t$ ) působení kavitace podle vztahu

$$W_h = A t v^n, \quad (6.8)$$

kde  $A$  je parametr závislý na podmínkách zkoušky a na testovaném materiálu,  $n$  je exponent v mezích od 4 do 14.

Při opakovaném zániku (implozi) velkého počtu bublin na stejném místě dílce dochází k cyklickému rázovému namáhání, které způsobí únavové poškození ve tvaru důlků, orientovaných ve směru proudění.

Kavitace je často doprovázena korozí, která může kavitační poškození významně urychlit. Pokud jsou v proudící kapalině i tvrdé částice (nečistoty), objevuje se na součástech vedle kavitace i eroze, resp. kombinace eroze a kavitace (hydroeroze).

Účinnou ochranou proti kavitaci je konstrukční řešení, které kavitaci neumožní anebo výrazně omezí. Materiály zcela odolné proti kavitaci zatím nejsou k dispozici, takže volba materiálu by měla vycházet z optimalizace nákladů (cena součásti plus náklady spjaté s odstávkou zařízení, a s výměnou či renovací dílce). Vysokou odolnost vůči kavitaci vykazují martenzitické nerezavějící oceli s nízkým obsahem uhlíku (typu CrNi13-4), dobré zkušenosti jsou i s některými druhy bronzů a mosazí.

### 6.7. Vibrační opotřebení (fretting)

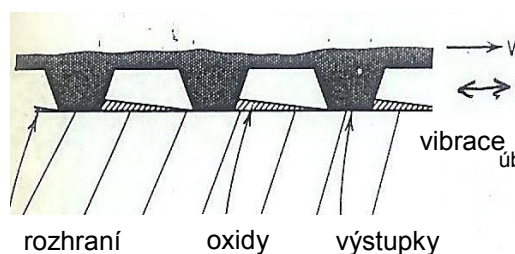
K vibračnímu opotřebení dochází u součástí, které vykonávají vzájemný tangenciální kmitavý pohyb při působení normálových zatížení, přitom potřebná minimální amplituda vibračního pohybu je cca 1-10  $\mu\text{m}$  (obr. 6.8). Toto opotřebení se vyskytuje u části s hybným uložením (valivá ložiska, čepy, hřídele), tak i zdánlivě nehybných spojení, jako jsou lisované, šroubové spoje. K vibračnímu opotřebení dochází, když při provozním zatížení nastává zvýšení teploty a oxidace na třecí ploše (třecí koroze). Vedle mechanického vlivu se při vibračním opotřebení uplatňuje koroze materiálu, neboť korozní produkty (tvrdší oxidy) rozdrčené vlivem tlaku a vibrací na práškovité částice způsobují nebo zintenzivňují abrazi exponovaného povrchu, obr. 6.9. Povrchové důlky a trhliny, které mohou vznikat při vibračním opotřebení, působí u cyklicky namáhaných součástí jako koncentrátoři napětí, snižující významně meze únavy (o 30-50%). Následky vibračního opotřebení se mohou projevit netěsností pevného spoje anebo naopak, ucpané částice mohou zabránit jeho demontáži při opravě.

Rozsah vibračního opotřebení dané dvojice materiálů závisí na amplitudě, frekvenci a měrném tlaku. S rostoucí amplitudou vibračního pohybu při dané frekvenci dochází k růstu otěru, avšak s frekvencí při konstantní amplitudě vibračního pohybu se otěr snižuje, obr. 6.9.

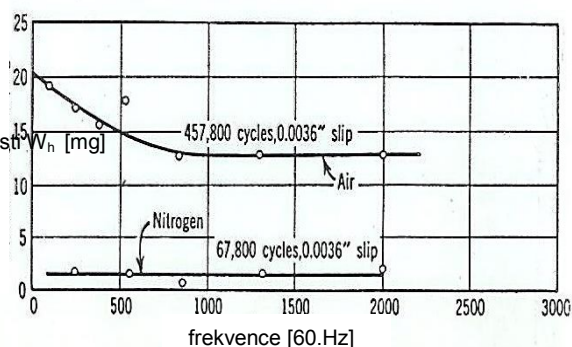
Celkové opotřebení ( $W_h$ ) je zde způsobeno chemickými a mechanickými vlivy (třetí člen):

$$W_h = (k_0 F^{1/2} - k_1 F) \cdot N/f + k_2 a F N, \quad (6.9)$$

kde  $F$  je normálové zatížení,  $N$  – počet cyklů,  $f$  – frekvence vibrací či oscilací,  $a$  – amplituda pokluzu při vibracích,  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  – konstanty.



Obr. 6.8 Schéma detailu vibračního opotřebení (třecí koroze, fretting)



Obr. 6.9 Vliv frekvence vibrací a prostředí (vzduch, dusík) na vibračním opotřebení.

Opatření pro zamezení fretingu: kombinace měkkého a tvrdého kovu (ocel/Sn, Cd na Fe), úprava povrchu za účelem odstranění pokluzu (zdrsnění povrchu), použití mazadel (nízko viskózní oleje, MoS<sub>2</sub>), použití elastomerů nebo materiálů s nízkým součinitelem tření (teflon). Vyšší odolnost proti vibračnímu opotřebení vykazují materiály s vysokou odolností proti abrazi a oxidaci povrchu. Nízkou odolnost vykazují dvojice těchto materiálů: Ni-ocel, Al – ocel, Al-Al. Nežádoucí účinky vibračního opotřebení na funkční plochy součástí lze snížit zpevněním povrchu plastickou deformací za studena anebo povlaky (mědí, chromem, kadmiem, stříbrem, korundem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

## 6.8. Únavové opotřebení

Výskyt únavového opotřebení, nazývaného též **kontaktní únava**, souvisí se střídavým namáháním povrchu materiálu, které obvykle nastane **při valivém pohybu** (valivá ložiska, ozubená kola, kola a kolejnice) anebo při opakovaných nárazech dvou povrchů (zdvihátka ventilů, části pneumatických strojů).

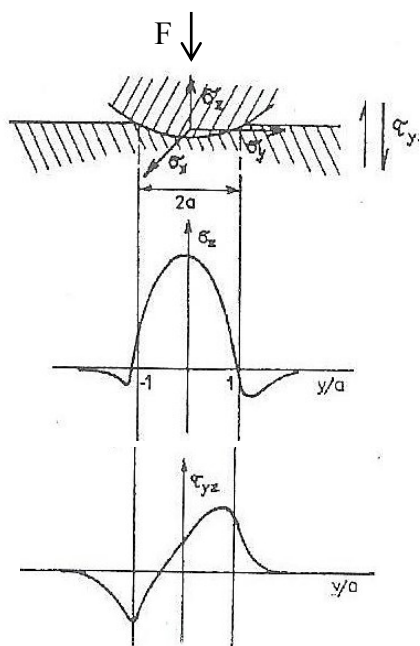
V povrchové vrstvě dochází k proměnným deformacím, které podle hodnoty působícího smykového napětí mohou vést k únavovému procesu. Častým projevem únavového opotřebení dílců je tvorba povrchových důlků, které vznikají v důsledku iniciace podpovrchových trhlin, jejich šíření, propojování a odpadávání či vydrolování kousků materiálu z povrchu. Vysoká cyklická smyková napětí, vyvolaná kontaktním tlakem mohou také vést k odlupování povrchové vytvrzené vrstvy (**spalling**). V daném případě se únavové trhliny šíří pod tvrzenou (nitridovanou, cementovanou) vrstvou, která se následně prolamuje a odlupuje.

Průběh rozhodujících složek napětí při kontaktu dvou těles během valivého pohybu závisí kromě **normálové síly**  $F_n$ , také na **tečné síle**  $F_t = \xi \cdot F_n$ , ( $\xi$  - součinitel valivého tření) a na geometrii obou funkčních povrchů. Na obr. 6.10, který znázorňuje průběh tlakových a smykových napětí při styku sférické plochy (kuličky) s rovinou, je zřejmý střídavý průběh napětí při valivém pohybu.

Zvýšené hodnoty složek smykových napětí ( $\tau_{yz}$ ) obecně souvisí s poměrně vysokým tlakovým normálovým napětím ( $\sigma_z$ ) a poměrně nízkou složkou napětí ( $\sigma_x$  a  $\sigma_y$ ) podle vztahu  $\tau_{yz} = |(\sigma_z - \sigma_y)|/2$ .

Únavové opotřebení povrchu může znamenat nejen snížení funkční schopnosti součástí, ale vzniklé **povrchové důlky (pitting)** může vytvořit iniciaci únavového lomu.

Vyšší životnost strojních součástí vystavených kontaktní únavě lze dosáhnout zpevněním povrchové vrstvy – povrchovým kalením, cementováním, nitridováním. Strukturní heterogenity v povrchových vrstvách, zejména oxidické a sulfidické vměstky, působí jako koncentrátoři napětí a zkracují etapu iniciace mikrotrhlin.



Obr. 6.10. Schéma vybraných složek napětí při styku roviny a sférické plochy. Pitting (tmavé důlky) na tramvajové kolejnici a adhezivní opotřebení (otěr, kovově čistý povrch), na boční straně kolejnice – rezavění (dole na snímku).

Působení čtyř hlavních činitelů: teploty, napětí, doby a prostředí způsobuje v závislosti na jejich vzájemné kombinaci, výskyt následujících skupin procesů poškozování materiálů:

- tečení (vznikají trvalé deformace, výskyt vnitřních poškození nebo krajně lom při tečení),
- únava - hlavně nízkocyklová, tepelně nebo tepelně-mechanická,
- koroze (vyskytují se téměř všechny známé druhy a typy koroze),
- opotřebení, doprovázené přemísťováním nebo úbytkem materiálu, vznikem důlků a drhlin.

Tribologickým procesům, které za normálních podmínek nevedou k bezprostřední havárii strojů, není v technické praxi věnována taková pozornost jako procesům únavového porušování nebo creepu. Průzkumy však ukazují, že v 80% případů primární příčinou vyřazení strojů a zařízení z provozu jsou procesy opotřebení. Přitom přes 50% všech těchto případů opotřebení je způsobeno abrazí.



## Shrnutí pojmů kapitoly 6

Po prostudování této kapitoly měly by Vám být zřejmé následující pojmy: **Součinitel smykového a valivého tření. Statický a kinetický součinitel tření. Základní druhy opotřebení: adheze, abraze, eroze, kavitace, kontaktní únava, pitting, vibrační opotřebení (fretting). Kombinované opotřebení. Tribologie. Hmotnostní, objemový a rozměrový otěr, rychlosti opotřebení, součinitelé poměrného opotřebení, součinitelé adhezivního a abrazivního opotřebení. Normalizované opotřebení, normalizovaná tlaková síla. Archardův zákon. Otěruvzdorné oceli, materiály vhodné (odolné) proti erozi, kavitaci, vibračnímu opotřebení.**



## Otázky ke kapitole 6

- 6.1 Čím se zabývá tribologie?
- 6.2 Jak je definováno a označováno poměrné opotřebení?
- 6.3 Uveďte dva příklady kombinovaného opotřebení adheze a abraze.
- 6.4. Jak velikost objemového otěru při erozním opotřebení závisí na kinetické energii částic?
- 6.5 Objasněte, jak mazání snižuje odolnost proti adhezi.
- 6.6 Jaké jsou možnosti zvýšení odolnosti proti kavitačnímu opotřebení ?
- 6.7 Jak vzniká pitting na kolejnicích?
- 6.8 Které procesy se vyskytují při frettingu? Jak se mění velikost otěru na amplitudě vibrací.
- 6.9. Jaké rozlišujeme součinitele tření?
- 6.10 Jaký je rozdíl v průběhu erozivního opotřebení na úhlu dopadu tvrdých částic na povrch dílce z měkké oceli a kameniny?



## Úlohy ke kapitole 6

- 6.1. Vzorek  $\varnothing 10\text{mm}$  vyrobený z nelegované nízkouhlíkové oceli byl podroben zkoušce abraze na brusném plátně (č. 120) po dráze 50 m pod zatížením 2,0 kg. Po zkoušce byl na vzorku zaznamenán úbytek hmotnosti 0,1420 g. Vypočítejte hmotnostní, objemové a lineární velikosti opotřebení, resp. otěru.
- 6.2. Pro podmínky uvedené v úloze č. 1 a relativní rychlost pohybu vzorku vzhledem k abrazivu  $v = 0,5 \text{ m/s}$  vypočítejte rychlosti (hmotnostního, objemového a lineárního) opotřebení.
- 6.3. Vypočítejte normalizované abrazivní opotřebení a normalizovaný tlak pro vzorek oceli s tvrdostí 200 HV podle údajů z úlohy č. 1.
- 6.4. Experimentálně bylo potvrzeno, že závislost koeficientu tření  $\mu$  na normované relativní rychlosti  $v_n$  má u nástrojových ocelí tvar  $\mu = 0,78 - 0,13 \cdot \log v_n$ . Přitom  $v_n = vR/a$ , kde  $v$  je relativní rychlost dvou funkčních povrchů,  $R$  - poloměr kontaktní plochy kruhového tvaru,  $a$  – koeficient teplotní vodivosti. Vypočítejte koeficient tření, když relativní rychlost povrchů ocelových částí je 0,7 m/s, koeficient teplotní vodivosti  $a = 9,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  a  $R = 1,0 \text{ mm}$ .
- 6.5. Objemový otěr při abrazi je logaritmickou funkcí podílu tvrdosti abraziva a materiálu funkčního povrchu podle vztahu:  $W = K \cdot \log(H_a/H_k)$ . Vypočítejte, jak se změní opotřebení zubů korečkového bagru při těžbě šterku, kde tvrdost křemene  $H = 10000 \text{ MPa}$  oproti těžbě dolomitu s tvrdostí  $H = 4150 \text{ MPa}$ . Zuby jsou vyrobeny z oceli 13240 v zušlechťeném stavu o tvrdosti 3650 MPa.

- 6.6. Vypočítejte tlak  $p$ , který vyvolá v povrchové vrstvě materiálu proud vody o rychlosti  $v = 500$  m/s, když  $p = \rho c_o v (1 + \frac{kv}{c_o})$ , kde pro vodu konstanta  $k = 2$  a  $c_o = 1500$  m/s je rychlost zvuku ve vodě. Rozvažte, zda takový proud vody může vyvolat erozi u oceli s martenzitickou strukturou o tvrdosti 800 HV, u feriticko-perlitické oceli o tvrdosti 200 HB, dále u skla a keramiky.

♦ **Řešení:** Po výpočtu dle uvedeného vztahu tlak  $p = 1250$  MPa. Pro martenzitickou ocel je pevnost v tlaku přibližně  $R_{mt} = 3,3 \cdot HV = 2600$  MPa  $> p$  a proud vody nemůže poškození vyvolat. U feriticko-perlitické oceli je pevnost v tlaku asi 700 MPa  $< p$  a erozní poškození oceli může být proudem vyvoláno.

U skla s tlakovou pevností nad 1250 MPa vodní eroze nenastane, u některých skel s nižší pevností může erozní poškození vzniknout. Keramika vodní erozi zadaných podmínek nepodléhá, její tlaková pevnost je obvykle vyšší než 2000 MPa.

- 6.7. Před nanesením určitého nátěrového systému je nutné povrch plechů očistit od zbytků okujů a rzi. Čas potřebný k požadovanému otryskání plechu částicemi korundu je 20 minut, když tryskací pistole je k rovině plechu skloněna pod úhlem  $\alpha = 60^\circ$ . Jak se tento čas změní, když pistole bude k rovině plechu skloněna pod úhlem  $\alpha = 15^\circ$ , a rychlost částic korundu se zvýší z 10 m/s na 15 m/s.

♦ **Řešení:** Podle vztahu (6.7) pro objemový otěr za jednotku času při erozi platí

$$W_o = k \cdot mv^2 \cdot \cos^2 \alpha.$$

Za předpokladu, že objemový otěr roste lineárně s dobou tryskání, je pro první případ

$W_1 = kt_1mv_1^2\cos^2\alpha_1$ . Podobně a přibližně pro druhý případ  $W_2 = kt_2mv_2^2\cos^2\alpha_2$ . Z rovnosti celkových otěrů  $W_1 = W_2$ , tj. stejných úběrech materiálu na dané ploše plechu pro potřebné očistění, dostaneme  $t_2 = t_1 \cdot v_1^2\cos^2\alpha_1 / v_2^2\cos^2\alpha_2 = 2,4$  min.

- 6.8. Na obr. 6.7 jsou uvedeny závislosti opotřebení měkkého a tvrdého materiálu při erozi tvrdými částicemi (SiC). Užitím tohoto obrázku stanovte, a) jak se změní eroze na Al slitině, když úhel dopadajících částic  $\alpha$  se zvýší z  $30^\circ$  na  $60^\circ$ . b) jak se změní eroze tvrdého keramického materiálu, když úhel dopadajících částic se zvýší ze  $30^\circ$  na  $60^\circ$ .

♦ **Řešení:** Podle obrázku pro hmotnostní opotřebení erozí je přibližně: a)  $W(30^\circ) = 20$  mg a  $W(60^\circ) = 8$  mg, tj. snížení 2,5 x. b)  $W(30^\circ) = 3,0$  mg a  $W(60^\circ) = 18$  mg, tj. zvýšení 6 x.

- 6.9. Opotřebení keramiky  $ZrO_2$  klesá s rostoucí lomovou houževnatostí  $K_{Ic}$  přibližně podle vztahu  $W = kF_n/K_{Ic}^4$  ( $k$  – konstanta,  $F_n$  – tlakové zatížení). Vypočítejte, jak se změní abraze  $ZrO_2$ , když při zachování stejné tvrdosti byla houževnatost přísadou  $Y_2O_3$  zvýšena trojnásobně.

- 6.10. Závislost hmotnostního úbytku na čase  $t$  ( $t > 6$  h) při kavitaci dílce ze slitiny kobaltu má tvar  $W_h = 1,5t - 6$ , kde  $t$  je čas v [hod] a  $W_h$  v [mg]. Odhadněte úbytek tloušťky dílce po půl roce provozu, když plocha ovlivněná kavitací  $A_n = 2 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup> a měrná hmotnost slitiny je 10 Mg/m<sup>3</sup>.



### Test – kapitola 6

- 6.1. Jaký druh opotřebení zrychluje korozní poškození a vytváří škodlivé důlky a netěsnosti:  
a) kavitace, b) fretting, c) kontaktní únava.
- 6.2. Který druh opotřebení snižují materiály, které obsahují tvrdé částice v houževnaté základní hmotě:  
a) adheze, b) eroze, c) abraze.
- 6.3. Archardův zákon můžeme vyjádřit ve tvaru:  
a)  $K_a = C \cdot \mu^n$ , b)  $W_n = K_a \cdot p_n$ , c)  $W_h = A t v^n$ ,
- 6.4. Součásti vystavené erozivnímu opotřebení částicemi, které dopadají při velkých úhlech je účelné vyrobit z materiálu:  
a) tvrdého, b) houževnatého a měkkého, c) heterogenního
- 6.5. Kavitační opotřebení vzniká v kapalinách:  
a) při vzniku bublin u povrchu, b) při pohybu a kompresi bublin, c) při zániku bublin
- 6.6. Pro kontaktní poškození jsou rozhodující složky napětí:  
a) normálové max.  $\sigma_i$ , b) smykové max.  $\Delta\tau$ , c) tlakové  $\sigma > R_p$
- 6.7. Pro zvýšení odolnosti proti únavě materiálu podporované vibračním účinkem při frettingu (mezi stejnými kovovými materiály) je účinné:  
a) zdrsnění kontaktních povrchů, b) leštění povrchu, c) kuličkování povrchu
- 6.8. Velikost adhezivního opotřebení lze snížit mazáním (řádově maximálně):  
a) 100 x, b)  $10^4$  x, c)  $10^6$  x.
- 6.9. Uvádí se, že přes 50% všech případů opotřebení strojů a zařízení je způsobeno:  
a) abrazí, b) erozí, c) kavitací.
- 6.10. Po zvýšení povrchové tvrdosti oceli 5 x, abrazivní opotřebení  $W_o$  za daných (stejných) podmínek bude:  
a) nižší zhruba 5 x, b) vyšší cca 5 x, c) menší, podle konkrétních podmínek a oceli



### Literatura

- [1] SUCHÁNEK, J., KUKLÍK, V., ZDRAVECKÁ, E., Abrazivní opotřebení materiálů, ČVUT Praha, 2007, 165 s.
- [2] BEČKA, J. Tribologie. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1997.

- [3] VOCEL, M., DUFEK, V., Tření a opotřebení strojních částí, SNTL, Praha 1976.
- [4] DOBRZAŃSKI, L. A: Podstawy nauki o materialach i metaloznawstwo. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Gliwice: 2002. 1499 s. ISBN 83-204-2793-2.
- [5] STRNADEL B., Nauka o materiálu II. Degradací procesy a design konstrukčních materiálů. VŠB Ostrava, 2008. 1. vyd. 280 s. ISBN 978-80-248-1842-9.
- [6] BHUSHAN, B, Principles and applications of tribology, John Wiley, New York, 1999.
- [7] SEDLÁČEK V., Povrchy a povlaky kovů. ČVUT, FJFI, Praha, 1992, 176 s.
- [8] KATO, K., ADACHI, K., Wear Mechanisms in Modern Tribology. Handbook, ed. S. Bhushan, CRC Press, New York, 2001.
- [9] **TriboTechnika** – časopis o tření, opotřebení a mazání.
- [10] Annual Book of ASTM Standards – Wear and Erosion, Metal Corrosion. Vol. 03.02, August 2012, 127 standards, 1018 p.

## 7. POŠKOZENÍ MATERIÁLU ZÁŘENÍM



**Čas ke studiu:** 2 hodiny

Stav a rozložení atomů v kovu může změnit energie záření anebo toku částic, a tím se mohou měnit fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti materiálů. Radiační poškození je významné hlavně v aktivních zónách jaderně energetických zařízení, dále může způsobit problémy při skladování radioaktivního odpadu. Za určitých podmínek je třeba také zohlednit nebezpečné působení kosmického záření nebo negativní vliv slunečního záření na polymery.



**Cíl** Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- charakterizovat interakce neutronového záření s materiálem
- popsat formy neutronového záření na kovy
- formulovat důsledky radiačního poškození ocelí
- popsat základní parametry fotodegradace polymerů



**Výklad**

### 7.1. Vlivy záření na materiál

Pokud záření interaguje s elektrony materiálu, např. při dopadu nízkoenergetických fotonů, záření  $\alpha$  a  $\beta$  (jádra helia, elektrony), se energie záření předává vnějším elektronům ozářeného materiálu. Elektrony se vybudí do vyšších energetických stavů anebo se oddělí od atomů a nastává **ionizace látky**. Výsledek této interakce významně mění vlastnosti látek s iontovou anebo kovalentní vazbou (např. polymerů) a jen velmi málo ovlivňuje kovy.

Když záření interaguje s jádrem atomu, mohou nastat tyto případy:

- Energie vibrační mřížky se zvýší bez vyražení ionu z uzlového bodu mřížky v případech absorbování kvanta záření  $\gamma$  s dostatečnou energií anebo interakce s pomalým neutronem.
- Energie odevzdaná iontu stačí na to, aby ion opustil uzlový bod mřížky a přenesl se do meziuzlové polohy (interakce s neutronem),
- Dopadající částice se zachytí v jádrech atomů a nastává transmutace nebo štěpení atomu, v závislosti na energii částice a na vlastnosti ozařované látky v případě aplikace vysokoenergetických neutronů.

Neutronové záření, které vzniká při štěpné reakci, má energii  $E$  závislou na **energii neutronů**. Pro pomalé (tepelné) neutrony  $E < 4 \cdot 10^{-21}$  J na neutron, pro středně rychlé neutrony hodnoty energie  $E = 1,6 \cdot 10^{-19}$  až  $1,6 \cdot 10^{-13}$  J (1,0 eV- 1,0 MeV) a pro rychlé neutrony  $E > 1,6 \cdot 10^{-13}$  J. Množství neutronů  $n$ , které dopadají na jednotku plochy za jednotku času se označuje jako **neutronový tok**  $\Phi$  [ $\text{n} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ].

Poškození materiál v důsledku jeho interakce s neutron má aditivní charakter a tedy o stupni poškození rozhoduje **integrální neutronový tok**  $\Phi_i = \int \Phi dt$  [n.m<sup>-2</sup>], resp. integrální dávka neutronů. Pro stacionární tok ( $\Phi = \text{konst.}$ ) zřejmě platí  $\Phi_i = \Phi \cdot t$ , kde  $t$  je doba ozáření.

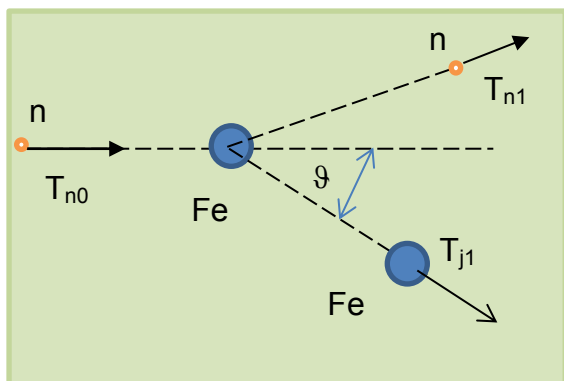
Rozhodující vliv na radiační poškození konstrukčních materiálů jaderně-energetických zařízení má **pružný a nepružný rozptyl**. Maximální energie předaná jádru je pro nulový úhel rozptylu  $\vartheta$  (obr. 7.1) dána vztahem

$$T_{j1max} = T_{n0} \frac{4 \cdot m_j \cdot m_n}{(m_j + m_n)^2}, \quad (7.1)$$

kde  $T_{n0}$  je energie neutronu,  $m_j$  a  $m_n$  jsou hmotnosti jádra a neutronu. Ztráta energie u nepružného rozptylu je větší, protože interakce neutronu a jádra je spjata s excitací jádra. Např. pro jádro železa (izotopu  $Fe_{26}^{56}$ ) jsou nejvýznamnější excitační hladiny 0,847; 1,81 a 0,122 MeV. Při obou způsobech rozptylu předává neutron svými postupnými srážkami část své energie jádrům atomů a tím postupně ztrácí energii a rychlost. Energie neutronu po  $k$ -té srážce s atomy materiálu (ve statistickém pojetí) je dána vztahem

$$T_{nk} = T_{n0} \cdot \exp(-k\xi_d), \quad (7.2)$$

kde střední **logaritmický dekrement**  $\xi_d$  je definován vztahem  $\xi_d = \ln(T_{ni}/T_{n,i+1})$  a pro střední hmotnostní číslo atomů  $A > 10$  přibližně platí  $\xi_d = 2/(A+2/3)$ .



Obr. 7.1. Schéma pružného rozptylu neutronu s kinetickou energií  $T_{n0}$  na jádru Fe, které získá kinetickou energii  $T_{j1}$  a energie neutronu po srážce klesne na  $T_{n1}$ .

Poznámka: Účinný jaderný průřez  $\sigma_j$  je poměr pravděpodobnosti zasažení jádra atomu neutronem  $P$  a plošné hustoty atomů  $\rho_s$  [m<sup>-2</sup>], tj.  $\sigma_j = P/\rho_s$ . Rozlišujeme účinné jaderné průřezy: rozptylové, absorpční a štěpné. Pro tepelné neutrony absorpční účinný průřez např. železa je  $2,5 \cdot 10^{-28}$  m<sup>2</sup> a kobaltu  $34,8 \cdot 10^{-28}$  m<sup>2</sup>. Velikost účinného průřezu se vyjadřuje také v barnech: 1 barn =  $10^{-28}$  m<sup>2</sup>, což odpovídá řádově průmětu plochy jádra jako terče.

Absorpční koeficient  $\alpha = n \cdot \sigma_a$ , kde  $n$  je počet atomů v jednotce objemu,  $\sigma_a$  je adsorpční účinný průřez. Čím vyšší je  $\alpha$ , tím účinnější je materiál při zastavování dopadajících částic. Intenzita záření ( $I$ ) při průchodu materiálem se postupně zeslabuje podle exponenciálního vztahu  $I = I_0 \cdot \exp(-\alpha x)$ , kde  $I_0$  je intenzita záření při vstupu do materiálu,  $\alpha$  - absorpční koeficient a  $x$  - tloušťka materiálu nebo vzdálenost (hloubka), kde proniklo záření

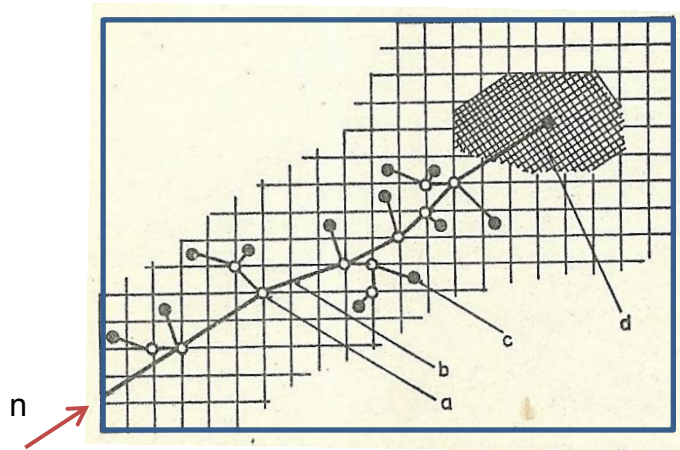
s intenzitou  $I(x)$ . Počet nedotčených částic, které proniknou destičkou tloušťky  $x$  je vymezen vztahem  $N = N_0 \exp(-n\sigma x)$ . Střední volná dráha  $l_s = (n\sigma)^{-1}$  je střední vzdálenost, kterou může částice urazit v materiálu, než interaguje s jádrem (terčem).

## 7.2. Formy poškození kovu

Z hlediska radiačního poškození jsou nejvýznamnější srážky neutronů s jádry atomů bez zachycení neutronů. Tyto srážky vyvolávají vznik bodových poruch, lokální ohřev, ale také přeměnu jader atomů.

**Vznik bodových poruch** je výsledkem vyražení atomů z uzlových bodů. Na odstranění atomu z uzlového bodu je potřebné dodat energii 1,6 až  $8 \cdot 10^{-18}$  J. Při ozáření neutrony je však dodávána energie o 2-3 řády vyšší. Zasáhnuté ionty jsou vyraženy z uzlových bodů a pohybují se dále mřížkou rychlostí  $10^5$  až  $10^6$  m.s<sup>-1</sup>, tedy o 2 až 3 řády vyšší než je rychlost zvuku v kovu. Tyto urychlené ionty zasahují další ionty v uzlových bodech, odevzdávají jim přebytek energie, vyrážejí je z uzlových bodů. Výsledkem primární srážky rychlého neutronu s jádrem je **série (kaskáda) dalších sekundárních srážek** mezi ionty (obr. 7.2).

Jedna primární srážka neutronu s ionem kovu vyvolá řádově  $10^3$  sekundárně vyražených iontů a vznikají tedy **dvojice vakance-intersticiál** (Frenkelovy poruchy). Poškozená oblast mřížky obsahuje řádově  $10^4$  atomů a má protáhlý tvar ve směru dopadu a odrazu neutronů při primární srážce, obr. 7.2. Střed oblasti je bohatší na vakance (zředěná oblast, dutiny submikroskopických rozměrů) a její okraj je bohatší na vlastní intersticiály. Celková koncentrace bodových poruch stoupá při zvyšování integrální dávky neutronů a dosahuje hodnoty výrazně vyšší než je rovnovážná koncentrace.



Obr. 7.2. Brinkmannův model radiačního poškození materiálu a) vakance, b – kaskáda vyražených atomů, c – intersticiál, d – zóna intenzivního poškození

Vakance se shlukují, kondenzují a vytvářejí uzavřené **dislokační smyčky** (Frankovy smyčky), které jsou nepohyblivé a tedy jsou překážkou pro pohyb jiných dislokací. Vakance vytvářejí na dislokacích stupně a současně urychlují difuzní procesy (precipitaci) v radiačně poškozeném kovu anebo urychlují difuzní tečení při ozáření - **radiační creep**. Intersticiální

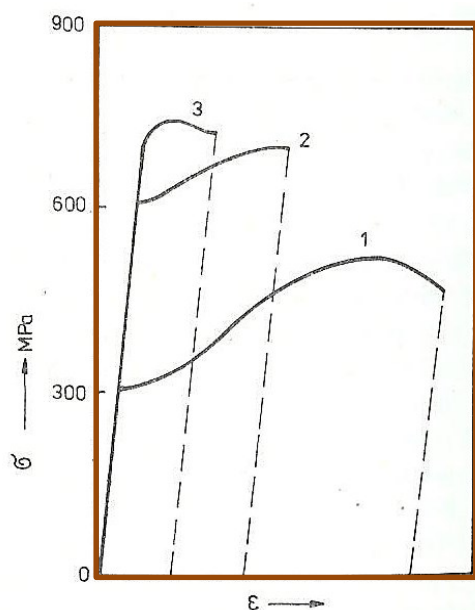
atomy vytvářejí atmosféry na hranových dislokacích a mohou také odchýlit polohu uzlových bodů a kolem nich vytvořit souměrnou dvojici (crowdion).

**Lokální tepelné ovlivnění** je výsledkem závěrečné interakce iontů vyražených z uzlových bodů, které mají kinetickou energii nižší než potřebná ( $E_d$ ) na vyražení dalšího ionu. Tato energie se projeví ve zvýšení kmitů mřížky. Lokální ohřev se projeví v objemu zahrnujícím asi  $10^3$  atomů, při tom teplota se zvýší o cca  $1000^\circ\text{C}$  během  $10^{-10}$  s. Takže mohou vznikat roztavené a rychle ztuhnuté mikroskopické oblasti anebo oblasti, ve kterých proběhla fázová přeměna. Tyto mikroskopické oblasti mají odlišné vlastnosti než matrice.

**Jaderná transmutace** je výsledkem zachycení neutronu jádrem atomu ozářeného materiálu. Vzniká těžší izotop ozářené látky anebo ion jiného prvku. Ve druhém případě se mění všechny vlastnosti původně ozářené látky.

### 7.3. Důsledky ozáření

Kovy s prostorově centrovanou kubickou mřížkou jsou citlivější na ozáření než jiné kovové materiály. Předběžně deformované kovy jsou méně citlivé na ozáření než žíhané. S růstem integrální dávky se zvyšuje mez kluzu při současně menším růstu pevnosti a výrazném poklesu tažnosti. Příklad radiačního zpevnění s mírným zkřehnutím je uveden na obr. 7.3. Následující žíhání částečně snižuje následky radiačního poškození. Proces zotavení vlastností materiálů je tepelně aktivovaný.



Obr. 7.3 Vliv radiace na pevnostní vlastnosti a tažnost uhlíkové oceli, pro integrální neutronový tok  $\Phi_i$ : 1)  $0 \text{ n.m}^{-2}$ , 2)  $7.10^{23} \text{ n.m}^{-2}$ , 3)  $10^{24} \text{ n.m}^{-2}$ .

**Radiační zpevnění** bývá doprovázeno mírným nárůstem tvrdosti, poklesem tažnosti a kontrakce. Závislost radiačního zpevnění na integrálním neutronovém toku lze zpravidla popsat ve tvaru

$$\Delta R_p = B_1 \cdot (\Phi_i)^m, \quad (7.3)$$

kde  $\Delta R_p$  je přírůstek meze kluzu ozářeného materiálu ve srovnání s materiálem neozařeným,  $\Phi_i$  je integrální neutronový tok vyjádřený v jednotkách  $10^{22} \text{ n.m}^{-2}$ , exponent  $m$  je zpravidla v intervalu 0,33 do 0,5 a  $B_1$  je konstanta materiálu. Uvedený jednoduchý vztah platí pro hodnoty  $\Phi_i < 5 \cdot 10^{22} \text{ n.m}^{-2}$ . Pro vyšší dávky záření jsou navrženy složitější a přesnější vztahy.

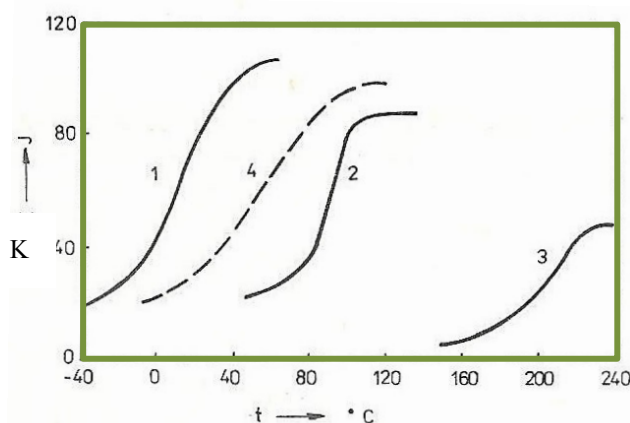
Elektrický odpor s ozářením roste podobně jako tvrdost. Neutronové záření rovněž mírně mění elastické konstanty kovů.

Ozářením klesá vrubová houževnatost ocelí a významně se zvyšuje tranzitní teplota přechodu materiálu z houževnatého do křehkého stavu (obr. 7.4), přitom zvýšení této teploty je funkcí integrální dávky neutronů – probíhá **radiační zkřehnutí**.

Přírůstek tranzitní teploty je možno v závislosti na integrálním neutronovém toku odhadnout podle vztahu

$$\Delta T_T = C_1 \cdot (\Phi_i)^m, \quad (7.4)$$

kde exponent  $m$  má hodnoty 0,33 až 0,5 a  $C_1$  je parametr závislý na materiálu a podmínkách ozařování. Pro vyšší hodnoty  $\Phi_i$  a vyšší energie neutronů je vhodnější přírůstek tranzitní teploty aproximovat vztahem  $\Delta T_T = C_2 + C_3 \cdot \log \Phi_i$ , kde  $C_2$  a  $C_3$  jsou konstanty závislé na materiálu a podmínkách jeho ozařování.



Obr. 7.4 Teplotní závislosti vrubové houževnatosti KV oceli (0,25%C, 1,3% Mn, 0,5%Mo) před ozářením (1), po ozáření s tokem  $\Phi_i = 3 \cdot 10^{23} \text{ n.m}^{-2}$  při 290°C (2), s  $\Phi_i = 1,1 \cdot 10^{24} \text{ n.m}^{-2}$  při 140°C (3) a po ozáření jako v případě (3) s následným žháním při 345°C/48h (4)

Když se neutrony zachytí v jádře atomu, který se přemění na jiný prvek, může být změna mechanických také významná. Vznikající prvek je v původním kovu nečistotou a může segregovat na hranicích zrn a způsobit zkřehnutí.

Poškozující účinek ozáření je možno do určité míry odstranit **regeneračním žháním** materiálu při experimentálně prověřených teplotách (300-500°C/1-5h), čímž se prodlouží technicky zdůvodněná životnost tlakové nádoby jaderného reaktoru. Zotavení z radiačního poškození materiálu je tím výraznější, čím vyšší je integrální neutronový tok, který radiační poškození vyvolal.

Radiační záření snižuje také odolnost oceli proti korozi a modifikuje ochranné vlastnosti povlaků. Ve vodných roztocích k tomu přistupuje účinek radiolýzy. Korozní rychlost perlitické oceli se potom ve vodě při působení radiace několikanásobně zvyšuje.

V materiálech, které jsou během exploatace podrobeny působení vyšších teplot, zvyšuje radiační neutronový tok následkem nadbytku vakancí ve struktuře rychlost tečení a zároveň se snižuje také doba do počátku terciálního stádia tečení. Kombinace působení radiace a zvýšené teploty na materiál se obecně nazývá **radiační tečení** (creep).

Oceli s 14-16% Cr, 9-16% Ni s dalšími prvky, stabilizovanými Ti a Nb byly zkoušeny na tečení při teplotě 700-750°C v reaktoru s energií neutronů 0,1 MeV a neutronovým tokem  $5 \cdot 10^{18} \text{ n.m}^{-2}\text{s}^{-1}$  a pro srovnání mimo reaktor. Bylo zjištěno, že nad kritickým napětím (100 MPa) ozáření mírně zvyšuje kinetiku tečení. Při nižších napětích (do 100 MPa) je rychlost tečení úměrná integrálnímu neutronovému toku a její hodnota může být řádově vyšší v porovnání bez vlivu záření.

Nadbytek vakancí při ozáření vede i k mírnému narůstání objemu kovu vlivem kolapsu vakancí (jejich propojení) ve vakantní dutiny. Uvedené zvýšení objemu se nazývá **swelling** (bobtnání) a jeho velikost můžeme stanovit podle snížení hustoty materiálu ( $\Delta\rho/\rho$ ). Zvětšení objemu konstrukčních částí jaderně energetických komponent podrobených působení neutronového záření závisí na integrálním neutronovém toku, na materiálu a na teplotě. Teplota, při které je přírůstek objemu vlivem neutronového záření nejvyšší je přibližně  $0,5 T_m$  (teplota tavení v K) a tuhé roztoky jsou swellingem ovlivněny méně než čisté kovy. U austenitických ocelí dosahuje přírůstek objemu při integrální neutronové dávce  $\Phi_i = 10^{26} \text{ n/m}^2$  přibližně hodnoty 1%. Při swellingu se mohou měnit, rozpouštět anebo vznikat precipitáty. Při teplotách expozice 450-650°C projeví oceli s vysokým obsahem niklu, feritické oceli a technicky čistý titan jen malý sklon k radiačnímu zvětšování, zatímco palivové materiály (články) v jaderné energetice významně mění svoje rozměry. Při swellingu dochází také k mírnému zvýšení měrného elektrického odporu a snížení modulu pružnosti.

Poškození materiálu mohou také způsobit energetické paprsky laseru ( $I \geq 10^3 \text{ W/mm}^2$ ), svazky elektronů nebo iontů, plasmy a do určité míry působení intenzivního ultrazvuku nebo magnetického pole.

## 7.4 Fotodegradace plastů

Vlivem slunečního záření i umělého osvětlení dochází k poškozování polymerních materiálů, tedy plastů, pryží a nátěrů na organické bázi.

Energii  $E$ , kterou při absorpci světelného záření molekula získává, můžeme rozdělit na tři složky  $E = E_e + E_v + E_r$ , kde  $E_e$  je energie excitace elektronů,  $E_v$  – energie vibrace atomů,  $E_r$  – energie rotace. Hlavní část absorbované energie se spotřebuje na převod elektronového systému do vyššího kvantového stavu. Zbytek se využije ke změnám vibračních a rotačních stavů. Molekula v základním stavu nebo v některém ze stavů elektronové excitace, při absorbování větší vibrační energie, než odpovídá její disociační energii (práci), rozpadá se na menší části, na atomy a **volné radikály** nebo na dva volné radikály. Bylo prokázáno, při chemické reakci polymerů se využije pouze malá část absorbované energie záření.

**Fotochemické působení světla** lze vysvětlit za předpokladu, že světlo je složeno z fotonů. Absorbovaný foton vyvolá vždy pouze aktivaci jedné molekuly, takže počet aktivovaných molekul se rovná počtu absorbovaných fotonů - **Einsteinův zákon fotochemické absorpce**. Absorpce světla ozařovaným systémem probíhá tedy v celých fotonech. Počet aktivovaných molekul  $N$ , které vzniknou absorpcí záření o energii  $E$  je dán vztahem  $N = E/h\nu$ , kde  $h$  – Planckova konstanta ( $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  J.s),  $\nu$  - frekvence záření. Pro počet aktivovaných molekul, rovnému Avogadrovu číslu ( $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$  mol $^{-1}$ ), lze  $E$  definovat jako „jeden einstein“. Absorpce energie jednoho molu fotonů (jednoho einsteinu) vyvolá tedy aktivaci  $6,022 \cdot 10^{23}$  molekul. Tato energie  $E_1$  (J.mol $^{-1}$ ) je závislá na vlnové délce záření podle vztahu

$$E_1 = N_A \cdot hc / \lambda, \quad (7.5)$$

kde  $c$  – rychlost světla ( $c \approx 3 \cdot 10^8$  m.s $^{-1}$ ,  $c = \nu \cdot \lambda$ ),  $\lambda$  - vlnová délka světla. Podle výpočtu lze prokázat, že absorbuje-li materiál jeden einstein záření o vlnové délce 300 nm, vzroste jeho energie o 399 kJ/mol, což je energie postačující k **rozštěpení vazby** např. mezi uhlíky v alifatických uhlovodících nebo k rozštěpení vazby mezi uhlíkem a chlorem. (tab. 7.1).

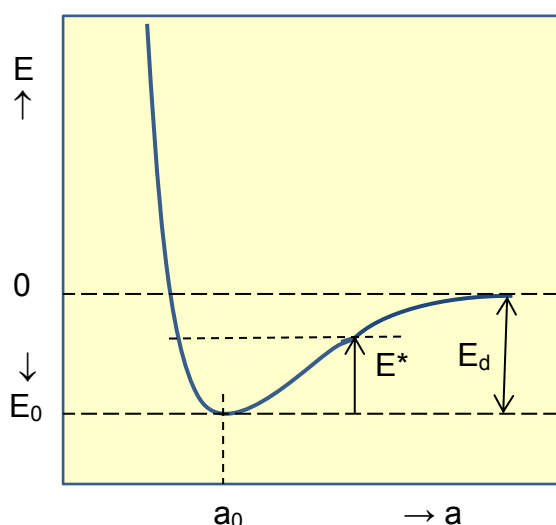
Tab. 7.1. Energie některých kovalentních vazeb v polymerních materiálech

| Vazba            | Energie vazby (kJ mol $^{-1}$ ) | Vazba             | Energie vazby (kJ mol $^{-1}$ ) |
|------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|
| C≡N (nitril)     | 875,04                          | C—O               | 364,2                           |
| C=C              | 837,36                          | S—H               | 364,2                           |
| C=O              | 728,5                           | N—H               | 351,7                           |
| C=C              | 607,1                           | C—C (alifatická)  | 334,9                           |
| C=S              | 628,0                           | C—O (ether)       | 330,7                           |
| C—C (aromatická) | 540,1                           | C—Cl              | 326,6                           |
| C—H (acetylen)   | 506,6                           | Si—H              | 314,0                           |
| C—F              | 498,2                           | Si—O              | 293,1                           |
| O—H              | 460,5                           | C—N (nitromethan) | 284,7                           |
| C—H (ethylen)    | 443,8                           | O—O (peroxid)     | 268,0                           |
| C—H (methan)     | 410,3                           | C—N (amid)        | 222,0                           |
| Si—O             | 372,6                           |                   |                                 |

Porovnáme-li energii světelného záření s **energií vazeb** (tab 7.1), vidíme, že energie slunečního záření, zejména jeho ultrafialové části (UV,  $\lambda = 290$ -400 nm), je dostatečně veliká, aby vyvolala fotodegradaci chemických vazeb v polymerech. Například polymery obsahující amidovou skupinu -O=C-NH- (polyamidy, vlna, hedvábí) vykazují absorpční pásy v oblasti 250 nm až 310 nm. Karbonylová skupina >C=O absorbuje záření o vlnové délce 310 nm, které je obsaženo ve slunečním záření dopadajícím na zemský povrch; tím se zvýší energie systému o 386 kJ.mol $^{-1}$ . Tato energie nedostačuje k rozštěpení vazby C=O (s energií disociace

728 kJ.mol<sup>-1</sup>), ale je dostatečně velká, aby způsobila rozštěpení vazby -C-N (222 kJ.mol<sup>-1</sup>) nebo rozštěpení vazby -C-C- (334,9 kJ.mol<sup>-1</sup>).

Obecná závislost meziatomové potenciální energie na vzdálenosti mezi středy sousedních atomů (jader) je uvedena na obr. 7.5, kde jsou také vyznačeny výše zmíněné energie aktivovaných stavů a vazebné, resp. disociační energie. Závislosti  $E = f(a)$  lze aplikovat na dvouatomové molekuly i na makromolekuly v polymerech. K přetržení či rozpadu vazby uvnitř makromolekuly je potřebná energie  $E^* > E_d$ . Kromě energie se při porušení polymeru mohou uplatňovat další faktory, např. doba excitace, možnost přenášení excitace podél polymerního řetězce, kvantová výtěžnost absorpce.



Obr. 7.5 Závislost energie interakce ( $E$ ) sousedních atomů na vzdálenosti ( $a$ ) jejich středů. Energie základního stavu ( $E_0$ ), vazebná, disociační energie ( $E_d$ ), energie excitovaného, aktivovaného stavu ( $E^*$ ). Rovnovážná vzdálenost středů atomů ( $a_0$ ).

Polymery mohou podléhat degradaci procesem zvaným **rozklad** – odtržení nebo přetržení kovalentních vazeb v řetězcích **makromolekul**. Toto způsobuje separaci segmentů řetězce v místě rozpadu a redukcí molární hmotnosti. Je známo, že s poklesem molární hmotnosti polymeru se snižuje jeho mechanická pevnost a odolnost proti chemikáliím, ovlivňovány jsou také fyzikální vlastnosti. Porušení vazeb může být výsledkem působení záření anebo teploty, nebo chemických reakcí.

Infračervené záření ( $\lambda = 0,78 - 3,0 \mu\text{m}$ ) může nadměrně zvýšit teplotu polymeru a přispět k tepelné degradaci (termodegradaci, termooxidaci). Hranice viditelného světla je přibližně 360 nm (3,5 eV) pro fialové světlo a 740 nm (1,7 eV) pro červené světlo.

### Účinek záření na polymery

Určité typy záření (elektronové paprsky, X-záření, záření  $\beta$ , záření  $\gamma$  a ultrafialové záření) mají potřebnou energii, aby pronikaly polymery a interagovaly s atomy nebo jejich elektrony. Jednou z takových reakcí je ionizace, při které záření odstraňuje orbitální elektrony z určitých

atomů a tedy je přeměňuje na kladně nabitě ionty. Jako důsledek, jedna z kovalentních vazeb spjatých se specifickým atomem je porušena a nastává přerozdělení atomů v tomto bodě. Toto porušení vazby vede buď k rozkladu, nebo k **příčnému zesíťení** v ionizovaném místě, v závislosti na chemické struktuře polymeru a také na dávce záření. Stabilizátory nebo UV absorbéry mohou být přidány pro ochranu polymeru proti poškození zářením. Při běžném každodenním použití, nejrozsáhlejší radiační poškození polymerů je způsobeno ultrafialovým zářením. Např. po delší expozici, většina polymerních nátěrových filmů se stává křehká, ztrácí barvu a je poškozena. Umělé hmoty je možno snadněji přetrhnout, v palubních deskách automobilů se objevují trhliny, polymerní skla se stávají matná.

Důsledky záření nemusí být ve všech případech škodlivé. Příčné vazby mohou být způsobeny zářením pro zlepšení mechanického chování a degradačních charakteristik. Např. záření  $\gamma$  je používáno pro zesíťení polyetylenu za účelem zvýšení jeho odolnosti k měknutí a viskóznímu tečení za zvýšených teplot.



### Shrnutí pojmů kapitoly

V závěru této kapitoly jsou rovněž zopakovány hlavní pojmy, které jste si měli osvojit. **Ionizace látky zářením, energie neutronů, integrální neutronový tok, pružný a nepružný rozptyl, dvojice vakance-intersticiál (Frenkelovy poruchy), radiační creep, lokální tepelné ovlivnění, swelling, radiační zpevnění, radiační zkřehnutí, regenerační žíhání, fotodegradace plastů, Einsteinův zákon fotochemické absorpce, aktivace molekul, energie vazby, rozštěpení vazby, rozklad makromolekul, příčné zesíťení.**



### Otázky ke kapitole 7

- 7.1. Jmenujte hlavní faktory ovlivňující radiační poškození reaktorových tlakových nádob?
- 7.2. Jakými způsoby lze účinky radiačního poškození minimalizovat?
- 7.3. Které atomy, s nižším nebo vyšším atomovým číslem, účinněji brzdí neutronové záření při pružném rozptylu?
- 7.4. Jak velký posuv tranzitní teploty oceli může způsobit neutronové záření v aktivní zóně jaderného reaktoru?
- 7.5. Charakterizujte radiační tečení (creep).
- 7.6. Jak je vztah mezi integrálním neutronovým tokem a radiačním zpevněním?
- 7.7. Jak vzniká a čím projevuje swelling?
- 7.8. Jak se mění tranzitní teplota oceli s velikostí neutronového toku?
- 7.9. Vyjádřete Einsteinův zákon fotochemické absorpce.
- 7.10. Za jakých podmínek dochází k fotodegradaci polymerů?



### Úlohy k řešení

- 7.1. Stanovte hodnotu průměrného logaritmického dekrementu pro železo.
- 7.2. Účinný průřez železa pro zachyt neutronu 2,5 barnů. Jaká je střední volná dráha neutronu v železe?
- ♦ **Řešení:** Střední volnou dráhu vypočteme podle vztahu  $l_s = (n \cdot \sigma_a)^{-1}$ , kde  $\sigma_a$  je absorpční účinný průřez  $n$  je počet atomů Fe v jednotce objemu:  $n = \rho / m_{Fe}$ , kde  $\rho = 7,87 \text{ Mg/m}^3$  je hustota železa a hmotnost jednoho atomu železa  $m_{Fe} = M(Fe)/N_A = 55,85 \text{ (g/mol)}/6,022 \cdot 10^{23} \text{ (1/mol)} = 9,27 \cdot 10^{-23} \text{ g}$ . Po dalším výpočtu  $n = 8,4 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$  a  $l_s = 21 \text{ m}$ .
- 7.3. Jakou maximální energii předá neutron s energií  $E_n = 0,1 \text{ MeV}$  atomu železa při pružné srážce. ( $M(Fe) = 55,85 \text{ g/mol}$ , hmotnost neutronu  $m_n = 1,67482 \cdot 10^{-24} \text{ g}$ ).
- 7.4. Jaká bude změna meze kluzu uhlíkové oceli při ozáření dávkou  $\Phi_i = 10^{23} \text{ n.m}^{-2}$ , podle tahových diagramů na obr. 7.3.
- 7.5. Na základě obr. 7.4 a příslušného vztahu odhadněte tranzitní teplotu dané oceli po ozáření při teplotě  $140^\circ\text{C}$  a integrálním neutronovém toku  $3,0 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-2}$ .
- ♦ **Řešení:** Podle obr. 7.5 je tranzitní teplota oceli bez ozáření přibližně  $T_{t0} = 10^\circ\text{C}$ , po zadaném ozáření  $T_{t1} \approx 200^\circ\text{C}$ , tj. zvýšení o  $\Delta T_{t1} = T_{t1} - T_{t0} \approx 190^\circ\text{C}$ . Podle vztahu (7.4), tj.  $\Delta T_t \approx C_1 \cdot (\Phi_i)^m$  dostaneme pro tok  $\Phi_{i1} = 1,1 \cdot 10^{24} \text{ n.m}^{-2}$  přibližně  $\Delta T_{t1} \approx C_1 \cdot (\Phi_{i1})^m$  a pro tok  $\Phi_{i2} = 3 \cdot 10^{23} \text{ n.m}^{-2}$  podobně  $\Delta T_{t2} \approx C_1 \cdot (\Phi_{i2})^m$ . Odtud  $\Delta T_{t2} \approx \Delta T_{t1} (\Phi_{i2} / \Phi_{i1})^m$ , a pro  $m = 0,33 - 0,5$  je  $\Delta T_{t2} \approx 100\text{--}120^\circ\text{C}$ , v průměru  $\Delta T_{t2} \approx 110^\circ\text{C}$  a  $T_{t2} = T_{t0} + \Delta T_{t2} \approx 120^\circ\text{C}$ .
- 7.6. Které vazby v polymerních materiálech může porušit světlo s vlnovou délkou  $0,5 \mu\text{m}$ .
- 7.7. Přepočítejte vazebnou energii v kJ/mol na eV (elektronvolty/vazbu), např. pro vazbu  $\text{--C--C--E}_v = 335 \text{ kJ/mol}$ .
- 7.8 Po kolika pružných srážkách neutronu s jádrem železa poklesne jeho počáteční energie na polovinu?
- 7.9. Laserovo záření s výkonem  $10 \text{ kW/mm}^2$  způsobilo za dobu  $10^{-2}$  vteřiny ohřev a natavení materiálu. Kolik fotonů s odpovídající vlnovou délkou  $668 \text{ nm}$  bylo v daném pulsu záření?
- 7.10. Jaká může platit souvislost mezi radiačním zpevněním ( $\Delta R_p$ ) a radiačním zkřehnutím ( $\Delta T_T$ ) pro určitou ocel za podmínky  $\Phi_i < 5 \cdot 10^{22} \text{ n.m}^{-2}$ .



### Test ke kapitole 7

- 7.1. Rozsah radiačního poškození oceli při daném integrálním neutronovém toku s růstem teploty (v intervalu  $50\text{--}500^\circ\text{C}$ ):  
a) stoupá, b) klesá, c) prakticky se nemění s teplotou
- 7.2. Intenzita záření při průchodu materiálem v závislosti na jeho tloušťce se zeslabuje:  
a) exponenciálně, b) lineárně, c) logaritmicky
- 7.3. Žiháním radiačně zpevněné slitiny její tranzitní teplota:

- a) klesá, b) stoupá c) zůstává v průměru stejná,
- 7.4. Teoretická pevnost kovalentních vazeb polymerních materiálů při tahovém zatížení je úměrná (podle obr. 7.5):  
a) vazebné energii  $E_d$ , b) derivaci max.  $dE/da$ , c) druhé derivaci  $\partial^2 E/\partial a^2$  v bodě  $a_0$
- 7.5. Která z uvedených jednoduchých vazeb více odolává slunečnímu záření:  
a) -C-H, b) -C-O-, c) -C-N-
- 7.6. Jak se mění hodnota modulu pružnosti při radiačním zpevnění:  
a) mírně stoupá, b) mírně klesá, c) stoupá úměrně toku záření
- 7.7. Při radiačním poškození vznikají v materiálu vysoká vnitřní pnutí:  
a) I. druhu, b) II. druhu, c) III. druhu.
- 7.8. Který typ záření proniká nejméně materiálem, při stejné energii částic záření:  
a) záření alfa ( $\alpha$ ), b) záření beta ( $\beta$ ), c) nebo záření gama ( $\gamma$ ).
- 7.9. Pro vytvoření dvojice vakance-intersticiál (Frenkelova porucha) je potřebná u oceli energie přes:  
a) 408 kJ/mol, b) 3000 kJ/mol, c) 20000 kJ/mol.
- 7.10. Pro poškození polymerního materiálu světelným zářením je rozhodující:  
a) intenzita záření (úměrná počtu fotonů), b) frekvence, c) pronikavost látkou



## Literatura

- [7.1] PUŠKÁR, A., Medzné stavy materiálův a sůčastí. Veda, Bratislava 1989, 304 s.
- [7.2] DOLEŽEL, B. Odolnost plastů a pryží. SNTL Praha, 1981, 710 s.
- [7.3] STRNADEL, B. Nauka o materiálu II. Degradacní procesy a design konstrukčních materiálů. ES VŠB-TU Ostrava, 2008, 280 s.
- [7.4] BEISER, A., Úvod do moderní fyziky. Academia, Praha 1975, 628 s.
- [7.5] LAPČÍK, L., PELIKÁN, P. ČEPPAN M., Fotochemické procesy. Alfa, Bratislava, 1989.



## Klíč k řešení

### Odpovědi na otázky ke kapitole 1 – Úvod k degradačním procesům materiálů

- O 1.1. Výrobní degradace materiálu zahrnuje vady a snížení úrovně vlastností materiálu (vůči požadovaným či předepsaným hodnotám), vznikající již v procesu výroby.
- O 1.2. Provozní degradace, je nežádoucí a zpravidla znamená nevratné zhoršení vlastností materiálu a často funkce konstrukce při spolupůsobení podmínek (napětí, teplota, prostředí) během provozu
- O 1.3. Mezní stav je nepřipustný z hlediska použití materiálu, funkce konstrukce nebo zařízení a zajištění potřebné životnosti a spolehlivosti.
- Rozlišujeme mezní stavy pružnosti, pevnosti, únosnosti, přetvoření a stability.
- O 1.4. Konkrétní mezní stavy materiálu jsou často označovány slovem „mez“ s upřesněním (mez pevnosti, mez únavy, mez tečení atd.), v podobném smyslu jsou používány názvy „prahové“ nebo „kritické“ hodnoty pro mezní vlastnosti nebo stavy materiálů.
- O 1.5. Stárnutí je způsobeno nevratnými (zpravidla dlouhodobými) změnami plastů za určitých podmínek, hlavně vlivem teploty, světla, prostředí. Může mít i kladné účinky na materiál (např. vytvrzování). Degradace je souhrn rozkladných a nežádoucích reakcí polymerů. Zahrnuje depolymerizaci, fotodegradaci, termodegradaci, biodegradaci.

### Odpovědi na otázky ke kapitole 2 - Lomové vlastnosti materiálů

- O 2.1. Skutečné napětí  $\sigma' = \frac{F}{S}$ , kde S je skutečný průřez kolmý na působící sílu F, a skutečná deformace  $\epsilon' = \ln \frac{L}{L_0}$ , kde L je délka tyče při zatížení silou F a  $L_0$  je počáteční délka.
- O 2.2. Skutečná pevnost neboli lomové napětí je dáno vztahem  $\sigma'_u = \frac{F_u}{S_u}$ , kde  $F_u$  síla v okamžiku před lomem. Skutečná deformace těsně u lomu (v krčku), lomová deformace  $\epsilon'_u = \ln \frac{1}{1-z}$
- O 2.3. Součinitel koncentrace napětí  $\alpha = \frac{\sigma_{max}}{\sigma}$  (poměr maximálního napětí k nominálnímu), pro kruhový válcovitý otvor v desce, orientovaný kolmo na tahové napětí  $\alpha = 3$ .
- O 2.4. Pro tahové napětí a eliptický otvor (o délce 2c, poloměr zaoblení  $\rho$ ,  $c \perp \sigma$ ):  $\alpha = 1 + 2 \sqrt{\frac{c}{\rho}}$
- O 2.5. Pole napětí u vrubů a trhlin můžeme vypočítat (metoda konečných prvků, použití komplex-ních funkcí) nebo stanovit experimentálně (fotoelasticimetrie, mikrorentgenová metoda)
- O 2.6. Štěpné krystalografické roviny v KSC (bcc) mřížce jsou typu {100}.
- O 2.7. Nepřímá úměra. Vyšší mezi kluzu  $R_p$  odpovídá nižší hodnota  $K_{Ic}$  u téhož materiálu, oceli.

- O 2.8. Pro slitiny hliníku je rozmezí hodnot  $K_{Ic} = 10 - 50 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ .
- O 2.9. Z důvodu menších smykových složek napětí, menšího počtu kluzových rovin ve stavu rovinné deformace, ve srovnání se stavem rovinné napjatosti.
- O 2.10. Pro otevření čela trhliny platí vztah:  $\delta = \frac{K_I^2}{\lambda E R_p}$ , kde  $\lambda = \pi/4 - 2$  (RN).
- O 2.11. Nízkoenergetický křehký lom oceli (s mřížkou KSC, bcc) vzniká pod tranzitní teplotou, jeho vznik podporuje vysoká rychlost zatížení, trojosý stav napjatosti s tahovými složkami napětí, hrubozrnná struktura.
- O 2.12. Odpor proti šíření trhliny  $R = \frac{dW_\gamma}{da}$  ( $\text{J}/\text{m}^2$ ) je energie potřebná k vytvoření lomové plochy jednotkové velikosti. R charakterizuje též lomovou houževnatost materiálu:  $R = G_{Ic} = \frac{K_{Ic}^2}{E}$ , dále R je funkcí délky trhliny a, viz. R-křivky.
- O 2.13. Mikromechanismy křehkého porušení oceli: transkrystalické štěpení, interkrystalické oddělení (štěpení), smíšené štěpné porušení.
- O 2.14. Zkouška DWTT je vhodná pro stanovení přechodové teploty plechů skutečné tloušťky, hlavně na tlaková svařovaná potrubí (plynovody), včetně oblasti svarových spojů.
- O 2.15. Cílem zkoušky TZT (CAT) je zjistit podmínky, při kterých se křehká nestabilní trhlina zastaví. Zkouškou můžeme zjistit teploty zastavení trhliny v závislosti na tahovém napětí a tloušťce tělesa.

## Výsledky úloh – kapitola 2

- U 2.1.  $[8,2 \text{ }\mu\text{m}]$
- U 2.2.  $[78,6 \text{ }\mu\text{m}]$
- U 2.3.  $[2175 \text{ MPa}]$
- U 2.4.  $[\text{ne}, \sigma_k = 1235 \text{ MPa}]$
- U 2.5.  $[\text{pro } Y=1, a_c = 28,7 \text{ mm}]$
- U 2.6. (Stručný popis pod obr. 2.9)
- U 2.7.  $[0,325 \text{ mm}]$
- U 2.8.  $[\text{viz. obr. 2.11}]$
- U 2.9.  $[\alpha = 6,6]$
- U 2.10.  $[\text{Zmenší se } 9 \times]$
- U 2.11.  $[\text{viz. obr. 2.23}]$
- U 2.12. a) Tvárné dutinové porušení, několik interkrystalických fazet. Velikost dutin 2-5  $\mu\text{m}$ , částic 1  $\mu\text{m}$  (bílé tečky uvnitř několika dutin), rozměry fazet 10-30  $\mu\text{m}$ .  
b) Křehké štěpné porušení, smíšené fazety, převážně interkrystalické ( $\approx 70\%$  plochy),

méně transkrystalických fazet a několik oblastí (ostrůvků, fazet) pravděpodobně s mikro-dutinami. Velikosti fazet 5-10  $\mu\text{m}$ , velikosti zrn 10-20  $\mu\text{m}$ , částice 1-3  $\mu\text{m}$ .

### Výsledky testu ke kapitole 2

T 2 1a, 2b, 3a, 4a, 5c, 6b, 7a, 8b, 9b, 10b, 11c, 12b, 13a, 14a, 15a, 16b

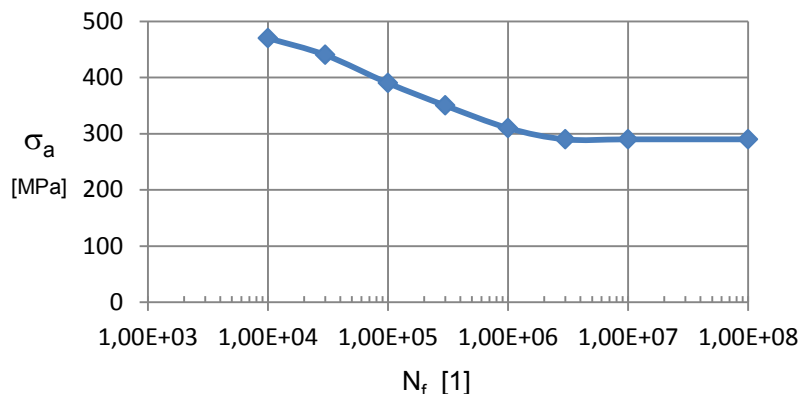
### Odpovědi na otázky ke kapitole 3 – Únava materiálu

- O 3.1. Při cyklickém namáhání kovové materiály žíhané (měkčí) se zpevňují, a naopak zpevněné materiály jsou změkčeny (tj. snížení tvrdosti, meze kluzu, pevnosti).
- O 3.2. Intruze jakožto mikroskopické prohlubně vznikají při cyklických pokluzech dislokací a úzkých pásem vlivem smykových napětí u povrchu. Extruze vystupují nad povrch vedle intruzí, vznikají podobným kluzovým mechanismem jako intruze (viz. obr. 3.4).
- O 3.3. Iniciaci únavového poškození kovů omezíme pohybem dislokací. Prováděná opatření: snížení koncentrace napětí, zvýšení jakosti povrchu (leštění, jemné broušení), vnesení tlakových pnutí na povrchu a zpevnění povrchu (cementování, nitridování, povrchové kalení, kuličkování, válečkování apod.)
- O 3.4. Nízkocyklová únava probíhá při cyklických napětích nad mezí kluzu ( $\sigma_h \geq R_p$ ), s počtem cyklů do  $5 \cdot 10^4$  (řádově  $\approx 10^2 - 10^4$  cyklů).
- O 3.5. Únavové striace vznikají jako mikroskopické žlábký (jeden žlábek vznikne za jeden cyklus), vyznačují lokální polohy čela rostoucí trhliny. Postupové čáry (odpočinkové čáry) jsou makroskopicky viditelné, označují změny podmínek při šíření únavové trhliny (velikosti zatížení, prostředí) anebo dočasná zastavení trhliny.
- O 3.6. Hlavně na rozkmitu (amplitudě) faktoru intenzity napětí, tj. na velikosti cyklické plastické deformace, dále na teplotě, frekvenci, stavu napjatosti a na korozním prostředí.
- O 3.7. Rozptyl únavové životnosti je způsoben hlavně v etapě iniciace a šíření mikrotrhlin. Při iniciaci jsou významné náhodné lokální koncentrace napětí na povrchu a náhodný výskyt vad v materiálu, při růstu a rozptylu mikrotrhlin se uplatní zejména různé velikosti zrn. Rozptyl únavové životnosti dále zvyšuje náhodný průběh zatížení, náhodné změny prostředí a teploty.
- O 3.8. Parisův vztah se používá pro odhady nebo výpočty únavové životnosti, zbytkové cyklické životnosti, dále pro porovnání rychlosti šíření trhlin v rozdílných materiálech anebo v určitém materiálu po různých variantách zpracování.
- O 3.9. Rychlost šíření únavové trhliny ( $da/dN$ ) obecně s rostoucí frekvencí klesá. Naopak rychlost  $v = da/dt = f \cdot (da/dN)$  s frekvencí stoupá.
- O 3.10. Korozní prostředí zpravidla snižuje únavovou pevnost a životnost, zvyšuje rychlost šíření trhlin, hlavně v I. a II. etapě růstu, snižuje prahové hodnoty ( $\Delta K_{Ip}$ ) – korozní únava.

## Řešení a výsledky úloh – kapitola 3

U 3.1. a)  $\sigma_h = 280$  MPa,  $\sigma_d = -140$  MPa, b)  $R = \sigma_d/\sigma_h = -0,5$ , c)  $\Delta\sigma = 2\sigma_a = 420$  MPa.

U 3.2. a) Wöhlerova křivka:



b)  $\sigma_c = 285$  MPa, c)  $N_f = 5 \cdot 10^4$  cyklů;  $N_f \rightarrow \infty$  (cyklů), d)  $\sigma_a = 450$  MPa,  $\sigma_a = 320$  MPa

U 3.3. Sestrojíme Smithův diagram (podle obr. 3.11). Kombinace zadaného statického a cyklického napětí vede k únavovému porušení.

U 3.4. [ $N_f = 1,7 \cdot 10^7$  cyklů, podle jednoduchého výpočtu]

U 3.5. Součást má poměrně ostrý přechod z většího rozměru na menší průměr a zároveň v těchto místech se nachází drážka. Poměrně vysoké koncentrace napětí vedou zde k iniciaci několika únavových mikrotrhlin (viz. sekundární stupně na obrázku u příkladu 3.5), které se propojují a vedou ke vzniku únavové trhliny, která roste do kritické velikosti, viz. únavová dělicí čára mezi hladší únavovou oblastí lomu a drsnější částí dolomení (dolomu). Podle podílu plochy konečného dolomení k celkové ploše lomu (cca 0,55) je možno usuzovat na střední úroveň cyklického zatížení a podle tvaru únavové oblasti, resp. dělicí čáry, šíření únavové trhliny probíhalo pravděpodobně při jednostranném ohybovém napětí.

U 3.6. Po broušení mez únavy se zvýší o  $\Delta\sigma_{cs} = 22,5$  MPa.

U 3.7. Pro zadané a zjištěné hodnoty  $\sigma_{cs} = \eta_p \cdot v_x \cdot \sigma_c / \beta = 0,59 \cdot \sigma_c$

U 3.8. Po zjednodušeném výpočtu  $N_c = 13970$  cyklů. Doba do lomu  $t_f = N_c / f = 77,6$  min.

Rozkmit prahové hodnoty faktoru intenzity napětí při parametru asymetrie cyklu  $R = 0$ :

U 3.9.  $\Delta K_{po} = 12,3 \text{ MPa}\sqrt{m}$  a rozkmit  $\Delta K_p = 1,45 \text{ MPa}\sqrt{m}$  pro  $R = 0,9$ .

U 3.10. Proti nízkocyklové únavě má vyšší odolnost varianta A.

## Výsledky testu ke kapitole 3

T 3 3.1 b, 3.2 c, 3.3 a, 3.4 b, 3.5 b, 3.6 b, 3.7 a, 3.8 b, 3.9 b, 3.10 b, 3.11 c, 3.12 c

### Odpovědi na otázky ke kapitole 4 - Tečení materiálů

- O 4.1. Homologická teplota je poměr teploty  $T$  [K] při zkoušce nebo v provozu k teplotě tavení  $T_t$  [K] daného materiálu ( $T/T_t$ ). Normalizované napětí je podíl aplikovaného napětí  $\sigma$  [MPa] k modulu pružnosti materiálu  $G$  [MPa] nebo  $E$  [MPa], tj.  $(\sigma/G)$  nebo  $(\sigma/E)$ .
- O 4.2. Stacionární tečení je charakterizováno téměř konstantní rychlostí deformace a má hlavní podíl na životnosti. Při stacionárním tečení jsou v rovnováze procesy zpevnění a zotavení.
- O 4.3. Mez tečení v tahu je napětí, které způsobí předepsanou trvalou deformaci za danou dobu při určité teplotě. Označujeme např.  $R_T 10^4/1/580 = 90$  MPa, tzn. napětí  $\sigma = 90$  MPa za dobu  $t = 10^4$  h a při teplotě  $T = 580^\circ\text{C}$  způsobí deformaci  $\varepsilon = 1\%$ .
- O 4.4. Zbylé napětí  $R_{Rz}$  je napětí, které ve zkušební tyči zůstane po ukončení zkoušky relaxace. Zápis se doplňuje údajem o době zkoušky  $t(\text{h})$  a zkušební teplotě  $T$  ( $^\circ\text{C}$ ) -  $R_{Rz}t/T$ .
- O 4.5. Difuzí vakancí směrem k jádru dislokace dochází k pohybu hranové dislokace kolmo na rovinu kluzu před překážkou (částicí). Vlivem smykových napětí pak dislokace obchází překážku, obr. 4.9.
- O 4.6. Kavity mohou vznikat spojením, kondenzací vakancí na hranicích zrn (případně fází), nebo dislokačním mechanismem (obr. 4.12) nebo dekohezí mezi maticí a částicí.
- O 4.7. Deformační mapa graficky zobrazuje a vymezuje oblasti, při kterých se realizují určité mechanismy tečení, v závislosti na bezrozměrných parametrech  $Tt/T$  a  $\sigma/G$ . Lomové mapy tečení představují oblasti dominantních mechanismů porušení (vznik kavit, trhlin) a lomů, sestavují se také v souřadnicích  $Tt/T$  -  $\sigma/G$ .
- O 4.8. Žáropevné oceli mají zvýšenou odolnost proti tečení, často s požadavkem odolností proti oxidaci v plynech. Podle teploty použití mohou být nelegované (do  $\approx 400^\circ\text{C}$ ), nízkolegované Cr, V, Mo (do  $\approx 550^\circ\text{C}$ ), vysokolegované feritické anebo austenitické ( $650$  a  $750^\circ\text{C}$ ).
- O 4.9. Proti dislokačnímu tečení jsou vytvářeny jemné stabilní precipitáty (karbidy, karbonitridy v ocelích), disperzní zpevnění (např. práškové částice  $\text{Al}_2\text{O}_3$  v Al), intermetalické fáze ( $\text{Ni}_3\text{Al}$ ). Proti difuznímu tečení jsou vhodná hrubší zrna, usměrněná zrna nebo monokrystaly. Legování většími substitučními prvky (W, Mo v oceli) nebo prvky, které snižují difuzi (Ni, Co v oceli).
- O 4.10. Zhruba podle teploty tavení, procesu difuze a oxidace je pořadí odolností proti tečení: termoplasty, termosety, slitiny Zn, Al, Ti, Cu, Fe, Ni, keramické materiály ( $\text{SiC}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ).

### Výsledky úloh – kapitola 4

- U 4.1.  $[\Delta\varepsilon/\Delta t = 0,325 \text{ h}^{-1}]$
- U 4.2.  $[\Delta L = 6,1 \text{ mm}]$
- U 4.3.  $[F = 17 \text{ kN}]$
- U 4.4.  $[t_r = 10^4 \text{ h}]$
- U 4.5.  $[72 \text{ MPa}]$
- U 4.6.  $[Q = 190 \text{ kJ/mol}]$

- U 4.7.  $[1,9 \cdot 10^{-2} \text{ h}^{-1}]$   
 U 4.8.  $[t_r = 233 \text{ h (9,7 dní)}]$   
 U 4.10.  $[T = 1197 \text{ K} = 924 \text{ °C}]$   
 U 4.11.  $[1990 \text{ h, } 4,32 \cdot 10^8 \text{ h}]$

#### Výsledky testu ke kapitole 4:

T 4 4.1 a, 4.2 b, 4.3 c, 4.4 c, 4.5 b, 4.6 c, 4.7 a, 4.8 b, 4.9 b, 4.10 b,

#### Odpovědi na otázky ke kapitole 5 - Základy koroze kovů

Formy korozního poškození budou závislé:

- a) na materiálu, jeho složení (čistotě), struktuře, fyzikálních, chemických, mechanických a dalších vlastnostech,  
 O 5.1. b) na charakteru korozního prostředí, které ovlivňuje materiál, např. vzduch, voda, půda, průmyslové prostředí, biologické vlivy,  
 c) na podmínkách, kterým je daný materiál v konkrétním prostředí vystaven (teplota, tlak, rychlost proudění, mechanické namáhání, atd.).

Důsledky korozního poškození:

- a) technické – úbytek materiálu, snížení pevnostních vlastností nebo poškození dílce,  
 O 5.2. b) ztráty ekonomické (obchodní), např. snížení estetického vzhledu a zhoršení prodejnosti,  
 c) problémy ekologické (bezpečnostní), např. kontaminace vod ropnými produkty.  
 d) hygienické – vzniklé korozní zplodiny způsobí znečištění výrobků (potraviny, léčiva),

- Při rovnovážném potenciálu oxidace a redukce téhož kovu ( $\text{Me} = \text{Me}^{+n} + n\text{e}^-$ ) probíhá  
 O 5.3. stejnou rychlostí v obou směrech ( $I_a = -I_k$ ), takže celkově nenastane úbytek materiálu.

- Vnější činitelé jsou spjaty s prostředím (zahrnují jeho složení, pH, rychlost proudění, teplotu), vnitřní činitelé souvisí s materiálem (složení, struktura, mechanické napětí, vnitřní pnutí, kvalita povrchu, povrchová úprava).  
 O 5.4.

- Galvanický článek mezi dvěma kovy – bimetalový článek (např. Cu katoda – Zn anoda), článek způsobený rozdílným složením, provzdušněním roztoku u kovu (článek s diferenční aerací), mikročlánek mezi elektrochemicky rozdílnými fázemi (např. v litině Fe je anoda – grafit je katoda) nebo mezi oblastmi s rozdílným chemickým složením (segregace).  
 O 5.5.

- Bodová koroze, mezikrystalová koroze, korozní praskání, viz. obr. 5.11.  
 O 5.6.

- Přímé náklady na korozi a protikorozní ochranu v průmyslových zemích jsou 2-4 %  
 O 5.7. HDP.

- V prostředí, které má charakter elektrolytu, nejčastěji elektricky vodivé vodné prostředí.  
 Reakce anodického rozpouštění, oxidace železa:  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$  (ionty kovu přecházejí  
 O 5.9. do roztoku, elektrony zůstávají v kovu a mohou se zúčastnit katodické redukce, depolarizace).

- O 5.10. Hodnotu rovnovážného potenciálu spočteme podle vztahu  $E_r = E^0 + RT/nF) \cdot \ln(a)$ .
- O 5.11. Aktivační přepětí  $\Delta E = E - E_r = \eta_{akt} = \beta \cdot \log J/J_0$ .  
Při koncentračním přepětí je rychlost reakce podmíněna (brzděna) hlavně difúzním přenosem korozně aktivní složky z prostředí k povrchu elektrody, např. při katodické depolarizaci kyslíkem.
- O 5.12. Polarizační odpor stanovíme podle vztahu  $R_p = \frac{\Delta E}{\Delta J}$  na základě téměř lineární závislosti  $J = f(E)$  nebo  $E = f(J)$  při korozním potenciálu  $E_{kor} \pm \Delta E$ .  
Limitní difúzní proudová hustota ( $J_L = cDnF/\delta$ ), je přímo úměrná koncentraci aktivní složky v prostředí ( $c$ ), její difuzi k povrchu ( $D(T)$ ) a tloušťkou ( $\delta$ ) difúzní vrstvy u povrchu.
- O 5.14. Rychlost rovnoměrné koroze je nepřímo úměrná polarizačnímu odporu:  $r_c = B/R_p$ , kde parametr  $B = b_a \cdot b_k / 2,3(b_a + b_k)$ .
- O 5.15.

### Výsledky úloh – kapitola 5

- U 5.1. [-0,790 V]
- U 5.2. [0,289 mg/(m<sup>2</sup>s), 1,15 mm/rok]
- U 5.3. [0,445 mm/rok]
- U 5.4. [0,304 mm/rok]
- U 5.5. [ $\Delta m = k \cdot \Delta t$ ,  $\Delta m = 1846 \text{ g/m}^2$ ]
- U 5.6. [-29.1 mV]
- U 5.7. Diagram E-pH pro Al je podobný jako pro Zn (obr. 5.2)
- U 5.8. [0,95 mm/rok; 20,3 g/m<sup>2</sup>d]
- U 5.9. [9,1 kg]
- U 5.10. [51,1  $\mu\text{m/rok}$ ]
- U 5.11. Uvnitř důlku je anodická oblast ( $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2e^-$  a  $\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe(OH)}_2 + 2\text{H}^+$ ), vedle důlku, resp. korozního bodu, probíhá katodická redukce ( $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ ), na okraji důlku  $\text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe(OH)}_2$
- U 5.12. [893 g.m<sup>-2</sup>.a<sup>-1</sup>]
- U 5.13. [parabolický vztah  $\Delta m^2 = k \cdot t$ ;  $\Delta m = 37 \text{ g.m}^{-2}$ ]
- U 5.14. [ $\Delta E = +0,103 \text{ V}$ , oxidace Cd, redukce Ni]
- U 5.15. [P-B poměr:  $r(\text{Mg}) = 0,8$ ;  $r(\text{V}) = 3,4$ ;  $r(\text{Zn}) = 1,6$ ]

### Výsledky testu ke kapitole 5

- T 5 5.1b, 5.2b, 5.3b, 5.4 b, 5.5c, 5.6b, 5.7a, 5.8b, 5.9a, 5.10b, 5.11a, 5.12a, 5.13b, 5.14b, 5.15b, 5.16b, 5.17a, 5.18b, 5.19c, 5.20b

### Odpovědi na otázky ke kapitole 6 - Opotřebení

- O 6.1. Tribologie je obecně a zjednodušeně nauka o tření, opotřebení a mazání.
- O 6.2. Poměrné opotřebení  $\psi = W(\text{etalon})/W(\text{vzorek})$ , lze použít pro objemové, hmotnostní i délkové jednotky, zpravidla pro otěr (abrazí, adhezi, erozi), obvyklé hodnoty  $\psi = 1-5$ .
- O 6.3. 1) Do netěsného kluzného ložiska (adheze) se mohou dostat tvrdé částice, které způsobí abrazí. 2) Brzdění kola po kolejnici (adheze), na které mohou ležet zbytky tvrdé sypké hmoty, prachu, písku apod. (+ abraze).
- O 6.4. Podle vztahu (6.4) platí  $W_{\text{er}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \cdot k = k \cdot W_k$ , kde  $W_k$  je kinetická energie dopadajících částic. Obecněji  $W_{\text{er}} = k \cdot W_k^n$  ( $n = 0,7 - 3$ ).
- O 6.5. Mazání snižuje koncentrace (špičky) kontaktních napětí, snižuje součinitel tření, výrazně snižuje součinitel adhezivního opotřebení  $K_{\text{adh}}$  ( $10^3-10^4 \times$ ), chrání povrch před korozí.
- O 6.6. Konstrukční opatření pro zamezení vzniku kavit, snížení rychlosti proudění, volba tvrdší korozivzdorné oceli (martenzitické chromové  $C_r > 12\%$ , např. CrNi13-4).
- O 6.7. V důsledku opakovaných kontaktních smykových napětí (v určitém místě materiálu) při valivém pohybu součástí vznikají u povrchu únavové trhliny, které se mohou spojovat a způsobit pak místní odpadávání materiálu a vznik mělkých důlků (pittingu).
- O 6.8. Při vibračním opotřebení (frettingu) dochází vlivem tření k ohřevu povrchu a tvorbě oxidů, které jsou mechanicky rozmělněny a působí dále jako abrazivo. Velikost otěru je úměrná amplitudě vibrací podél povrchu, vlivem mechanického faktoru, viz. vztah (6.9).
- O 6.9. Součinitel kluzného (vlečného, smykového) tření je poměr třecí síly k normálové  $\mu = F_t/F_n$ ; rozlišujeme statický ( $\mu_s$ ) nebo kinetický součinitel tření ( $\mu_k$ ). Součinitel valivého tření je dán podílem výstřednosti  $f$  (mezi normálovou silou a reakcí podložky) a poloměru  $R$  valivé součástí  $\mu_r = f/R$ .
- O 6.10. Při dopadu tvrdých erozivních částic na měkkou ocel opotřebení klesá s rostoucím úhlem dopadu (mezi  $15-90^\circ$ ), viz. obr. 6.6. Při dopadu stejných částic na křehkou kameninu nastává naopak růst opotřebení.

### Řešení a výsledky úloh – kapitola 6.

- U 6.1. [ $W_h = 0,142 \text{ g}$ ,  $W_o = 18,3 \text{ mm}^3$ ,  $W_l = 0,236 \text{ mm}$ ;  $W_h/L = 2,86 \text{ mg/m}$ ,  $W_o/L = 0,367 \text{ mm}^3/\text{m}$ ,  $W_l/L = 4,73 \text{ } \mu\text{m}/\text{m}$ ,  $L = 50 \text{ m}$ ]
- U 6.2. [ $w_h = 5.72 \text{ mg/s}$ ,  $w_o = 0,734 \text{ mm}^3/\text{s}$ ,  $w_l = 9,46 \text{ } \mu\text{m}/\text{s}$ ]
- U 6.3. [ $W_n = 4,68 \cdot 10^{-6}$ ,  $p_n = 1,25 \cdot 10^{-4}$ ]
- U 6.4. [ $\mu = 0,53$ ]
- U 6.5. [opotřebení stoupne  $7,85 \times$ ]
- U 6.6. [tlak  $p = 1250 \text{ MPa}$ , eroze nevznikne na martenzitické oceli a keramice]
- U 6.7. [2,4 min]

- U 6.8. [a) snížení eroze 2,5 x, b) zvýšení 6 x]  
 U 6.9. [abraze se sníží 81 x]  
 U 6.10. [ $\Delta h = 0,33 \text{ mm}$ ]

### Výsledky testu ke kapitole 6

T 6 6.1b, 6.2c, 6.3b, 6.4b, 6.5c, 6.6b, 6.7c, 6.8c, 6.9a, 6.10c

### Odpovědi na otázky ke kapitole 7 – *Opotřebením materiálů*

- O 7.1. Radiační poškození je úměrné integrálnímu toku, energii částic a teplotě ozáření.  
 O 7.2. Použit regenerační žíhání, snížit dávku záření, použít materiály, které absorbují více záření a nejsou radioaktivní.  
 O 7.3. S nižším atomovým číslem, viz vztahy (7.1) a (7.2).  
 O 7.4. Nežádoucí zvýšení tranzitní teploty o  $\Delta T_T = 100 - 150 \text{ }^\circ\text{C}$ , viz. obr. 7.4.  
 O 7.5. Nadměrné zvýšení množství vakancí vlivem energetických neutronů, zrychlení vakančního mechanismu tečení a šplhání dislokací  
 O 7.6. Radiační zpevnění lze charakterizovat zvýšením meze kluzu  $\Delta R_p = B_1(T) \cdot (\Phi_i)^m$   
 O 7.7. Při neutronovém záření se tvoří vakance a dutiny (kondenzací, kolapsem vakancí), což vede ke zvýšení objemu materiálu, ke snížení jeho střední hustoty, řádově o %.  
 O 7.8. Tranzitní teplota s velikostí ozáření stoupá, podle mocninné nebo logaritmické závislosti (pode hodnoty  $\Phi_i = \Phi \cdot t$ ,  $\Delta T_T = C_1(\Phi_i)^m$  nebo  $\Delta T_T = C_2 + C_3 \cdot \log \Phi_i$ )  
 O 7.9. Jeden foton způsobí excitace v jedné makromolekule polymeru.  
 O 7.10. Pokud energie fotonu je vyšší než vazebná (disociační) energie kovalentní vazby.

### Řešení a výsledky úloh – kapitola 7.

- U 7.1. Pro střední hmotnostní číslo atomu železa  $A(\text{Fe}) = 55,85$  a podle přibližného vztahu  $\xi_d = 2/(A+2/3)$  snadno vypočteme  $\xi_d = \underline{0,0354}$ .  
 U 7.2. [ $n = 8,4 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$  a  $l_s = 21 \text{ m}$ ]  
 U 7.3. Hmotnost atomu Fe je  $m_{\text{Fe}} = 9,27 \cdot 10^{-23} \text{ g}$  (dle úlohy 7.2). Podle vztahu (7.1) pak  $T_{j1\text{max}} = 0,0691 \cdot T_{\text{no}} = \underline{6,92 \text{ keV}}$ .  
 U 7.4. Sestrojíme grafickou závislost meze kluzu  $R_e$  (resp.  $R_{p0,2} = 700 \text{ MPa}$ , dle obr. 7.3) na toku  $\Phi_i$  a pomocí interpolace pro  $\Phi_i = 10^{23} \text{ n.m}^{-2}$  odečteme hodnotu meze kluzu  $\underline{R_e \approx 420 \text{ MPa}}$ , tj. zvýšení o  $\Delta R_e \approx 120 \text{ MPa}$ .  
 U 7.5. [ $T_t \approx 120^\circ\text{C}$ ]

- U 7.6. Podle vztahu (7.5) energie fotonů  $E_1 = 239 \text{ kJ/mol}$ , poruší vazby C-N v amidech s energií  $E_v = 222 \text{ kJ/mol}$ .
- U 7.7.  $[1,0 \text{ eV} = 96,5 \text{ kJ/mol}; 335 \text{ kJ/mol} = 3,47 \text{ eV}, ]$
- U 7.8. Po dosazení do vztahu (7.2) za  $T_{nk} = 0,5T_{n0}$  a  $\xi_d = 0,0354$  lze vypočítat  $k = 20$ .  
Plošná hustota energie pulsu záření je  $E_s = P \cdot t = 10^4 (\text{W/mm}^2) \cdot 10^{-2} (\text{s}) = 100 \text{ J/mm}^2$ .
- U 7.9. Energie fotonu  $E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda = 6,626 \cdot 10^{-34} (\text{Js}) \cdot 3,0 \cdot 10^8 (\text{m/s}) / 6,68 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ . Počet fotonů  $N = E_s / E = 3,36 \cdot 10^{21}$ .
- U 7.10. Podle vztahu (7.3) a (7.4) může platit přímá úměra  $\Delta R_p = \Delta T_T \cdot B_1 / C_1$ .

### Výsledky testu ke kapitole 7

- T 7 7.1 b, 7.2 c, 7.3 a, 7.4 b, 7.5 a, 7.6 b, 7.7 c, 7.8 a, 7.9 b, 7.10 b.