

Jan Krmela, Jiří Stodola, Františka Pešlová

Technické problémy strojních součástí – opotřebení

Vysokoškolská učebnica

2021

Trenčín

Autori: **doc. Ing. Jan KRMELA, Ph.D.**
(Trenčianska univerzita Alexandra Dubčeka v Trenčíne,
Trenčín, Slovenská republika)
prof. Ing. Jiří STODOLA, DrSc.
(Univerzita Obrany, Brno, Česká republika)
prof. Františka PEŠLOVÁ, Ph.D.
(České vysoké učení technické v Praze, Praha,
Česká republika)

Názov: Technické problémy strojních součástí – opotřebení
(Technické problémy strojných súčástí – opotrebenie)
Druh diela: vysokoškolská učebnica
Jazyk publikácie: český
Vydanie: prvé, jún 2021
Formát: A4
Počet strán: 224
Náklad: CD-ROM, PDF formát, k stiahnutiu tiež na: <http://krmela.wz.cz/contact.html>
Vydavateľ: Trenčianska univerzita Alexandra Dubčeka v Trenčíne,
Trenčín
Zeme vydavateľa: Slovenská republika
Počet autorských hárkov: 9,88 AH, počet normostrán: 197,6

Recenzenti: **prof. Dr. Ing. Libor BENEŠ**
(Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, Ústí nad Labem,
Česká republika)
prof. Ing. Eva SCHMIDOVÁ, Ph.D.
(Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice,
Česká republika)

Publikácia neprešla jazykovou úpravou.

© Jan Krmela, Jiří Stodola, Františka Pešlová, 2021

Akákolvek reprodukcia diela alebo jeho časti
nie je bez súhlasu autorov povolená.
Určené pre VŠ študentov pre študijné účely.

ISBN 978-80-8075-942-1

EAN 9788080759421



OBSAH

ÚVOD.....	4
1. TECHNICKÝ OBJEKT	6
1.1. Mezní stavy technického objektu	7
1.2. Opotřebení povrchů technického objektu	13
2. KOMPLEXNÍ PŘÍSTUP K TVORBĚ TECHNICKÉHO OBJEKTU	23
3. PŘEHLED ZÁKLADNÍCH POŽADAVKŮ NA TECHNICKÝ OBJEKT	29
3.3. Jevy a stavy na technickém objektu	31
4. ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA POVRCHŮ TECHNICKÉHO OBJEKTU.....	36
4.1. Povrchové interakce	38
4.2. Vlastnosti povrchů.....	45
5. PROCESY OPOTŘEBENÍ TECHNICKÉHO OBJEKTU	49
5.1. Experimentální hodnocení opotřebení	51
5.2. Zobecněný přístup k výpočtovému modelování opotřebení	56
5.3. Abrazivní opotřebení technického objektu	58
5.4. Adhezivní opotřebení technického objektu.....	67
5.5. Erozivní opotřebení technického objektu.....	81
5.6. Vibrační opotřebení technického objektu	84
5.7. Únavové opotřebení technického objektu	86
5.8. Kavitační opotřebení technického objektu	87
5.9. Kombinované erozivně-kavitační opotřebení technického objektu	95
5.10. Opotřebení ablací technického objektu	97
6. KOROZNÍ OPOTŘEBENÍ TECHNICKÉHO OBJEKTU	98
6.1. Formy (druhy) korozního napadení.....	114
6.2. Faktory ovlivňující korozní opotřebení.....	125
7. ÚPRAVA POVRCHŮ TECHNICKÉHO OBJEKTU	132
7.1. Povlakování.....	135
8. PŘÍKLADY OPOTŘEBENÍ TECHNICKÝCH OBJEKTŮ	149
9. KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY VERSUS OPOTŘEBENÍ	191
9.1. Výběr materiálů odolných proti opotřebení	192
9.2. Směry ve vývoji materiálů odolných proti korozi a opotřebení.....	199
LITERATURA.....	203
PŘÍLOHY.....	205

ÚVOD

Vysokoškolská učebnice se zabývá problematikou opotřebení materiálů, z kterých jsou vyrobené součásti, pracující v různém prostředí. Tyto součásti mají společný rys, který lze specifikovat jako vnější zatížení povrchu, vyvolávající na povrchu objektu jeho aktivaci jako reakci materiálu. Reakce povrchů se projevuje vznikem a rozvinutím degradace, která může být pro technický objekt přípustná nebo nepřípustná. Vědní obor, který se věnuje změnám povrchů v procesu tření, opotřebení a případně mazání součástí je nazýván tribotechnikou. Tuto vědní disciplínu lze chápat jako mezioborovou, protože v sobě zahrnuje několik různých oborů, např. fyziku, chemii, materiálové inženýrství, inženýrskou mechaniku, diagnostiku, statistiku, měřicí techniku, údržbu, ekonomiku a jiné. Proto se autoři učebnice zaměřili na opotřebení, z hlediska komplexního systémového přístupu. Hlavní pozornost byla věnována procesům opotřebení probíhajícím na povrchu technických objektů a všemu, co s těmito procesy souvisí.

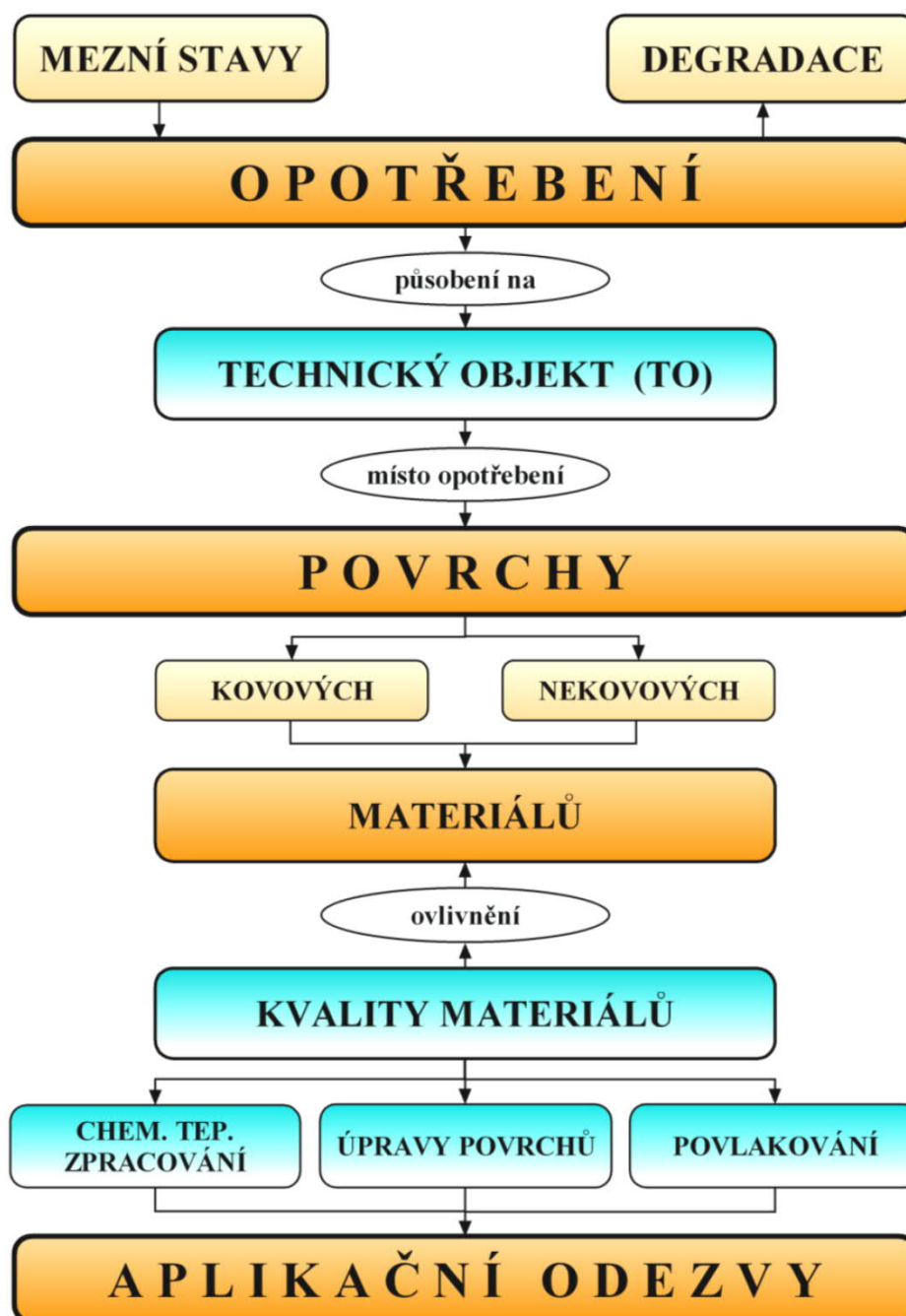
Autoři vymezili pojem technický objekt, definovali povrch technických objektů, mezní stavy vznikající na povrchu, dále opotřebení a degradaci, která může být urychlována interakcí s okolím. Samotný proces opotřebení, i když je rozdělený podle převládajících projevů, na různé druhy, má několik společných rysů, které se autoři pokusili zevšeobecnit. Opotřebení je výsledkem velmi složitého procesu, který probíhá v tzv. tribo-soustavě. Převážně znamená změnu povrchu tuhých těles při jejich vzájemném pohybu, za působení síly, resp. při pohybu média a zákonitě vede ke zhoršení funkčních vlastností a nakonec ke vzniku závady, poruchy nebo selhání prvku nebo dokonce celé konstrukční soustavy.

Předložená VŠ učebnice se pokouší k těmto degradačním procesům přistupovat systémově za použití názorných schémat, která stručně a výstižně vyjadřují řešenou problematiku a zároveň ukazují šíři řešených problémů. Strukturovaně vyjádřená náplň, které je věnovaná pozornost, je uvedena na prvním schématu nazvaném „Řešená problematika“ (obr. 1.). Opotřebení souvisí s mezními stavy, které se mohou na technickém objektu provozováním vyskytovat a mohou následně vyústit v degradaci, popř. havárii v případě, pokud se příčiny mezních stavů neodstraní včas. Poškození je sledováno na povrchu technického objektu, kde má opotřebení své specifické projevy podle toho, zda se jedná o kovový nebo nekovový materiál. Dochází k celkovému snížení kvality povrchu technického objektu. Na základě zatížení, kterému je objekt vystaven v průběhu jeho provozování, se povrch upravuje a to buď chemicky, mechanicky nebo jiným tepelným zpracováním povrchu, například povlakováním, aby se zlepšila jeho odolnost proti opotřebení.

V závěru publikace jsou uvedeny některé vybrané aplikační odezvy, které souvisí s opotřebením. Jedná se o případy kombinovaného opotřebení železničního kola v interakci s kolejnicí z pohledu materiálové odezvy a dále automobilové pneumatiky a její kompozitní kompaktnosti, při dodržení optimálních adhezních sil zpevňujících

kordů v pryžové matrici, související s její konstrukcí, popř. sklářské formy, vystavené teplotně-mechanickému opotřebení tekutou sklovinou.

Nelze opomenout, že každý proces opotřebení je doprovázený korozním působením, které tento proces urychluje, podle druhu okolního prostředí. Korozní působení se podílí na zkracování celkové životnosti technického objektu, bez ohledu zda je přítomné další opotřebení nebo ne. Zrychlená korozní zkouška může sloužit pro předpověď životnosti objektu v provozu. Tyto zkoušky jsou, na rozdíl od zkoušek opotřebení, normalizované.



Obr. 1 Řešená problematika

1. TECHNICKÝ OBJEKT

Technický objekt (TO) lze definovat jako materiální soustavu s hierarchicky uspořádanými prvky, která byla vytvořena technologickým procesem za účelem plnění předem stanovené funkce.

Charakteristika technického objektu

Technickým objektem lze nazvat jakoukoliv technickou část, konstrukční prvek, který může být samostatný, nebo tvoří součást konstrukčního celku. Technický objekt má určitý geometrický tvar, morfologii, velikost, geometrii, mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti. Má rovněž svoji strukturu, skládající se z jednotlivých prvků.

Dále pro technické objekty platí:

- Technické objekty jsou obklopeny prostředím, které může různým způsobem na těchto objektech ovlivňovat probíhající vzájemné interakce buď jen na povrchu, v podpovrchových vrstvách nebo v objemu materiálu dané součástí.
- Prostředí a okolí technického objektu může být tvořeno jiným objektem nebo atmosférou různé teploty, vlhkosti nebo agresivity. Dále to mohou být pohybující se plynné, kapalné nebo pevné částice dopadající na povrch TO různou rychlostí a pod různým úhlem. Interakce technických objektů s okolím mohou mít charakter:
 - *typu aktivace* – jsou to takové interakce z okolí objektu, které na jeho povrchu vyvolávají určité kvalitativní nebo kvantitativní změny. Tyto interakce mohou být mechanické, chemické, teplotní, případně zahrnující působení plynného nebo kapalného média. Takovéto interakce bývají příčinou vzniku různých procesů, které mohou vyústit do iniciací porušení materiálu na povrchu;
 - *interakce procesní* – které na objektech ovlivňují proces vyvolaný jeho aktivací. Může to být např. působení teploty, tlaku, vlhkosti, záření, agresivity prostředí, chemických vlivů aj.;
 - *interakce v časoprostoru* – které probíhají na technickém objektu v daném prostředí různou rychlostí po různou dobu, což může být ovlivněno velikostí a kvalitou povrchu. Dlouhodobé povětrnostní působení je příkladem těchto interakcí;
- Aktivace objektu na něm vyvolává určité procesy. Tyto procesy mohou mít charakter pozitivní nebo negativní pro konstrukční část nebo i pro celý objekt. Mohou probíhat v mikro nebo makro oblastech na povrchu, nebo ve struktuře materiálu.
- V důsledku probíhajících procesů se objekty dostávají do stavů, které mohou ovlivnit kvalitu struktury a tím i jejich materiálové a funkční vlastnosti.
- V případě vzniku nových stavů mohou objekty změnit své projevy, směřující z objektu do jeho okolí. Může pak dojít ke zpětné vazbě, která způsobí změnu chování samotného objektu.

Veličiny vyjadřující stav objektu se označují běžně jako stavové veličiny a souvisejí s:

- působením na objekt,
- vlastnostmi objektu,

- vazbou struktury,
- projevy objektu.

Změny stavových veličin z výchozího stavu na stav aktuální lze členit na:

⇒ změny *kvantitativní* – mohou být charakterizovány různými nároky na technický objekt při jeho užití, např. to mohou být požadavky na:

- funkčnost,
- spolehlivost,
- ekonomičnost,
- provoz,
- bezpečnost apod.

⇒ změny *kvalitativní* – mají charakter změny vlastností objektu, např.:

- topografických,
- geometrických,
- strukturálních,
- fyzikálních,
- chemických,
- mechanických atd.

Podle charakteru změn stavových veličin v čase mohou probíhat tyto změny na TO spojitě nebo skokově.

Některé změny mohou být příčinou takového stavu objektu, který je pro další funkci nepřijatelný. Nepřijatelné stavy mohou vznikat v období výroby, montáže, manipulace, provozování nebo oprav. Tyto stavy jsou v technice označovány jako mezní stavy (MS).

Mezní stav je vždy vázán na materiál, z kterého je daný objekt vyrobený, obr. 1.1. Velikost a charakter zatížení povrchu TO může vyvolat proces opotřebení, koroze, únavy apod., který se projeví nějakou nepřijatelnou změnou. Tato změna může být deformační, strukturní nebo zahrnovat geometrii povrchu, což vede v určitém čase a prostoru k degradaci materiálu TO. Degradace může být charakterizována výskytem trhlin, změnou materiálových vlastností, nebo se může projevit ve změně napjatosti v povrchu nebo pod povrchem TO aj.

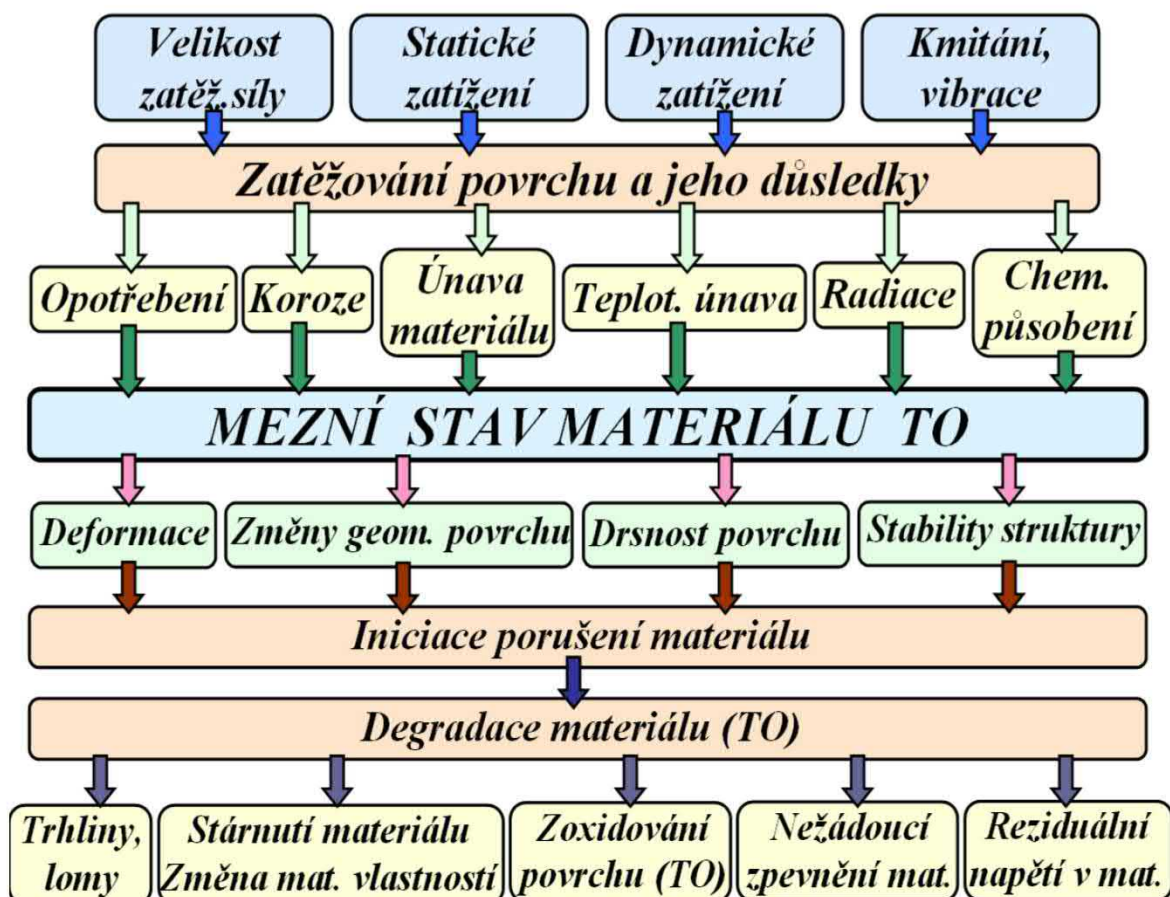
1.1. MEZNÍ STAVY TECHNICKÉHO OBJEKTU

Mezní stav technického objektu nastává tehdy, když TO nemůže nadále plnit funkci, pro kterou byl určený.

Mezní stavy vzhledem na jejich vlastnosti lze členit:

Podle *charakteru změn stavových veličin* na:

- *kvantitativní MS* – nastávají tehdy, když se hodnota některého ze stavových parametrů stane pro funkci objektu nepřijatelnou;
- *kvalitativní MS* – vznikají tehdy, jestliže se změní kvalita některého ze stavových parametrů tak, že už neumožní další funkci objektu.



Obr. 1.1 Mezní stavy TO

Podle časového průběhu jejich vzniku mohou být:

- okamžité MS – závisí pouze na okamžitých hodnotách stavových parametrů, které vedou k jejich vzniku;
- kumulativní MS – závisí na kumulaci změn ve vlastnostech struktury objektu v procesu působení a ovlivňování objektu z jeho okolí. Nejsou závislé na okamžitých hodnotách těchto parametrů, ale jen na jejich časovém průběhu.

Podle možné následnosti mezních stavů:

- vylučující se (disjunktivní) MS – lze označit „disjunktivními“ tehdy, vznikne-li pouze jeden ze dvou možných MS;
- příčinné (kauzální, následné) MS – se označují jako kauzální tehdy, jestliže vznik jednoho MS vytváří podmínky pro vznik následných mezních stavů.

Podle chování po odstranění aktivace objektu mohou být:

- vratné MS – odstraní-li se aktivace objektu, která mezní stav vyvolala, mizí i jeho následky;
- nevratné MS – následky dosaženého mezního stavu zůstávají i po odstranění iniciace, která MS vyvolala.

Podle charakteru následků z dosaženého mezního stavu to jsou:

- poruchové MS – způsobí poruchu, v jejímž důsledku není objekt schopen plnit svou funkci, ale po jejím odstranění je objekt opět provozuschopný;

- *bezpečnostní MS* – jejich dosažení způsobí destrukci takové součásti, která je prvkem ochranného zařízení proti vzniku havarijních stavů. Destrukce této „kontrolní součásti“ již nechrání objekt před vznikem jiných mezních stavů;
- *havarijní MS* – dosažení mezního stavu jednoho prvku vede k nekontrolovatelné destrukci celé konstrukce nebo objektu.

Podle *možnosti jejich výskytu*:

- *potenciální MS* – jsou to předpokládané mezní stavy, které se mohou vyskytnout u konkrétního objektu pracujícího v konkrétních provozních podmínkách;
- *reálné MS* – jsou takové MS, které u objektů skutečně nastávají v konkrétním čase při konkrétních provozních podmínkách objektu;
- *teoretické MS* – mohou být popsány matematickou teorií, která vychází z určitých, v reálných podmínkách nesplnitelných předpokladů, přičemž algoritmus teorie věrohodně vystihuje obtížně popsatelné skutečné mezní stavy.

Podle *rozsahu oblasti*, v níž nastává mezní stav:

- *lokální MS* – nastávají v mikroobjemech skutečného materiálu (na úrovni atomů a molekul), čemuž odpovídají body kontinua, kterými lze materiál výpočtově modelovat;
- *oblastní MS* – nastávají v prostorově nebo plošně vymezených oblastech tělesa;
- *globální MS* – probíhají v celém objemu tělesa.

Podle *statistického pojetí* mezních stavů jsou:

- *deterministické MS* – charakteristiky mezních stavů i charakteristiky spolehlivosti jsou určeny jednoznačně – kvantifikátor je určen jednou hodnotou;
- *pravděpodobnostní MS* – jsou takové, kde MS, mezní plochy a charakteristiky spolehlivosti je možné vyjádřit intervalovým číslem.

Podle *počtu mezních parametrů* popisujících mezní stav jsou:

- *jednoparametrické MS* – mezní podmínka obsahuje pouze jeden mezní parametr;
- *víceparametrické MS* – mezní podmínka obsahuje více než jeden mezní parametr.

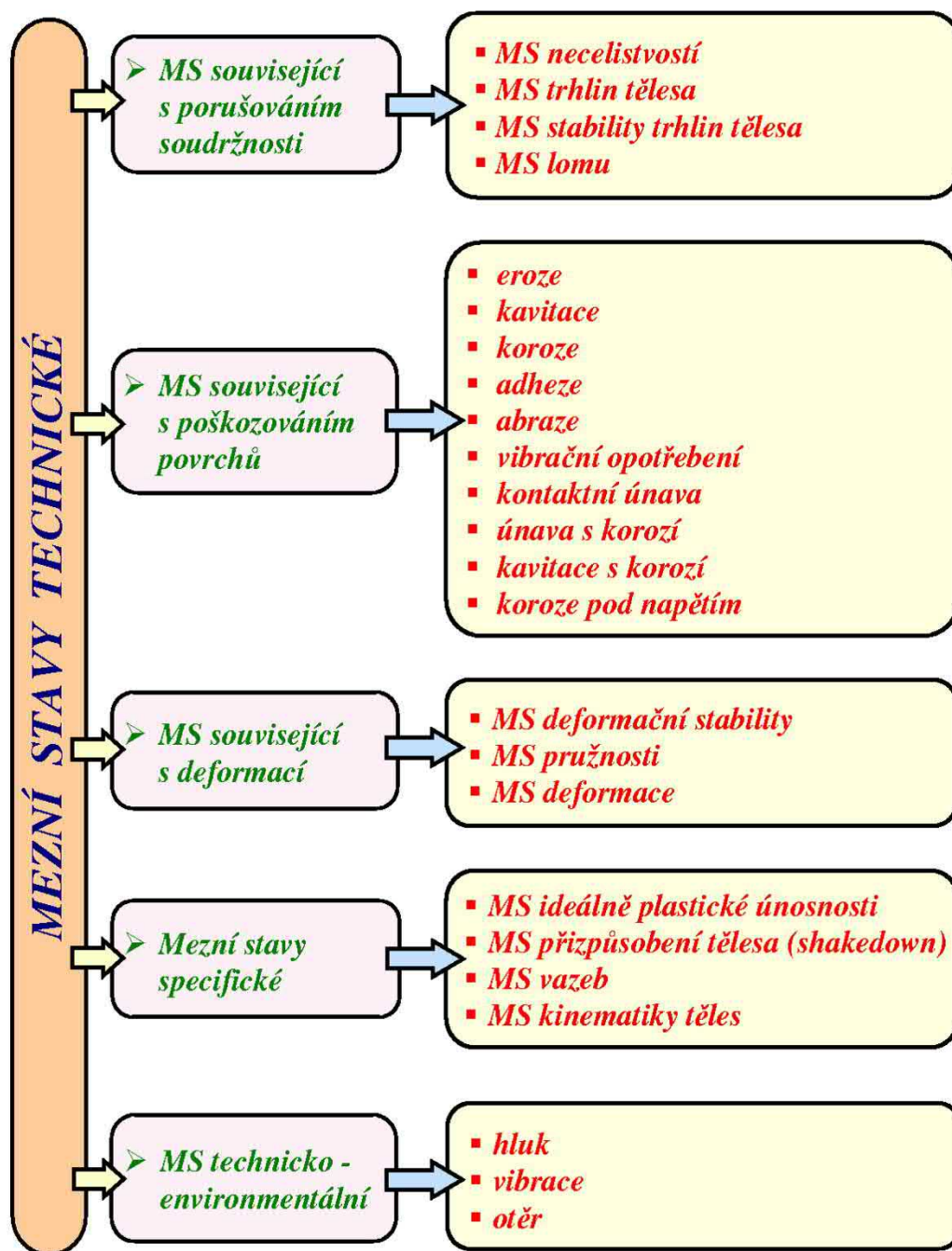
Členění technických mezních stavů podle příčin jejich vzniku – obr. 1.2

A. Mezní stavy související s deformací tělesa

- *MS plastické deformace* tělesa – je takový jeho stav, kdy se deformace funkčně přípustná mění na funkčně nepřípustnou;
- *MS elastické deformace* tělesa – je takový jeho stav, při jehož dosažení vzniknou v tělese první plastické deformace;
- *MS deformační stability* tělesa – je stav tělesa, kdy se jeho geometrická konfigurace, která byla stabilní před dosažením mezního stavu, stává labilní a stabilní konfigurací se stává jiná geometrická konfigurace tělesa.

B. Mezní stavy související s porušením koheze materiálu tělesa

- *MS porušení koheze* tělesa – je takový stav tělesa, při kterém vznikne v tělese zjizvitelná nesoudržnost struktury materiálu;
- *MS trhlin* tělesa – nastává tehdy, když v tělese existuje trhlina, nebo větší počet trhlín, znemožňující jeho předepsanou funkci, přičemž těleso zůstává celistvé;



Obr. 1.2 Členění technických mezních stavů

- MS lomu tělesa – nastává tehdy, když z celistvého tělesa vznikají minimálně dvě samostatná tělesa s vlastní lomovou plochou, jejíž existence způsobuje ukončení funkce, popř. havárii konstrukce.

Podle charakteru lomové plochy existuje:

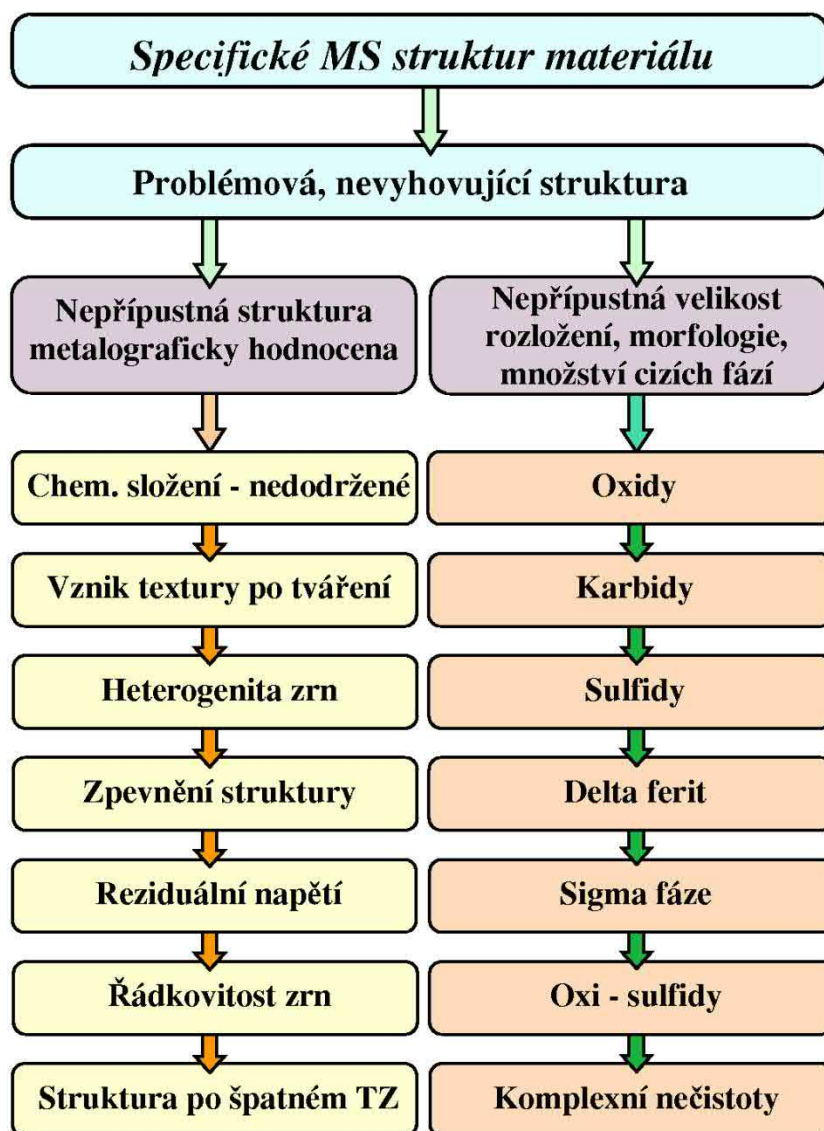
- ⇒ MS *křehkého* lomu tělesa – který vznikl v důsledku nestabilního šíření mechanismem štěpného porušení při nízké spotřebě energie po předchozí minimální plastické deformaci;
- ⇒ MS *houževnatého* lomu tělesa – je stav porušení, který je důsledkem stabilního růstu trhliny probíhající mechanismem tvárného porušení s vysokou spotřebou energie po předchozí velké plastické deformaci;

- ⇒ MS *únavového* lomu tělesa – nastane po dlouhodobé střídavé plastické deformaci, jako konečné stádium únavového procesu. Mechanismus porušování má svůj specifický charakter. Podle velikosti střídavé deformace se jedná buď o nízkocyklovou nebo vysokocyklovou únavu, kterou lze členit na únavu:
- *mechanickou* – vznikající v důsledku střídavě plastických deformací způsobených mechanickým zatěžováním. V závislosti na teplotě okolí se může jednat o únavu:
 - za obvyklých teplot okolí;
 - za zvýšených teplot;
 - za nízkých teplot.
 - *teplotní* – příčinou vzniku střídavých deformací jsou opakované změny teploty s následným vznikem časově proměnných teplotních napětí. Podle charakteru rozložení teploty v objemu tělesa se mohou vyskytnout následující případy:
 - v tělese existuje „vysoký teplotní gradient“, a to i v případě homogenního izotropního materiálu;
 - v tělese existuje „rovnoměrně rozložené teplotní pole“, ale uvnitř struktury materiálu je zamezeno deformaci od ohřevu tělesa. Deformačně-napěťové stavy od teplotních cyklických změn mohou vyvolat iniciaci porušování na úrovni mikrostruktury materiálu.
 - *teplotně mechanickou* – vzniká v důsledku časově proměnných změn mechanického a tepelného zatížení. Teplotně mechanická únavu zahrnuje různé mechanismy poškozování. Může to být poškozování např. vysokoteplotním creepem, oxidací aj. Mechanismy porušování se liší v závislosti na deformačně-teplotní historii.
- ⇒ MS lomu tělesa při *cyklickém creepu* – je to takový stav, který nastane po opakovaném míjivém zatěžování za vzniku jednosměrného nárůstu plastických deformací. Vzhled lomové plochy nevykazuje typické znaky únavového mechanismu porušování;
- ⇒ MS lomu tělesa při *teplotním cyklickém creepu* – je lomový stav, ke kterému dochází v důsledku kumulace plastické deformace při konstantním napětí a cyklické změně teploty;
- ⇒ MS lomu tělesa při *teplotním ratchetingu* – je lomový stav, ke kterému dochází v důsledku kumulace plastické deformace při cyklické změně teploty a napětí od pulzujícího silového zatížení v tahu;
- ⇒ MS lomu tělesa při *vysokoteplotním creepu* – nastává po dlouhodobém konstantním zatěžování za působení teploty, která vyvolá creepové deformace tělesa.

C. Mezní stavy *specifické*

- MS *ideálně plastické* únosnosti – vychází z ideálně plastického chování materiálu, kdy se u tělesa s konkrétním tvarem, zatížením a vazbami vytvoří takové plastické oblasti, že vznikne tzv. plastický kloub. Jeho existence způsobí u staticky určité konstrukce její zhroucení, u staticky neurčité konstrukce dochází v okolí plastického kloubu k přerozdělení napětí;

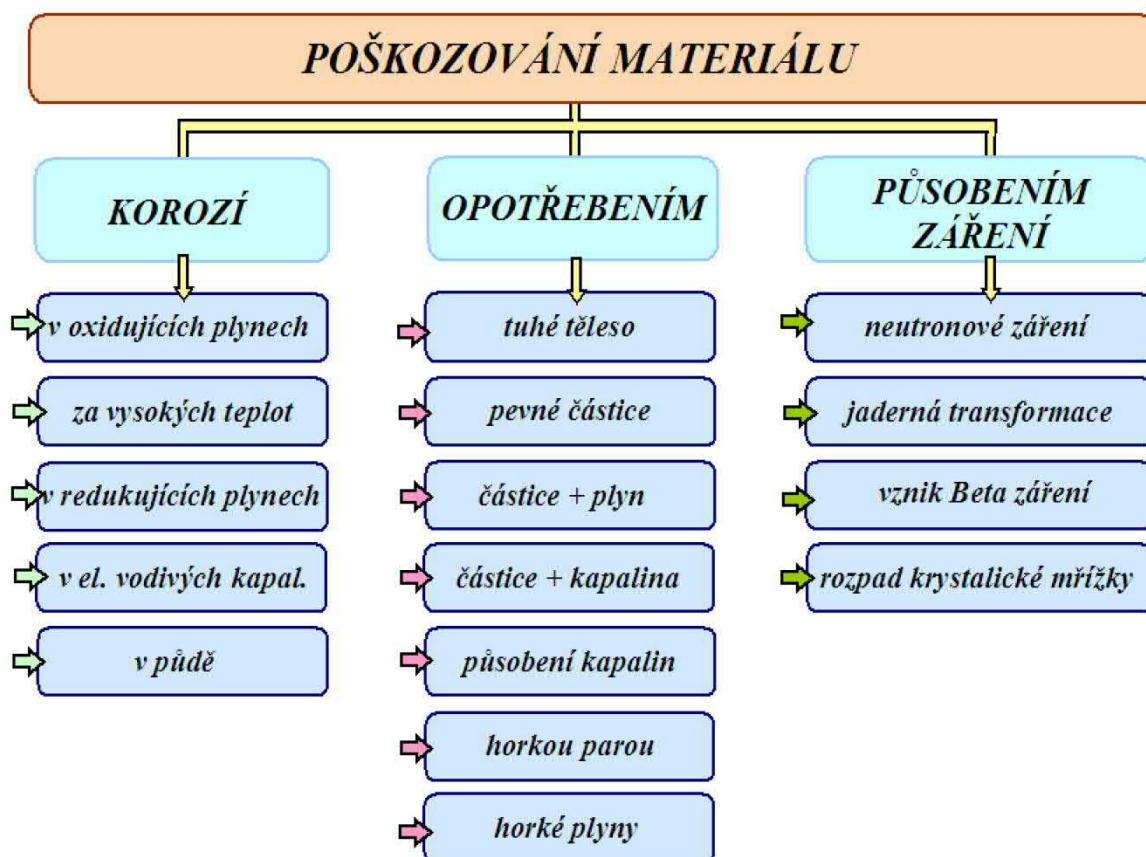
- MS *přizpůsobení tělesa* (shakedown) – tento mezní stav může nastat u staticky neurčité konstrukce, která je opakovaně zatěžovaná tak, že v omezeném objemu materiálu dochází ke vzniku pružně plastických deformací, přičemž v okolí tohoto objemu zůstává materiál v elastickém stavu. Důsledkem tohoto stavu je vznik reziduálních napětí v příslušném objemu materiálu a jeho okolí;
- MS *ztráty vazby* – kdy se některá z vazeb mezi prvky nebo mezi objektem a okolím stává nefunkční;
- MS *kinematiky tělesa* – při kterém je zabráněno funkčně potřebným pohybům tělesa nebo jeho prvků;
- MS *struktury materiálu* – nastává obvykle ve výrobě, ještě před konkrétním použitím TO, v důsledku nedodržení chemického složení, zahrnuje např. výskyt vměstků (různého množství, velikosti aj.), nevyhovující strukturu materiálu, obr. 1.3, aj. Takto vyrobený materiál s nevyhovující strukturou snižuje dobu technického života technického objektu a může dojít k celkové havárii TO ještě před začátkem jeho provozování.



Obr. 1.3 Mezní stavy struktury materiálu

D. Mezní stavy související s poškozením povrchů těles nebo TO

MS *poškození tělesa* – je takový stav, pro který je charakteristická trvalá, funkčně nežádoucí změna povrchu nebo rozměru TO, v důsledku některého mechanismu opotřebení. Jedná se o poškození povrchu opotřebením v interakci s korozním působením, popř. zářením z okolí, jak to znázorňuje obr. 1.4.

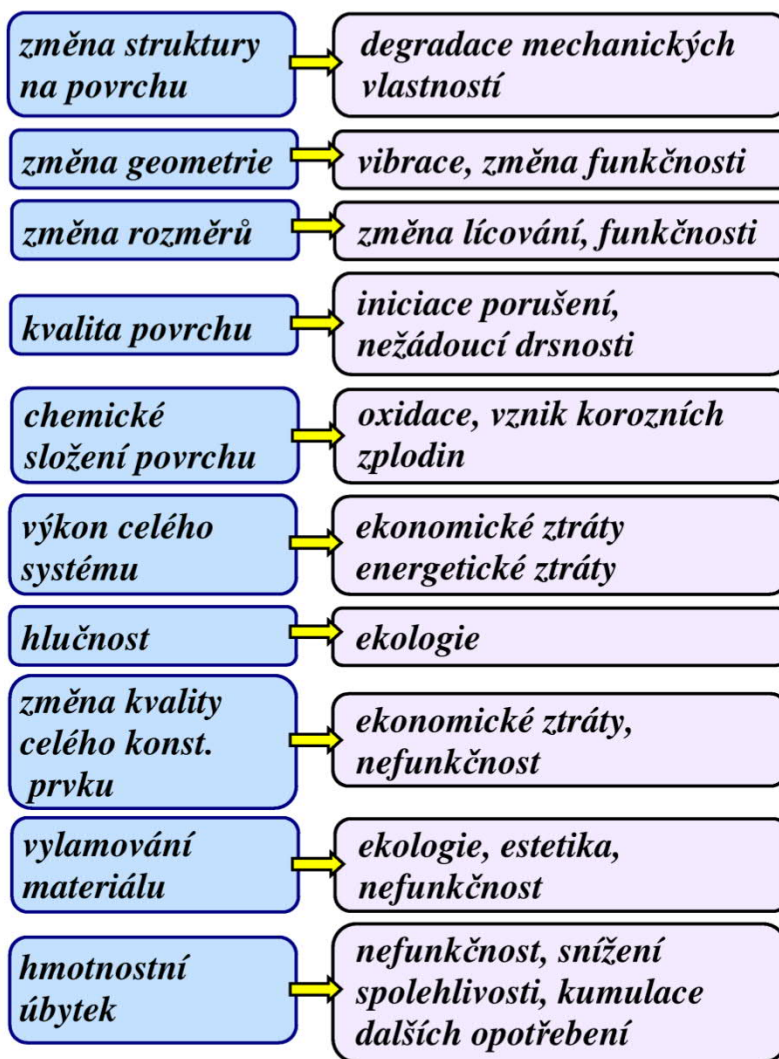


Obr. 1.4 Poškozování materiálů působením okolního prostředí

1.2. OPOTŘEBENÍ POVRCHŮ TECHNICKÉHO OBJEKTU

Opotřebení je trvalá, funkčně nežádoucí změna povrchu nebo rozměru pevných těles, způsobená mechanickými procesy při vzájemném působení funkčních povrchů dvou těles, nebo funkčního povrchu tělesa s určitým tekutinovým médiem (kapalina, plyn), která může být doprovázena jinými fyzikálními (mechanickými, elektrickými, radiačními apod.) nebo chemickými procesy. Médiem může být samotná tekutina, nebo tekutina obsahující různé pevné částice.

Důsledky opotřebení na základě negativní změny povrchů se promítanou do zhoršení vlastností a chování TO v provozu s jejich vazbou na okolí, obr. 1.5. Velkým nebezpečím je opotřebení v takových oblastech, kde se nepředpokládá, že jejich iniciace byla způsobena poškozením povrchu. Změny struktury jsou příčinou zhoršení mechanických vlastností, změny geometrie mohou vyvolat vibrace, vedoucí ke ztrátě funkčnosti. Změna kvality povrchu, např. oxidace, vede k jiné drsnosti, iniciuje porušení, zvyšuje hlučnost, způsobuje ekologické a ekonomické ztráty, poruchy, popř. i havárie.

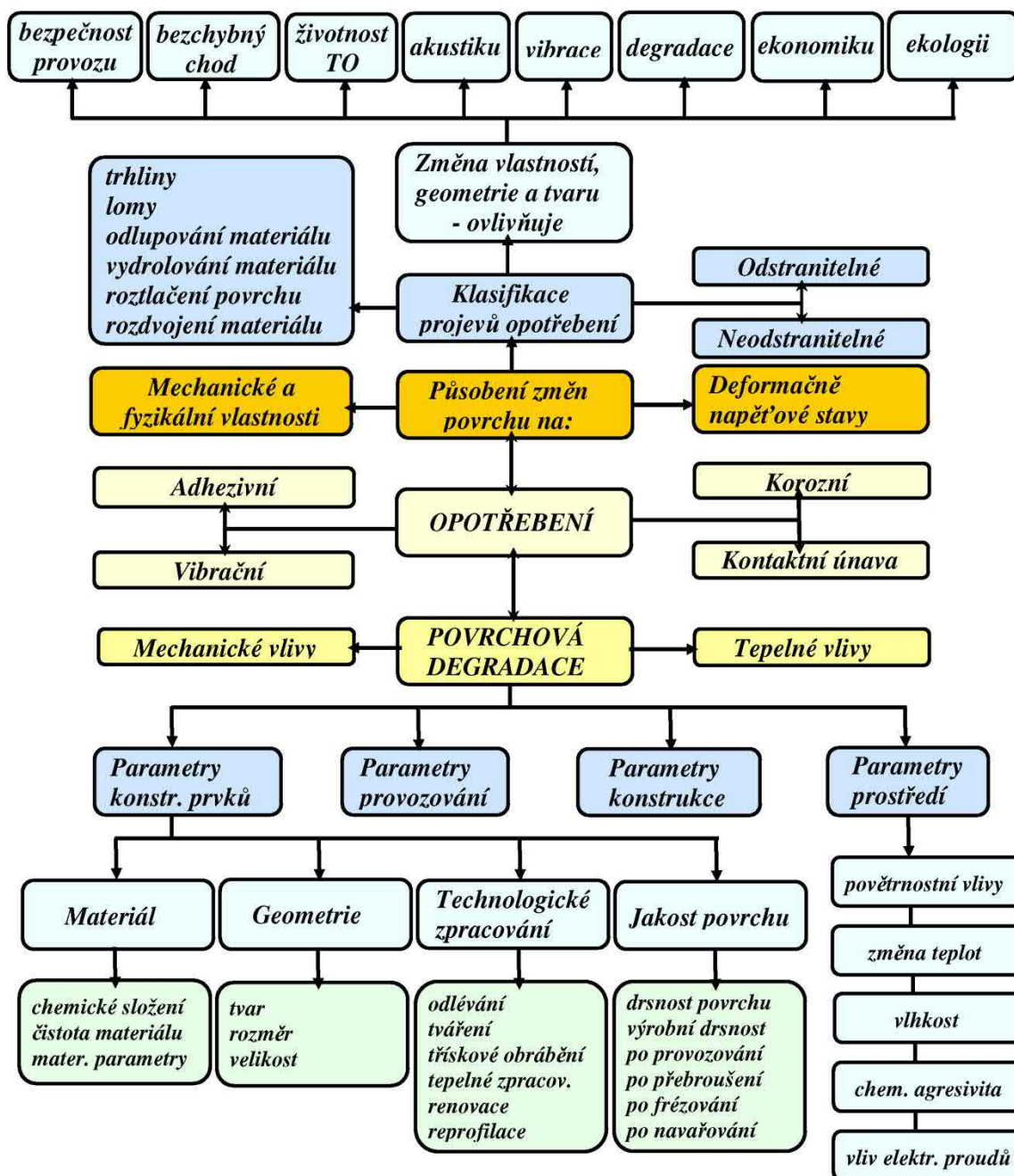


Obr. 1.5 Důsledky opotřebení TO



Korozní opotřebení kované brány

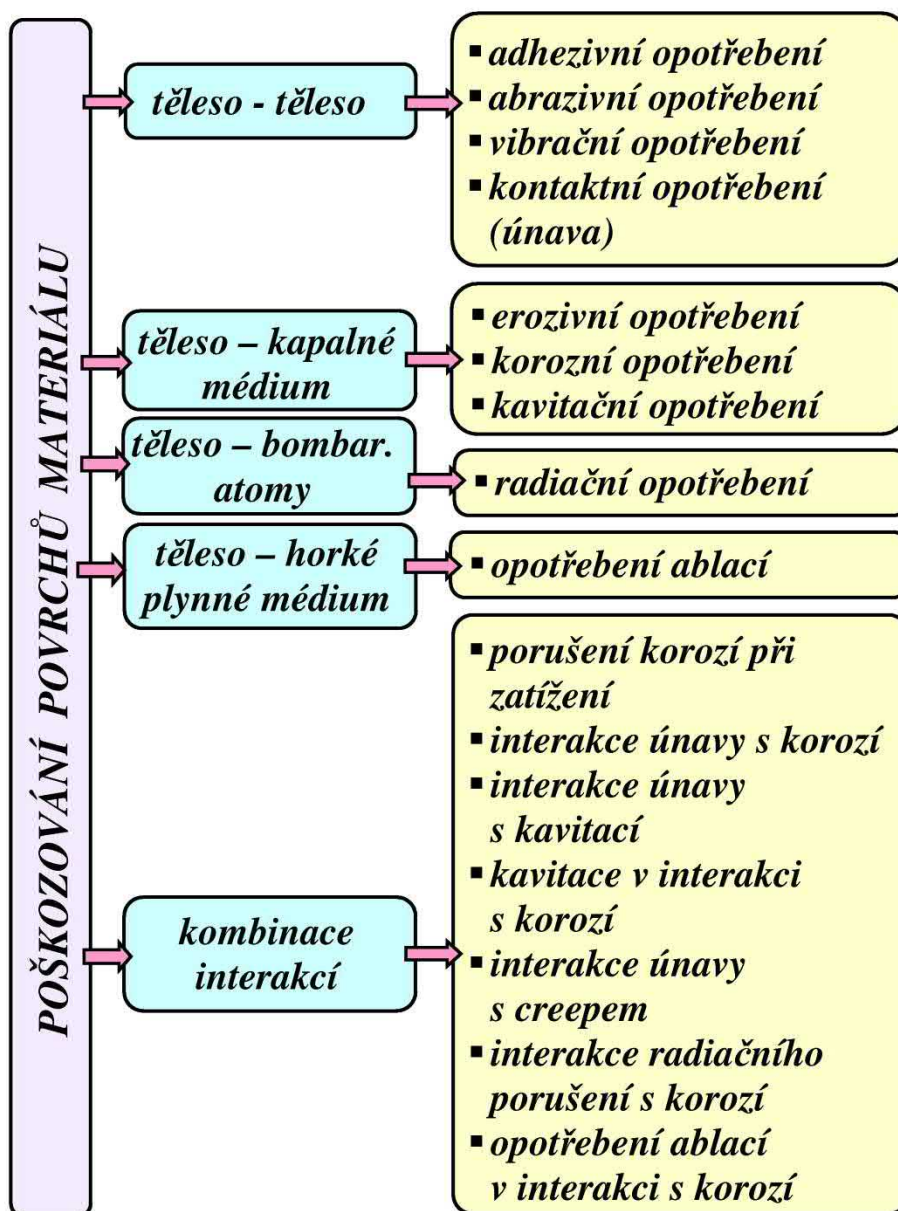
Pokud důsledkem změny povrchové struktury je iniciace porušení, která se rozvine až do MS a dojde k porušení různých prvků, lze předpokládat, že dojde také ke změně chování TO, změně jeho akustických, vibračních, výkonových a jiných projevů, obr. 1.6, které se mohou vyskytovat na daném nebo na úplně jiném konstrukčním prvku, některé části související s technickým objektem nebo na celém TO. Proces porušování je podmíněn kvalitou materiálu a prostředí, ve kterém opotřebení probíhá.



Obr. 1.6 Komplexní pohled na proces opotřebení

Členit opotřebení lze rovněž podle toho, jaké objekty budou v interakci, obr. 1.7.

Příkladem kombinovaného opotřebení jedné součásti s následnými důsledky pro konstrukční celek zobrazují degradované součásti z převodového a hnacího ústrojí automobilu, obr. 1.8.

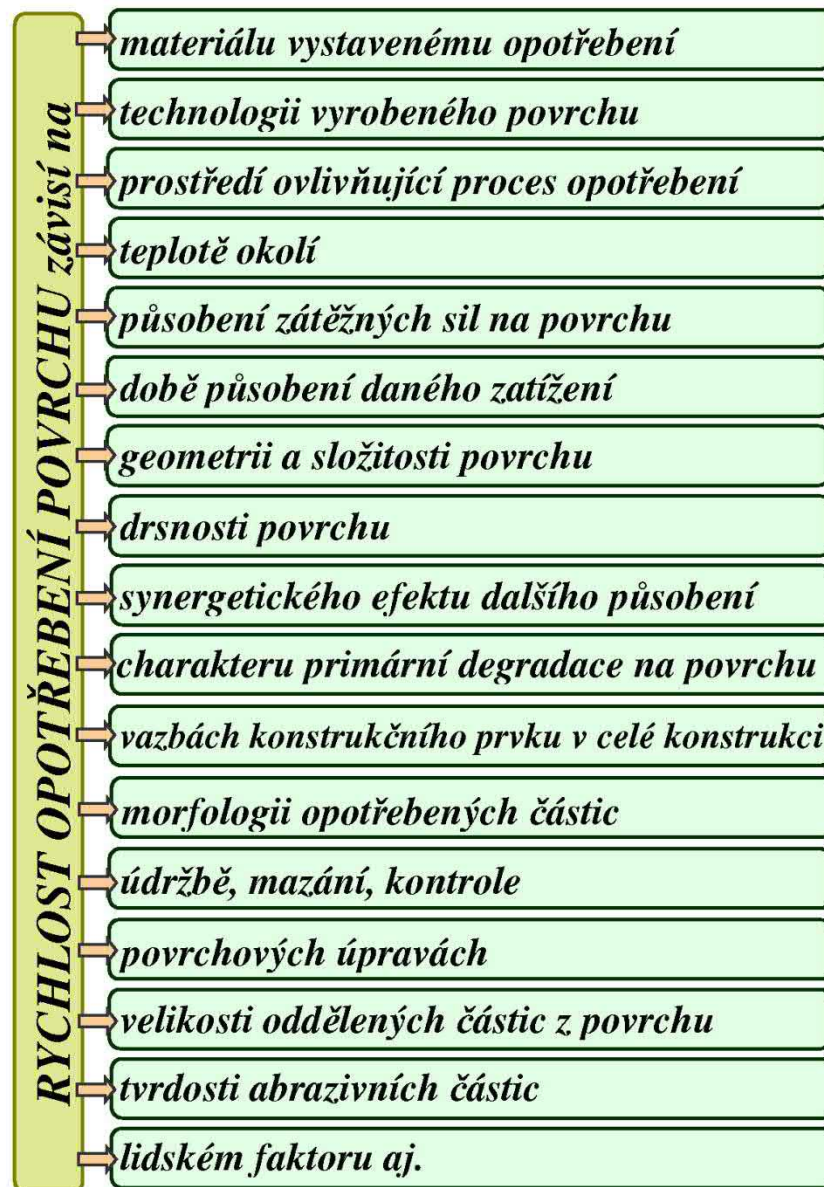


Obr. 1.7 Poškození povrchů materiálu v interakci s okolím



Obr. 1.8 Degradované součásti z převodového a hnacího ústrojí

Rychlost opotřebení povrchů z různých druhů materiálů je závislá na mnoha attributech, jak uvádí obr. 1.9.



Obr. 1.9 Závislost rychlosti opotřebení na různých faktorech

Základní definice mezních stavů opotřebení povrchů

- MS *adhezivního* opotřebení – je takový stav stýkajících se dvou pevných těles, pro který je charakteristická trvalá, funkčně nežádoucí změna kvality povrchů těles při jejich relativním pohybu, a to v těch lokálních místech, v nichž se nacházejí nerovnosti povrchů.

K adhezivnímu opotřebení dochází v důsledku silového působení v místech kontaktu těles. Je metalograficky prokázáno, že se vytvářejí mikrosvary v místech kontaktu povrchových nerovností s jejich následným usmýknutím doprovázeným přenosem materiálu z jednoho povrchu na druhý. Tím dochází také k vyhlazování povrchových nerovností plastickou deformací s následným vznikem povrchových trhlin, nových rýh apod.

- MS *abrazivního* opotřebení – je stav tělesa, pro který je charakteristická trvalá, funkčně nežádoucí změna kvality povrchu a to v důsledku:
 - styku tělesa s tvrdším a drsným povrchem druhého tělesa;
 - působení abrazivních částic na funkčním povrchu tělesa (dopravníky písku, kamení, drtiče, mlýny);
 - působení abrazivních částic oddělených z povrchu těles, které jsou mezi dvěma povrchy (vodící plochy obráběcích strojů, pístní kroužky, kluzná ložiska, čepy klikových hřídelů apod.).

Změna kvality funkčního povrchu je charakterizována:

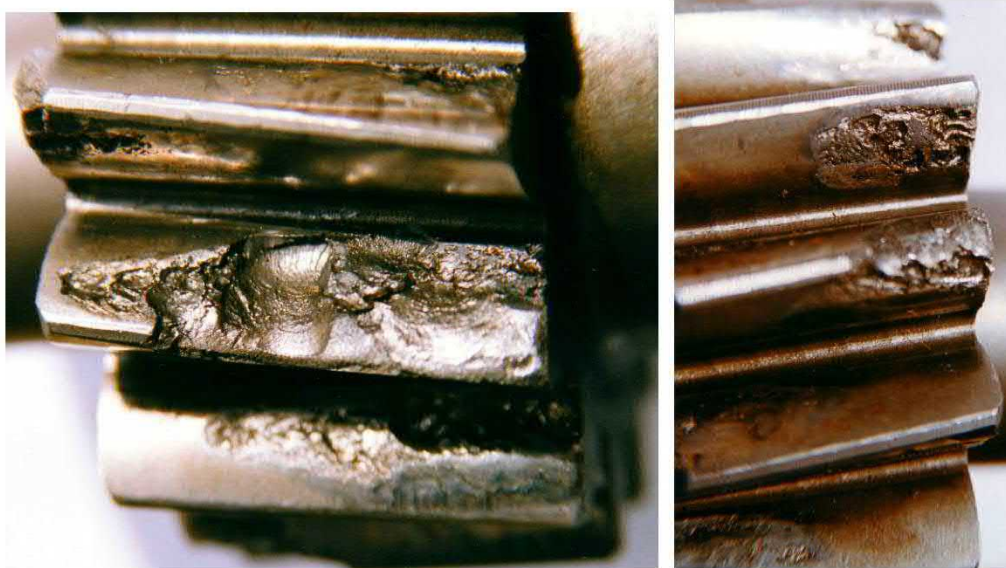
- odřezáváním povrchových vrstev tělesa;
- tvorbou rýh, důlků;
- vznikem podpovrchových a povrchových únavových trhlinek apod.

- MS *vibračního* opotřebení – je stav stýkajících se těles, které vykonávají vzájemný tečný kmitavý pohyb při působení normálového silového působení, jehož výsledkem je trvalá, funkčně nežádoucí změna kvality povrchů těles.

- MS opotřebení v důsledku *kontaktní únavy* – vzniká u dlouhodobějšího styku těles, při kterém na kontaktní ploše působí velké stykové tlaky vedoucí k lokální střídavé plastické deformaci, způsobující únavový proces. Iniciace únavového porušení vzniká v určité hloubce pod povrchem. Důsledkem je trvalá nežádoucí změna kvality funkčně lícovaného povrchu tělesa.

Změna kvality funkčního povrchu má charakter:

- tvorby povrchových důlků (pitting);
- šíření podpovrchových trhlin s následným vytrháváním nebo vydrolováním částic materiálu z funkčního povrchu, resp. odlupování materiálu z povrchové vrstvy (spalling).



Obr. 1.10 Vydroleniny na ozubených kolech

Tento mezní stav nastává např. na:

- bocích ozubených kol (obr. 1.10),

- nákolcích železničních kol,
 - kolejnicích,
 - valivých drahách kroužků a valivých tělísek ložisek apod.
- MS *erozivního* opotřebení tělesa – je stav tělesa, pro který je charakteristická trvalá, funkčně nežádoucí změna kvality důležitého povrchu tělesa, a to v důsledku působení:
- pevných částic nesených proudem kapaliny (vodní čerpadla a turbíny, trysky, armatury, míchací lopatky),
 - pevných částic nesených proudem plynu (ventilátory, ventilátorové mlýny, pneumatická zařízení, lopatky proudových motorů, práškovody, cyklóny, tryskače apod.), obr. 1.11,
 - proudu kapaliny, páry nebo plynu s jemnými částicemi (koncové stupně parních turbín pracujících ve vlhké páře, lopatky plynových a expanzních turbín, nosné plochy letadel atd.).
- Příkladem funkčně nežádoucích změn kvality povrchu tělesa jsou např.:
- proděravěná oběžná kola, čerpadla,
 - porušení ohybu v potrubích,
 - eroze náběžných hran vodních, parních a plynových turbín aj.



Obr. 1.11 Degradovaná součást po opotřebení pevnými částicemi nesenými plyným médiem a součást po uvedení do provozu (vpravo)

- MS *kavitačního* opotřebení tělesa – je stav tělesa, pro který je charakteristická trvalá, nežádoucí změna kvality funkčně důležitého povrchu tělesa v důsledku opakovaného vzniku a zániku kavitačních bublin v kapalině, a to v bezprostřední blízkosti povrchu tělesa.

Změna kvality povrchu tělesa je způsobena kavitační implozí bublin, které mají charakter únavového procesu, začínajícího na úrovni mikrostruktury materiálu v povrchové vrstvě tělesa. Z počátku vzniká zvrásnění, zdrsnění a změna reliéfu

povrchu tělesa, později dojde ke vzniku mikrotrhlin s následným rozvojem do makrotrhlin a vytrháváním částic materiálu z povrchu tělesa, v němž pak vznikají hluboké prohlubně – kavity mikroskopických až makroskopických velikostí. Tento mezní stav se vyskytuje např. u:

- vodních turbín a čerpadel,
- kluzných ložisek,
- redukčních ventilů,
- vnějších ploch válců, vodou chlazených spalovacích motorů,
- hydraulických prvků, které jsou v interakci s kapalným médiem,
- vložek válců motorů aj.

- MS *korozního* poškození povrchu tělesa – je takový stav tělesa, pro který je typická trvalá, nežádoucí změna kvality funkčně důležitého povrchu tělesa v důsledku samovolně probíhajícího procesu chemické nebo fyzikálně-chemické degradace materiálu za spolupůsobení kapalného nebo plynného média.

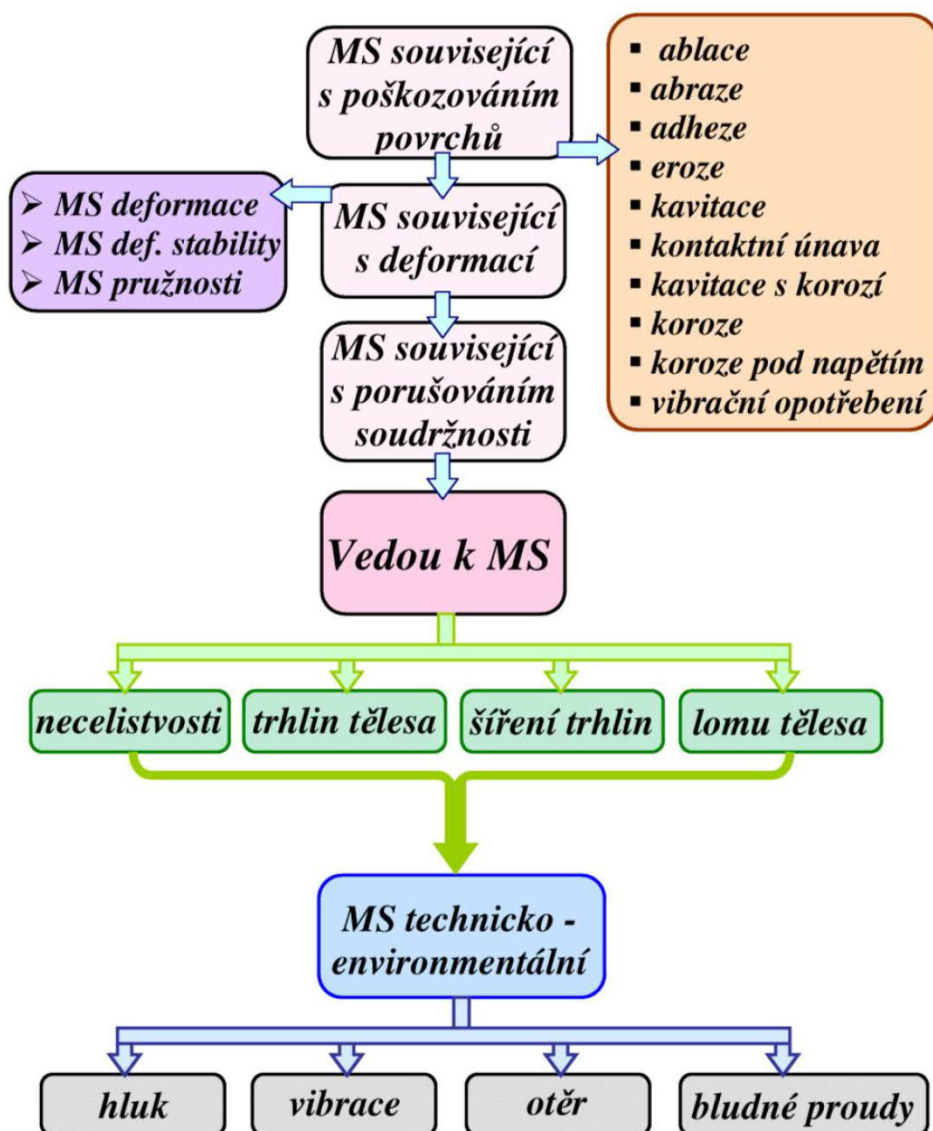
Uvedený proces je označován jako koroze s podstatou:

- chemickou, která probíhá na kovech bez přítomnosti vody nebo vlhkosti v nevodivém prostředí;
- elektrochemickou, v elektricky vodivých prostředcích, např. ve vodních roztocích a elektrolytech;
- fyzikální (vodíkovou), která probíhá v redukčních prostředcích, jejichž součástí je vodík.

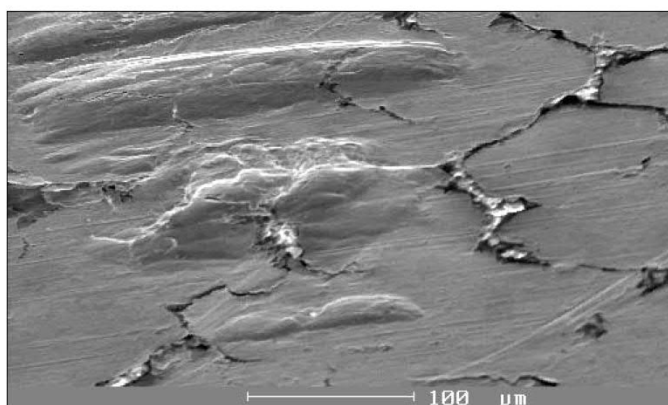
U všech MS jsou společným jmenovatelem podstatné etapy, které jsou charakteristické procesem:

- I. rozpoznávání MS – *kognifikace* (nález a charakter opotřebení);
- II. výběru parametrů souvisejících se vznikem MS – *parametrizace* (hlučnost, vibrace, geometrická změna povrchu, porušení – iniciace a šíření trhliny apod.);
- III. popisu MS formálními prostředky – *formalizace* (místo opotřebení, úbytek hmotnosti, změna geometrie, aj.);
- IV. určování mezních podmínek – *determinace* (velikost zatížení, vibrace, lokalita opotřebení, hmotnostní úbytek, kritický geometrický rozměr atd.);
- V. ověřování správnosti mezních podmínek – *verifikace* (verifikace získaných výsledků vzhledem na životnost TO a příčinu opotřebení);
- VI. vytváření souborů možných MS pro konkrétní případ – *konkretizace* (kombinace různých druhů opotřebení projevující se komplexně na TO);
- VII. posuzování spolehlivosti TO – *evaluace* (vzhledem na životnost, výkonnost a bezpečné provozování).

V praxi je velmi nesnadné identifikovat iniciaci opotřebení a jednotlivé etapy degradačního procesu na základě studia projevů na povrchu, vyžaduje to zkušenosti z řešení inverzních tribologických problémů (obr. 1.12). Příkladem je povrch oceli vystavený neidentifikovatelnému opotřebení, uvedený na obr. 1.13. Vznikající „puchýře“ odrážejí odezvu materiálu na působící zatížení na povrch.

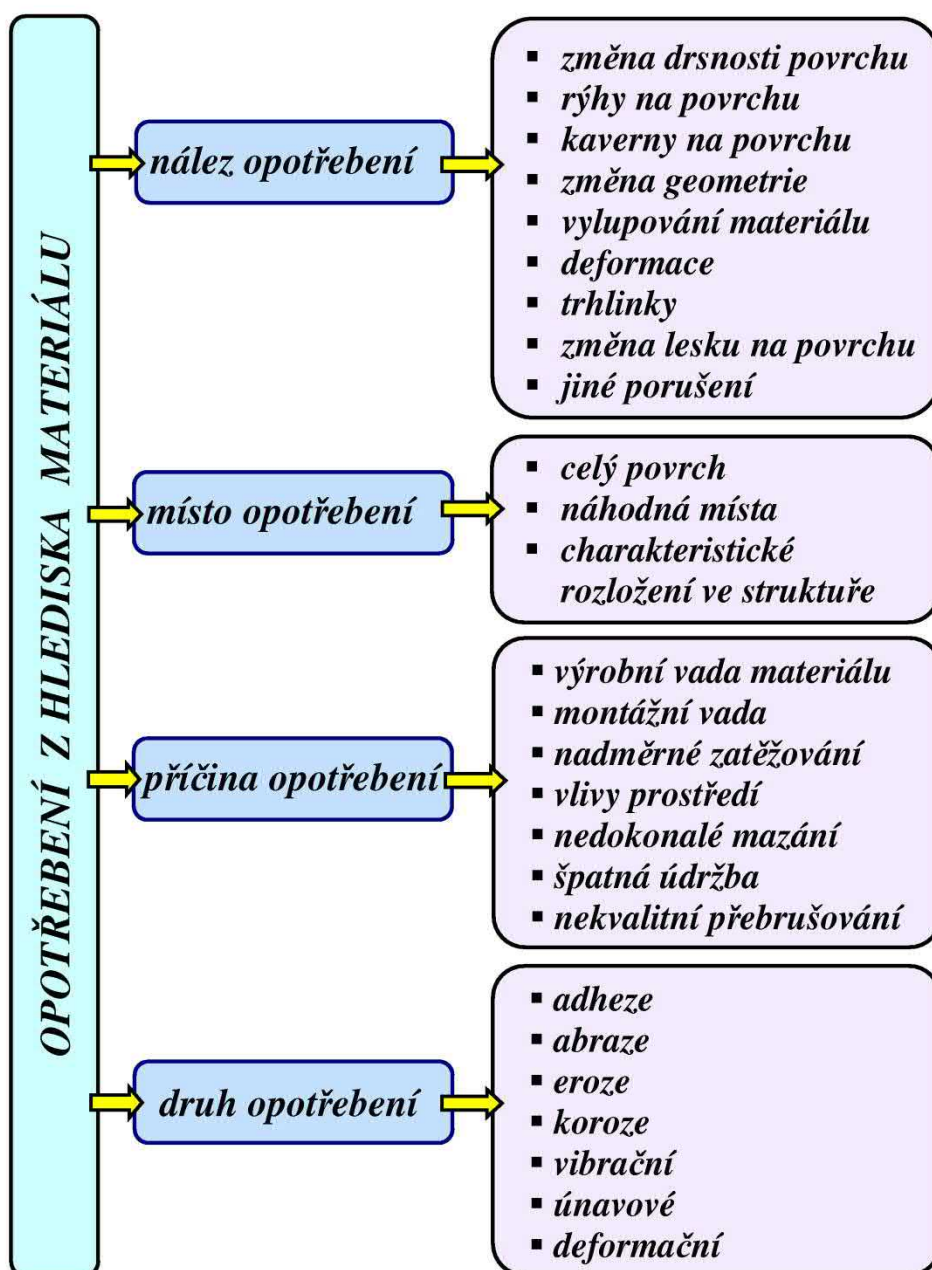


Obr. 1.12 Projevy na povrchu TO z hlediska mezních stavů



Obr. 1.13 Odezva materiálu na povrchové zatížení

Spolehlivost a životnost technických objektů souvisí s výskytem mezních stavů, které se mohou objevit na TO v průběhu jeho života. V souvislosti s výskytem opotřebení na povrchu TO je nutné identifikovat tyto procesy z hlediska materiálu, obr. 1.14.



Obr. 1.14 Identifikace opotřebení z hlediska materiálové pojetí

Při identifikaci opotřebení z hlediska materiálového pojetí vycházíme z jeho projevů:

- *nález* opotřebení – kvantifikace změn na povrchu materiálu může být vyjádřena např. parametrem drsnosti, deformace, geometrie, změnou hmotnosti, velikostí trhlin, úbytkem hmotností aj.,
- *místa* opotřebení – určení lokality, kde se projev opotřebení nalézá, zda se jedná o aktivní povrch, náhodné místo nebo o jinou plochu na sledovaném TO,
- *příčiny* (příp. iniciace) opotřebení – kvalita materiálu, technologie výroby, vliv prostředí, vliv provozu, údržbový systém aj.,
- *druhu* opotřebení – kde na základě nejvýraznějších projevů lze přiřadit charakteristické opotřebení.

2. KOMPLEXNÍ PŘÍSTUP K TVORBĚ TECHNICKÉHO OBJEKTU

Odolnost technického objektu proti poškozování bude záležet na kvalitě provedení TO. Historie výroby bude odrážet všechny zainteresované složky, které se na vytvoření konstrukčních prvků podílely v jednotlivých etapách. Tvorba TO bude vyžadovat komplexní a systémový přístup všech zúčastněných. Hlavně to jsou:

Projektanti a konstruktéři

Navrhují technický objekt se snahou o vyloučení budoucích potenciálních mezních stavů v provozu na jednotlivých konstrukčních prvcích. TO je navržený v návaznosti na paralelní inženýrství. Projektanti i konstruktéři musí vycházet z inženýrských, technologických, materiálových, chemických, ekonomických a ekologických analýz.

Materiáloví inženýři

Navrhují nové materiály (kovové, nekovové a složené) s respektováním technologických procesů výroby a případného tepelného zpracování. Určují a stanovují materiálové charakteristiky experimentálním modelováním, predikují potenciální zdroje MS a z nich možné degradační procesy součástí z nových nebo známých materiálů, v provozu při jejich zatížení. Zabezpečují expertní činnost na TO, po dosažení jejich MS, které vyústily do celkové havárie. Postup vyšetřování havárie, porušení materiálu jako konstrukčního prvku nebo konstrukce musí brát v úvahu:

- 1) *Rozsah porušení* – důležitost součásti, nebo konstrukce jako celku.
- 2) *Identifikaci* – získání všech informací týkající se:
 - a) výrobce materiálu – materiálového atestu,
 - b) tepelného zpracování a jeho režimu,
 - c) vlivu předchozích technologií,
 - d) provozování součástí – čas, změny namáhání, nepředvídané okolnosti,
 - e) stanovení vzniku a průběhu poruchy, havárie – popis,
 - f) kontroly lomové plochy, zhodnocení charakteru porušení, popis šíření trhliny,
 - g) zakreslení do technické dokumentace a vytvoření potřebné fotodokumentace,
 - h) zpracování informací z identifikace.
- 3) *Defektoskopické zkoušky*, využití nedestruktivních metod pro kontrolu neporušených částí TO.
- 4) *Vybrání místa* – pro odebrání vzorků je důležitá volba oblasti, která vypovídá o iniciaci porušení materiálu.
- 5) *Mechanické zkoušky* – pro získání a porovnání materiálových charakteristik šetřené součásti jako jsou: R_e , R_m , KC, HRB, HV, HB, K_{IC} , ...
- 6) *Metalografické hodnocení* pro určení:
 - a) velikosti zrna,
 - b) výskytu intermediálních fází,
 - c) čistoty struktury,
 - d) charakteru struktury,
 - e) struktury po tepelném zpracování,
 - f) výskytu trhlin a jiných vad.

- 7) *Fraktografické zkoušky* se využívají pro:
- určení charakteru lomové plochy,
 - určení druhu porušení,
 - popis lomové plochy,
 - určení iniciace vzniku trhlin.
- 8) Jiné *speciální zkoušky*, podle typu namáhání to mohou být:
- zkoušky opotřebení,
 - zkoušky korozní,
 - zkoušky kavitační,
 - zkoušky technologické,
 - a jiné simulované zkoušky vzorků, nebo celých konstrukčních prvků.
- 9) *Deformačně napěťový diagram ε - σ* pro použitý materiál.
- 10) *Přehodnocení celé konstrukce*, vazby jejích prvků, pevnostní výpočty atd.
- 11) *Lomová mechanika* a její využití pro:
- popis trhliny,
 - určení rychlosti šíření trhliny,
 - určení citlivosti materiálu na porušování.
- 12) Jiné *vyžádané zkoušky*, podle rozsahu porušení a velikosti havárie, při nich může být použito výpočtové modelování, simulující počátek a celý průběh havárie.

Vznik oboru materiálové inženýrství ukázal potřebu vzájemné provázanosti s jinými obory a specializacemi, které se podílí na vytvoření TO, bezpečném provozování až po jeho likvidaci. Toto zobrazuje struktura obr. 2.1 „Aplikační materiálové inženýrství“.

Konstrukční návrhy jak pro techniku, užitkovou potřebu, biomedicínu nebo jiné specifické použití musí zahrnovat všechny potřebné analýzy (ekonomické, ekologické, inženýrské aj.) pro správné provozování vyrobených součástí, které mají stanovenou dobu života a charakter ukončení (recyklace, odpad).

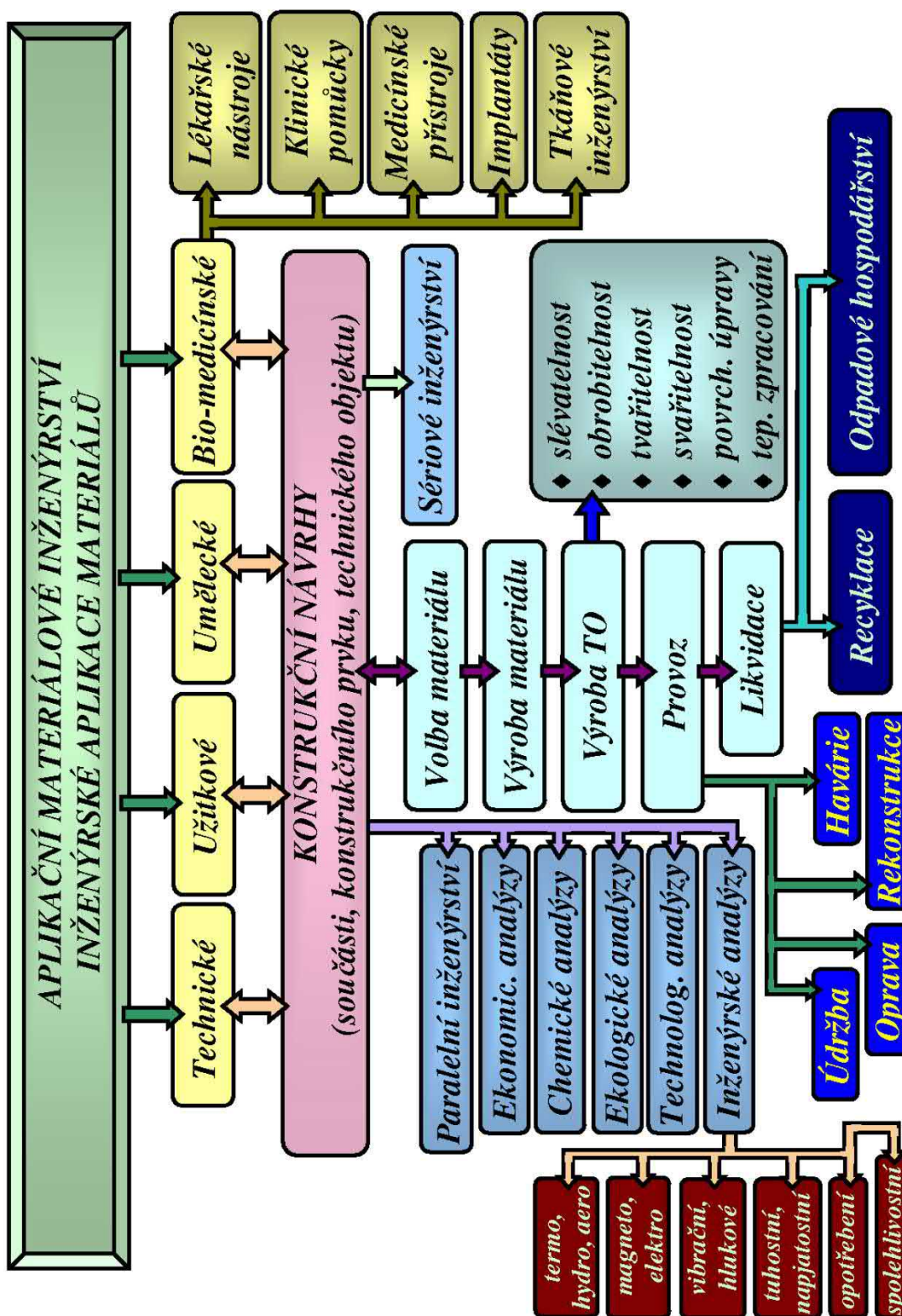
Technologové

Jsou důležitým článkem celého výrobního cyklu. Zabývají se výrobou TO s využitím technologií slévání, tváření, svařování, obrábění a tepelného zpracování. Respektují druh materiálu a jeho technologické vlastnosti.

Úlohou technologů je minimalizovat výskyt výrobních vad způsobených v procesu vzniku polotovarů, jako např. u:

- odlitků – bubliny, řediny, zalité tuhé kapky, částičky formovacího materiálu, nedokonalý povrch, struktura, chemická heterogenita;
- hutnicky tvářených polotovarů – trhliny, zdvojení, zaválcované průhyby, zaválcované nekovové vměstky, sulfidy, oxisulfidy, textura, napěťové stavy, zoxidovaný povrch;
- výkovků – vločky, zakované průhyby a vnitřní trhliny, nedodržení geometrie, strukturní, chemická heterogenita;
- svarů – trhliny, studené spoje, póry, neprovařený kořen, nedokonalé natavení materiálu, krátery, bubliny, deformačně napěťové stavy;

- o tepelného zpracování – povrchové a podpovrchové trhliny, oduhličený nebo zoxidovaný povrch, deformace zrn, zhrubnutí zrna, nehomogenita struktury aj.



Obr. 2.1 Aplikační materiálové inženýrství

Inženýři z oboru mechaniky těles

Na základě vstupních údajů, získaných od materiálových inženýrů, konstruktérů a zkušebních techniků, provádějí pevnostní výpočty a výpočtové modelování deformačně-napěťových stavů pro spolehlivou a bezpečnou funkci prvků v celém TO.

Zkušební technici

Zabývají se experimentálním modelováním na zkušebních vzorcích a testováním konkrétních konstrukčních prvků popř. celků TO. Zkušební metoda musí vyloučit vznik potenciálních mezních stavů součásti při jejím daném zatížení v provozu.

Techničtí diagnostici

S ohledem na výskyt možných mezních stavů provozovaných součástí, dílců, skupin nebo celého TO, zajišťují průběžné nebo časově lokalizované nedestruktivní kontroly s využitím metod, které jsou schopné detekovat, identifikovat a lokalizovat vznikající poruchy.

Provozní technici

Vzhledem k možným mezním stavům na TO monitorují jeho provoz. V součinnosti se systémem údržby garantují spolehlivost a bezpečnost jeho provozování.

Faktory ovlivňující porušení TO

Každé těleso (TO) má svou strukturu, geometrický tvar, velikost, specifické vlastnosti, morfologii povrchu, vazby s okolím aj. Aktivace povrchu s okolím vyvolá na objektu změnu, která může vyústit do MS porušení. Celý proces porušování závisí na výběru materiálu, technologii výroby, charakteru zatěžování, provozním využití, systému údržby.

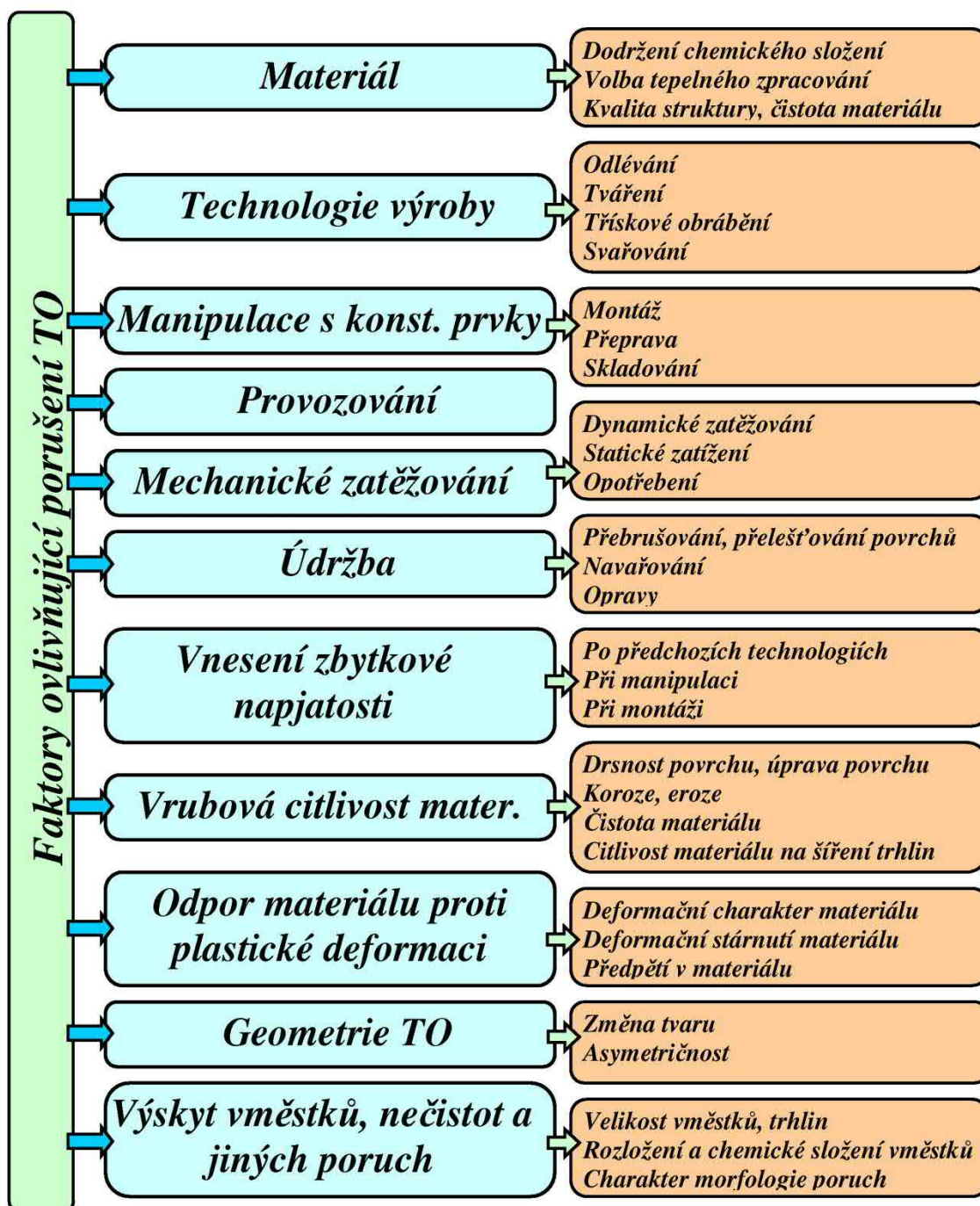
Včasná identifikace MS materiálu TO je základním předpokladem pro věrohodné posuzování spolehlivosti technických objektů.

Podstatné atributy související s MS pak jsou:

- *Aktivace objektu* z jeho okolí, což je např. různý způsob vnějšího zatěžování.
- *Ovlivňující procesy* působící na objekt, s nimi souvisí např. plastická deformace, zdrsnění a změna kvality povrchu, stabilita struktury, geometrie aj.
- *Určující MS* jsou parametry objektu zahrnující velikost opotřebení, únavu materiálu, změnu chemického složení povrchové vrstvy aj.
- *Mezní, určující parametry* – zahrnují vznik trhlin a jejich velikost, lomy, změnu mechanických vlastností povrchových a podpovrchových oblastí aj.
- *Environmentální MS* – zahrnuje problémy související s hlučností, provozem, kmitáním celých soustav, změn elektrických charakteristik, kdy např. dotykem kovových částí dochází k vzniku bludných proudů, které celý proces opotřebení mohou superponovat.

Z uvedené struktury obr.2.2 je vidět, že vznik a charakter porušení TO bude záležet nejen na volbě materiálu a jeho technologické přípravě, ale na řadě dalších faktorů. Bude otázkou, jak zatížení (dynamické, statické) ovlivní iniciaci porušení a jak bude k porušování přispívat i údržba a manipulace s technickým objektem. Každý z těchto uvedených faktorů může být iniciátorem porušení nebo jeho ovlivňujícím činitelem.

Vzhledem k náhodnému charakteru procesů porušování, a tím i poškozování povrchů, je volba a proces experimentálního modelování specifická pro každý druh opotřebení. Experimenty je potřebné realizovat na statisticky významném množství vzorků a výsledky měření statisticky zpracovávat. Jsou-li nezávislé veličiny spojité, pak je možno pro statistické zpracování využít regresní analýzu, takže výsledky mohou mít podobu matematicky vyjádřených regresních závislostí.



Obr. 2.2 Faktory ovlivňující porušení TO

Mezní (okrajové) podmínky však mají hypotetický charakter, který nevystihuje fyzikální proces porušování. Pevnostní hodnoty se stanovují experimentálně, jsou globálními charakteristikami materiálu, zahrnující v sobě veškeré informace o jeho mikrostruktuře.

Neexistují mezní (okrajové) podmínky, určující závislost mezi veličinami způsobujícími poškození povrchů těles a veličinami popisujícími dosažení příslušného mezního stavu poškození.



Korozní opotřebení kovových schodů

3. PŘEHLED ZÁKLADNÍCH POŽADAVKŮ NA TECHNICKÝ OBJEKT

Technický objekt musí vyhovovat všem normám a předpisům pro správnou funkci, proto posuzování změn na TO musí být v souladu se všemi požadavky, které jsou na technické objekty kladené před jejich uvedením do provozu, jako jsou:

- *Jakost* – souhrn vlastností TO, které podmiňují schopnost objektu uspokojovat stanovené potřeby v souladu s jeho určením.

Mezi základní vlastnosti pro technické a funkční aplikace patří:

- spolehlivost,
 - bezporuchovost,
 - životnost,
 - bezpečnost,
 - pohotovost,
 - udržitelnost,
 - materiálová náročnost,
 - energetická náročnost,
 - vlastnosti ergonomické, estetické, ekologické,
 - unifikace,
 - normalizace a jiné.
- *Spolehlivost (pohotovost)* – je základní vlastnost vytvořeného objektu spočívající ve schopnosti plnit požadované funkce při zachování stanovených ukazatelů provozu v daných mezích a v čase podle určených technických podmínek. Spolehlivost je obecná, objektivní a komplexní vlastnost, která podle určení TO a podmínek jeho provozu může zahrnovat ostatní dílčí vlastnosti jako:
 - *Bezporuchovost (reliability)* – je schopnost objektu plnit nepřetržitě požadované funkce v průběhu stanovené doby a za daných technických podmínek. Kvantitativně ji vyjadřujeme např. pravděpodobností bezporuchového provozu v daném intervalu.

Bezporuchovost podle ISO 8402 je „schopnost objektu nepřetržitě plnit požadovanou funkci v daných podmínkách a v daném časovém období“.

Norma ČSN 01 0102 definuje bezporuchovost (inherent reliability) jako „schopnost objektu plnit nepřetržitě (nebo s plánovanými přestávkami) a bez poruch požadované funkce po stanovenou dobu a ve stanovených podmínkách“.
 - *Zajištění údržby* – spočívá v řídicích, organizačních, materiálních, logistických aj. opatřeních k všestrannému zajištění prováděné údržby.
 - *Pohotovost* – je vlastnost objektu zabezpečující bezporuchovost a opravitelnost objektu v podmínkách provozu. Pohotovost lze vyjádřit jako pravděpodobnost, že se objekt bude nacházet v provozuschopném stavu.

- *Životnost* (durability) – je schopnost objektu plnit nepřetržitě požadované funkce do dosažení stanovené meze nebo mezního stavu.

Životnost podle ISO 8402 je „schopnost objektu plnit požadovanou funkci v daných podmínkách používání a údržby do dosažení mezního stavu, který lze charakterizovat ukončením užitečného života, nevhodnosti z důvodu ekonomických, technických nebo jiných závažných faktorů.“

Podle ČSN 01 0102 je životnost (uváděná jako longevity) „schopnost objektu plnit požadované funkce do dosažení mezního stavu při zadaných podmínkách používání a údržby“.

Tímto pojmem se posuzuje spolehlivost u tzv. kumulativních mezních stavů.

Parametrem pro popis a kvantifikaci životnosti jsou:

- doba života, vymezená jako časový interval od počátku zatěžování objektu do dosažení mezního stavu;
 - nebo zbytková doba života jako časový interval od okamžiku posuzování spolehlivosti objektu do dosažení mezního stavu při provozním zatížení.
- *Opravitelnost* – je vlastnost objektu spočívající ve způsobilosti zjištění příčiny vzniku poruch a schopnosti odstranění jejich následků opravou.
 - *Bezpečnost* (safety) – je vlastnost objektu neohrožovat lidské zdraví.

Parametrem pro kvantifikaci bezpečnosti je koeficient bezpečnosti. Obecně je definován jako poměr mezní hodnoty toho parametru, který vyvolává mezní stav k provozní hodnotě stejného parametru.

Bezpečnost je v normě ISO 8402 chápána jako „vlastnost objektu při plnění požadovaných funkcí být ve stavu, ve kterém je riziko ohrožení zdraví, života osob, životního prostředí nebo poškození majetku omezováno na přijatelnou úroveň“.

Podle normy ČSN 01 0102 je bezpečnost vymezena jako „vlastnost objektu neohrožovat lidské zdraví nebo životní prostředí při plnění předepsaných funkcí po stanovenou dobu a za stanovených podmínek“.

Norma IEC 50 (191) popisuje bezpečnost jako „schopnost objektu nezpůsobovat v daných podmínkách provozu a po stanovenou dobu kritické nebo katastrofální poruchy“.

Základní pojmy pro popis probíhajících procesů na TO

- *Technický objekt* – je předmět stanoveného určení uvažovaný z hlediska jeho zamýšleného poslání, jehož spolehlivost se zkoumá, studuje nebo zkouší.
- *Prvek* – je část TO, která je součástí jeho ucelené struktury.
- *Systém* – je souhrn vzájemně spojených prvků určených k plnění předepsaných funkcí. Lze ho definovat rovněž jako abstraktní objekt vytvořený na TO z hlediska řešeného problému, přičemž jeho strukturu tvoří ty formalizované prvky struktury objektu, které jsou z hlediska tohoto problému na určité rozlišovací úrovni jeho řešení podstatné.

- *Soustava* – je reálný nebo abstraktní objekt se systémovými vlastnostmi, který je z určitého hlediska předmětem zájmu subjektu.
- *Interakce* – je působení mezi prvky prostřednictvím vzájemných aktivovaných vazeb.
- *Parametr* – je měřitelná veličina, která popisuje technické, ekonomické nebo provozní vlastnosti TO. Mezní hodnoty parametrů jsou kritériem pro dobu funkce objektu, jejichž překročení se stává kritériem poruchy.

3.3. JEVY A STAVY NA TECHNICKÉM OBJEKTU

- *Porucha* – spočívá v omezení nebo ukončení provozuschopnosti technického objektu. Je to stav, kdy došlo k překročení mezi stanovených daným parametrem.
- *Poškození* – spočívá v ukončení výborného stavu objektu.
- *Provozeroschopný stav* – je stav TO, ve kterém je objekt schopný plnit stanovené funkce s dodržением hodnot parametrů určených technickou dokumentací.
- *Mezní stav* – je stav objektu, ve kterém je přerušeno další využití TO kvůli neodstranitelné příčině, což může být:
 - porušení bezpečnostních požadavků,
 - překročení předepsaných mezí,
 - snížení efektivnosti pod stanovenou hodnotu,
 - nevyhnutelnost vykonání opravy.
- *Udržovatelnost* – je schopnost objektu předcházet a zároveň zjišťovat příčiny vzniku poruch. Poruchy odstraňujeme předepsanou údržbou a opravou.
- *Údržba* – je činnost vykonaná za účelem udržení TO v provozuschopném stavu po dobu životnosti stanovenou technickými podmínkami, kam patří kontrola a předběžné preventivní údržbové zásahy.
- *Oprava* – je pracovní činnost za účelem odstranění poruch a navrácení objektu do provozuschopného stavu.
- *Obnova* – je jev spočívající v obnovení schopnosti TO po poruše plnit znovu požadovanou funkci podle technických podmínek.
- *Sledované parametry*, které signalizují první změny na objektu lze nazvat – *pozorované proměnné veličiny*, které si provozovatelé stanovují na základě složitosti TO.

Sledované proměnné veličiny technického objektu

Jsou vyjádřené časově limitující veličinou označenou jako:

- doba *do první poruchy* – je doba provozu TO do objevení první poruchy;
- doba *mezi poruchami* – je doba mezi dvěma po sobě jdoucími poruchami;
- doba *provozu* – je čas potřebný pro vykonání určité práce objektu. Udává se buď časem nebo jinou veličinou v závislosti na čase (počet km, množství spotřebovaného paliva, počet odpracovaných Mh, počet cyklů, zapnutí aj.);
- doba *prostojů* – je čas, kdy TO není v provozu;
- doba *poruchového prostoje* – je doba, kdy v důsledku poruchy technický objekt není schopný plnit požadovanou funkci podle technických podmínek.

Dále to mohou být vytyčené doby, týkající se konkrétního TO, který je průběžně opravovaný nebo udržovaný, jako je např.:

- doba *preventivní údržby* přístroje, stroje nebo zařízení;
- doba *opravy* přístroje, technického objektu;
- doba *aktivní opravy* přístroje;
- doba *zálohového prostoje* přístroje;
- doba *obnovení provozuschopnosti* přístroje atd.

Poruchy a jejich charakteristiky

Poruchy, které mohou vznikat na TO, lze dělit podle jejich charakteru na poruchu:

- *náhlou* – je porucha vzniklá skokovou změnou, která není předvídatelná a nezávisí na době provozu;
- *postupnou* – je porucha vznikající postupnou změnou hodnot jednoho nebo několika parametrů TO. Může být předvídatelná na základě prohlídek nebo údržby. Je závislá na době provozu;
- *úplnou* – je nežádoucí změna jednoho nebo více parametrů objektu závisících na úrovni stanovené technickými podmínkami;
- *částečnou* – nebrání používání objektu i když dochází k poruše jednoho nebo více parametrů objektu;
- *havarijní* – je náhlá a úplná porucha celého objektu;
- *degradační* – je postupná nebo částečná porucha snižující celkovou kvalitu provozu.

V současné době se používá *kategorizace důsledků poruch*:

- ▲ *MINOR* – je malá porucha, která neovlivní výkon TO pod stanovenou hodnotu;
- ▲ *MAJOR* – je porucha, která vyvolá závažný důsledek, ale nesnižuje funkční schopnost TO pod přijatelnou limitní hodnotu, zvládnutelnou obsluhou;
- ▲ *CRITICAL* – je porucha, která vyvolá kritický důsledek, který by mohl snížit funkčnost TO. Pokud by tato porucha nebyla včas odstraněna, mohla by vést až k havárii;
- ▲ *CATASTROPHIC* – katastrofický důsledek vyvolá taková porucha, která vede k poškození TO vedoucímu k ukončení bezpečného chodu technického objektu s možnými ztrátami nebo ohrožením lidských životů.

Periodizace poruch

Podle intenzity poruch lze sledovat období, které je potřebné pro konkrétní opakující se opravy na TO. Jedná se o:

- období *časných poruch*, které vznikají velmi brzy – je počáteční úsek doby používání, během kterého se intenzita poruch zmenšuje;
- období *konstantní intenzity poruch* – je období, během kterého vznikají poruchy přibližně se stejnou intenzitou;
- období *poruch dožitím* – je závěrečný úsek doby používání, během kterého se intenzita poruch zvětšuje.

Ukazatel spolehlivosti

Ukazatel spolehlivosti – je kvantitativní charakteristika jedné nebo více vlastností, která tvoří spolehlivost TO.

Ukazatelé bezporuchovosti

- *Pravděpodobnost poruchy* – je pravděpodobnost, že v daném časovém intervalu vznikne porucha technického objektu.
- *Pravděpodobnost bezporuchového provozu* – je pravděpodobnost, že v daném časovém intervalu nevznikne porucha.
- *Hustota pravděpodobnosti poruchy* – určuje, že dochází k poruše TO za malý časový úsek po daném okamžiku, dělený velikostí tohoto intervalu.
- *Intenzita poruch* – je podmíněná hustota pravděpodobnosti poruchy neobnoveného objektu za malý časový úsek určená pro daný okamžik času za podmínky, že do tohoto okamžiku porucha nevznikla.
- *Střední doba provozu bez poruchy* – je střední hodnota doby provozu objektu do první poruchy nebo střední hodnota doby provozu objektu mezi poruchami.
- *Parametr proudu poruch* – je hustota pravděpodobnosti vzniku poruchy obnoveného TO určovaná pro uvažovaný okamžik.

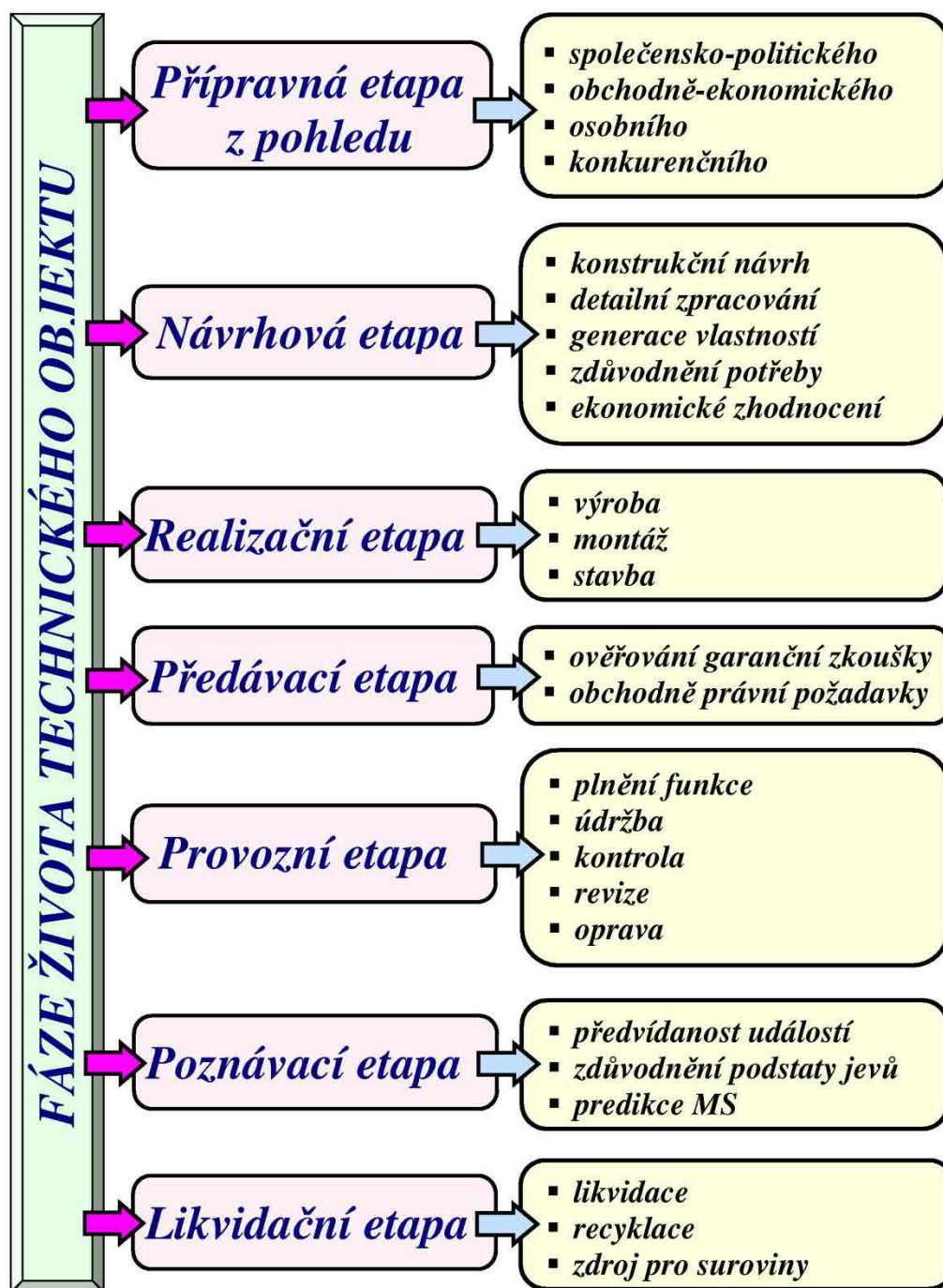
Ukazatelé životnosti

- *Střední život* – je střední hodnota technického života technického objektu.
- *Gamaprocentní život* – je provozní doba, během které TO nedosáhne mezní stav s pravděpodobností gama procent.



Detail vypadnuté části na točivých schodech

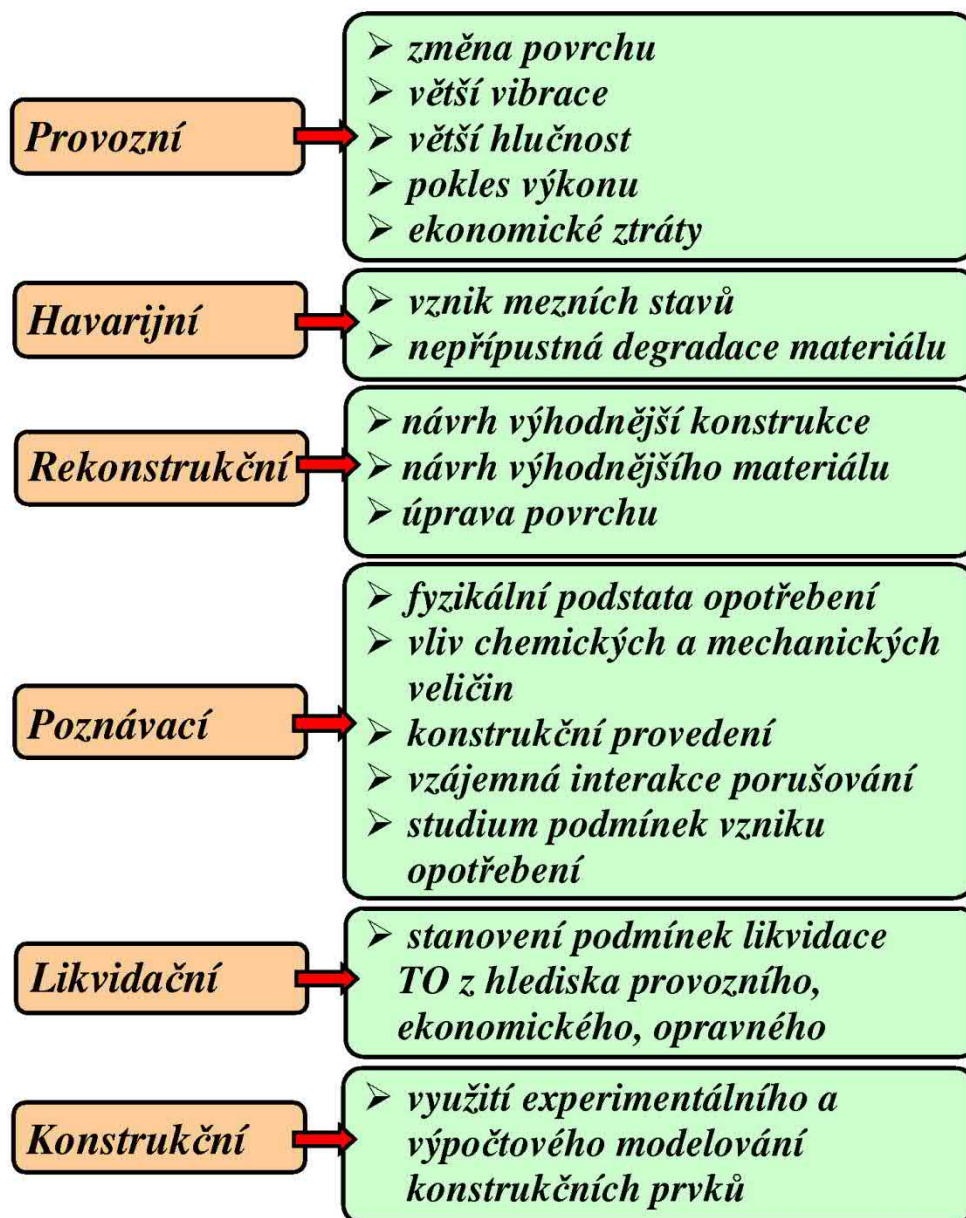
Fáze života technického objektu – obr. 3.1, vždy obsahuje těchto 7 etap.



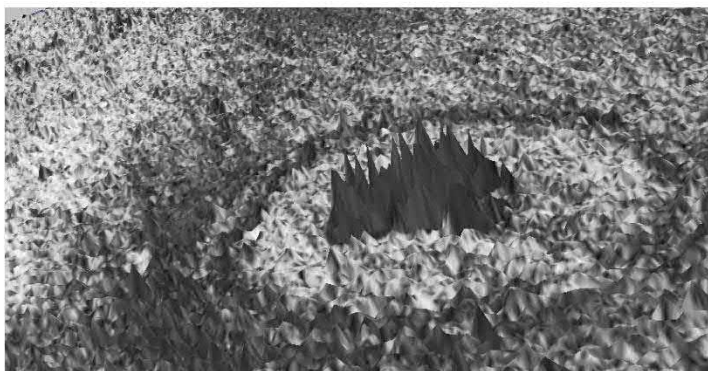
Obr. 3.1 Fáze života technického objektu

Typy problémů v technické praxi

S opotřebením povrchů souvisí řešení problémů, které nastaly v provozní etapě. Vyznačují se vždy nějakou negativní změnou, která avizuje vznik MS nebo takové nepřipustné degradace, která může vést až k havárii TO. Na základě získání poznatků o podstatě opotřebení na daném TO a všeho co s tímto opotřebením souvisí, lze navrhnout potřebné opatření pro dodržení stanovené doby technického života s ukončenou recyklací nebo jeho likvidací (obr. 3.2).



Obr. 3.2 Problémy související s opotřebením

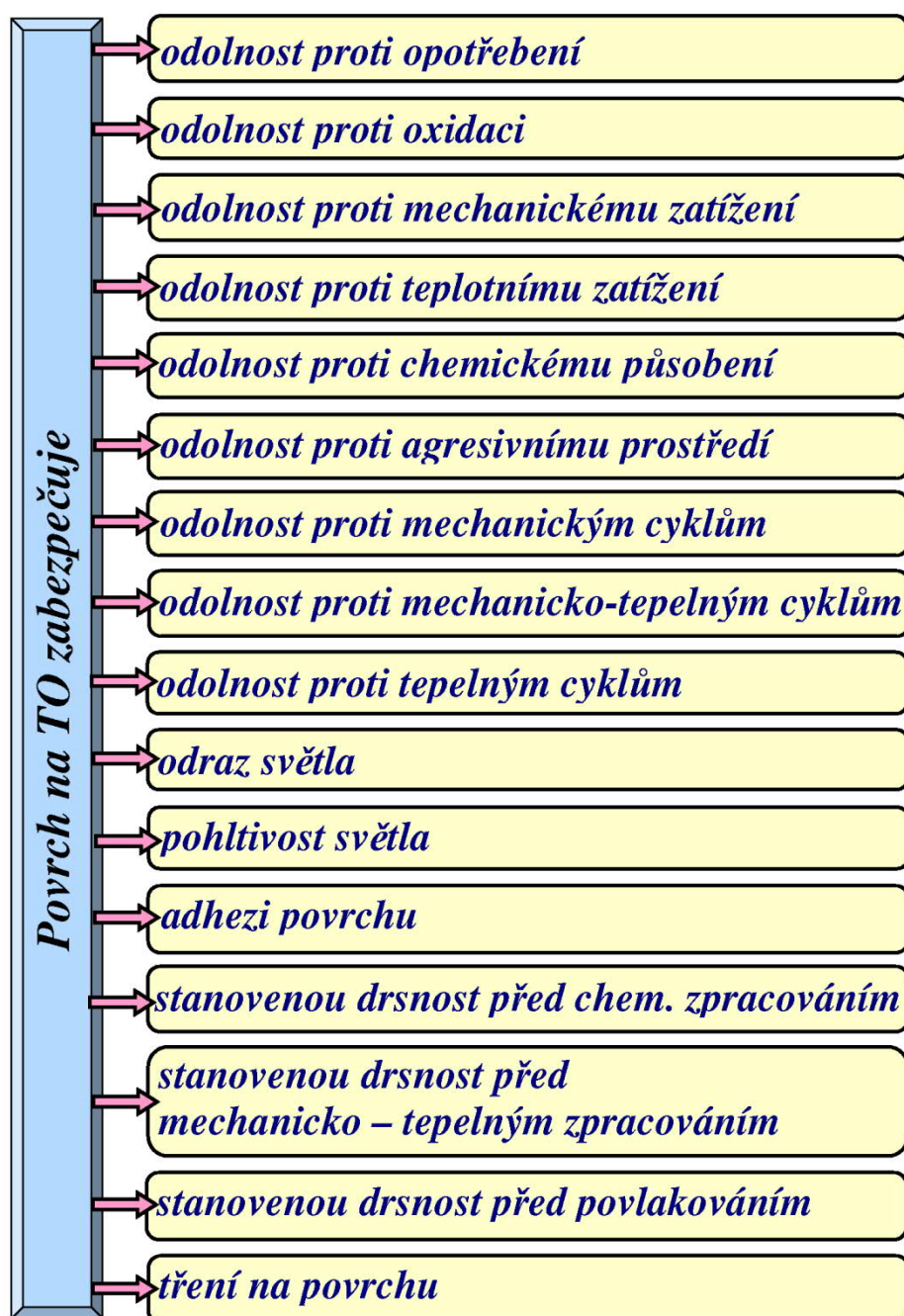


Zoxidovaný povrch oceli v pohledu 3D

4. ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA POVRCHŮ TECHNICKÉHO OBJEKTU

Volný povrch kovů představuje velký soubor zrn, tvořící rozhraní mezi pevnou fází a okolím.

Okolí na povrchu technického objektu aktivuje různé způsoby porušení soudržnosti materiálu. Povrch proto musí zabezpečovat odolnost vůči jeho poškozování se zachováním všech strukturních, tribologických, optických, geometrických a funkčních vlastností, obr. 4.1.



Obr. 4.1 Funkce povrchu

Charakteristickou vlastností každého povrchu pevné fáze je změna symetrie sil působící v krystalové mřížce. Zatímco uvnitř objemu jsou tyto síly v různých směrech navzájem vykompenzovány, povrchová vrstva je v tomto smyslu „nenasyčená“. Tato okolnost může mít následující důsledky, obr. 4.2:

- vzdálenost povrchové vrstvy od zbývajícího krystalu může být jiná než je vzdálenost ekvivalentních rovin rovnoběžných s povrchem uvnitř objemu, pak hovoříme o relaxaci povrchu. Mírou relaxace je změna mezirovinné vzdálenosti v procentech pro danou orientaci;
- uspořádání atomů v rovině povrchu může být odlišné od struktury ekvivalentní roviny v podpovrchové vrstvě. Uvnitř objemu krystalu se pak toto uspořádání dá nazvat jako rekonstrukce povrchu, což může být důsledkem toho, že daná krystalová plocha není v povrchu stabilní. K rekonstrukci povrchu může také dojít vlivem následné interakce s okolím;
- povrchová vrstva nemusí být rovinná, ale může být tvořena soustavou nových stabilnějších mikroplošek projevující se z makropohledu jako zvlněný povrch;
- neúplné nasycení povrchových vazeb má také za následek vznik silového pole, což vede k hromadění molekul plynu v blízkosti povrchu tj. k adsorpci. Tato „reaktivnost“ povrchu je závislá na charakteru elektronové struktury materiálu povrchu.

Charakter povrchu odráží relaxaci, rekonstrukci, vazbu atomů na povrchu i rovinnost. Fyzikální, chemické, mechanické a geometrické vlastnosti předurčují povrch podle jeho chování k dalšímu použití.

Tvar mikroskopických ploch na povrchu tělesa je závislý na velikosti povrchové energie, tj. energie potřebné k vytvoření nového povrchu o jednotkové ploše.

Pro stabilní plochy povrchu platí, že tato energie musí být minimální, což vyplývá z obecné podmínky pro termodynamickou rovnováhu soustavy:

$$dG = dG_v + dG_s = 0, \quad (4.1)$$

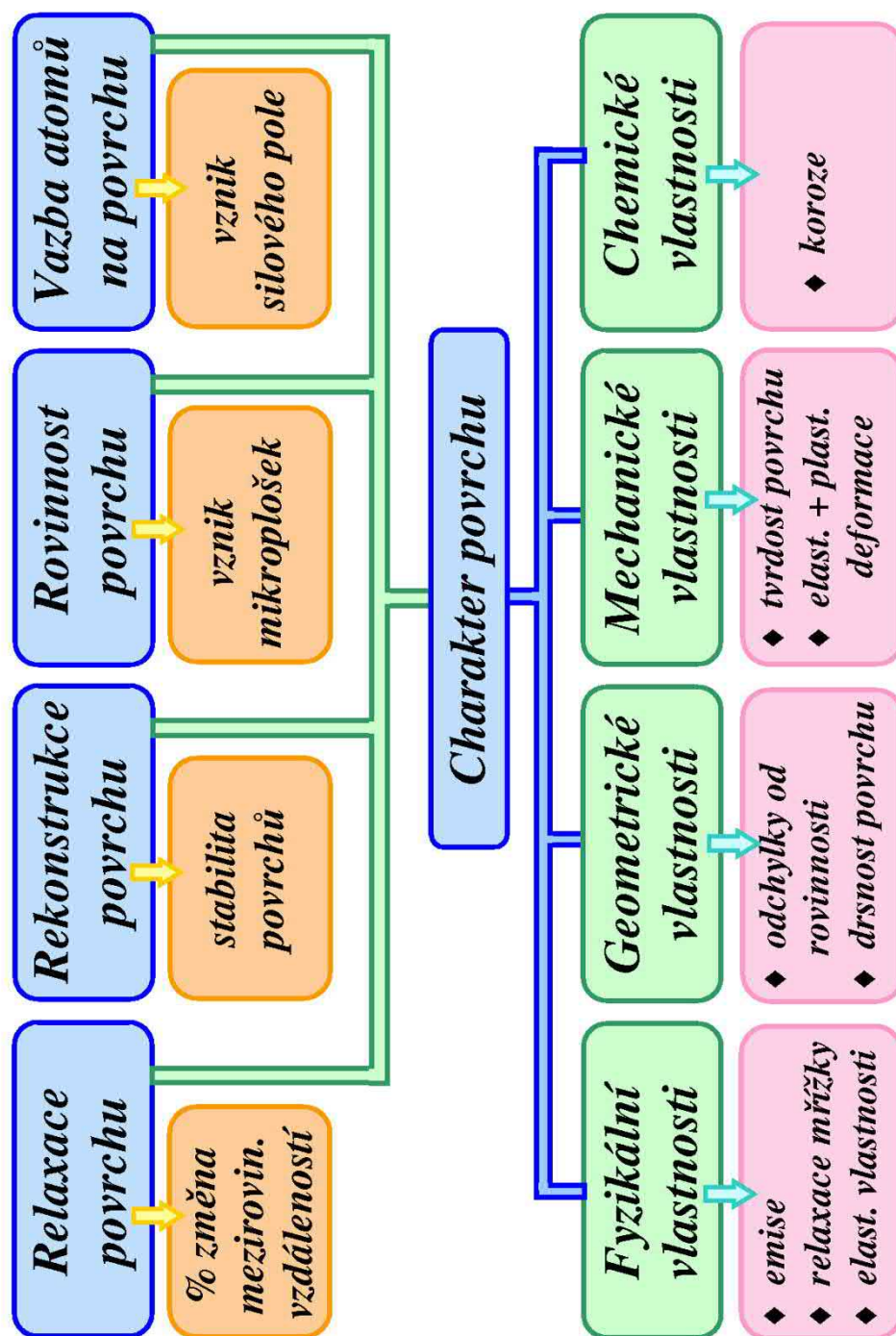
kde symbol G označuje Gibssovu energii a indexy v objemovou a s povrchovou složku této energie. Pro povrch pak platí, že $dG_s = 0$.

Z této podmínky vyplývají pravidla pro přirozený výskyt krystalové plochy v povrchu a tedy platí, že:

- 1) počet vazeb přerušených při vzniku plochy musí být minimální ve srovnání s ostatními plochami;
- 2) vzniklá plocha musí být elektronicky neutrální.

Rozdíly povrchu a vnitřního objemu kovu lze zobrazit průběhem potenciální energie elektronů a hustoty těchto stavů. Povrchové atomy si zachovávají svůj individuální charakter.

Elektronová struktura bude rozhodovat o chemické reaktivitě povrchu kovu.



Obr. 4.2 Interakce povrchu se strukturou

4.1. POVRCHOVÉ INTERAKCE

Volný povrch je vystavený převážně působení plynného prostředí, které je ovlivněno obsahem jednotlivých chemických prvků.

Povrchovou interakci plynů s pevnými látkami lze vyjádřit počtem nárazů molekul za 1 s na cm^2 .

Pokud by se každá letící molekula zachytila a vytvořila vazbu s povrchovým atomem kovu, pak by doba t , potřebná k úplnému pokrytí povrchu vzorku adsorpční vrstvou, byla:

$$t = \frac{10^{-4}}{p}, \quad (4.2)$$

kde p je tlak vyjádřený v jednotkách Pa.

Potom součin „ $t \cdot p$ “ je mírou pokrytí povrchu adsorbátem.

Koeficient pravděpodobnosti ulpění S je definovaný jako poměr rychlosti adsorpce dn/dt a počtu nárazů Z na ploše povrchu A :

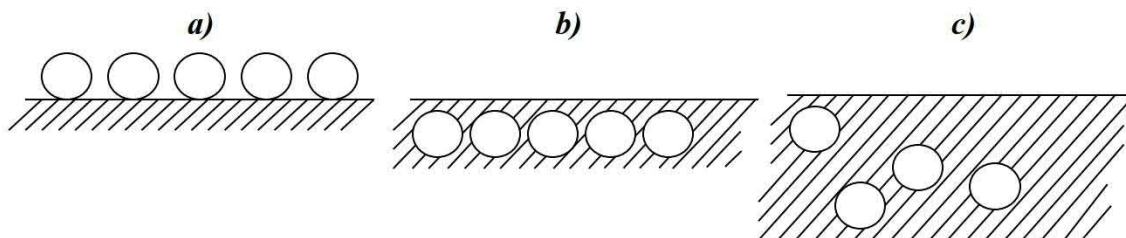
$$S = \frac{dn/dt}{Z \cdot A} \quad (4.3)$$

Tento koeficient závisí na teplotě a míře pokrytí povrchu adsorbátem. Jeho hodnoty se liší pro různé dvojice plyn – kov. Jsou-li molekuly adsorbátu vázány k povrchu chemicky, pak lze hovořit o chemisorpci.

Využití Van der Waalsových sil na povrchu značí adsorpci fyzikální, která probíhá zpravidla za nižších teplot.

Při interakci plynů s povrchy pevných látek mohou nastat tyto případy:

- vytvoření jedné vrstvy při chemisorpci, obr. 4.3 a,
- vytvoření více vrstev – fyzikální absorpci,
- pronikání částic do povrchové vrstvy (inkorporace), obr. 4.3 b,
- pronikání částic plynů do větších hloubek, obr. 4.3 c.



Obr. 4.3 Model vyleštěného povrchu materiálu

a) chemisorpce; b) inkorporace (včlenění, zabudování); c) absorpce

V důsledku povrchových reakcí, zvláště při vyšších teplotách, může dojít k segregaci nečistot z objemu kovu do jeho povrchu. Mohou to být převážně nečistoty na bázi uhlíku, kyslíku, síry, tedy prvků vytvářejících intermediární fáze a alkálie. Na proces tvorby struktury má výrazný vliv primární technologie a čistota výroby.

❖ Vliv čistoty na povrchové vlastnosti ocelí

Nadměrný obsah plynů v ocelích vede ke:

- zkřehnutí (vodíkové křehkosti),
- vzniku poruch soudržnosti (vznik vloček, bublin, tvorba trhlin),
- zvýšenému sklonu ocelí ke stárnutí apod.

Vysoký obsah síry:

- snižuje plasticitu,
- snižuje houževnatost,
- zhoršuje tranzitní chování ocelí.

Příliš vysoký obsah fosforu a povrchově aktivních prvků může vést ke zkřehnutí ocelí. Obsah dezoxidačních přísad v ocelích, jako je hliník, vápník a KVZ, je nutné dodržovat v poměrně úzkých tolerancích, aby nedocházelo např. ke vzniku bodlin a sekundární dezoxidaci při jejich příliš nízkém obsahu nebo ke zkřehnutí v důsledku tvorby shluků vměstků na bázi uvedených prvků, což se v povrchu projevuje jako iniciátor porušení.

Z hlediska vlivu mikročistoty na mechanické vlastnosti kovových materiálů je nejméně vhodná strukturně usměrněná distribuce vměstků, a to:

- v *mezidendrických* prostorách vedoucí až k mezidendrickým lomům, na jejichž iniciaci se podílejí např. sulfidy manganu II. typu, karbidy či karbonitridy niobu;
- na *hranicích primárních* austenitických zrn projevující se např. nežádoucími lasturovými lomy iniciovanými nitridy hliníku, sulfidy chrómu atd.;
- na *hranicích sekundárních* austenitických zrn, jak je to např. v případě nevyhovujících kamenitých lomů, které jsou způsobeny reprecipitací sulfidů manganu v průběhu přehřátí ocele.

Výskyt defektních lomů signalizující anomálie ve struktuře je zpravidla spojen s poklesem houževnatosti a dalších charakteristik plasticity. V případě následného tváření dochází k usměrnění vměstků do řádků, což se odráží ve zvětšení anizotropie mechanických vlastností a morfologii lomových ploch (břidličnaté anebo dřevité lomy).

Negativní vliv vměstků zejména na mechanické vlastnosti kovových materiálů, spočívá především v koncentraci napětí v jejich okolí v důsledku rozdílné teplotní roztažnosti vměstků a kovové matrice.

Vměstky mohou výrazným způsobem ovlivňovat únavové vlastnosti ocelí a to hlavně usnadněním stádia iniciace únavových trhlin. Rozhodující měrou se podílejí na charakteru iniciace jednotlivých jamek tvárného porušení a tedy mohou výrazně snižovat tvárnost a houževnatost ocelí.

S ohledem na negativní vliv vměstků na vlastnosti ocelí je nutné vždy kvantifikovat znečištění materiálů cizí příměsí. Používané metody hodnocení se zpravidla uplatňují na metalograficky připraveném povrchu zkoumáním:

- morfologie vměstků,
- jejich plošného podílu,
- velikostí,
- distribucí vměstků.

Údaje o mikročistotě současně poskytují informace o kvalitě metalurgického procesu.

Eliminace negativních vlivů na užité vlastnosti kovových materiálů lze dosáhnout snížením obsahu škodlivých prvků, což se úspěšně daří používanými postupy mimopecního zpracování ocelí anebo modifikací vměstků.

Modifikace vměstků je definovaná jako změna jednoho typu vměstku za typ jiný, méně škodlivý, a to zpravidla úpravou procesu dezoxidace.

❖ Dendritická segregace v oceli

Dendritická segregace v oceli vede k nerovnoměrnému rozdělení legur a doprovodných prvků, které jsou důsledkem nerovnovážného tuhnutí binárních a vícesložkových soustav. Velikost dendritické segregace je kromě materiálových konstant (schopnosti difuze v tuhé a kapalné fázi, rozdělovacích koeficientů, aj.) určena metalurgií a podmínkami tuhnutí.

Nerovnoměrné rozdělení příměsí v nízkolegovaných ocelích a zvyšování jejich koncentrace v mezidendritických prostorách může vést ke vzniku nerovnovážných fází (např. MnS II. typu, fosfidické eutektika), čím jsou ovlivňované následné fázové přeměny vedoucí ke vzniku strukturní heterogenity.

Dendritická segregace se také podílí na vzniku makroheterogenit jako jsou:

- vycezeniny,
- řádkovitost struktury apod.

Takto poznamenaná struktura je typická poklesem mechanických, fyzikálních a chemických vlastností.

Degradace vlastností je výraznější při současném vzniku strukturní heterogenity a „nerovnovážných“ fází. Výsledkem takovéto degradace jsou mezidendritické lomy, lomy ve vycezeninách, dendritické usměrnění fází aj. Z hodnocení lomových ploch lze řešit inverzně probíhající degradační proces v materiálu.

❖ Mikrosegregace v oceli

V mikrolokalitách matrice kovových materiálů jsou přítomny poruchy krystalové struktury a strukturní nehomogenity, ve kterých rozpuštěné atomy mají nižší hodnoty volné entalpie a které jsou potencionálními místy pro segregaci.

Mezi tato místa patří zejména:

- volné povrchy,
- hranice zrn,
- mezifázová rozhraní matrice – minoritní fáze,
- shluky dislokací a vakancí,
- vrstvené poruchy.

V případě rovnovážné segregace je obsah uvedených poruch konstantní a koncentrace segregujících příměsí se s rostoucím časem blíží pro daný systém saturované – rovnovážné koncentraci. Pokud se koncentrace strukturních poruch s časem mění, pak i úroveň segregace je časově proměnná, tedy vzniká nerovnovážná segregace.

Tloušťka vrstev segregovaných atomů se pohybuje v jednotkách atomů, parametr obohacení (tj. poměr obsahu příměsí v segregované vrstvě a v matrici) nabývá hodnot 10^2 až 10^6 . Je nutné zdůraznit, že i v těch případech, kdy jsou doprovodné prvky vázány na vměstky či jiné minoritní fáze, jsou současně rozpuštěné v matrici a i přes jejich malý obsah segregují, čímž podstatným způsobem mohou přispívat k degradaci vlastností materiálů.

Nejčastějšími degradačními účinky spojenými se segregací škodlivých příměsí a povrchově aktivních prvků jsou:

- popouštěcí křehkost (P, S, Sn, As, Sb,...),
- radiační křehkost (segregace Cu),
- vodíková křehkost (interakce povrchově aktivních prvků s vodíkem),
- korozní porušování (oxidace),
- žíhací trhliny ve svarových spojích aj.

Doprovodné a legující prvky spolu s minoritními fázemi nejsou v objemu kovu rovnoměrně rozloženy. Tato chemická a strukturní nehomogenita může nabývat rozměrů:

- makroskopických,
- mikroskopických,
- submikroskopických.

Charakter strukturní heterogenity bude v neposlední míře záviset na difúzitě atomů tvořící strukturu krystalických látek.

❖ Mechanismy difúze

Mechanismy difúze vycházejí z různé pohyblivosti částic v rozdílných skupenstvích hmoty a řídí se I. a II. Fickovým zákonem. A. Fick tyto zákony definoval matematicky.

I. Fickův zákon pro trojrozměrný prostor – platí:

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_y \frac{\partial c}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] \quad (4.4)$$

a lze konstatovat, že množství atomů, které projdou rovinou kolmou na směr difúze plochou S v čase t určuje I. Fickův zákon:

$$, \quad (4.5)$$

kde $\frac{\partial c}{\partial x}$ je koncentrační spád na vzdálenost x a D je difúzní součinitel.

Difúzní součinitel D výrazně závisí na teplotě:

$$D = D_o \cdot \exp \left[-\frac{Q}{RT} \right], \quad (4.6)$$

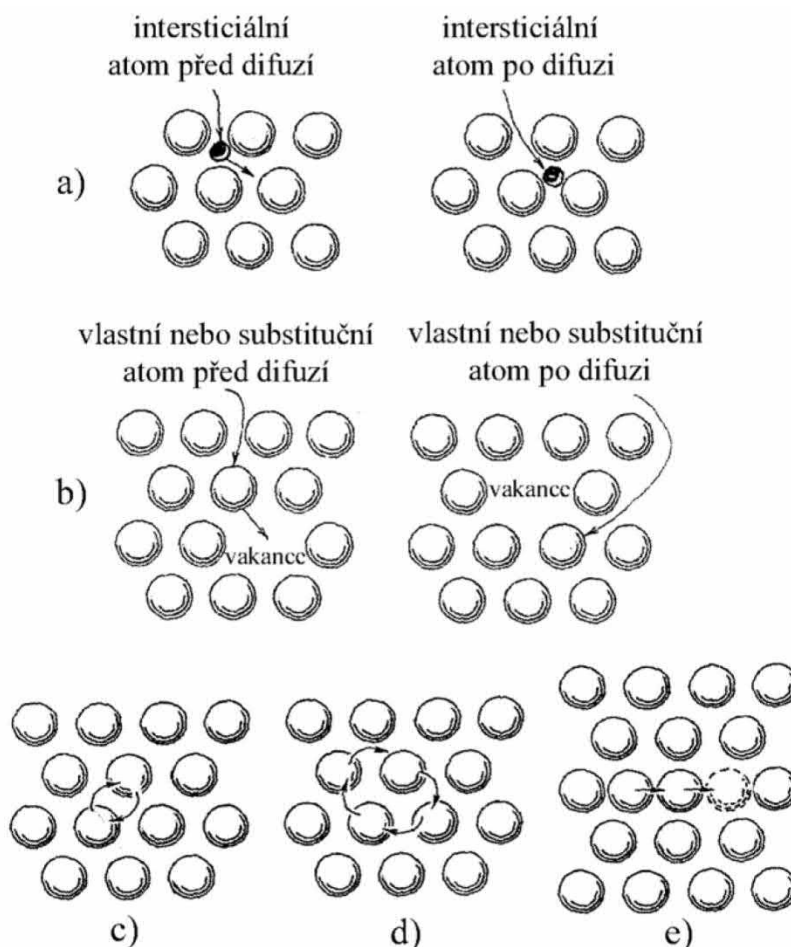
kde D_o je součinitel závisející na typu struktury, ale nezávislý na teplotě; Q je aktivační energie difúze závislá na koncentraci a struktuře látky, ve které k difúzi dochází; R je Boltzmanova konstanta; T je absolutní teplota.

Pro nestacionární stav, tj. když se koncentrace v bodě x mění s časem, platí pro trojrozměrný prostor II. Fickův zákon:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_x \frac{\partial c}{\partial x} \quad (4.7)$$

$$D = D_o \cdot \exp \left[-\frac{Q}{\partial x} \right] \quad (4.8)$$

Difúzní součinitel udává množství určité látky, která projde jednotkou plochy za jednotku času při jednotkové změně koncentrace v závislosti na vzdálenosti.



Obr. 4.4 Mechanismy difúze v krystalických materiálech

Mechanismy difúze v krystalických materiálech jsou zobrazeny na obr. 4.4. Dělí se na:

1. *Individuální* mechanismus:
 - *intersticiální* (obr. 4.4 a) – nezávisle na jiných atomech se jeden intersticiální atom pohybuje z jedné intersticiální dutiny do druhé za předpokladu, že splňuje podmínky pro vznik intersticiálního tuhého roztoku;
 - *vakantní* (obr. 4.4 b) – substituční atomy využívají ke svému přemístění blízká volná místa. Aktivační energie vakantního mechanismu musí být vyšší než u intersticiálního mechanismu o potřebnou energii na vytvoření vakancí a jejich pohyb.
2. *Skupinový* mechanismus jako organizovaný pohyb mnoha částic, který může být:
 - *výměnný* (obr. 4.4 c) – dochází při něm k výměně místa mezi dvěma sousedními stejně velkými atomy. Při průchodu atomů přes polovinu mezirovinné vzdálenosti dochází k velké distorzi mřížky. Teoretické výpočty aktivační energie ukázaly, že pro uskutečnění výměnného mechanismu je potřeba několikanásobně vyšší energie než pro přeskok atomu do vakance. Proto je pravděpodobnost výskytu výměnného mechanismu malá;

- *kruhový* (obr. 4.4 d) – jedná se o kruhovou výměnu míst, mezi některými sousedními atomy stejné velikosti. Energetická náročnost tohoto mechanismu je ve srovnání s energií potřebnou pro přeskok atomu do vakance vyšší asi o třetinu;
- *nepřímý intersticiální* mechanismus (obr. 4.4 e) – představuje postupný přesun atomu z jedné uzlové polohy do polohy intersticiální a do další uzlové.

Difúze je v krystalických materiálech do určité teploty silně urychlována poruchami krystalové mřížky jako jsou vakance, interstice a jiné bodové poruchy.

Charakter povrchů lze potom dělit podle druhu materiálu, který povrch tvoří, na:

- homogenní
- a heterogenní.

Homogenní povrchy typické pro monokrystaly nacházejí své uplatnění v elektronice, kde se využívají jejich fyzikální vlastnosti.

Reálné povrchy jsou vždy heterogenní. Heterogenita povrchu může být biografická nebo indukovaná (vlivem adsorbátu).

Povrchová difúze umožňuje vznik uspořádaných souborů na povrchu. Vznik nových souborů bude záviset na tom, která z interakcí povrch – adsorbát resp. adsorbát – adsorbát je silnější. Vyšší teplota zvyšuje pohyblivost částic adsorbátu. Doba života částic v adsorbovaném stavu určuje charakter adsorbované vrstvy.

❖ Povrchové jevy na slitinách

Také u slitin je známý jev povrchové segregace. To znamená, že se povrchová vrstva liší jak strukturou tak chemickým složením od vrstev podpovrchových, což platí pro převážnou většinu slitin.

- a) Povrch se zpravidla obohacuje tou složkou, která má nižší sublimační energii. Je známo, že pokud se liší poloměr atomů ve slitině o více než 10 %, pak se v povrchu mohou přednostně hromadit větší atomy. V povrchu se kumuluje převážně ta složka, která má menší povrchovou energii. Toto pravidlo obvykle platí u substitučních roztoků;
- b) Je-li metalurgický proces dané slitiny více exogenní, nemusí se tendence k segregaci u těchto materiálů uplatnit;
- c) Při kvantifikaci efektu povrchové segregace je nutno respektovat podmínku minima Gibbsovy energie, tj. uvážit vliv entropie míšení;
- d) Pro exotermní slitiny platí, že prvek nahromaděný v povrchové vrstvě je deficitní ve vrstvě druhé pod povrchem. Pro endotermní slitiny platí, že je zpravidla obohacena pouze nejvrchnější vrstva, a to jen při nízké teplotě, která se blíží kritické teplotě, při níž už k míšení nedochází.

K segregaci různých složek slitin v povrchu může docházet i vlivem povrchových chemických interakcí. Jestliže se složky slitin navzájem liší svou aktivitou vůči adsorbátu, pak se složka s vyšší aktivitou bude hromadit v povrchové vrstvě.

V případě disociativní chemisorpce (uplatněné u vodíku nebo dusíku) atomy, které vzniknou na povrchu, jsou reaktivnější než původní molekuly, které mají nespárované elektrony. Za určitých podmínek, např. za zvýšené teploty, mohou tyto atomy migro-

vat ze záchytných a disociačních center na centra neaktivní. Je to typ povrchové migrace mezi centry rozdílného charakteru.

❖ Geometrie povrchů

Přesným měřením bylo zjištěno, že ani povrch monokrystalů s úplnými atomovými rovinami nelze pokládat za geometricky dokonale rovinný. Lze prokázat, že ještě větší rozdíly od geometrické roviny budou mít kovová tělesa, jejichž povrchy jsou dokončeny různými technologickými způsoby.

Je třeba předpokládat, že povrchové vrstvy materiálu budou mít vždy chemické složení odlišné od základní struktury.

Z hlediska funkce součásti jsou geometrické vlastnosti povrchu rozhodující hlavně z pohledu tření, opotřebení, otěru a koroze.

Velkým nebezpečím je, že odchylky od ideální nerovnosti mohou vznikat při technologické přípravě povrchu nebo samotné výrobě součásti. Změna povrchu se může různě projevit po plastické deformaci tvářením, dále po svařování, leštění povrchu, tepelném zpracování nebo po různých typech třískového obrábění. Forma tohoto projevu může mít charakter zpevnění nebo výskytu různě rozložených napěťových stavů v povrchových geometrických odchylkách.

4.2. VLASTNOSTI POVRCHŮ

❖ Fyzikální vlastnosti povrchů

Fyzikální vlastnosti jsou dané atomovou i elektronovou strukturou a mohou se projevit jako specifické vlastnosti povrchu.

Mezi typické fyzikální vlastnosti povrchu patří emise. To znamená, že se za určitých podmínek, buď za vysoké teploty nebo vnějším dopadem elektronů, mohou z povrchu kovu nebo slitiny uvolňovat elektrony. Podle toho lze emisi nazvat tepelnou nebo sekundární.

Sekundární emise zahrnuje chování elektronů uvolněných při nárazu primárních elektronů na povrch kovu. Sekundární elektrony obsahují pružně i nepružně odražené elektrony, které vznikají uvnitř kovu při srážkách primárních elektronů s mřížkovými elektrony. Srážkou se některé mřížkové elektrony vyrazí do vyšších elektronových sfér a některé z nich, které mají dostatečnou energii, se z povrchu mohou uvolnit.

❖ Optické vlastnosti povrchů

Dopadá-li elektromagnetické vlnění na povrch tělesa, rozdělí se energie tohoto vlnění na tři části – odraženou, pohlcenou a část, která tělesem projde. Těleso samo vyzářuje energii, jejíž intenzita je funkcí teploty a struktury tělesa.

Dokonalejší odraz světla se uplatní jen na kovových plochách opticky hladkých.

Výsledkem pohlcení a rozvedení energie záření pod povrchem kovů je zvýšení teploty tělesa v povrchové a podpovrchové vrstvě. Tato teplota je nerovnoměrně rozložena do různých hloubek materiálu.

Leštitelnost kovů předurčuje jejich použití pro součásti s dobrými optickými vlastnostmi pro odraz světla, čím zároveň zvyšuje odolnost proti opotřebení.

❖ Elektrické vlastnosti povrchů

Elektrické vlastnosti povrchu jsou určeny vždy elektronovým stavem daného materiálu. U čistých kovů a jejich slitin je možné měřit změny potenciálů a kapacit v elektrickém poli při povrchu. Naopak vliv vnějších potenciálů bude závislý na emisi elektronů.

V místě styku dvou těles, jimiž prochází elektrický proud, se proudová linie více nahustí, protože průřez kontaktu je obvykle menší než celková plocha styku. Toto zúžení znamená zvětšení proudové hustoty a odporu. Proudová linie je funkcí tvaru povrchů vzájemně se dotýkajících ploch, elektrické vodivosti, tvrdosti obou materiálů i tlaku na styčných plochách.

❖ Napětí v povrchových vrstvách

Vlastnosti povrchu jsou dané podmínkami technologie zpracování. Jednotlivé výrobní operace nepůsobí jen na povrchu, ale i do určité hloubky materiálu, která se mění podle způsobu zpracování i vložené energie.

Důvod vzniku deformačně-napěťových stavů v materiálu jsou nehomogenita elastických a plastických deformací v jednotlivých místech, fázové přeměny a nerovnovážné stavy, které mohly být vyvolány technologickými operacemi.

Průběh zbytkových napětí (smysl, gradient, velikost) se s hloubkou pod povrchem mění podle příčin vzniku plastických deformací a jejich interakce s okolím. Rozhodující bude velikost a průběh napětí v závislosti na tloušťce ovlivněné vrstvy. Zbytkové napětí lze stanovit experimentálně nebo analyticky. Experimentální metody jsou založeny na měření změn fyzikálních, chemických nebo mechanických vlastností materiálu.

Velmi významnou oblast určování napětí tvoří metody rentgenové tenzometrie. Základem je stanovení změny vzdálenosti atomových rovin, které byly vyvolány v polykrystalickém materiálu elastickou deformací v důsledku napětí. Metody jsou vhodné jak pro měření napětí na povrchu, tak i průběhu napětí pod povrchem.

Dále je třeba počítat i s heterogenitou materiálů, texturou, kombinací makro i mikronapětí a velkých gradientů napětí.

Do určité míry lze stav napjatosti v povrchové vrstvě hodnotit z měření tvrdosti. Tahová napětí vyvolávají větší změny tvrdosti než napětí tlaková.

❖ Mechanické vlastnosti povrchů

Funkční vlastnosti jsou zásadně ovlivněny i mechanickými vlastnostmi. Nejběžnější vlastností je tvrdost. Tvrdost souvisí se strukturou, chemickým složením povrchové vrstvy, zpevněním a výskytem napětí.

❖ Chemické vlastnosti povrchů

Chemické vlastnosti ovlivňují změny povrchu a povrchové vrstvy ve styku s prostředím, zejména oxidační stavy prvků na mezifázovém rozhraní.

Za největší vliv chemických reakcí povrchu lze označit heterogenní katalýzu a korozi. Citlivost povrchu na chemické reakce předurčuje TO k jeho použití v agresivním prostředí.

❖ Vlastnosti povrchových vrstev po různém technologickém zpracování

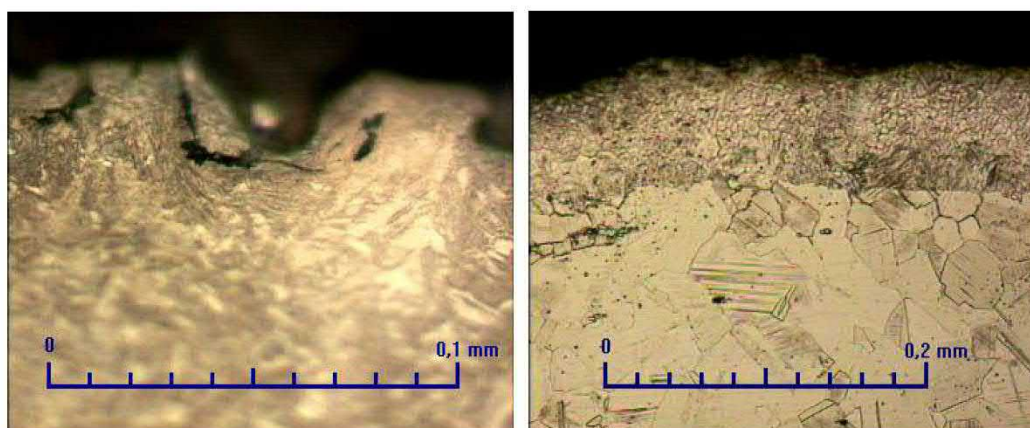
Přirozený povrch vzniká krystalizací z tekuté nebo plynné fáze a jeho dokonalost je ovlivněna podmínkami vzniku zárodků a jejich růstem. U běžných odlitků může být rozhodující drsnost povrchu, která je závislá na litém materiálu i způsobu lití. Ke změnám povrchu dochází po obrábění.

Řezný proces vedoucí k oddělení třísky je spojen s elastickou a plastickou deformací, což se projevuje na:

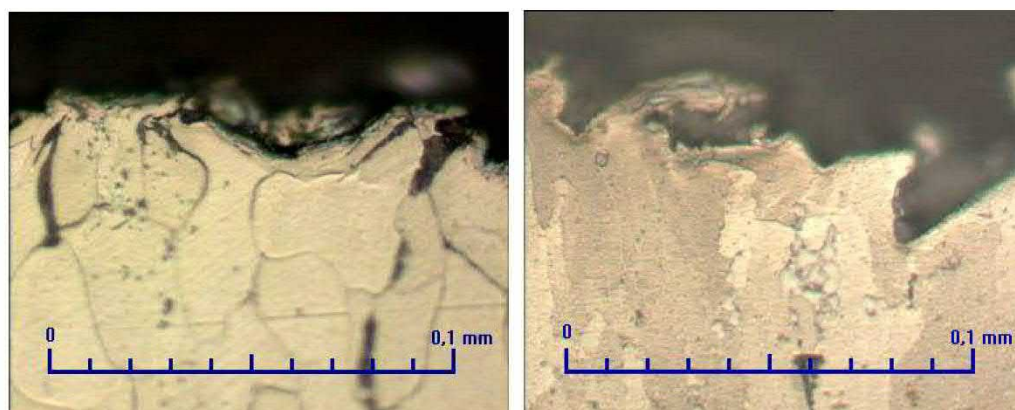
- deformačním chování,
- drsnosti povrchu,
- teplotních polích,
- zpevnění povrchových vrstev.

Plastická deformace za tepla i za studena je nejjednodušší způsob změny mechanických vlastností na povrchu materiálu.

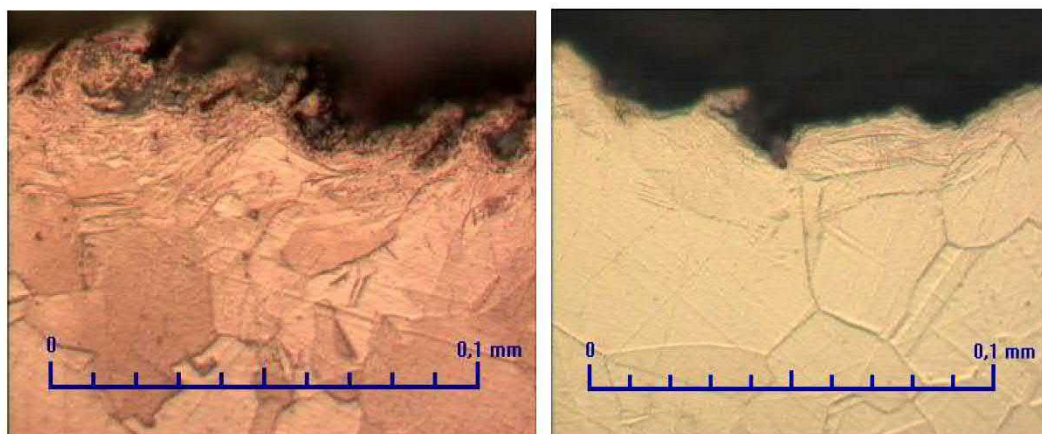
Příkladem mohou být studované povrchy různých typů materiálů po erozivním obrábění, ukazující na to, jakým způsobem působí tento proces na změnu povrchových struktur. Zobrazené materiály (obr. 4.5 až 4.8) se diametrálně liší svými mechanickými vlastnostmi a chemickým složením, což se také projevuje v konečné kvalitě opracovaného povrchu.



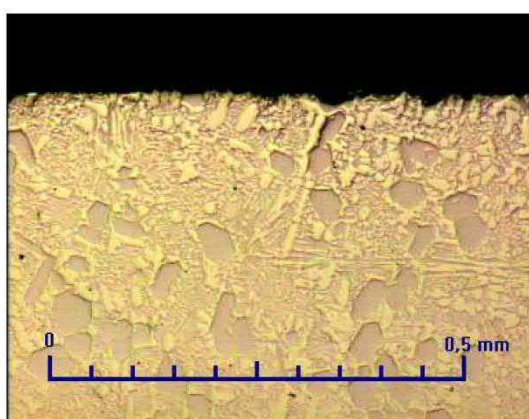
Obr. 4.5 Povrch ocele 11523 a povrch ocele 17246 (vpravo)



Obr. 4.6 Povrch otěruvzdorné ocele zn. Hardox a povrch slitiny hliníku (vpravo)



Obr. 4.7 Povrch mědi a povrch mosaze (vpravo)



Obr. 4.8 Povrch Stellite 20

Ze sledovaných metalograficky připravených struktur lze poukázat na odezvu materiálu při odebrání třísky z povrchu. U všech předložených materiálů byla použita stejná metoda erozivního obrábění s konstantními technologickými parametry.

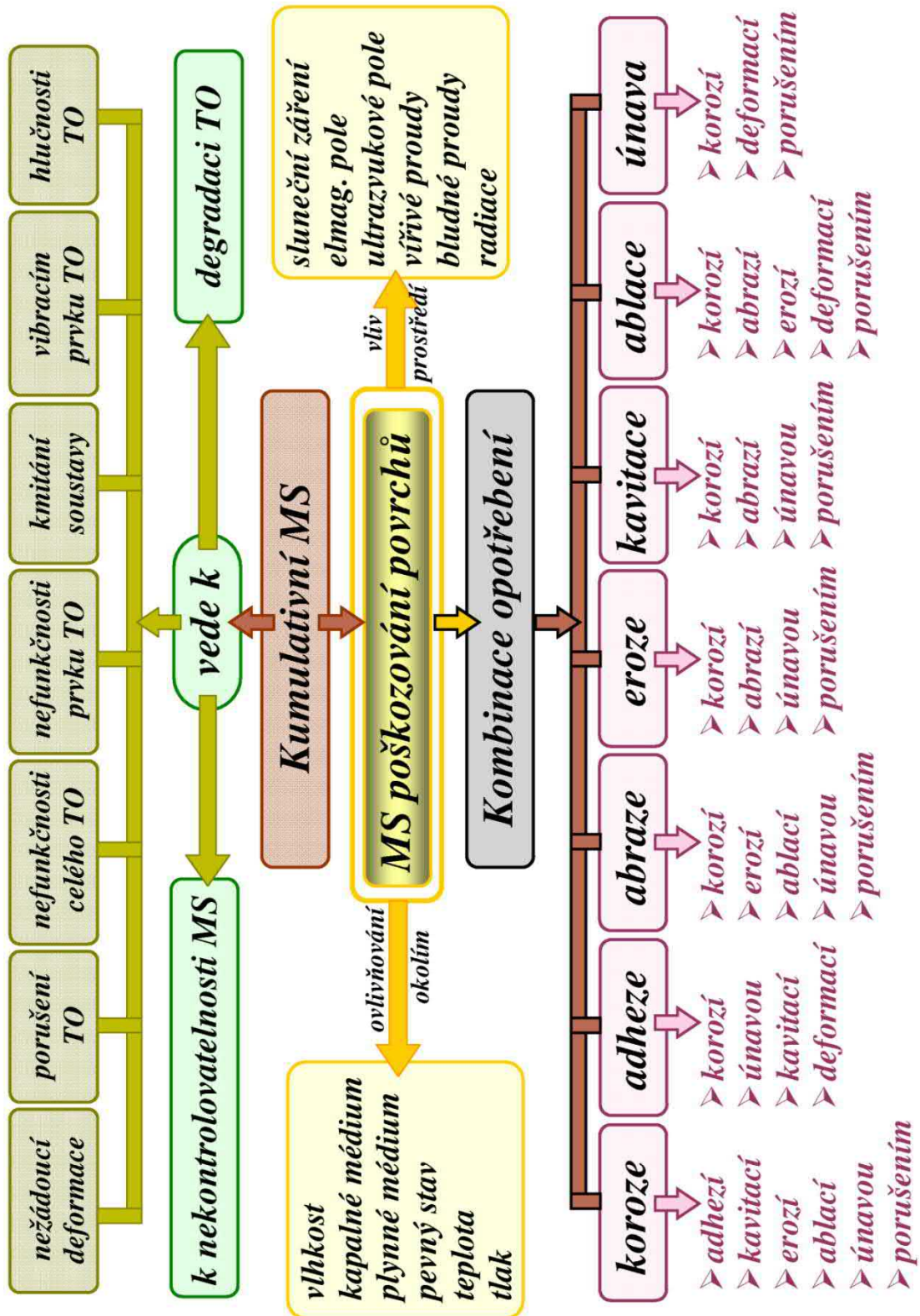
Měkčí materiály jako je ocel 11523 (obr. 4.5 vlevo), měď (obr. 4.7 vlevo) a hliník (obr. 4.6 vpravo) mají povrch velmi členitý, což je způsobené plastickou deformací rozdělených povrchových zrn. V některých místech lze část zrna charakterizovat jako „zrno roztržené“ z povrchu se zbývající deformované částí povrchu. Mosaz (obr. 4.7 vpravo) má povrch dokonce ukončený hranicemi zrn.

Otěruvzdorný Hardox (obr. 4.6 vlevo) má zrno částečně deformované, ale nedochází k jejich uvolňování z povrchu. Materiál Stellite 20 (obr. 4.8) a ocel 17246 (obr. 4.5 vpravo) má zrna v povrchu jemnější a lze očekávat, že bude docházet k částečnému zpevnění povrchové vrstvy.

Z takto připravených struktur je vidět odezva materiálu na jeho správný výběr pro dané opotřebení. V případě, že se jedná o kovy, pak je rozhodujícím kritériem jejich krystalická mřížka a velikost výchozího zrna v povrchové vrstvě. S tímto souvisí i citlivost materiálu na opotřebení a korozi.

5. PROCESY OPOTŘEBENÍ TECHNICKÉHO OBJEKTU

Opotřebení se vyskytuje vždy na povrchu součástí nebo TO, kde se povrchy proti sobě pohybují, kde přicházejí do styku s tuhými částicemi nebo jsou vystavené působení proudu plynů, kapalin, případně proudu kapalného nebo plyného média s obsahem tuhých částic různé velikosti.



Obr. 5.1 Kombinace opotřebení

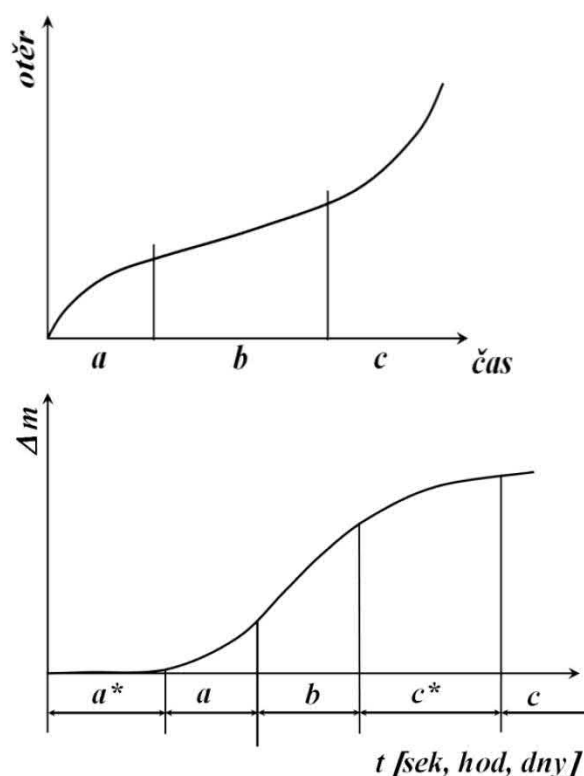
Charakter opotřebení bude záviset na okolních vlivech, kdy může průběžně působit v daném procesu i korozní účinek.

Proces opotřebení (pokud se včas nezastaví) je procesem nežádoucím, protože vždy vede k degradaci materiálu objektu nebo celkové havárii.

Protože zatím nejsou k dispozici matematické teorie pro exaktní popis degradačních procesů, nejsou matematicky formulovány ani příslušné okrajové podmínky pro mezní stavy poškozování povrchů těles. V současnosti se proto vychází z přibližných teoretických modelů a získaných poznatků, které lze aplikovat na různé způsoby opotřebení, obr. 5.1.

Mechanismus opotřebení

Průběh opotřebení v čase a prostoru je obvykle charakteristický pro všechny mechanismy opotřebení, obr. 5.2.



Obr. 5.2 Hmotnostní otěr a hmotnostní úbytek v závislosti na čase

Sledováním tohoto procesu je možné jednotlivé etapy rozdělit podle průběhu opotřebení na charakteristické oblasti vypovídající o chování zatíženého objektu:

- a* – inkubační doba = částečná změna mechanických vlastností povrchu materiálu (vizuálně neidentifikovatelná),
- a – záběh = vyrovnání mikronerovností, mění se drsnost povrchu, měl by být co nejkratší,
- b – ustálený děj = odběr → úbytek materiálu, lineární funkce,
- c – progresivní růst → je třeba výměny, opravy, regenerace,
- c* – ustálený úběr materiálu,
- a + b → limitující pro životnost,
- a* + a + b → limitující pro životnost.

Závislost hmotnostního úbytku na čase (obr. 5.2 dole) ve všeobecnosti sestává ze čtyř stádií:

- I. a^* – je časově označované jako *počáteční stadium* (t_0) odpovídající tzv. „inkubační době“, během níž se nevyskytuje žádné opotřebení ve smyslu úbytku materiálu. V této době však může docházet ke změně napjatosti v povrchové vrstvě, deformačnímu zpevnění povrchové vrstvy, případnému vzniku mikrotrhlinek, které nemusí být vizuálně pozorovatelné. Toto počáteční stadium bude pro každý materiál rozdílné;
- II. a – stadium *vzrůstu rychlosti* opotřebení (t_1), během něhož se začínají lokálně oddělovat z povrchu tělesa mikroskopické částičky materiálu a opotřebení se postupně rozšiřuje na celou zatěžovanou oblast;
- III. b – stadium *ustáleného stavu*, kdy se rychlost opotřebení udržuje blízko konstantní hodnoty;
- IV. c – stadium *postupného snižování rychlosti* opotřebení, tak jak se obnažuje poškozené místo a zmenšuje se účinek zatížení povrchu.

5.1. EXPERIMENTÁLNÍ HODNOCENÍ OPOTŘEBENÍ

Může existovat měření *přímé*, kde je možné zahrnout:

- délkový otěr,
- hmotnostní úbytek,
- objemový úbytek,
- plošné vyhodnocení,
- hloubka opotřebení,
- drsnost povrchu,

nebo měření *nepřímé*:

- změna struktury,
- změna výkonu,
- měření vibrace,
- korozní opotřebení,
- změna mechanických vlastností,
- měření hluku,
- hodnocení částic opotřebení,
- metalografické hodnocení změny struktur ve směru podélném a příčném,
- fraktografické posouzení porušeného povrchu – porovnání lomových ploch z oblastí opotřebení a z oblastí bez opotřebení.

Zobecněné únavové porušování aplikované na opotřebení kovového materiálu

Proces postupného povrchového opotřebování s dosažením MS porušení je vlastně procesem únavového porušování, a to bez nebo v součinnosti s korozí materiálu. Tento proces je podmíněn a řízen plastickou deformací, která vede ke kumulativnímu poškozování soudržnosti materiálu.

Z pohledu postupného rozvoje poruch soudržnosti materiálu lze povrchové opotřebenění materiálu z hlediska současných, všeobecně přijímaných představ, členit na tyto etapy:

a) Etapa změn mechanických vlastností materiálu

Toto stádium souvisí se vznikem, pohybem a interakcí dislokací v daném materiálu. Důsledkem těchto procesů je cyklické zpevnění nebo změkčení materiálu. Vznikající plastická deformace je obecně dána pohybem dislokací, ale je též ovlivněna přítomností precipitátů, jiných cizích příměsí, hranicemi zrn apod.

b) Etapa nukleace mikrotrhlin

Experimentálně bylo prokázáno, že k nukleaci trhlin obvykle dochází na povrchu tělesa, v některých případech však v určité hloubce pod povrchem. Příčinou této skutečnosti může být makroskopická strukturní heterogenita, výrazné zpevnění povrchové vrstvy, vnitřní podpovrchové vady atd. Podle novějších studií se předpokládá, že iniciace únavového porušení vzniká v tzv. vhodně orientovaném zrně s nejhustěji obsazenými atomy v krystalografických mřížkách, které jsou totožné s tzv. kritickou rovinou. V této rovině má lokální, smykové a normálové napětí největší poškozující účinek na materiál, zvláště při dosažení maximálních hodnot. Toto napětí vede rovněž k únavovému porušení. Potom v oblasti vysokocyklové únavy vzniká taková napjatost, že dochází ke zplastizování pouze několika vhodně orientovaných zrn, přičemž okolní zrna jsou deformována pouze elasticky. Pro popis napjatosti v těchto lokalitách se zavádí tzv. lokální deviátor tenzoru napětí.

V zásadě existují tedy čtyři druhy nukleačních míst (submikroskopických zárodků necelistvosti materiálu) označených jako:

- oblast vhodně orientovaných zrn,
- únavová skluzová (perzistentní) pásma,
- hranice zrn (v místech se skluzovým pásem),
- rozhraní mezi inkluzemi a matricí.

Problematika určení hranice mezi etapou nukleace (její délka je určena inkubační dobou vzniku mikrotrhliny) a etapou růstu trhliny není doposud jednoznačně vyřešena, takže se používají různá konvenční pravidla, např.:

- křivka kritického poškození podle Frenche,
- Mansonovo kritérium (růst trhliny začíná, má-li její délka hodnotu 0,05 až 0,08 mm),
- smluvní velikost submikrotrhliny „ l_0 “ rovnající se přibližně velikosti zrna ($l_0 \approx d$), při jejímž dosažení se etapa nukleace považuje za skončenou – je dosaženo mezního stavu bodového porušení,
- kritérium Dang Van, střední hodnota normálových napětí působících ve vyšetřovaném bodě.

c) Etapa stabilního šíření trhliny

Pro tuto etapu je charakteristické, že trhlina se šíří jen tehdy, dodává-li se do tělesa energie zvnějšku, tedy $dE/dl > 0$. Znamená to, že přerušením dodávání vnější

energie lze šíření trhliny kdykoliv zastavit. Tato etapa končí mezním stavem stability trhliny, který je obecně popsán matematicky $dE/dl = 0$.

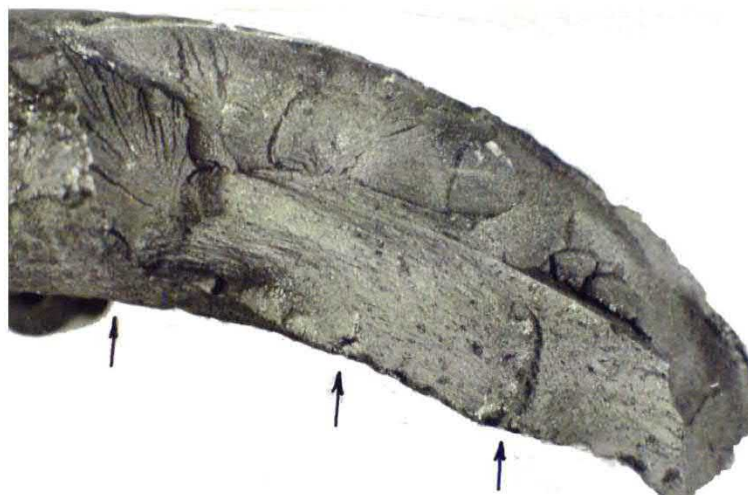
Specifickým případem je etapa tzv. klidového stavu trhlín, v níž se pole trhlín od působení provozních a zatěžovacích podmínek nemění ($l = 0$).

d) Etapa nestabilního šíření trhliny

V této etapě šíření trhliny probíhá bez dodávání energie z vnějšího prostředí. Energií potřebnou k šíření trhliny je elastická energie napjatosti (tedy vnitřní energie) uvolňovaná v procesu šíření trhliny v případě, kdy platí, že $dE/dl < 0$. V této etapě se trhlina šíří nekontrolovatelně vysokou rychlostí až do závěrečného lomu.

Hodnocení závěrečných lomových ploch

Na lomové ploše lze pozorovat několik typickým pásem jako jsou: ohnisko porušení, sekundární stupínky a lemy, pásmo postupného rozvoje trhliny, pásmo urychleného rozvoje a pásmo dolomení. Na lomové ploše se může objevit několik ohnisek porušení získaných korozním účinkem daného prostředí, obr. 5.3.



Obr. 5.3 Lomová plocha pružiny

Existují-li v materiálu místa s fyzikálními charakteristikami odlišnými od základního materiálu, pak tato místa ovlivňují charakter dalšího šíření trhliny. Mikrogeometrie trhlín je však také výrazně ovlivněna strukturou materiálu, která působí na jejich stabilitu při dalším zatěžování. Uvedené faktory způsobují, že v procesu zatěžování materiálu dochází k větvení trhlín, jehož důsledkem je zmenšení hodnoty hnací síly trhliny oproti hodnotě u trhliny nerozvětvené (přímé). O tom, jaký charakter budou mít rozvětvené trhliny, rozhodují kromě fyzikálních a geometrických parametrů částice sekundárních fází nebo hranic zrn i poměr velikosti plastické zóny k charakteristickému strukturnímu rozměru (rozměrový poměr).

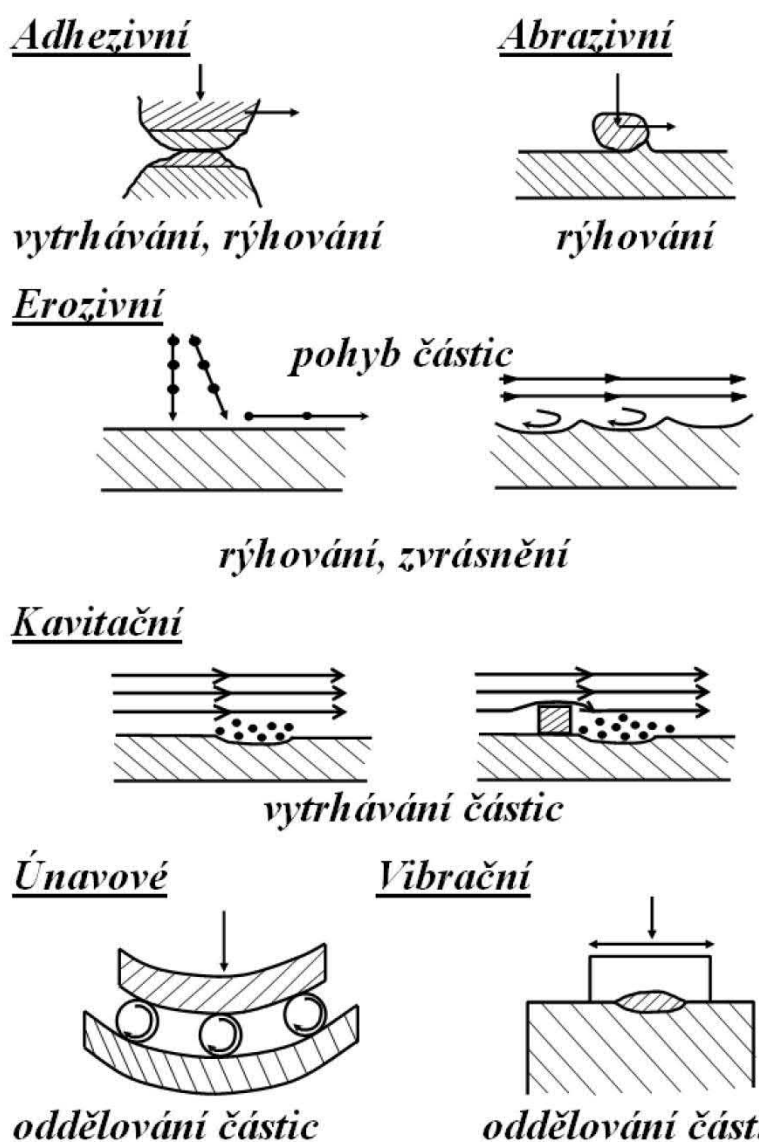
Při analýzách vzniku a růstu únavových trhlín z opotřebení lze akceptovat:

- lineární lomovou mechaniku, kdy plastická oblast je v okolí čela trhliny poměrně malá v porovnání s velikostí trhliny,
- nelineární lomovou mechaniku, kdy plastická oblast je srovnatelná s velikostí trhliny,

- dlouhé trhliny, kdy z geometrického hlediska jsou větší velikosti než 1 mm,
- krátké trhliny s velikostí trhliny od 0,001–1 mm,
- časově nezávislé hodnoty amplitudy určujících parametrů napětí a přetvoření,
- časově závislé hodnoty amplitudy určujících parametrů napětí a přetvoření.

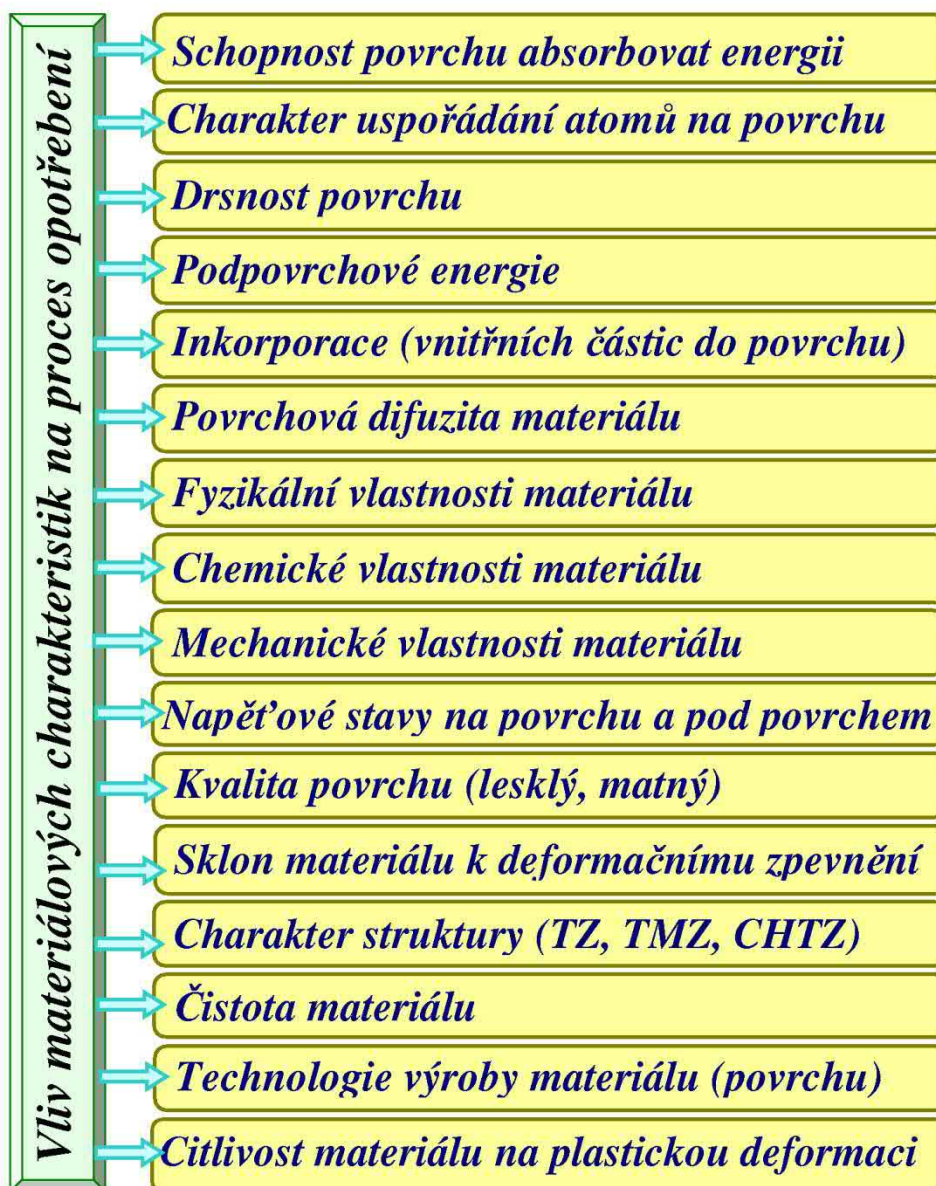
Únavový proces porušování při jakémkoliv mechanismu opotřebení je analogický globálnímu únavovému procesu jen s tím, že nejsou brány v úvahu synergické efekty v kombinaci s jiným opotřebením a korozní účinek, který zatížení povrchu superponuje a tím ovlivňuje jednotlivé projevy opotřebení.

Schematicky lze jednotlivá opotřebení znázornit tak, jak to zobrazuje obr. 5.4, kde jsou zachycena působící zatížení na konkrétní povrchy s jejich geometrickou odezvou v narušených oblastech.



Obr. 5.4 Schematická znázornění různých druhů opotřebení

Na odolnost proti opotřebení se podílí samotný povrch bez ohledu na to, o jaké materiálové charakteristiky se jedná (obr. 5.5.).



Obr. 5.5 Materiálové aspekty opotřebení

Na urychlení nebo zpomalení celého procesu opotřebení má vliv:

- uspořádání atomů v povrchové vrstvě,
- geometrie povrchu zobrazená v drsnosti povrchu,
- povrchová energie potřebná na vytvoření nového povrchu,
- schopnost částic pronikat do povrchové vrstvy (inkorporace),
- charakter povrchové difúze materiálu,
- fyzikální vlastnosti materiálu,
- chemické vlastnosti povrchu materiálu,
- mechanické vlastnosti povrchu materiálu,
- environmentální parametry – teplota, tlak, typ prostředí,
- deformačně-napětové stavy povrchových vrstev,
- lomové parametry, jako je součinitel asymetrie faktoru intenzity napětí,
- a další faktory týkající se specifického opotřebení.

5.2. ZOBECNĚNÝ PŘÍSTUP K VÝPOČTOVÉMU MODELOVÁNÍ OPOTŘEBENÍ

Výpočtové modelování vyžaduje formulaci problému obdobně jako při experimentálním modelování, tedy úkolem je „stanovit závislost hmotnostního úbytku materiálu na čase“, ale se všemi aspekty, které se průběžně podílí na procesu opotřebení. Bude důležité mít k dispozici tyto realizovatelné výpočtové algoritmy:

- A1 algoritmus pro kvantifikování *zatížení povrchu* tělesa v závislosti na druhu opotřebení;
- A2 algoritmus pro automatické *generování topologie struktury* heterogenního materiálu, a to na základě statisticky pojatých poznatků o struktuře příslušného materiálu;
- A3 algoritmus, který umožňuje určení hodnot průběžných *změn mechanických vlastností* materiálu v závislosti na charakteru a velikosti předchozího zatěžování;
- A4 algoritmus, který umožňuje určení hodnot *elastických a pevnostních materiálových charakteristik* v každém časovém okamžiku v závislosti na předchozí historii zatěžování;
- A5 algoritmus, který umožňuje v daném časovém okamžiku stanovit odpovídající *deformačně-napět'ové stavy* podle typu těchto zatížení;
- A6 algoritmus pro určování *zbytkové napjatosti* od výrobních technologických procesů a od technologických úprav povrchu tělesa;
- A7 algoritmus pro určování *provozní deformace, přetvoření a napjatosti* od provozního zatížení;
- A8 algoritmus pro určování *deformace a napjatosti* v povrchové vrstvě tělesa od *různých forem zatěžování, při konkrétním opotřebení*;
- A9 algoritmus pro určování *výsledné napjatosti*, která je průnikem napjatosti zbytkové, provozní a procesu opotřebení;
- A10 algoritmus pro určování *změn tvaru reliéfu* povrchu tělesa způsobených deformačně-napět'ovými stavy v povrchové vrstvě tělesa;
- A11 algoritmus popisující *korozní procesy* v povrchové vrstvě tělesa;
- A12 algoritmus určující *dobu a místo* vzniku příslušných možných *mezních stavů* souvisejících s porušováním soudržnosti materiálu (mezní stavy pružnosti, tvárné pevnosti, křehké pevnosti, únavové pevnosti bez uvažování koroze, mezní stavy trhlin) v jednotlivých bodech vyšetřované oblasti, a to na základě předchozí historie zatěžování a doby jeho trvání, aktuálního stavu napjatosti v jednotlivých bodech oblasti a aktuálních hodnot pevnostních materiálových charakteristik;
- A13 algoritmus, který umožňuje stanovení *vlivu korozních procesů* v povrchové vrstvě tělesa na vznik mezních stavů od výsledné napjatosti;
- A14 algoritmus posuzující *stavy trhlin* (iniciace, stabilní a nestabilní šíření trhliny) s uvažováním koroze v závislosti na čase pro celou vyšetřovanou oblast, a to pro případy kavitační eroze a koroze;
- A15 algoritmus zaznamenávající prostorovou *topologii lomových ploch* v každém časovém okamžiku a posuzující, zda tyto lomy nevytvořily uzavřenou podoblast

(tedy potenciaální úlomek) a zda se tato podoblast může oddělit od vyšetřované oblasti;

- A16** algoritmus, který je schopen stanovovat *objemy a hmotnosti uvolněných úlomků* a u těchto dvou entit stanovovat změny jejich velikosti v závislosti na čase;
- A17** algoritmus, který vyjadřuje *superponování zatěžujících sil* na povrchu podle druhu opotřebení s dalším druhem opotřebení při jejich různých kombinacích;
- A18** algoritmus, který vyjadřuje *změnu povrchového zpevnění* v oblastech plastické deformace;
- A19** algoritmus rychlosti probíhajícího *opotřebení na změněném povrchu* po dominantním druhu opotřebení;
- A20** algoritmus *odezvy dané struktury* na zatížení, transformace původní podpovrchové struktury na jinou (fázové přeměny materiálu);
- A21** algoritmus *geometrie* měnící se *stopy* porušení na povrchu neopotřebovaného a opotřebovávaného materiálu;
- A22** algoritmus *přibývající hmoty* na povrchu vtlačení oddělených částic materiálu, které způsobí kvantitativní a kvalitativní změnu povrchu;
- A23** algoritmus *ustáleného úběru* materiálu z povrchu.

Obecně lze konstatovat, že při řešení problémů opotřebení výpočtovým modelováním jsou vstupní údaje do jeho algoritmů slabým místem celého procesu řešení.

Neexistují dosud exaktní teorie pro následující algoritmy:

- ❖ určování elastických a pevnostních materiálových charakteristik v závislosti na historii předchozího zatěžování,
- ❖ matematická teorie pro určování změn tvaru reliéfu povrchu tělesa vyvolaných změnou deformačních a napět'ových stavů ve struktuře materiálu,
- ❖ predikce míst a doby vzniku mezních stavů porušování soudržnosti ve struktuře homogenních a nehomogenních materiálů,
- ❖ doposud nebyla formulována teorie pro posuzování mezních stavů únavové pevnosti pro šíření únavových trhlin pro případ, u něhož změny velikosti hlavních napětí a jejich směry mají stochastický charakter,
- ❖ neexistuje teorie pro komplexní posouzení iniciačních stavů trhlin pro jejich rychlosti a směry šíření v závislosti na čase a pro všechny body konkrétně vyšetřované oblasti,
- ❖ není k dispozici teorie popisující chování únavových trhlin za současného působení koroze,
- ❖ nelze v čase zachytit změnu struktury a její fázové přeměny a tyto průběžně matematicky popisovat,
- ❖ neexistuje algoritmus zachycující změny rychlosti opotřebení v povrchových vrstvách, které by charakterizovaly jednotlivé fáze kontinuálně měnící strukturu,
- ❖ neexistuje algoritmus pro další kontinuální změny, které se uskutečňují v časoprostoru a jsou vyvolány probíhajícím mechanismem opotřebení na povrchu, popř. v určité hloubce pod povrchem, na které také adekvátně reagují okolní zrna materiálu.

Realizace experimentu v oblasti opotřebení vykazuje dvě relativně protichůdné tendence. Experiment uskutečňovaný pro posuzování odolnosti materiálu proti opotřebení je poměrně snadný, i když časově náročný. Experimentálně se zjišťují a měří výsledné projevy porušování formou hmotnostních úbytků materiálu v různých časových intervalech. Experiment sloužící k identifikaci probíhajících procesů opotřebení je však velmi obtížný a zatím nerealizovatelný.

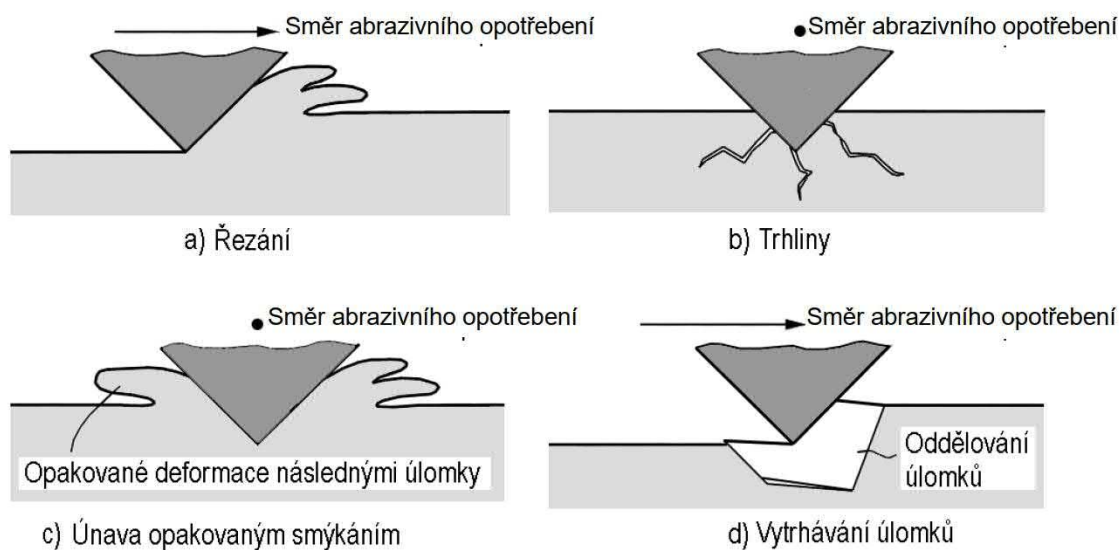
Lze tedy konstatovat, že vzhledem k uvedeným skutečnostem jsou současné možnosti výpočtového modelování při řešení problémů opotřebení značně omezené, protože důležitým prvkem při tvorbě matematických teorií je experiment. Bariéry v realizaci experimentu tedy přímo implikují i bariéry ve vytváření matematických teorií. V současnosti se řeší pouze určité dílčí problémy s využitím simulačního modelování a citlivostní analýzy.

V následujících podkapitolách bude na vybraných typech opotřebení ukázán možný přístup k řešení dané problematiky.

5.3. ABRAZIVNÍ OPOTŘEBENÍ TECHNICKÉHO OBJEKTU

Abrazivní opotřebení (příloha 1) je způsobeno rozrýváním a řezáním měkkého povrchu jednoho tělesa drsnějším povrchem druhého tvrdšího tělesa. K podobnému efektu může dojít působením oddělených úlomků nebo vytrhaných částic z funkčních povrchů, které zůstanou mezi těmito pohybujícími se povrchy.

Celý proces abrazivního opotřebení je podobný svými důsledky jiným mechanismům opotřebení. Rozdílnost je třeba vidět v abrazivních parametrech a charakteru částic dopadajících na povrch druhého objektu. Volné částice jsou vtlačovány do měkkého povrchu, který rýhují nebo odřezávají ve směru jejich pohybu. Částice a úlomky (vytrhnutá zrna, třísky, piliny, prachové částice, písek aj.) povrchový materiál deformují nebo přemísťují až do jeho dalšího porušení, kdy vznikají mikrotrhliny přecházející do lomů, čímž proces abrazivního opotřebení přechází do stádia porušování, jak znázorňuje obr. 5.6.

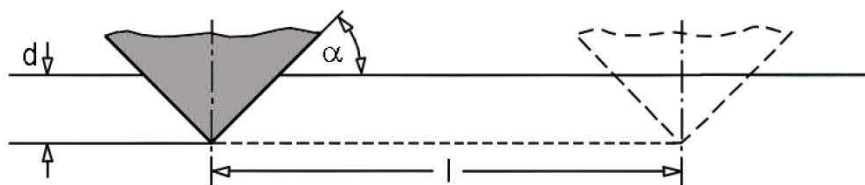


Obr. 5.6 Mechanismus abrazivního opotřebení

Vzhledem k mechanismu abrazivního porušování lze u tohoto procesu využít experimentální modelování, kde se vytknutá částice zobrazuje geometrickým útvarem umožňující mapovat jeho dráhu na povrchu a těsně pod povrchem se zanecháním definované stopy – vrypu. Podle směru a zatížení působící částice na povrchu je možné sledovat odezvu v povrchové vrstvě materiálu. V případě odřezávání materiálu z povrchu dochází nejprve k jeho stlačení a po vyčerpání možností plastické deformace vznikají iniciace trhlin. Pokud dopadají na takto změněný povrch částice nadále, vznikají mikroobjemy materiálu, které se uvolňují, čímž vznikají nové úlomky ze základního materiálu, které se připojují k abrazivním částicím a celý proces opotřebení se urychluje.

Analytický model abrazivního opotřebení

Relativně jednoduchý model abrazivního opotřebení využívá kužel příčně pronikající do povrchu, obr. 5.7. Tento model předpokládá, že veškerý materiál přemístěný pomocí kužele se mění na úlomky – abrazivní částice opotřebení. Výhodou tohoto modelu je jeho analytická jednoduchost i když jeho přílišné zjednodušení může vést k nepřesnosti. V modelu je individuální zatížení na úlomek (na abrazivní částici) přenášeno vrubem způsobeným kuželem do povrchu materiálu a výsledkem je mezní namáhání projevující se jako průnik.



Obr. 5.7 Model abrazivního opotřebení jedním úlomkem

Mechanismus abraze

Pomocí jednoduchého algoritmu lze vyjádřit, jaké zatížení bude působit na vybraný úlomek z povrchu materiálu, který se zapojí do procesu opotřebení:

$$W_g = 0,5\pi \cdot (d \cdot \cot \alpha)^2 H, \quad (5.1)$$

kde W_g je individuální zatížení na úlomek [N], d je hloubka zářezu [m], α je úhel sklonu kužele a H je mezní namáhání pod zářezem (mez pevnosti) [Pa].

Přibližný objem materiálu přemístěného kuželem je produktem příčného průřezu rýhy $d^2 \cot \alpha$ a příčné vzdálenosti l , takže platí:

$$V_g = l \cdot d^2 \cot \alpha, \quad (5.2)$$

kde V_g je množství kuželem přemístěného materiálu [m³] a l je délka pohybu kužele v materiálu [m].

Dosazení hloubky d z rovnice 5.1 do rovnice 5.2 umožňuje vyjádřit množství opotřebovaného materiálu v čase působením zatížení na úlomek (abrazivní částici), tvar úlomku a třecí vzdálenost, platí:

$$V_g = \frac{2l \cdot \tan \alpha}{\pi \cdot H} \cdot W_g \quad (5.3)$$

Celkové opotřebení je dáno součtem objemů jednotlivých úlomků (částic opotřebení) z materiálu a plátí:

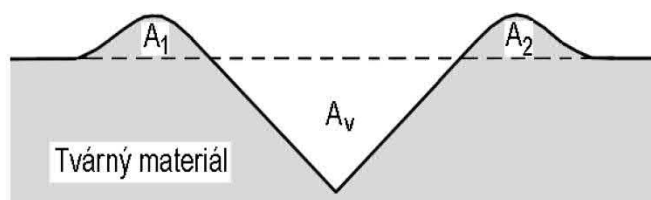
$$V_{celk} = \sum V_g = \frac{2l \cdot \tan \alpha}{\pi \cdot H} \cdot \sum W_g \quad (5.4)$$

$$\text{nebo } V_{celk} = \frac{2l \cdot \tan \varepsilon}{\pi \cdot H} \cdot W_{celk}, \quad (5.5)$$

kde V_{celk} je celkové množství (objem) opotřebení [m^3] a W_{celk} je celkové zatížení [N].

Vyjádření pomocí rovnice 5.4 předpokládá, že veškerý materiál přemístěný kuželem úlomku jednoduše odchází a je odstraněn ve formě abrazivních částic opotřebení. Tento předpoklad je relativní, protože mechanismus tvorby částic abrazivního opotřebení je určován proporcionalně v závislosti na odstraňování materiálu z povrchu. Rovnice 5.5 může být používána jako měřítko účinnosti abraze při výpočtech podílu skutečného opotřebení a vypočteného opotřebení podle rovnice 5.4.

Propracovanější a přesnější je dvojdimenzionální model abrazivního opotřebení, který předpokládá, že opotřeбенý materiál se nezíská z řezné rýhy na povrchu pomocí úlomku (částice opotřebení). Vyšší proporcionalita oděru materiálu zahrnuje přemísťování materiálu na stranách úlomku (částice). Je-li materiál tvárný, je přemísťování částí zbytku postranních dvojic na okrajích vytvořené abrazivní rýhy. Idealizovaný model příčné abrazivní rýhy je znázorněn na obr. 5.8.



Obr. 5.8 Model přemísťování a odstraňování abrazivního tvárného materiálu

Nový parametr f_{ab} je definován jako parametr pro množství materiálu přemístěného z povrchu abrazivní rýhy vytvořené úlomkem k objemu materiálu dané rýhy, platí:

$$f_{ab} = 1 - \frac{A_1 + A_2}{A_v}, \quad (5.6)$$

kde f_{ab} je parametr množství přemístěného materiálu rýhou k objemu materiálu rýhy ($f_{ab} = 1$ pro ideální mikrořezné opotřebení, $f_{ab} = 0$ pro ideální smyk a $f_{ab} > 1$ pro mikrotrhliny), A_v je příčná plocha abrazivní rýhy [m^2], $A_1 + A_2$ je příčná plocha materiálu odstraněného ze stran rýhy [m^2].

Měrná ztráta materiálu opotřebením při skluzu je dána vztahem:

$$\Delta V_1 = \frac{\Delta V}{l} = \frac{f_{ab}}{A_v}, \quad (5.7)$$

ΔV_1 je měrná ztráta materiálu opotřebením při skluzu na vzdálenost l [m].

Lineární intenzita nebo hloubka opotřebení při smyku na vzdálenost l v tvárném režimu je vyjádřena jako:

$$\Delta V_{d,tvár} = \frac{\Delta V}{l \cdot A} = \frac{f_{ab} \cdot A_v}{A}, \quad (5.8)$$

ΔV_d je lineární intenzita nebo hloubka opotřebení při smyku na vzdálenost l [m], A je kontaktní plocha úlomku (částice opotřebení) [m²].

Poměr opotřebené plochy ve skutečném kontaktu s abrazivními úlomky ke kontaktní ploše je dán vztahem:

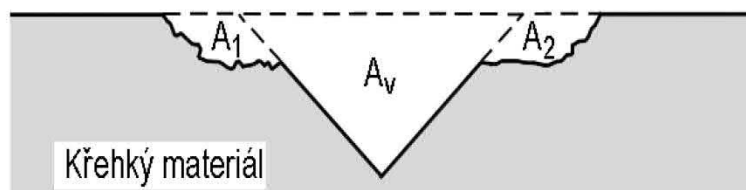
$$A_v / A = \frac{\phi_1 \cdot p}{H_{def}}, \quad (5.9)$$

ϕ_1 je součinitel závislý na tvaru abrazivní částice (získává se experimentálně), p je vnější povrchový tlak [Pa] a H_{def} je pevnost materiálu při velké deformaci [Pa].

Pro tvárné materiály je člen f_{ab} skutečné deformace na opotřebeném povrchu a mezní deformace stejného materiálu odvozen z plasticity a platí:

$$f_{ab} = 1 - \left(\frac{\phi_{lim}}{\phi_s} \right)^{\frac{2}{\beta}}, \quad (5.10)$$

ϕ_{lim} je limitní plastická deformace materiálu v abrazivní oblasti (typická hodnota $\phi_{lim} = 2$), ϕ_s je skutečné plastické přetvoření materiálu opotřebeného povrchu, β je člen popisující znehodnocované oblasti materiálu přetvořených plastickou deformací v závislosti na hloubce pod povrchem materiálu (typická hodnota $\beta = 1$).



Obr. 5.9 Model přemístování křehkého materiálu při abrazivním opotřebení

Z rovnice 5.10 je patrné, že hodnota parametru je úzce spjata s vlastnostmi materiálu a závisí také na charakteristikách procesu abrazivního opotřebení např. na ostroti úlomků a částic opotřebení. Pro modelování abrazivního mechanismu křehkého materiálu je parametr modifikován tak, aby dovoľoval charakter odíraného materiálu formou odírání po stranách rýhy, obr. 5.9.

Plochy křehkého materiálu A_1 a A_2 jsou vzhledem k tvárnému materiálu negativní obr. 5.9, protože křehký materiál nekumuluje na stranách vrubu materiál, ale místo toho vzniká široká rýha, vyjádření pro f_{ab} má tvar:

$$f_{ab} = 1 + \frac{|A_1 + A_2|}{A_V} \quad (5.11)$$

Pro lineární model intenzity abrazivního opotřebení má tvar:

$$\Delta V_{d,kř} = \frac{\phi_1 \cdot p}{H_{def}} + \frac{\phi_3 A_f D_{ab} p^{1,5} H^{0,5} \mu^2 \Omega}{K_{IC}^2}, \quad (5.12)$$

kde ϕ_3 je součinitel závislý na procesu tvorby trhlin během abraze, A_f je plocha abrazivních úlomků (částic) a křehkých destiček (šupinek), D_{ab} je skutečná délka abrazivních částic [m] (obvykle mezi 30 až 100 μm), H_{df} je pevnost deformovaného obrušovaného materiálu [Pa], H je pevnost nedeformovaného obrušovaného materiálu [Pa], μ je součinitel tření na lící straně abrazivních částic (obvykle $\mu = 0,1-0,5$), K_{IC} je lomová houževnatost [$\text{m}^{0,5}\text{Pa}$], p_{krit} je kritický povrchový tlak pro kontaktní praskání nebo tvorbu destiček (lamel) křehkého materiálu [Pa] a Ω je parametr definovaný jako:

$$\Omega = 1 - \exp\left(-\frac{p}{p_{krit}}\right)^{0,5} \quad (5.13)$$

Účinky abraze na povrchy

Tyto účinky jsou charakteristické úběrem materiálu z funkčního povrchu tvrdým a drsným povrchem druhého tělesa nebo abrazivních částic. Poškození má formu:

- rýhování,
- oddělování různých objemů materiálu,
- vzniku nerovnosti povrchu.

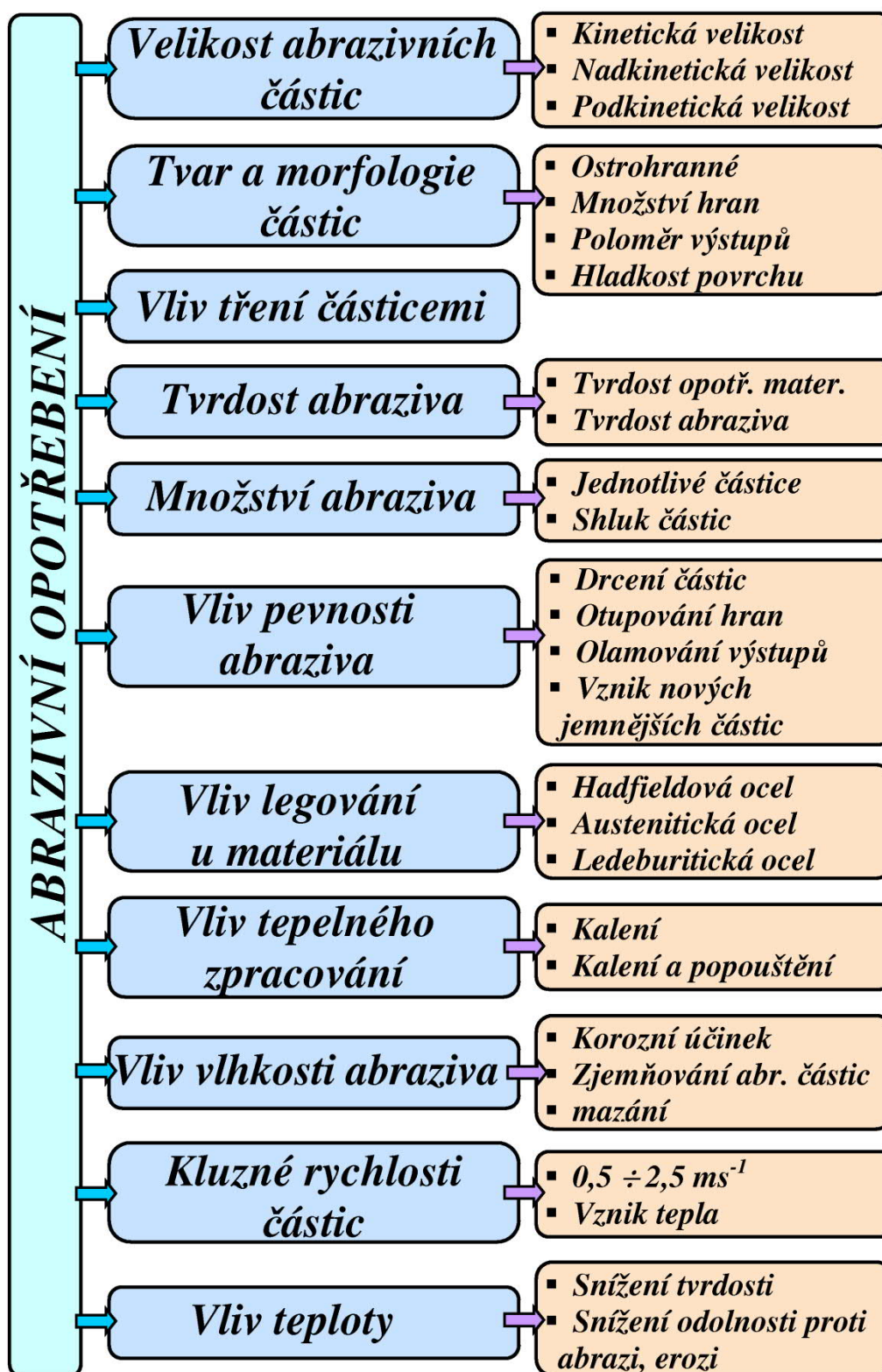
Faktory ovlivňující abrazivní opotřebení jsou uvedeny na obr. 5.10.

Mezi další faktory lze zahrnout:

- struktura materiálu,
- úhel dopadu abrazivní částice,
- kombinace s dalším opotřebením aj.

Příklady součástí s výskytem abrazivního opotřebení:

- zuby rýpadel, lžíce nebo břity,
- opotřebení pluhu a zemědělské techniky pro práci v půdě,
- vodící plochy obráběcích strojů, čepy a vodící oka,
- třecí plochy v endoprotézách,
- válečková valivá ložiska, písní kroužky,
- železniční kola a kolejnice aj.



Obr. 5.10 Faktory ovlivňující abrazivní opotřebení

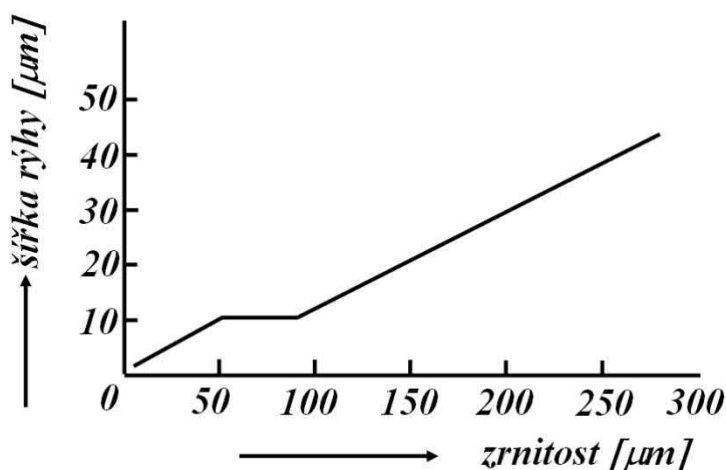
Typickým příkladem interakce tří těles → kolo, kolejnice → abrazivní částice znázorňuje odřezaná tříška z povrchu kola (obr. 5.11).



Obr. 5.11 Abrasivní částice z opotřebení železničního kola

Závislost opotřebení na velikosti abrazivních částic – obr. 5.12

Počet vzniknutých rýh je nepřímo úměrný velikosti abrazivních částic a přímo úměrný zatížení za předpokladu, že nesmí dojít k drcení abrazivních částic. Šířka rýhy se mění se změnou velikosti abrazivních částic při zatížení – lineární růst.



Obr. 5.12 Vliv velikosti abrazivních částic na šířku rýhy

Kritická velikost abrazivních částic

Je taková velikost, při které dochází ke změně závislosti opotřebení na průměrné velikosti abrazivního opotřebení. Mění se podle:

- zatížení,
- zkušebních podmínek od 70–200 μm,
- provozních podmínek.

Vliv tvrdosti abraziva – obr. 5.13

Poměrná odolnost proti opotřebení φ je vyjádřena:

$$\varphi = \frac{W_{1\text{ etalonu}}}{W_{2\text{ vzorku}}} = \frac{W_{h\text{ et.}}}{W_{h\text{ vz.}}} = \frac{P_{vz.}}{P_{et.}} = \frac{W_{o\text{ et.}}}{W_{o\text{ vz.}}}, \quad (5.14)$$

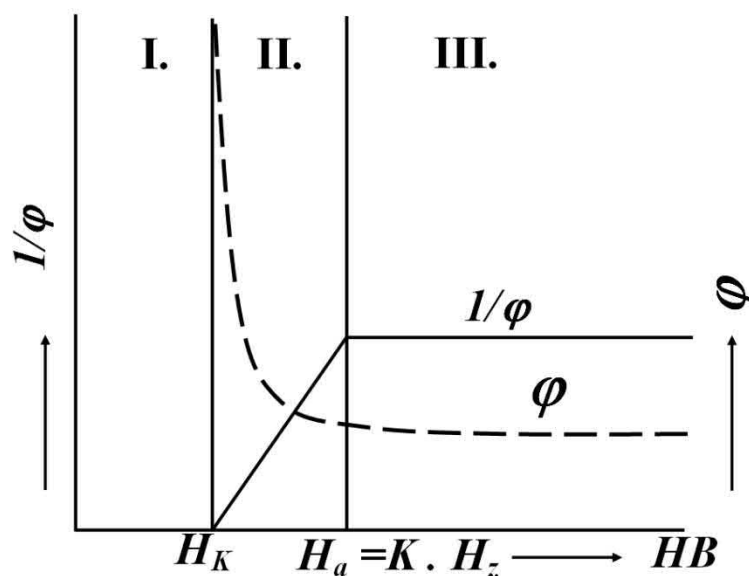
kde W_l , W_h , W_o je délkový hmotnostní nebo objemový otěr, p je měrná hmotnost a H je míra opotřebení podle změny tvrdosti materiálu.

Poměrné opotřebení je potom definováno jako:

$$1/\varphi \quad (5.15)$$

Závislost opotřebení na změně mechanických vlastností, vyjádřených tvrdostí abrazivního materiálu, má tři základní oblasti charakterizující průběh opotřebení podle typu abraziva (obr. 5.13):

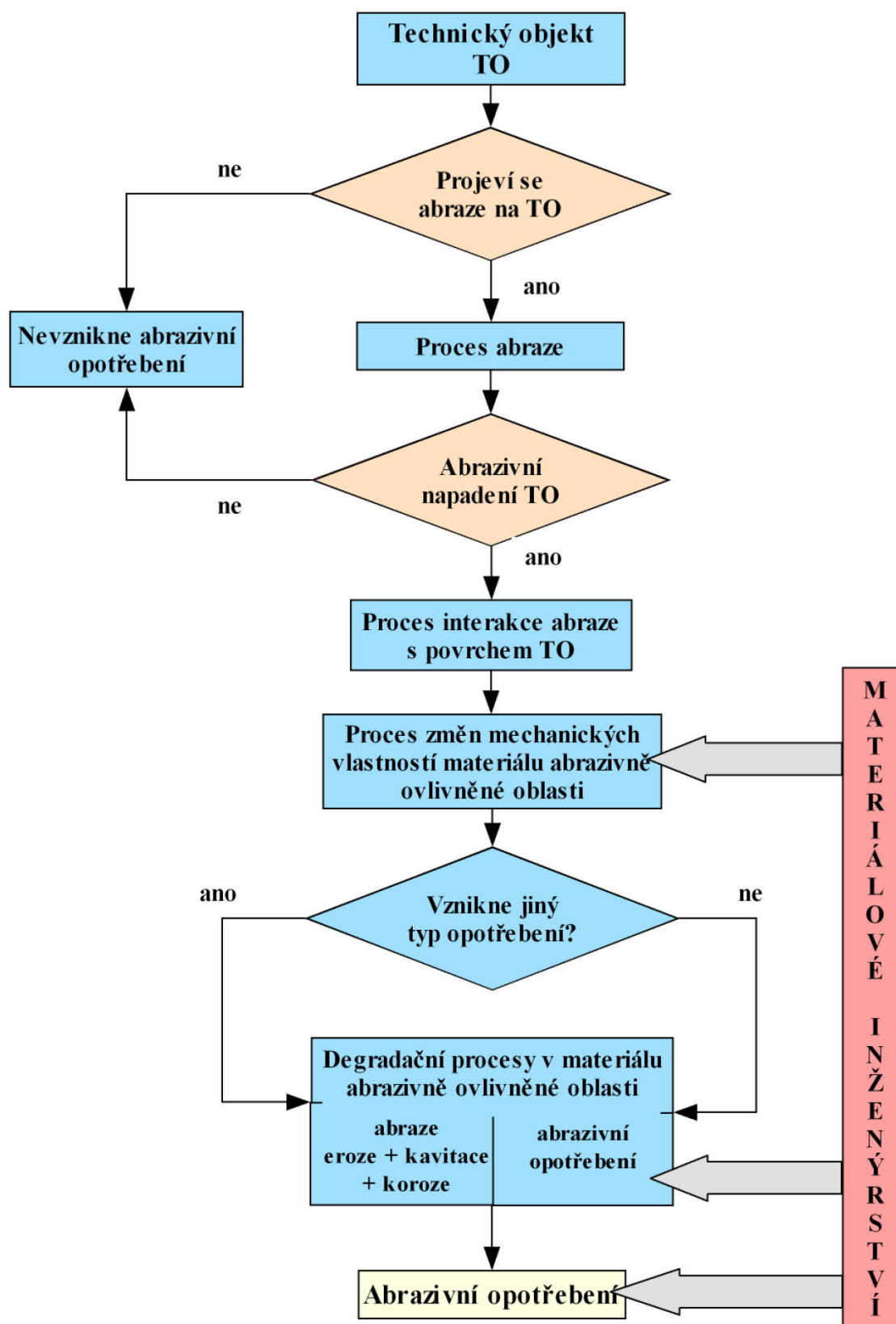
- I. $H_K < H_a$ – dochází k mírnému opotřebení;
- II. Přechodová oblast, opotřebení stoupá z min. $H_a = H_K$ po max. hodnotu $H_a = K \cdot H_z$, K – konstanta, např. pro kovy se používá 1,3–2;
- III. $H_a \gg H_K$ opotřebování je konstantní a závislé na poměru H_a/H_K , φ při $H_a > K \cdot H_K$ je konstantní při $H_a = H_K$ roste.



Obr. 5.13 Vliv tvrdosti abraziva

Volba materiálu (z pohledu materiálového inženýra) probíhá podle popsaného procesu probíhajícího na technickém objektu (obr. 5.14). První předpoklad, je správná identifikace vyskytujícího se opotřebení. Na základě sledování jednotlivých etap lze usoudit, o jaký zásah nebo změnu v daném procesu následně půjde a jakým způsobem se navrhnou další opatření pro zvýšení odolnosti proti opotřebení. Zda se bude jednat o návrh nového materiálu, nové technologie výroby, nebo dalšího tepelného zpracování povrchu.

Příkladem opotřebené součásti abrazí může být hrabací rošt čističky šterkového lože kolejevého svršku na obr. 5.15, kde se jedná o tzv. proděravění materiálu roštu, který vede k nefunkčnosti celé čističky. Celý proces opotřebení byl superponován korozi a erozí, které se v daném prostředí vyskytovaly.



Obr. 5.14 Abraze z hlediska procesní strukturalizace



Obr. 5.15 Hrabací rošt v provozním stavu a opotřebení jeho povrchu abrazí po vyjmutí z čističky (vpravo)

5.4. ADHEZIVNÍ OPOTŘEBENÍ TECHNICKÉHO OBJEKTU

Adhezivní opotřebení je charakteristické vysokou hodnotou součinitele tření. Tribologický kontakt bývá adhezivním opotřebením relativně rychle porušen a v extrémních případech je zabráněno kluznému tření vysokým součinitelem tření nebo zadřením. Mnoho poruch mazání v kluzných kontaktech je způsobeno adhezivním opotřebením, protože dokonalé oddělení kluzných povrchů závisí na mazacích poměrech v kontaktu součástí. Nejsou-li kluzné povrchy odděleny, adheze a následující opotřebení vedou téměř nevyhnutelně k zadření, čímž může dojít v konečné fázi k destrukci stroje. Adhezivní opotřebení je charakteristické tím, že při kluzném pohybu třecí dvojice jsou mikroskopické částice kovu vytrhávány a přenášeny na druhý povrch. K vytrhávání materiálu dochází proto, že mezi kontaktními plochami existují velké aktivované mezimolekulární resp. meziatomové síly, které se snaží vytvořit pevnou vazbu, která by obě plochy atomárně spojila dohromady. V reálném čase jsou vytvářeny velké počty adhezivních spojů a můstků, které stále vznikají, zanikají a obnovují se. Celý proces má náhodný stochastický charakter, který vzniká mezi tělesy na kontaktních plochách, které se stýkají nejen při skluzu, ale také při valení, rázu aj. Princip mechanismu adhezivního opotřebení se dá vysvětlit řadou existujících hypotéz a teorií, které obvykle vycházejí z procesu elastických a plastických deformací, přecházející na rýhování, vytváření svarových spojů a končící zadřením nebo mezním stavem porušení.

Mechanismus adheze

Adheze (přilnavost) mezi dvěma objekty příležitostně spojenými dohromady není pozorována v případech, kdy na povrchu existuje vrstva oxidu, vody, oleje nebo jiného média. Atmosféra a organické látky povrchově znečišťují objekty a tím snižují přilnavost mezi povrchy. Adheze je také snižována rostoucí drsností, nerovností povrchu a různou tvrdostí kontaktních materiálů.

❖ Adheze kov–kov

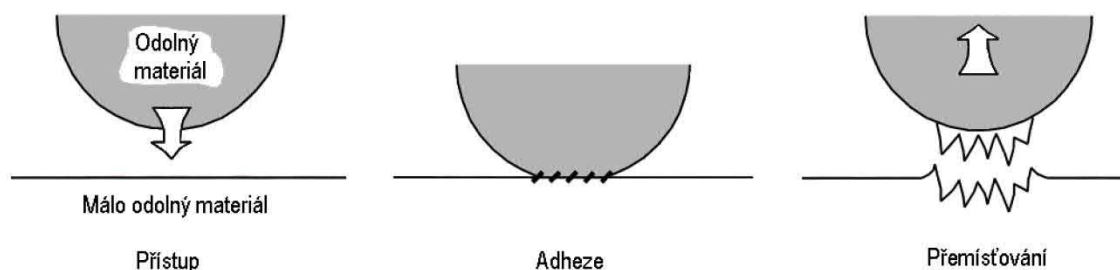
Kovy mají vždy na povrchu vytvořenou oxidační vrstvičku, která je v oxidační atmosféře pasivní. Oxidační vrstvička bývá tak tenká, že se povrch kovu jeví vyleštěný a čistý. Tato vrstvička má tloušťku pouze několik nanometrů a nebrání správnému kontaktu, ale stává se zároveň bariérou pro nadměrné opotřebení a další oxidaci.

Adhezivní síla pro různé kovy v kontaktu s čistým železem, měřená při tlaku $2 \cdot 10^{-4}$ [N] a tlaku v měřící vakuové komoře 10^{-10} [Torr], je uvedena v tabulce 5.1.

Tab. 5.1 Adhezivní síla pro vybrané kovy v kontaktu se železem ve vakuu

Kov	Rozpustnost v železu (%)	Adhezivní síla k železu [N]	Kov	Rozpustnost v železu (%)	Adhezivní síla k železu [N]
Železo	–	> 0,004	Nikl	9,5	0,0016
Měď	< 0,25	0,0013	Stříbro	0,13	0,6
Zlato	< 1,5	0,0005	Platina	20	0,001
Hliník	22	0,0025	Olovo	nerozpustné	0,0014

Z uvedené tab. 5.1 je patrné, že schopnost přilnavosti se nerozlišuje mezi kovy na základě jejich vzájemné rozpustnosti nebo relativního atomového čísla. Největší adheze se objevuje pro kombinaci stejných materiálů, např. kontakt železo–železo, ale i pro mnoho dalších kombinací odlišných kovů. Proces spojování je téměř okamžitý, ale může být pomalejší při poklesu teploty. Pro různé kombinace kontaktních kovů se ukazuje, že při silné přilnavosti dochází k přenosu měkčího kovu na tvrdší, obr. 5.16.

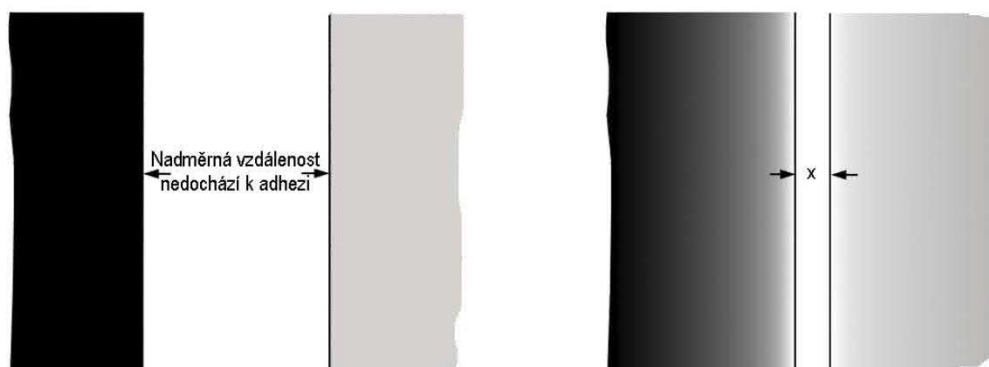


Obr. 5.16 Přenos kovu v důsledku adheze

Adheze mezi kovy se uskutečňuje přenosem elektronů mezi kontaktními povrchy. Množství volných elektronů přítomných v kovech se při dotyku vymění mezi dvěma tuhými látkami, čímž vzniká adhezivní spojení. Elektrony nejsou spojeny v pevné struktuře, vzdálenosti mezi dvěma povrchy v kontaktu jsou velmi malé (< 1 nm), proto může dojít k jejich přenosu z jednoho tělesa na druhé. Výsledkem může být takový stav, kdy elektrony spojují i dva povrchy navzdory jejich odlišné atomové struktuře. Existují teorie, že některé kovy s vysokou hustotou elektronů jsou dárci elektronů druhému kovu s nižší hustotou elektronů, jak znázorňuje obr. 5.17.

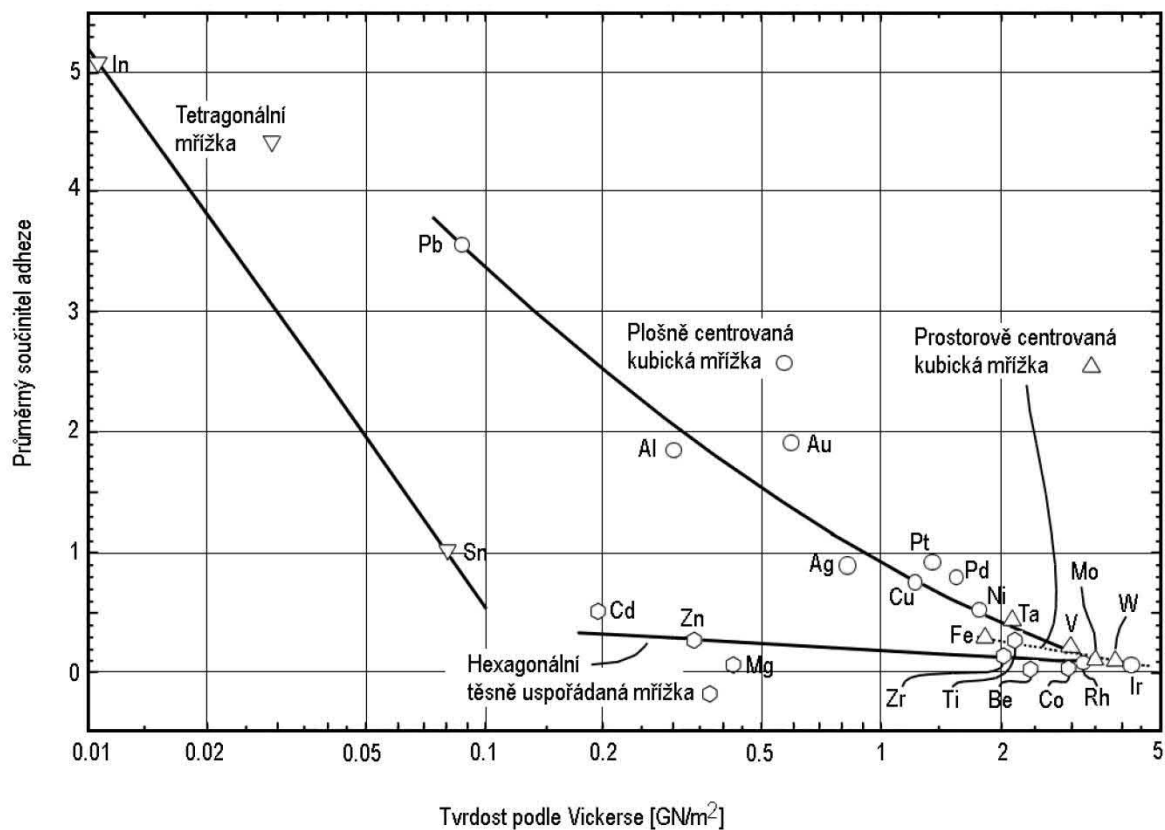
Kovy se vyskytují ve čtyřech základních typech krystalické mřížky a to kubické plošně centrované, kubické prostorově středěné, hexagonální těsně uspořádané a tetragonální. Experimentálně je potvrzeno, že kovy s hexagonální těsně uspořádanou

strukturou vykazují menší tendence k adhezi než jiné krystalické struktury, což souvisí s bazální vazbou. Vysoká tvrdost, velký modul pružnosti a povrchová energie kovů jsou charakteristické pro potlačení tendence k adhezi. Grafické vyjádření součinitele adheze v závislosti na tvrdosti pro několik čistých kovů zobrazuje obr. 5.18. Součinitel adheze je definován jako poměr síly potřebné k přerušení spoje ke kontaktní síle. Z grafické závislosti tvrdosti na součiniteli adheze na obr. 5.18 je vidět, že pro kovy s podobnou tvrdostí, ale rozdílnou krystalickou strukturou, např. hliník a zinek nebo olovo a cín, existují významné rozdíly v adhezi.



Legenda: x – ekvivalentní atomová vzdálenost < 1 nm.

Obr. 5.17 Model výměny elektronů v adhezivním kontaktu mezi kovy



Obr. 5.18 Součinitel adheze různých kovů v závislosti na tvrdosti podle Vickerse

Důvodem pro rozdíly v adhezi mezi kovy s podobnou tvrdostí může být právě charakter krystalických mřížek, které mají různé kluzné roviny a tedy i směry,

ve kterých plastická deformace probíhá. Adheze kovů je také ovlivněna reaktivitou a elektrickými vlastnostmi. Chemicky aktivní kovy, jako je hliník, se spojují daleko snadněji a proto mají vyšší adhezi než ušlechtilé kovy. To ukazuje na skutečnost, že kovy s plošně centrovanou krychlovou mřížkou a vysokým stupněm chemické aktivity mají zvláště vysokou adhezi. Na základě těchto poznatků vyplývá, že tyto kovy jsou naprosto nevhodné pro nemazané kluzné kontakty. Limitujícím faktorem adheze je potřebný tlak, který vede k plastickému toku materiálu, který se podílí na vybudování pevného kontaktu mezi povrchy.

❖ Adheze kov–polymer

Z experimentů spojení kovu a polymeru ve vysokém vakuu bylo zjištěno, že kovy a polymery mohou mít relativně vysoký stupeň adheze. Pevné adhezivní spojení nejspíše souvisí s přítomností reaktivních nekovů jako je fluor v polymeru, který má schopnost difundovat do povrchu kovu. Povrch atomů polymeru se spojuje s povrchem atomů kovu a vytváří adhezi. Mnoho polymerů přilne k jiným materiálům pravděpodobně pomocí Van der Waalových sil. V některých režimech opotřebení tato forma adheze není dostatečně silná pro rozmělnění částic materiálu a přerušení adhezivního kontaktu. Silná adheze mezi kovem a polymerem je založena na chemické interakci mezi polymerem a kovem při opotřebení. Takové nežádoucí opotřebení je nebezpečné pro endoprotézy v oblasti polymer–kov, obr. 5.19.



Obr. 5.19 Opotřebení kloubní hlavičky

❖ Adheze kov–keramika

Při vhodných podmínkách dochází k silné adhezi mezi kovy a keramikou. Podstatným faktorem při adhezi mezi kovovými a keramickými povrchy je chemická afinita některých prvků z keramiky. Vyskytuje se pouze u kovů, které netvoří stabilní oxidy snižující součinitel tření s keramikou. Ve styku s keramikou kovy, jako např. měď, hliník a nikl (vytvářející stabilní oxidy), mají vysoký součinitel tření, naopak součinitele tření zlata a stříbra (nestabilní oxidy) jsou nízké. Ačkoliv kyslíkové ionty tvoří na hliníkovém povrchu oxidy, které jsou pevně vázány s hliníkem, dodatečná interakce s kontaktními atomy kovu je možná a je vysvětlována zákony kvantové

chemie. Kovy obvykle mají nižší kohezni (soudržnou) sílu než většina keramických materiálů, proto dochází k přerušení adhezivního kontaktu vytvořenými úlomky, které porušují soudržnost a jsou transportovány na keramiku ve formě přenosové vrstvičky. Adheze keramických a kovových materiálů je omezována povrchovým znečištěním podobným způsobem jako v případě kontaktů kov–kov.

Účinky adheze na povrchy

Silná adheze mezi nerovnostmi povrchů při opotřebení vyvolává vícesložkovou třecí sílu, která je generována nerovnostmi a zaniká v případě odstranění částic opotřebení nebo jejich přemístěním.

Adhezivní teorie tření byla vytvořena již v polovině minulého století. Součinitel tření je definován klasickým vztahem:

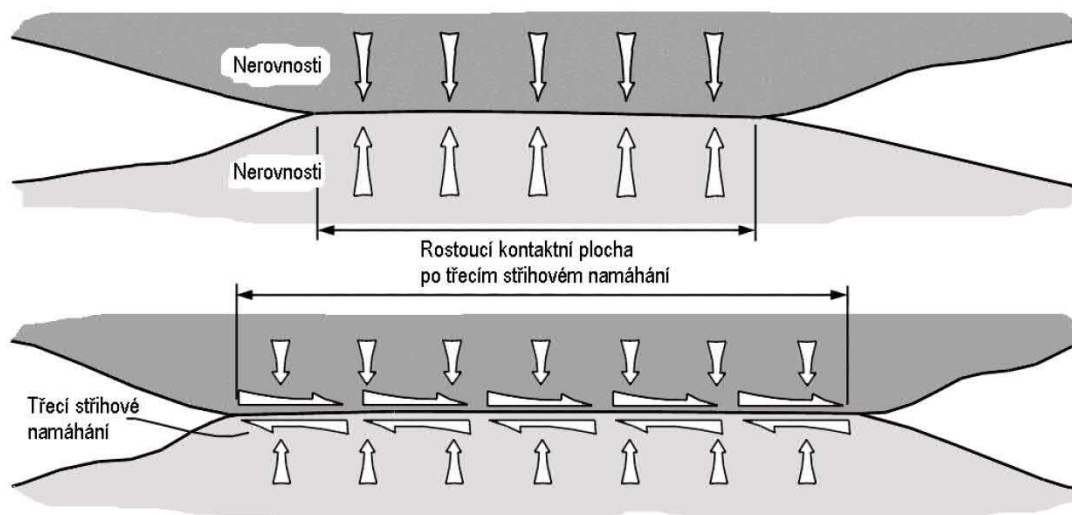
$$\mu = \tau / p_y, \quad (5.16)$$

kde τ je smykové (tečné) namáhání materiálu [Pa] a p_y je plastické deformační napětí materiálu [Pa].

Skutečné povrchové smykové namáhání materiálu vede k adhezivnímu spojení při hodnotě $\mu = 0,2$. Pro rozdílný materiál kontaktních povrchů je výsledné namáhání měkčího materiálu a jeho smykové namáhání, popř. smykové namáhání ve styku povrchů, bez ohledu na jejich velikost dáno rovnicí 5.16. Nejvyšší adheze se objevuje mezi stejnými materiály, tj. kombinace kovů znamená nižší adhezi a nižší tření. Heterogenní materiály, jako jsou oceli a litiny, mají obvykle nižší adhezi, protože zahrnují v mikrostruktuře i nekovové fáze. Součinitel tření těchto materiálů je nižší, ale některé názory zpochybňují platnost klasické adhezivní teorie. Byly nalezeny příklady třecí odolnosti, s ohledem na mazání nebo atmosférické podmínky, způsobené pravděpodobně deformacemi nerovností a ne adhezivním spojením. Třecí síly způsobené adhezí jsou dominantní jen v případě, že existuje úplný nedostatek maziva. Teorie tření v této jednoduché formě předkládá, že hraniční hodnoty tření jsou menší než soudržnost materiálu.

Z adhezivních experimentů ve vysokém vakuu vyplývá, že když je znečištění z povrchů progresivně odstraňováno, velikost tření rychle roste. Naopak, jestliže se znečištění dostane na čistý povrch, velikost tření klesá na hodnotu obvyklou pro atmosférické podmínky. I ve vysokém vakuu se může objevit úplné zadření mezi kontaktními povrchy. Je-li kyslík dodáván na železné povrchy, začíná se tvořit vrstvička oxidů železa a výsledkem je snížení součinitele tření. Dosáhne-li tato vrstvička určité tloušťky, potom vysoká adheze mezi železem je nahrazena mírnou adhezí mezi oxidy železa, kde pravděpodobnou příčinou jsou Van der Waalovy síly. Součinitel tření mezi povrchy čistého železa je vysoký, v praxi je např. $\mu = 3$. Tento fenomén vysvětluje teorie tzv. „přirůstku spojování vlivem nerovností“. Podle ní dochází během plastické deformace k relativně komplikované interakci normálových a tangenciálních sil. Teorie „přirůstku spojování vlivem nerovností“ je založena na předpokladu, že zpočátku je normálové zatížení na nerovnosti dostatečně velké pro jejich plastickou deformaci. Protože kontaktní povrch se dostane do plastického stavu podobnému jako „tečení materiálu“, kontaktní plocha se zvětšuje a dojde k zatížení tangenciálními silami. Zvětšení kontaktní plochy sníží normálový tlak

(tj. stejné zatížení je rozloženo na větší plochu), viz obr. 5.20. Zvětšená kontaktní plocha umožní zvětšení tangenciální síly. Tangenciální síla a kontaktní plocha rostou až k maximálnímu dosažitelnému smykovému namáhání daného materiálu (předpokládá se, že zahrnuje zatížení a maximální namáhání za kluzných podmínek všech stykových ploch a jejich nerovností před přerušením kontaktu). Výsledkem je rychlý růst součinitele tření, dochází k adhezivnímu spojení a soustava se stává nestabilní, čímž může dojít k zadření pracovních kluzných částí.



Obr. 5.20 Růst kontaktní plochy vlivem nerovností za působení třecích sil

Podmínky mechanismu přírůstku kontaktní plochy spojení vlivem nerovností se popisuje von Misesovým kritériem růstu. Podle tohoto kritéria bude materiál plasticky deformován v případě, že platí:

$$p^2 + 3\tau^2 = p_y^2, \quad (5.17)$$

kde p je normálový kontaktní tlak [Pa], τ je skutečná smyková síla namáhání v kontaktu [Pa] a p_y je plastické deformační napětí materiálu [Pa].

Protože výsledek spojení je dán kombinací vlivů normálového tlaku „ p “ a tangenciálního namáhání „ τ “, vztahy popisující chování byly navrženy v následujících tvarech:

$$p^2 + c\tau^2 = p_0^2, \quad (5.18)$$

kde c je konstanta ($c \rightarrow 10$) a p_0 je deformační napětí materiálu bez tangenciálního namáhání [Pa].

Další proměnné jsou definovány následujícím způsobem, např. z rovnice (5.18) plyne, že když normálové zatížení působí na nerovnosti, tj. $\tau = 0$ potom bude $p = p_0$, tlaky „ p “ a „ τ “ a „ p_0 “ vyjádřené jako:

$$p = N/A_r; \quad \tau = F/A_r; \quad p_0 = N/A_{r0}, \quad (5.19)$$

kde F je třecí síla [N], N je normálová síla [N], A_r je skutečná plocha kontaktu zahrnující působení tangenciálních sil [m²], A_{r0} je skutečná plocha kontaktu bez působení tangenciálních sil [m²].

S využitím uvedených vyjádření bude:

$$(N/A_r)^2 + C(F/A_r)^2 = (N/A_{r0})^2 \quad (5.20)$$

Úpravou rovnice 5.20 a vyjádřením vztahů zvýšení skutečné kontaktní plochy a tangenciální síly lze psát, že:

$$A_r/A_{r0} = (1 + C \cdot F^2/N^2)^{0,5} \quad (5.21)$$

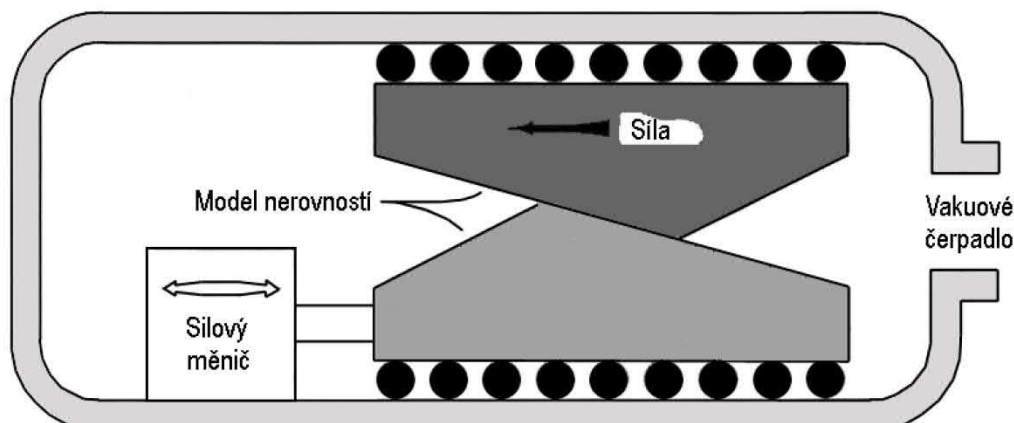
Z rovnice 5.21 vyplývá, že zvýšení tangenciální síly je příčinou zvýšení adheze, protože skutečná plocha styku roste. Např. je-li $C = 10$ a poměr tangenciální síly k normálové je 0,3, potom kontaktní plocha se zvětší 1,4x. Zvětšení skutečné kontaktní plochy je dáno vysokou hodnotou proměnné třecí síly „ F^* “, která byla sledována pro čisté povrchy. Zvýšení tangenciální síly je podmíněno zvýšením skutečné kontaktní plochy, dokud není dosaženo celkového smykového namáhání na styku mezi nerovnostmi a nezačne působit tzv. makrosmykání. Pro vysokou hodnotu celkového smykového napětí je těchto podmínek těžké dosáhnout, protože zvýšení kontaktní plochy odpovídá zvýšení tangenciální síly (když „ F^* “ převyšuje „ N “, A_r/A_{r0} se blíží $C^{0,5}F/N$). Rozdíl je vidět v rovnici 5.21, kde pro malé hodnoty tangenciální síly a limitní smykové napětí je zvýšení „ A_r “ nepatrné, proto základní vztah 5.16 je přibližně správný. Míra zvýšení ve skutečných kontaktech s tangenciální silou je dostatečná a udrží konstantní smykové napětí na styčné plochy nerovností. Je tomu tak proto, že poměr tangenciální síly v kontaktní ploše se významně nemění a může se objevovat zadření kluzných členů. Je třeba brát v úvahu, že plastická deformace, která se objevuje na nerovnostech je doprovázena zpevněním u mnoha kovových materiálů. Proto pevnost svarového spoje je často vyšší než u smykem namáhaných kovů, kdy se objevuje hlazení, které se liší od lokálních svarů. Celkový efekt zpevňování v závislosti na součiniteli tření je však malý v porovnání s efektem vytvořeného spojení.

Vysoký součinitel tření, který je typický pro čisté povrchy ve vakuu, se často objevuje v praktických aplikacích u mechanických kontaktů a vede k poruchám. Kluzná ložiska a zuby převodů jsou zvláště citlivé na tyto problémy. Např. hladké povrchy zubů bývají porušeny trhlinami a objevují se známky silné adheze a adhezivních lomů. Normální provoz je v těchto podmínkách nemožný a výsledkem bývá poškození strojních skupin vysokou teplotou a adhezí. V mnoha třecích kontaktech jako jsou ložiska, převody, řetězy, řemenice, hnací kola, hřídele aj. dochází k případům katastrofických poruch adhezí a adhezivním opotřebením.

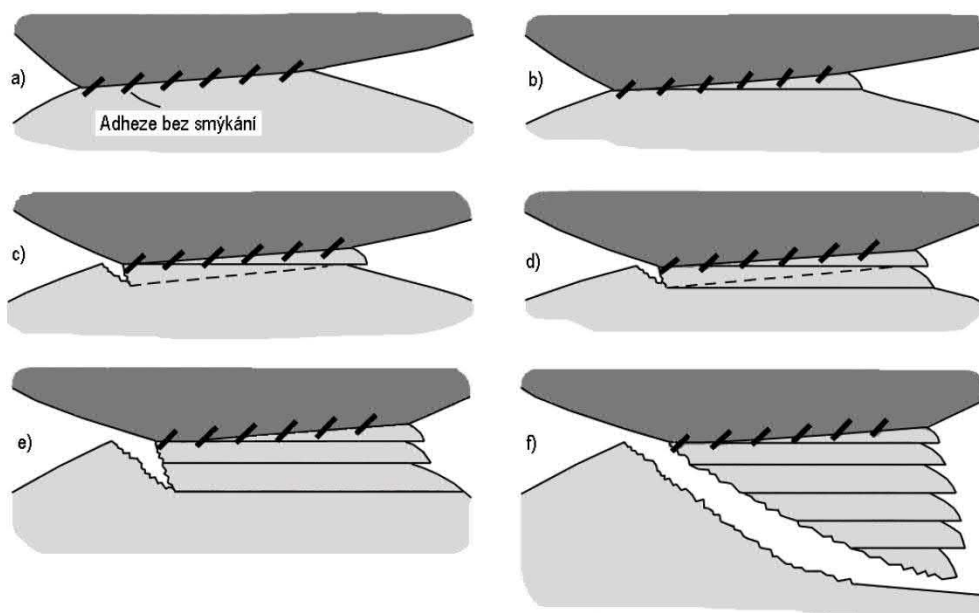
Kombinované působení adheze mezi nerovnostmi a kluzným pohybem bývají příčinou kritické plastické deformace nerovností. Styk mezi dvěma nerovnostmi byl simulován na dvou klínových deskách, obr. 5.21.

Obě desky jsou přitlačovány k sobě vertikální silou a pohybují se jedna proti druhé pomocí hydraulického pístu. Celý systém byl přizpůsoben tak, aby se proces dal sledovat elektronovým mikroskopem. Poloha desek je udržována v konstantní poloze pomocí bočních ochozů. Model vyjadřuje představu třecího kontaktu, kde jednotlivé nerovnosti se pohybují podél horizontální roviny s míjivým zatížením a dochází ke kontaktu s opačnou nerovností. Mechanismus tvorby a přemístění částic v adheziv-

ním kontaktu mezi nerovnostmi, s využitím experimentálního zařízení obr. 5.21, je schematicky zobrazen na obr. 5.22.



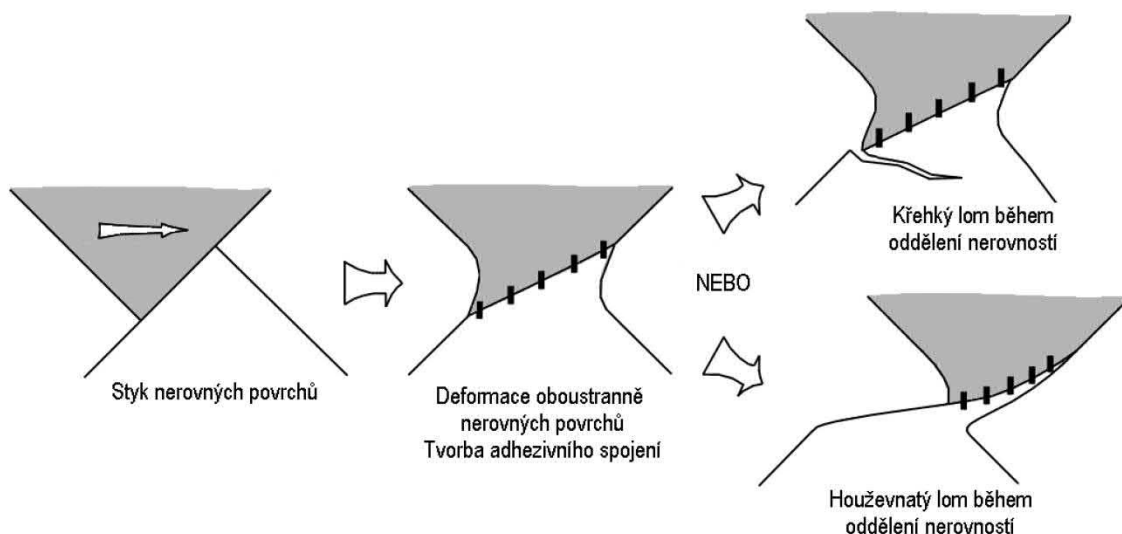
Obr. 5.21 Experimentální zařízení pro studium procesu adhezivního opotřebení



Obr. 5.22 Tvorba a přemísťování adhezivních částic opotřebení

Materiál s menšími nebo ostřejšími nerovnostmi se deformuje a tvoří řadu ustříhnutých (usmýknutých) pásů přizpůsobených relativnímu pohybu tj. pásy se nepohybují skluzem podle kontaktního obrysu nerovností. Když každý ustříhnutý pásek dosáhne mezního stavu namáhání, dochází k iniciaci trhliny popř. již existující trhlina se šíří a tvoří se nový ustříhnutý pás. Trhlina se šíří křížem přes nerovnosti a částice se oddělí od deformované nerovnosti. Ostré nerovnosti mají tendenci k větším ztrátám materiálu v porovnání s oblými nerovnostmi. Materiálové charakteristiky mají velký vliv na deformace nerovností a velikost adhezivního opotřebení. Zkušenosti ukazují, že nerovnosti křehkých materiálů mají tendenci křehkého porušení a tedy utržení materiálu s malou deformací. Také tento druh materiálu produkuje méně částic opotřebení v porovnání s tvárnými materiály. Tvárnost materiálu má nežádoucí efekty zvyšující adhezivní opotřebení. Při kontaktu mezi nerovnostmi, které neprodukují částice opotřebení, může existovat značná plastická deformace zobrazená na obr. 5.23.

Velká plastická deformace a nebo praskání povrchu s produkcí ostrých zkosených profilů opotřebovaných nerovností byla pozorována experimentálně.



Obr. 5.23 Model deformací nerovností v adhezivním kontaktu

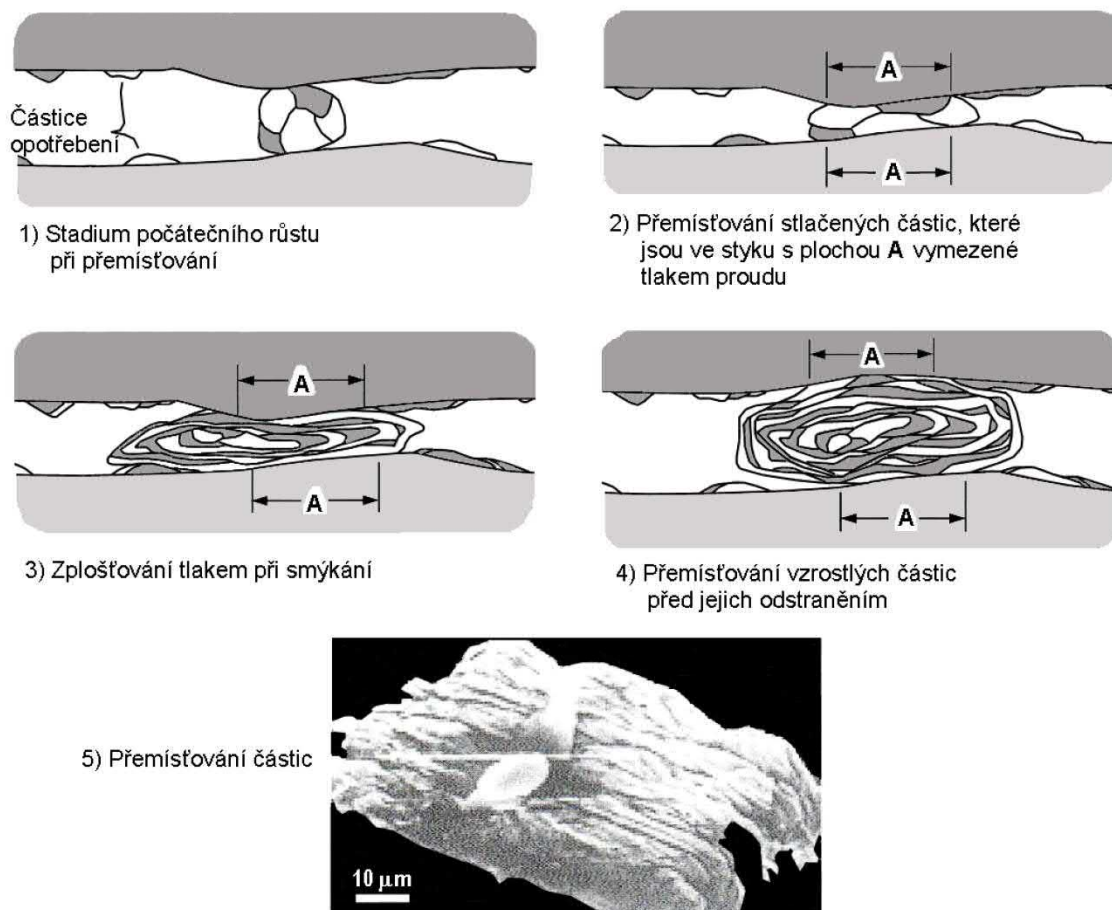
Částice kovu oddělené z jedné nerovnosti (obr. 5.23) zůstávají odděleny na druhém povrchu. V závislosti na podmínkách mohou být postupně odstraňovány dalšími vznikajícími nerovnostmi v kontaktu a tím tvořit částice opotřebení nebo zůstat na povrchu ve formě přenosové vrstvičky.

Vznik přenosové vrstvičky je charakteristickou vlastností adhezivního opotřebení, materiál je přenesen z jednoho povrchu na druhý před tím, než dojde k uvolnění částic opotřebení. To zcela zásadně odlišuje adhezivní opotřebení od mnoha dalších mechanismů opotřebení. Jev přenosu materiálu byl nalezen např. v kontaktu mosaz–ocel, kdy přenosová vrstvička nesla mosaz na ocelový povrch, který byl časem pokryt pásy opotřebení. Přenesená mosaz byla nalezena na vysoce tvrdém kovu, který je schopen opotřebit mosazný vzorek samotný.

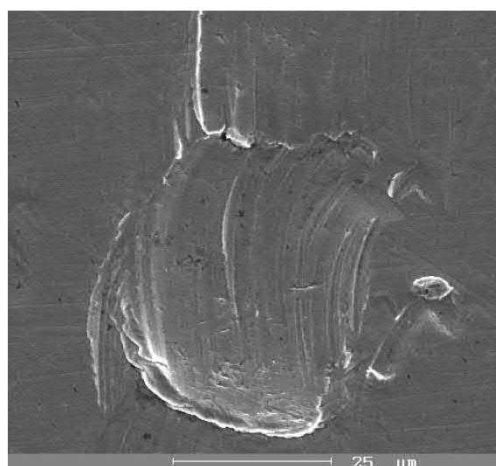
Testy s jinými materiály, jako je např. železo, molybden, nikl, měď, stříbro a hliník pro různé kombinace třecích dvojic ukazují, že vzájemné rýhy a částice materiálu ve formě „hrudek“ se objevují v identických kopiích, ale v případě, že dva kovy jsou nerozpustné, např. železo a stříbro, k přenosu hrudek opotřebení nedochází. Jsou-li rozdílné kovy smýkány jeden na druhém, objevuje se určitá forma mechanických slitin a přenos částic závisí na oddělených materiálech tvaru lupínků obou kovů. Na začátku přenosu částic dochází k nahromadění materiálu z obou povrchů do malých hrudek. Potom se hrudky zplošťují mezi třecími povrchy a výsledkem je listková struktura. Možný mechanismus tohoto procesu ukazuje příklad vzniku a pohybu částic na obr. 5.24.

Z různých výzkumů, testů a srovnání bylo zjištěno, že přenosová vrstvička má specifické vlastnosti, které ji odlišují od jiných vrstviček na třecím povrchu.

Mechanismus tvorby rýh zahrnuje rozrývání měkčí spodní vrstvy materiálu pomocí mechanicky zpevněných přenosových částic. Rozrývání je nedokonalou formou řezání, přitom dochází k tvorbě trhlin na opotřebovaném povrchu s výsledným vysokým tahovým namáháním (obr. 5.25) projevující se typickým porušením.



Obr. 5.24 Tvorba lístkové struktury přenosem částic



Obr. 5.25 Typická lokalita adhezivního opotřebení

Tvorba takových hrubých rýh na opotřebených površích je charakteristická právě v případech adhezivního opotřebení. Rýhy obvykle vznikají na kluzných členech a tvoří velké oblasti pásů opotřebení, např. v diskových nebo kroužkových mechanis-mech, na kolících, disku nebo kroužku aj. Přenosová vrstvička může značně pozměnit kluzné vlastnosti materiálů. Je-li přítomna a obsahuje-li relativně velké hrudky, je nemožné hladké klouzání a namáhání je způsobeno několika nebo i pouze jednou přenosovou částicí. Uvolní-li se přenosová částice, dojde k náhlému pohybu kluzného

povrchu, který uvolnění vyrovnává. V extrémních případech může uvolnění přenosových částic selhat a dojde k celkovému zadření kluzných styčných ploch. Avšak ne všechny přenosové vrstvičky jsou nežádoucí, např. opotřebení polymerů závisí na velmi tenké přenosové vrstvičce, která umožňuje nízké tření. Pevná maziva mají také příznivý vliv na tvorbu tenkých vrstev na opotřebovávaných površích. Tyto vrstvy jsou přenášeny z jednoho opotřebovaného povrchu na druhý a umožňují mazání nedostupných kontaktních ploch.

Ovlivňování adhezivního opotřebení

Není-li adhezivní opotřebení systematicky snižováno, dochází často k nepříjemným následkům jako je např. vysoké tření, možnost zadření, růst částic opotřebení, ucpání mazacích kanálků aj. V některých případech přenosu částic může dojít k ucpání celého kluzného kontaktu, což je typické pro prstencové (kruhové) kontakty. Dalším důsledkem problémů při silné adhezi je vysoký stupeň opotřebení a silné poškození povrchu. Vrstvy nečistot zoxidovaných povrchů a materiálové nečistoty přispívají k snížení adhezivního opotřebení. Adhezi lze regulovat speciálně formulovanými mazivy a pečlivým výběrem třecích materiálů.

Oxidace kovových povrchů snižuje adhezi na přijatelnou hladinu. Vlhkost zvyšuje účinek kyslíku, důvod tohoto jevu dosud není exaktně vysvětlen. Oxidace kovových povrchů je relativně rychlá i za nízkých teplot a je limitována jeho množstvím do dosažení kritické tloušťky $5 \cdot 10^{-9}$ m. V podmínkách atmosférického tlaku se oxidační vrstvička po odstranění opět tvoří za několik mikrosekund. Rychlý opětový růst znamená, že ochranná oxidační vrstvička v opotřebovávaném kontaktu je stále rovnoměrná. Studie úprav nechráněných povrchů s minimem složek materiálu vede k závěru, že odolnost proti adhezivnímu opotřebení u železa se významně zvyšuje i malým množstvím fosforu a síry. Analýza opotřebovaných povrchů železa s relativně velkým obsahem uhlíku ukazuje, že uhlíková vrstvička pokrývá opotřebované povrchy, proto slitiny a kompozitní materiály jsou obvykle kvalitnější než čisté materiály z hlediska odolnosti proti adhezivnímu opotřebení.

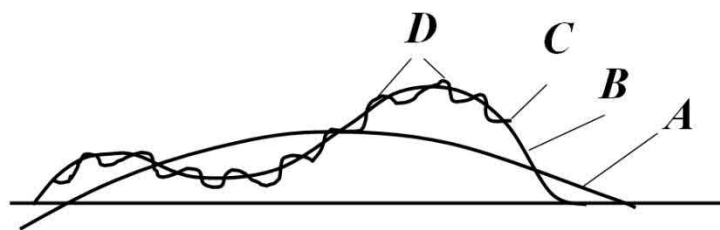
Další možností je použití maziv, která snižují adhezivní opotřebení a poskytují ochranu povrchu. Mastné kyseliny a další polární organické látky jsou obvyklými přísadami do mazacích olejů. Mastné kyseliny adsorbují z povrchu oxidační vrstvičky, čímž dochází ke snížení tření a opotřebení. Některá maziva (oleje) obsahují přísady (aditiva) bohaté na síru, fosfor a chlór. Kovové povrchy mohou tvořit sulfidické, fosforové a chlórové vrstvičky právě tak snadno jako oxidační vrstvičky. Tyto vrstvičky fungují pro případ, že oxidační vrstvička není schopna poskytnout ochranu povrchu proti silnému tření a zadírání. Minimalizace adhezivního opotřebení zahrnuje speciální tvorbu maziv.

Vhodný výběr materiálů vede k minimalizaci tření a opotřebení. Příkladem vhodné kombinace je ocel a bronz pro hřídele a pánve kluzných ložisek. Základním pravidlem pro konstruktéra je nutnost vyhnout se v dynamické konstrukci vzájemnému smýkání podobných nebo dokonce stejných materiálů. Účinky vzájemné rozpustnosti kovů na jejich adhezi jsou stále diskutabilní. Silné argumenty říkají, že kovy, které jsou vzájemně rozpustné, by se neměly smýkat jeden proti druhému. Avšak zkušenosti

ukazují, že kovy smýkané proti oceli a hliníku, které mají omezenou rozpustnost v železu, mají vyšší součinitel tření než chróm, který je celkově rozpustný. To může být vysvětleno Buckeyho hypotézou, která předpokládá, že chemicky aktivní kovy jsou elektropozitivní, tj. dárci elektronů a výsledkem je mnohem silnější adheze železa než u pasivních nebo inertních kovů. Protože hliník je více elektropozitivní než chróm, je jeho adheze na železo silnější než chrómu na železo. Olovo, cín, měď a stříbro, které jsou široce užívány v kluzných ložiskách k snížení tření, jsou kovy s nízkou chemickou aktivitou. Heterogenní materiály jsou méně reaktivní než čisté materiály a proto se opotřebovávají méně. Např. tření oceli proti oceli je lepší než čistého železa proti čistému železu. Některé polymery mohou být také použity v kluzných kombinacích s tvrdokovky a jejich třecí chování závisí na charakteristikách polymerů. Tření keramiky proti keramice nebo proti kovovým materiálům vykazuje relativně velký součinitel tření a rychlost adhezivního opotřebení závisí na dostatečně vysoké teplotě, která umožňuje desorpci vrstvičky vlhkosti v třecím kontaktu.

Spolehlivě rozeznat tendence adhezivního chování materiálů v třecích kontaktech je zásadní otázkou pro další výzkum a praxi. Atmosférické vrstvičky a maziva poskytují efektivní prostředky pro snížení adhezivního opotřebení, ale nikdy jej nemohou úplně odstranit. Výsledkem adheze je vysoký součinitel tření, opotřebení a někdy až degradace kontaktních povrchů. V extrémních případech, kdy adhezivní opotřebení je plně rozvinuto, tření a rychlost opotřebení je tak vysoká, že je nemožné pro kontaktní povrchy pokračovat v klouzání. Adhezivní opotřebení je hlavní příčinou poruch mnoha kovových třecích kontaktů a proto účinná prevence je základem správné funkce konstrukčních prvků.

Oddělování a přemísťování části z povrchu může způsobit nerovnost povrchu od submikroskopického charakteru nerovnosti až po makroskopickou, obr. 5.26.



A – makroskopická drsnost, B – vlnitost povrchu,
C – mikroskopická drsnost, D – submikroskopické nerovnosti.

Obr. 5.26 Oddělování a přemísťování části z povrchu

Rychlé a zjednodušené hodnocení adhezivního opotřebení lze vyjádřit pomocí objemových otěrů.

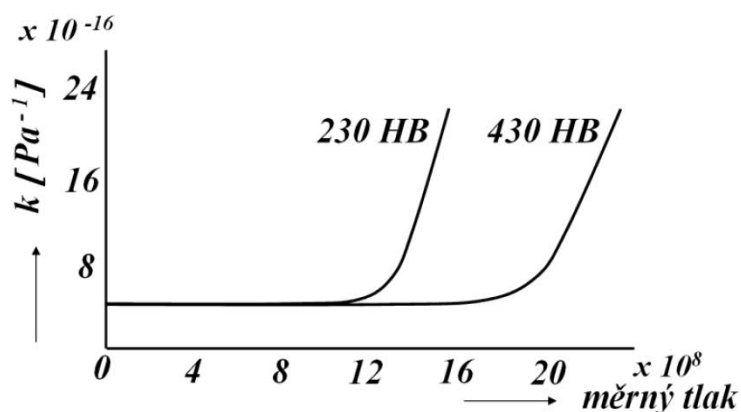
Velikost objemového otěru W_o závisí na zatížení F , když průměrná velikost plošek je konstantní:

$$W_o = k \cdot F \cdot L, \quad (5.22)$$

kde k je koeficient adhezivního opotřebení, L je kluzná dráha [m].

Koeficient k je závislý na tvrdosti materiálu HB a zůstává konstantní do hodnoty měrného tlaku $\approx 1/3$ HB.

Z grafického porovnání dvou materiálů při adhezivním opotřebení na obr. 5.27 lze konstatovat, že na měkčí materiál stačí menší měrný tlak.



Obr. 5.27 Závislost koeficientu adhezivního opotřebení na měrném tlaku



Obr. 5.28 Faktory ovlivňující adhezivní opotřebení

Základní faktory ovlivňující adhezivní opotřebení jsou uvedeny na obr. 5.28, dále sem patří:

- *Zatížení* – překročením „kritického“ zatížení roste opotřebení skokem mnohonásobně;
 - *Tepelný režim* – přeměnou energie při tvorbě mikroskopických částic, dochází k chemickým reakcím povrch – okolí, co vede k zvýšení opotřebení;
 - *Mazání* – odstraňuje místní špičky napětí, působí jako chemická ochrana;
 - *Použité materiály* – na třecí ploše, rozpustnost, nerozpustnost chemických prvků;
 - *Technologie výroby* – optimální drsnost povrchu, zpevnění;
 - *Výběr dvojice materiálu* pro případné adhezivní opotřebení.

Existují varianty:

1. Dva tvrdé materiály (tvrdé návary);
2. Materiály s nízkou interakcí: kov – nekov kov – kov;

└──────────────────┘
Mazání
3. Materiály kov – plast → bez mazání;
4. Kompozit kov → s mazáním a bez mazání;
5. Plast – plast → bez mazání.

Příklady součástí vystavených adhezivnímu opotřebení jsou zobrazeny na obr. 5.29 až 5.31 – opotřebení kolejnic a obr. 5.32 typické opotřebení brzdového obložení.



Obr. 5.29 Kolejnice – odlupování materiálu



Obr. 5.30 Kolejnice s extrémní vlnkovitostí



Obr. 5.31 Kolejnice – vada head check



Obr. 5.32 Opotřebení brzdového obložení s detailem vypadaných míst a rýhy

5.5. EROZIVNÍ OPOTŘEBENÍ TECHNICKÉHO OBJEKTU

K erozivnímu opotřebení povrchu technického objektu dochází v důsledku opakovaných srážek tvrdších částic s povrchem. Při nárazu se kinetická energie každé částice mění v deformační práci, která způsobuje plastickou deformaci na povrchu objektu formou stopy-rýhování vedoucí k oddělování částic. Opakované nárazy na povrch mohou mít charakter únavového zatěžování.

Mechanismus eroze

Oddělování částic a poškozování funkčního povrchu částicemi nesenými:

- proudem kapaliny (součásti vodních čerpadel, turbín, trysek, potrubí);
- proudem plynu (ventilátory, tryskače, potrubí, armatury);
- proudem kapaliny, páry, kapek nebo plynu (parní turbíny, parní armatury, náběžné hrany rovných ploch leticích letadel).

Účinky eroze na povrchy

Jsou charakteristické nerovnoměrným porušením funkčního povrchu např. u:

- části vzduchové brzdy,
- části spalovacích motorů (opotřebení pístu spalovacího motoru je na obr. 5.33),
- hydraulických přenosů výkonů.

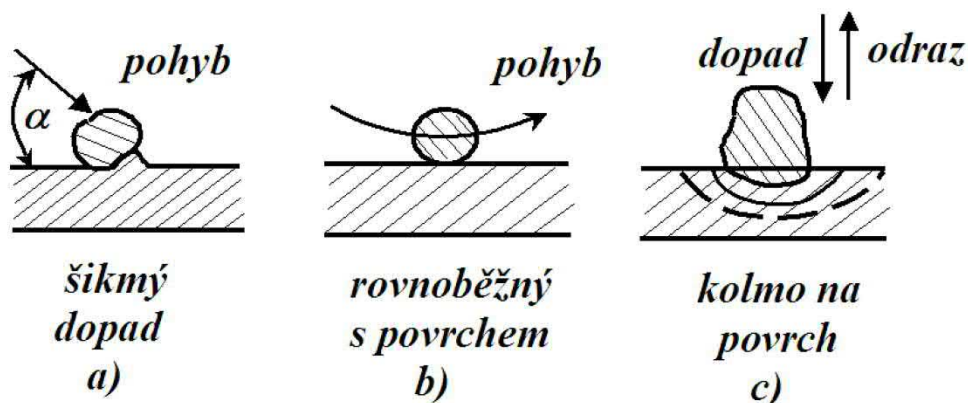


Obr. 5.33 Degradace pístu spalovacího motoru erozí

Při erozivním opotřebení částicemi – obr. 5.34, kdy mohou nastat tyto případy:

- částice s dostatečnou energií vniknou do povrchu, materiál vytlačí nebo oddělí;
- částice zatíží povrch jen v elastické oblasti;
- dojde k elastické a plastické deformaci a částice se může i odrazit.

Je důležité sledovat úhel pod jakým erozivní částice dopadá na povrch a jakou hloubku materiálu ovlivňuje. To závisí mj. na energii dopadu sledované částice.

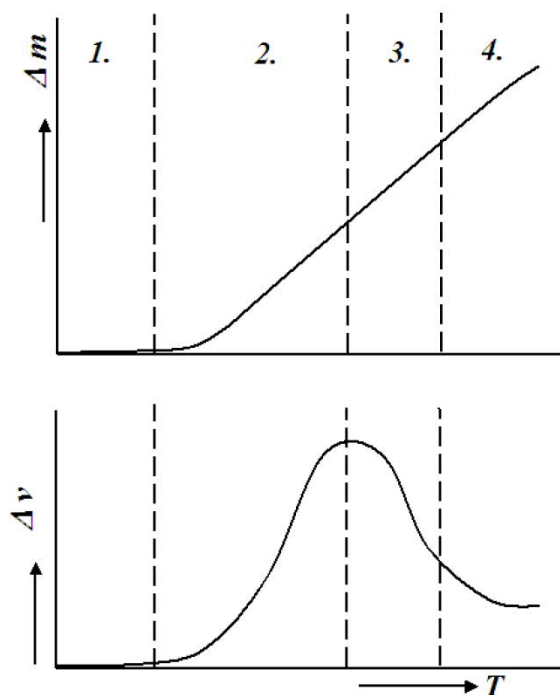


Obr. 5.34 Erozivní opotřebení částicemi

Časový průběh opotřebení – obr. 5.35 je typický charakteristickými oblastmi:

- *Inkubační doba* – dochází ke změnám mechanických vlastností povrchu;
- *Nárůst rychlosti opotřebení* – začíná být viditelný úbytek materiálu z povrchu;
- *Útlum*;
- *Ustálený režim*.

Proces opotřebení je ovlivněn faktory, které jsou uvedeny na obr. 5.36. Patří k nim mimo jiné i druh, velikost a tvar částic, jejich tvrdost aj.



Obr. 5.35 Hmotnostní ořer v závislosti na čase



Obr. 5.36 Faktory ovlivňující erozivní opotřebení

5.6. VIBRAČNÍ OPOTŘEBENÍ TECHNICKÉHO OBJEKTU

Vibrace souvisí s mechanickým kmitáním těles s různými amplitudami.

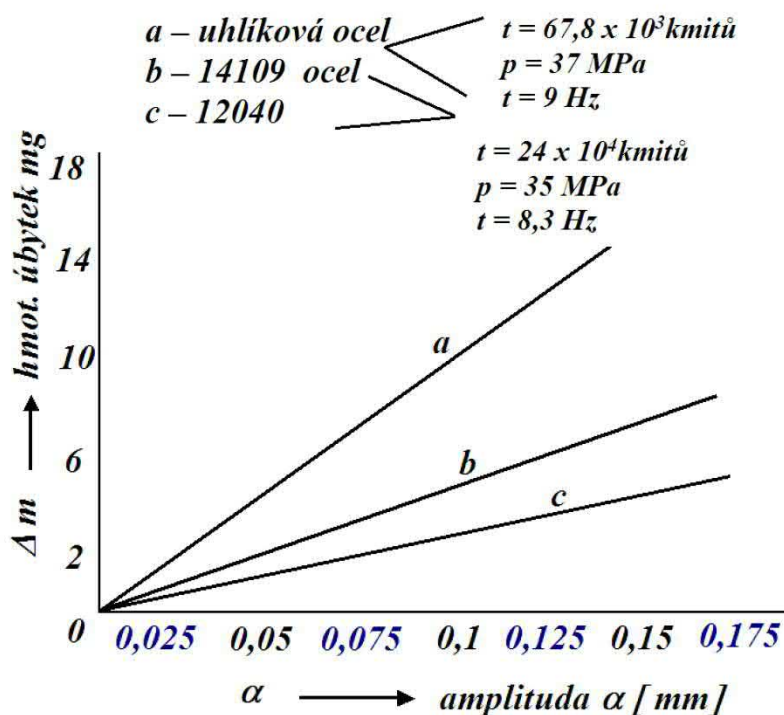
Mechanismus opotřebení

- Tvorba malých částic plasticky deformovaných kovů;
- První stádium – oxidace – oddělování oxidů;
- Druhé stádium vytvoření jiného změněného povrchu (změna geometrie, povrchu, mechanických vlastností).

Účinky vibrace na povrchy

- Oddělování částic a poškozování materiálu vzájemnými kmitavými tangenciálními posuvy povrchů při působení normálového zatížení;
- Amplitudy vibrací jsou 0,1–100 μm ;
- Produkt opotřebení \rightarrow oxidy Fe způsobující charakteristické zbarvení povrchu.

Příklad vibračního opotřebení a jeho průběh znázorňuje obr. 5.37 pro uvedené materiály.



Obr. 5.37 Hmotnostní úbytek na amplitudě vybraných ocelí

Důsledky opotřebení mohou být obvykle:

- snížení únavové pevnosti vznikem trhlin;
- iniciace porušování vznikem:
 - napěťových stavů,
 - korozi za napětí,
 - ztráty přesnosti rozměrů,
 - změny tolerance vložení,
 - změny drsnosti povrchu,

- zvětšení vibrací,
- opotřebení jiných částí konstrukce.

Faktory ovlivňující průběh vibračního opotřebení jsou:

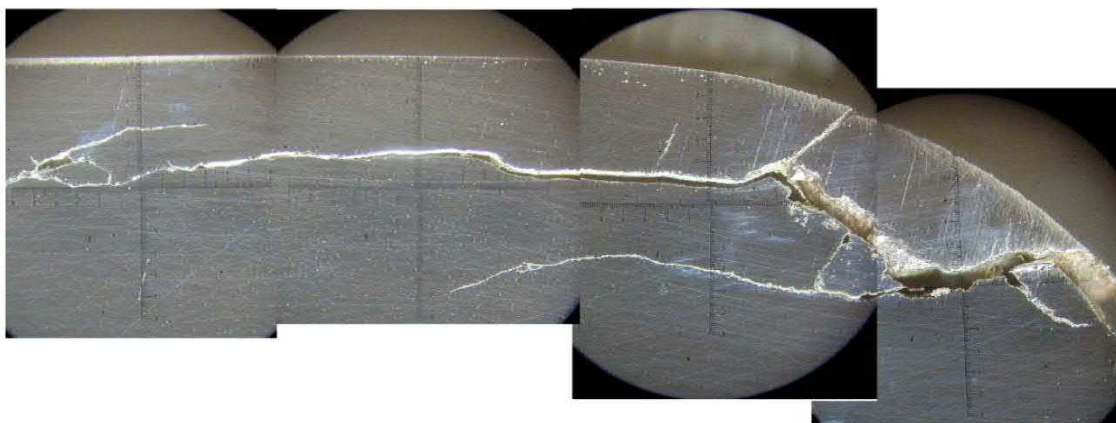
- amplituda, rychlost a zrychlení pohybu;
- frekvence pohybu;
- měrný tlak;
- vlastnost materiálu;
- doba působení;
- prostředí;
- teplota;
- magnetické pole;
- ultrazvukové působení aj.

Vibrační opotřebení je možné snížit:

- konstrukčním řešením,
- povrchovou úpravou,
- mazáním,
- správným zajištěním strojů při přepravě,
- dokonalým uchycením,
- úpravou funkčních povrchů aj.

Příklady typických součástí porušeny vibrací:

- valivá ložiska,
- čepy,
- hřídele a spojky,
- náboje těles,
- náboje hřídelí,
- setrvačníky,
- šrouby,
- kolo–kolejnice, obr. 5.38.



Obr. 5.38 Porušení kolejnic vibrací a dalším opotřebením

5.7. ÚNAVOVÉ OPOTŘEBENÍ TECHNICKÉHO OBJEKTU

Únavové opotřebení je typické kumulací poruch v povrchové vrstvě při cyklickém namáhání, kde v místech maximálního smykového namáhání dochází k porušení materiálu. Při vysokém smykovém namáhání dochází k oddělování materiálu a vytvořená lomová plocha vykazuje mechanismus křehkého porušování s typickým lasturovým lomem. Dochází k vydrolování materiálu, vzniku důlků, tzv. pittingů.

Účinky únavy na povrchy

- Postupná kumulace poruch v povrchové vrstvě materiálu při opakovaných stykových napětích;
- Když je σ pod Re , jedná se o vysokocyklovou únavu. Faktory ovlivňující únavové opotřebení jsou různorodé obr. 5.39, podle kluzných dvojic.

Pokud se únavové opotřebení projevuje nejvíce v místech dotyku zakřivených povrchů, označujeme tuto únavu materiálu jako kontaktní únavu. V technické praxi bývá únavový proces převážně v kombinaci s adhezivním opotřebením.



Obr. 5.39 Faktory ovlivňující únavové opotřebení

Zmírnit únavového opotřebení lze:

- snížením nebo vyloučením tření u kluzných dvojic;
- zlepšením mazacích podmínek:
 - použitím vhodných materiálů,
 - náhradou nevyhovujících materiálů otěruvzdornými materiály,
 - vytvořením speciálních vrstev (povrchové kalení, cementování, nitridování),
 - navářením, nástřikem speciálních materiálů,
 - úplnou náhradou kovů za plasty (případně nekovy),
 - zvýšením rezervy životnosti, zvětšením hmotnosti, tvaru, tloušťky upravené povrchové vrstvy aj.,
 - rovnoměrným rozložením opotřebení,
 - vhodnou konstrukcí, údržbou;
- kompenzací opotřebení.

Příklady součástí vystavených únavovému opotřebení jsou:

- valivá ložiska,
- ventily a zdvihátka,
- ozubená kola,
- okolky žel. dvojkolí,
- kolejnice, obr. 5.40,
- pneumatické kladivo,
- vrtné tyče,
- vrtné koruny.



Obr. 5.40 Kolejnice – vydrolování materiálu na povrchu

5.8. KAVITAČNÍ OPOTŘEBENÍ TECHNICKÉHO OBJEKTU

Přechodem mezi korozi a čistě mechanickým opotřebením je poškození kavitací. Kavitační opotřebení je makroskopicky zjiřitelná změna kvality povrchu tělesa v důsledku kavitace v podobě zvrásnění, zdrsnění, změny tvaru reliéfu tělesa, výskytu trhlin, kaveren nebo makrolomů.

Kavitace

- je definovaná jako fyzikální jev v kapalině, při němž vznikají, vyvíjejí se a zanikají kavitační bubliny. Při jejich zanikání tzv. implozi dochází tlakovými vlnami k cyklickému únavovému namáhání povrchu materiálu;

- je negativní jev vznikající v hydraulických strojích a zařízeních, který mění vlastnosti povrchových vrstev těch částí, které jsou v interakci s kavitační oblastí v kapalině, v důsledku čehož dochází k nežádoucímu zhoršení vlastností a výkonových parametrů;
- se vyskytuje vždy v interakci materiálu s kapalným médiem a nejčastěji v proudících kapalinách, kde tlak dosahující kritické hodnoty vede k porušení její kompaktnosti a kontinuity proudu – vzniku *hydrodynamické* kavitace;
- často dochází k tzv. *vibrační* kavitaci, která vzniká v kapalině poblíž kmitajícího tělesa;
- rovněž může dojít k tzv. *parní* kavitaci vznikající ve stojící kapalině ohřevem, elektrickým výbojem, elektrolýzou, vypouštěním syté páry do kapaliny apod.

Kavitace působí na materiál mechanickými účinky, vyvolané při zániku kavitačních bublin, které způsobují kavitační opotřebení – *kavitační erozi*.

Kavitační porušování – je proces porušování soudržnosti materiálu v té povrchové vrstvě tělesa, která se dostane do interakce s kavitační oblastí. Kavitační proces a jeho důsledky je přehledně zobrazený na obr. 5.41. Kavitační opotřebení způsobující mechanickou, geometrickou, objemovou a strukturní změnu na povrchu TO, co může mít rovněž vliv na vznik vedlejších účinků. Mohou to být výkonové ztráty, vznik vibrací, hluk nebo vznik nežádoucích elektrických účinků TO versus kapalném médiu. Kavitační proces je ovlivněný nejen fyzikálními vlastnostmi kapaliny, ale i její kvalitou. Velikost a oblast výskytu kavitačního opotřebení bude záležet na tvaru TO a jeho uložení v kapalném médiu.

Mechanismus kavitačního opotřebení

V současné době je nejrozšířenější korozně-mechanická teorie kavitace. Podle této teorie k poškozování, např. kovů, dochází následkem současného působení mechanických sil a koroze.

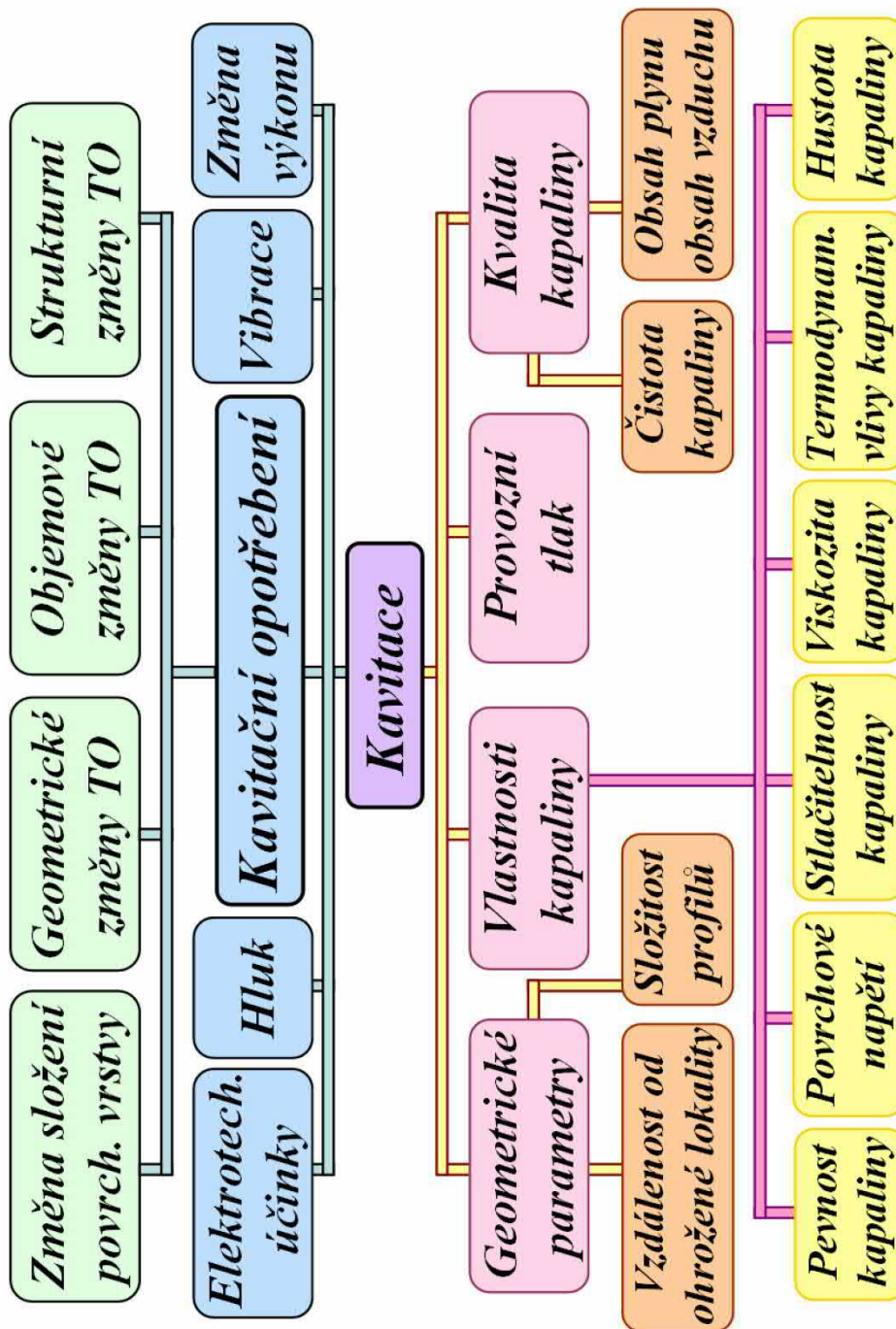
Kavitační bublina tvoří určitý prostor v kapalině vyplněný parami, případně vyloučenými plyny, vzniká při poklesu tlaku v kapalině na kavitační tlak (např. při zúžení profilu, vibraci apod.), který je nutný pro vznik kavitace.

Velikost tlaku se blíží tlaku nasycených par dané kapaliny při její teplotě a závisí na:

- obsahu plynů v kapalině,
- druhu kapaliny,
- tvaru bublin,
- velikosti a počtu kavitačních jader,
- na době výskytu kavitačních jader v kritické oblasti ap.

V souladu s Rayleighovou teorií kapalina vtéká do kontrahující se bubliny se sférickou symetrií a vzrůstající rychlostí.

Po zániku bubliny vzniká tlaková vlna a vytváří úderné vzájemné působení kapaliny s přilehlým povrchem tuhého tělesa, které vyvolává mechanické kavitační opotřebení.



Obr. 5.41 Souvislosti kavitačního opotřebení

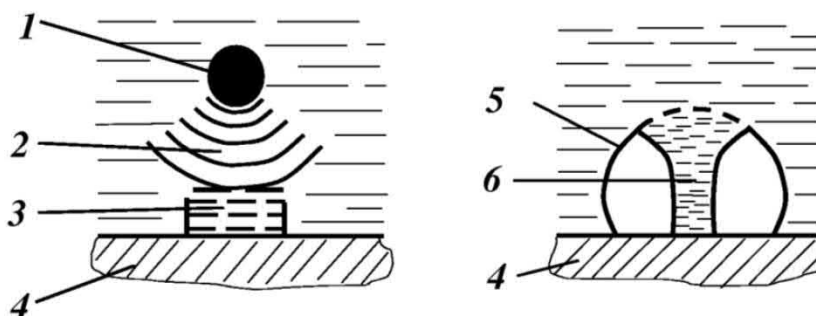
Vlastnímu kavitačnímu napadení předchází určitá inkubační doba. Při ní má svou úlohu elektrochemická koroze, jejímž potlačením lze i posunout počátek kavitačního napadení.

Určujícím činitelem kavitačního napadení je tedy opakující se mechanický ráz při zániku bublin, který vede k únavě, např. lopatek vodních turbín, čerpadel a lodních šroubů.

Při skutečném proudění většina bublin nezaniká sféricky, příčinou jsou tlakové a rychlostní gradienty, vyvolané blízkostí stěny, vlivy turbulence apod.

Zánik kavitačních bublin (obr. 5.42) je dán setrvačností kapaliny a tlakem okolí. Významné jsou rovněž vlastnosti kapaliny, které působí na průběh jevu, např.:

- hustota kapalného média,
- stlačitelnost kapaliny,
- povrchové napětí,
- tlak par,
- obsah plynu v kapalině,
- rozdělení zárodků.



Obr. 5.42 Schéma zániku bubliny (1 – bublina, 2 – tlaková vlna, 3 – objem kapaliny, 4 – tuhé těleso, 5 – bublina, 6 – mikropaprsek kapaliny)

Napadení kavitací je výsledkem působení bublin ve formě mraků, tzv. *bublinových clon*. Působení kavitačních bublin, při kterém vždy záleží na místním a časovém rozdělení a na intenzitě, nelze přesně definovat. I když tento proces může být hodnocen pouze statisticky, je známo, že rychlost vzniku a zániku bublin je závislá na druhu proudění kapalného média a procentuálním obsahu plynu nebo vzduchu obsaženého v kapalině, viz. obr. 5.43. Jakákoliv změna tlaku, teploty, napětí apod. v kapalině vede k urychlování kavitačního procesu, který může být superponovaný i korozním účinkem.

Kavitační působení na povrchy

1. Jestliže nárazový tlak a tím vzniklá napětí jsou pod hodnotou považovanou za práh opotřebení, k mechanickému poškození nedojde.

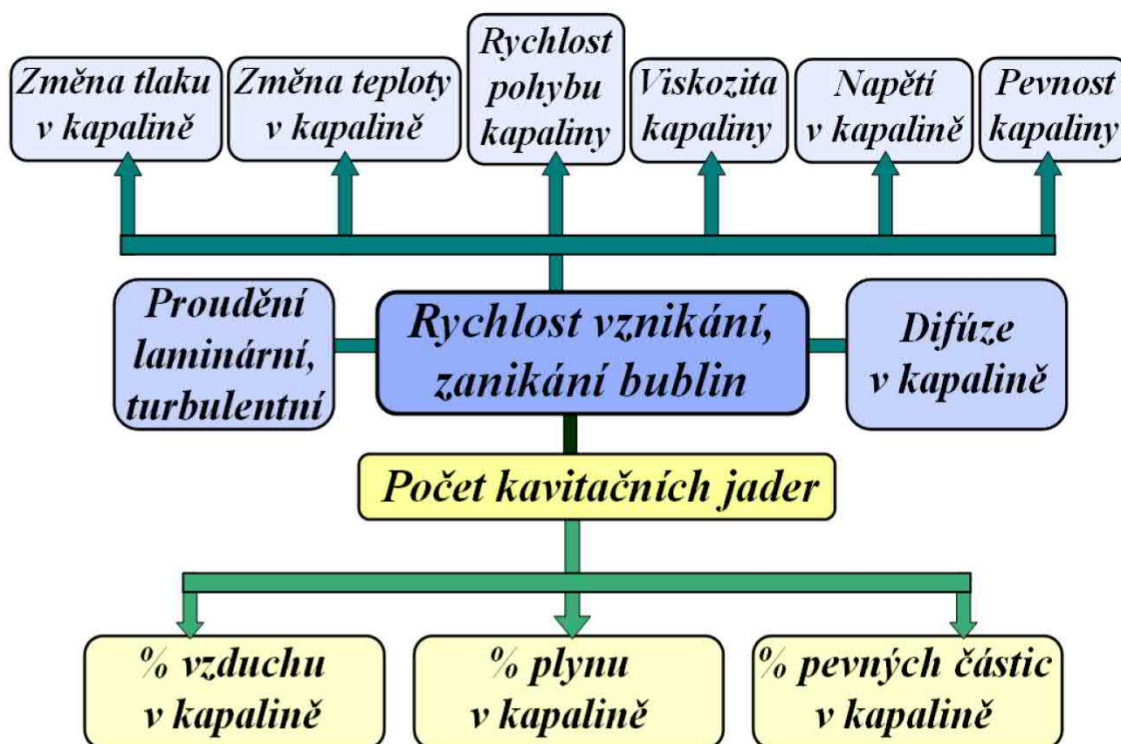
Tento úkaz je podobný pojetí meze únavy. I když v daném případě ke kavitačnímu opotřebení nedojde, může být vyvoláno poškození materiálu elektrochemickým působením (narušování mezní vrstvy kapaliny, oxidačních vrstev, produktů koroze apod.).

2. Napětí, která vznikají následkem dynamického působení kapaliny na povrch materiálu, jsou menší než mez skluzu. K opotřebení v tomto případě dochází následkem únavových dějů povrchových vrstev materiálu, které je možno charakterizovat jako vysokocyklovou únavu.
3. Povrchová vrstva materiálu je napadena do té míry, že vzniklá napětí jsou větší než mez skluzu.

V tomto případě dochází k plastické deformaci povrchu materiálu. Mnohonásobně se opakující působení mikroobjemů na povrchu způsobí zpevňování povrchové

vrstvy materiálu, což vede ke zvýšení tvrdosti. V praxi může docházet též k únavovému poškození povrchu materiálu, avšak při menším počtu cyklů zatížení je proces obdobný jako u nízkocyklové únavy.

4. Povrchová místa materiálu jsou ihned porušována působením jednotlivých mikroúderů, kdy dochází k překročení meze pevnosti materiálu (srovnatelné s mechanickým lomem).



Obr. 5.43 Kavitační působení ovlivněné počtem kavitačních jader v kapalině

Iniciace kavitačního porušování

Kavitační opotřebení začíná prvními makroskopickými důlky, jejich počet s časem působení roste a povrch se stává drsnějším.

Důlky (jamky) mohou být registrovány podle typu, velikosti, hloubky a povrchového vzhledu.

K odlomení částice materiálu z povrchu dochází zpravidla při vzniku překrývajících se důlků, způsobených zánikem mnoha bublin. To je příčinou hmotnostního úbytku materiálu.

Při mikroskopickém zkoumání materiálu je nutné vzít v úvahu zvláště tyto vlastnosti:

- velikost, tvar, strukturu, orientaci zrn,
- hranice zrn, včetně vlastností materiálů vyloučených na hranicích,
- chemické složení materiálu,
- krystalickou strukturu,
- nečistoty a nekovové vměšky,
- strukturu, tvar, rozdělení a složení jednotlivých fází.

Odolnost materiálu proti kavitačnímu opotřebení

Odolnost materiálu proti kavitačnímu opotřebení se zjišťuje zkouškami buď v přirozených – provozních nebo laboratorních podmínkách.

Byly hledány laboratorní metody, které by umožnily vyvolat mnohem intenzivnější kavitaci, nebo které by působily podobnými účinky.

Pro určování odolnosti proti kavitačnímu opotřebení v laboratorních podmínkách jsou v současné době známy tyto čtyři základní způsoby poškozování materiálu:

1. v kavitační oblasti vytvořené v kavitační dýze;
2. v kavitační oblasti vzniklé za otvorem na okraji rotujícího disku;
3. v kavitační oblasti vytvořené vibrací;
4. mnohonásobnými údery vzorku o proud kapaliny.

Časový průběh kavitačního opotřebení

Jedním ze základních parametrů, majících vliv při zkoušce materiálu na odolnost proti kavitačnímu opotřebení, je doba trvání zkoušky.

Závislost hmotnostní úbytku – čas sestává ze čtyř různých částí:

- I.** *Počáteční stadium* (t_0) odpovídající „inkubační době“, během níž se nevyskytuje žádné opotřebení ve smyslu úbytku materiálu. V této době však může docházet k deformačnímu zpevnění povrchové vrstvy nebo vzniku mikrotrhlinek apod.;
- II.** *Stadium vzrůstu rychlosti* opotřebení (t_1), během něhož se začínají lokálně oddělovat z povrchu zkušebního tělesa jednotlivé částičky materiálu a opotřebení se postupně rozšíří na celou napadenou oblast;
- III.** *Stadium ustáleného stavu*, během něhož se rychlost opotřebení udržuje blízko konstantní hodnoty;
- IV.** *Stadium snižování rychlosti* opotřebení, během něhož rychlost opotřebení klesá postupně tak, jak se prohlubuje poškozené místo a zmenšuje se účinek kavitace.

Inkubační doba a jednotlivá stádia jsou zpravidla definována podobně jako opotřebení ve všeobecnosti.

Kritéria hodnocení odolnosti materiálu proti kavitaci

Hodnocení a klasifikace materiálů z hlediska jejich odolnosti proti kavitačnímu opotřebení jsou nejčastěji založeny na porovnávání:

- hmotnostních nebo objemových úbytků vzorků nebo též střední hloubky opotřebení v závislosti na čase;
- změn rychlosti opotřebení v závislosti na čase;
- hodnoty různých číselných ukazatelů. Číselné ukazatele, podobně jako křivky rychlosti opotřebení, se stanovují na základě závislosti úbytku na době působení kavitace.

Nejrozšířenější ukazatele jsou:

- inkubační doba t_c ,
- hmotnostní úbytek Δm nebo objemový úbytek ΔV a střední hloubka opotřebení h nebo průniku po určité době zkoušky,

- doba zkoušky t potřebná k dosažení určitého hmotnostního nebo objemového úbytku nebo určité hloubky průniku,
- průměrná rychlost opotřebení v nebo průměrná odolnost v^{-1} ,
- maximální rychlost opotřebení $d(\Delta V)/dt/max$ nebo maximální hodnota rychlosti střední hloubky průniku.

Vliv mechanických vlastností na odolnost proti kavitačnímu opotřebení

❖ Vliv tvrdosti

Tvrdost materiálu se ukázala být důležitým faktorem odolnosti proti kavitačnímu opotřebení. Obecně řečeno, materiály o vyšší tvrdosti mají větší odolnost než materiály s nižší tvrdostí. Avšak některé materiály do tohoto obecného schématu nezapadají.

❖ Vliv deformačního zpevnění

Existují důkazy, že odolnost proti kavitačnímu opotřebení závisí na deformačním zpevnění opakovanými nárazy kapaliny.

Zvláštností mechanického působení při kavitaci je okamžitý průběh působení zatížení, její mnohonásobnost a působení v mikrolokalitách.

Intenzita deformačního zpevnění je určována obecnými zákonitostmi chování různých kovů a jejich slitin při plastické deformaci. Větší nebo menší sklon k deformačnímu zpevnění je určen krystalickou mřížkou daného kovu.

Její reakce na kavitační působení je tedy analogická, tzn. chovají se jako plastické materiály a porušují se mechanismem růstu a spojování dutin nebo mechanismem tvárného porušení.

Z experimentů s čistým železem vyplývá, že při kavitaci rychlost deformace odpovídá přechodu od plastického ke křehkému chování tohoto materiálu.

Tento případ je zvláště zajímavý, neboť na jednom a téže vzorku lze pozorovat dva různé druhy mechanismu porušování materiálů. Bylo pozorováno křehké i tvárné porušení v armco-železe.

Z uvedeného vyplývá, že nelze předložit obecnou teorii kavitačního opotřebení, protože mechanismus porušování materiálů může být různý v závislosti na charakteru mechanického působení, tj. podle energie nárazu.

Značnou úlohu má samotný materiál, jeho struktura, substruktura, sklon ke zpevnění aj.

❖ Vliv pevnosti a modulu pružnosti

Materiály s vysokou mezí pevnosti v tahu se vyznačují tendencí k vysoké odolnosti proti kavitačnímu opotřebení.

Energetické parametry

E – modul pružnosti vykazuje dobrou korelaci s hodnotou kavitační odolnosti materiálu definovanou jako reciproká hodnota maximální rychlosti objemového úbytku, která byla zjištěna na vibračním přístroji při zkouškách různých materiálů.

Mezní energie pružné deformace je energií na jednotku objemu, které je třeba k vyvolání napětí až po mez pevnosti, přičemž se předpokládá, že nedojde k plastické deformaci.

❖ **Odolnost materiálu proti kavitačnímu opotřebení**

Kavitační odolnost je schopnost materiálu odolávat působení kavitace. Posuzuje se zpravidla z časového průběhu kavitačního opotřebení a je velmi rozdílná. Rozdíly jsou nejen u jednotlivých druhů materiálů, ale i v jednotlivých mikrolokality materiálu, ve kterých se projevuje mechanický účinek kavitace, což platí i pro jednotlivé strukturní složky materiálů.

Působící zatížení v jednotlivých strukturních složkách způsobuje nestejnou deformaci. To přispívá k selektivnosti porušování v nejslabších místech materiálu.

Ferit slabě odolává kavitačnímu porušení, proto oceli s feritickou strukturou jsou málo odolné. Přítomnost feritu v oceli, která má být kavitačně odolnou, je nežádoucí.

Porušování austenitu, podobně jako u feritu, začíná v okolí hranic zrn. V závislosti na době působení dochází k odstranění části nebo celého zrna. U málo deformovaných zrn s existencí skluzových pásů se porušení vyskytuje i po skluzových pásech na hranicích dvojčat. Ohniska porušení budou vznikat tím intenzivněji, čím větší je hustota skluzových pásů (nebo při větším počtu dvojčat).

Je zřejmé, že odolnost feritu a austenitu je určena stupněm legování. Vliv legování se projevuje ve změně rozměru zrn nebo ve změně pružných a pevnostních vlastností tuhého roztoku. Inkubační doba při kavitačním opotřebení austenitických ocelí je delší, neboť deformační energie se spotřebovává na její přeměnu a nikoliv na porušování.

Obecné principy určující kavitační odolnost umožňují vystihnout chování např. šedé litiny při mikronárazovém zatížení. Je zřejmé, že nejslabší složkou struktury, která nemá prakticky žádnou odolnost, je grafit, který se porušuje jako první. Během krátké doby se objeví na povrchu dutiny v místech, kde byl grafit. Další vývoj opotřebení je určen tvarem, charakterem rozložení a dispersností vzniklých pórů po vypadnutí grafitu, protože kavitační odolnost litiny je určena především rozměry, tvarem a charakterem rozložení grafitu. Stavba základní matrice ve většině případů hraje druhořadou úlohu. Obecně lze říci, že kavitační opotřebení šedé litiny probíhá mnohem intenzivněji než porušování oceli.

Bílé nelegované litiny mají značně větší kavitační odolnost než litiny šedé. Cementit má vysokou odolnost proti mikronárazovému působení. Porušení začíná matricí, kdy iniciace vznikají mezi lamelami primárního eutektického cementitu s následujícím odstraňováním částeczek základní kovové matrice z tvrdé kostry. Litiny tohoto typu se používají omezeně z důvodu nízké konstrukční pevnosti a vysoké křehkosti. Vzhledem k různému stupni odolnosti materiálu může kavitační působení o stejné intenzitě u jednoho materiálu za určitou dobu poškodit jen jeho povrchovou vrstvu, kdežto u jiného materiálu může být vyvoláno již značné opotřebení. Odolnost materiálu proti kavitačnímu opotřebení je dána souhrnem mnoha materiálových charakteristik, kde se odráží mechanická a fyzikální podstata materiálu.

Ukazuje se, že materiály mohou mít různou hodnotu kavitační odolnosti v závislosti na intenzitě kavitace.

Pro hodnocení odolnosti proti kavitaci je proto důležitá znalost intenzity kavitačního opotřebení při daných provozních podmínkách.

Příkladem kavitačního opotřebení je hydraulický prvek – kuželka obr.5.44, kde jsou vidět místa typického kavitačního porušení, podle vzniku a zániku bublin v kapalném médiu způsobující změnu geometrie.



Obr. 5.44 Hydraulický prvek z TO

5.9. KOMBINOVANÉ EROZIVNĚ-KAVITAČNÍ OPOTŘEBENÍ TECHNICKÉHO OBJEKTU

Při kombinovaném erozivně-kavitačním opotřebení působí na opotřebovávaný povrch TO současně nárazy kapaliny a nárazy tvrdých částic (např. vytrhnuté částice z povrchu) v ní obsažených. Přitom následkem rozdílu v mechanismech těchto dvou působení může kombinované opotřebení probíhat podle jiných zákonitostí, než které byly uvedeny.

Zákonitosti kombinovaného erozivně-kavitačního opotřebení

Při studiu kombinovaného erozivně-kavitačního opotřebení je nutné vycházet z hlavních zákonitostí čistě erozivního a čistě kavitačního opotřebení.

- Závislost kavitačního opotřebení na rychlosti vody je vyjádřena exponentem $n = 5-14$ a závislost erozivního opotřebení jen přibližně ve druhé mocnině. Proto při kombinovaném erozivně-kavitačním opotřebení se podle převahy erozivního opotřebení pozoruje zmenšení exponentu n ;
- Při kavitačním opotřebení se projevuje inkubační perioda, během níž nedochází k viditelnému opotřebení, při erozivním opotřebení se taková perioda prakticky nevyskytuje;
- Závislost kavitačního opotřebení na čase je složitá, zatímco erozivní opotřebení má v závislosti na čase průběh prakticky lineární;
- K opotřebení kovů při kavitaci dochází převážně následkem únavových dějů, následkem velkého počtu cyklů zatížení. Erozivní opotřebení probíhá převážně při jednorázových zatíženích částic.

Hodnocení kombinovaného procesu opotřebení

V technické praxi působí často značné potíže srovnání experimentálních výsledků, což platí zvláště v oblasti zkoušek opotřebení.

Tento stav je důsledkem různorodosti dosud používaných zkušebních metod, zkušebních přístrojů a zařízení i vlastních měřených veličin. K sestavení časové závislosti opotřebení vzorků nebo součástí je potřebné měřit změny, k nimž dochází na funkčním povrchu. Dosud však nebyl v oblasti opotřebení vypracován jednotný systém měření a měřených veličin.

Za základ hodnocení je přijato hmotnostní kritérium opotřebení určované vztahem:

$$\Delta m = m_0 - m_t, \quad (5.23)$$

kde Δm je hmotnostní úbytek vzorku, m_0 je počáteční hmotnost vzorku a m_t je hmotnost vzorku po opotřebení v průběhu časového intervalu t .

Ke studiu počáteční fáze působení tvrdých částic nesených proudem kapaliny a hydraulických nárazů vznikajících při zániku kavitačních bublin na povrch kovového materiálu se používají metalograficky připravené vzorky z etalonových materiálů.

U erozivního opotřebení jde v podstatě o opakované působení částic na povrch materiálu v oblasti mikroobjemů, pro něž je typické poškození materiálu opakovanou plastickou deformací povrchu. Při erozivním opotřebení je často plastickou deformací ovlivňována jen velmi tenká povrchová vrstva materiálu (řádově několik μm).

Pro iniciaci zárodků opotřebení je rozhodující kumulovaný účinek mraku kavitačních bublin, který má únavový charakter. Lokální porušení materiálu typu jedním úderem, projevující se mikrokrátery (obr.5.45) není pro iniciaci rozhodujících zárodků opotřebení určující.



Obr. 5.45 Vložka válce spalovacího motoru

Dále je zřejmé, že působením kavitace dochází k silné plastické deformaci povrchu a k iniciaci porušení při vyčerpání schopnosti materiálu absorbovat plastickou deformaci. K přednostní iniciaci porušení dochází ve všeobecnosti tam, kde je porušena homogenita deformace.

5.10. OPOTŘEBENÍ ABLACÍ TECHNICKÉHO OBJEKTU

Specifické opotřebení částí TO, které jsou vystavené horkým plynům nebo spalinám z výfuků, je nazýváno opotřebení ablací. Projevuje se jako degradační proces, který využívá vysokou teplotu plynů až po natavení materiálu, vedoucí k meznímu stavu deformace. Toto opotřebení bývá superponováno abrazivním a erozivním opotřebením s případným výskytem korozního účinku, který celý proces degradace dále urychluje. Dochází k nepřijatelným mezním stavům porušování, vedoucím k haváriím jednotlivých součástí, příp. celých technických objektů.

Příklad opotřebení ablací je uveden na obr. 5.46.



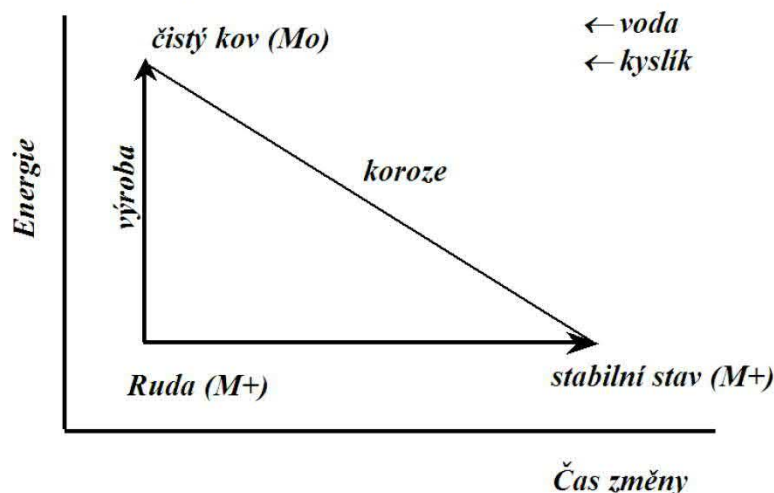
Obr. 5.46 Vnější ústí práškových hubic po opotřebení ablací s detailem (dole)

6. KOROZNÍ OPOTŘEBENÍ TECHNICKÉHO OBJEKTU

Koroze (příloha 2) podstatné většiny kovů (Fe, Cr, Al, Zn, Pb, Sn aj.) probíhá samovolně, kovy se dostávají do termodynamicky stabilního stavu v jakém se nacházejí v přírodě, obr. 6.1.

Chemické složení prostředí, teplota, tlak, přítomnost záření aj. předurčují pravděpodobnost vzniku korozního procesu a působí na rychlost korozního procesu. Koroze představuje chemické nebo elektrochemické porušování, převážně kapalnými nebo plynnými látkami, heterogenní reakcí kovů nebo slitin, při níž přecházejí v oxidovaný stav. Oxidací v širším slova smyslu je každá reakce, při níž kov ztrácí elektrony.

Většina kovů a slitin je v podstatě nestálá a samovolně přechází do oxidovaného stavu s různou možností míry přechodu. Přechod je potom charakterizován snížením volné entalpie celé soustavy ΔG .



Obr. 6.1 Časový průběh koroze

Změna volné entalpie (zvaná též termodynamický nebo chemický potenciál), kterou je možné definovat jak rozdíl chemických potenciálů konečných a výchozích látek, představuje veškerou energii, kterou 1 mol sloučeniny přijme nebo odevzdá do okolí při svém vzniku za konstantní teploty a tlaku, kterou lze vyjádřit vztahem:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S, \quad (6.1)$$

kde ΔH , ΔS jsou změny entalpie a entropie, T je termodynamická teplota. Jejich hodnoty jsou za standardního stavu tj. $9,827 \cdot 10^4$ Pa a aktivity reagujících látek rovné jedné pro většinu sloučenin a reakcí uvedeny v příslušných tabulkách a dovolují výpočet standardní volné entalpie ΔG^0 .

Změna volné entalpie převážně závisí na teplotě, což je vyjádřeno empirickými rovnicemi např.:

$$\Delta G_T = A + BT \log T + CT, \quad (6.2)$$

kde A , B , a C jsou konstanty. Vhodnější je však grafické znázornění závislosti ΔG^0 pro různé reakce při různých teplotách vztahených na totéž množství jedné z reagujících látek, např. 1 mol kyslíku, síry, dusíku apod.

Není-li tomu tak, je třeba k vyšetření reakční afinity ΔG korigovat odečtenou hodnotu ΔG^0 o aktivní kvocient J podle obecného vztahu:

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln J \quad (6.3)$$

Podle Guldbergova-Waageova zákona je rychlost chemické reakce v daném okamžiku úměrná aktivitě reagujících látek. Chemická rovnováha příslušné reakce za stálé teploty je charakterizována rovnovážnou konstantou K , která je rovna součinu aktivit reakčních produktů dělenému součinem aktivit výchozích látek. Volná entalpie souvisí s příslušnou rovnovážnou konstantou podle vztahu:

$$\Delta G^0 = -RT \ln K, \quad (6.4)$$

kde R je plynová konstanta rovna $8,3144 \pm 0,001 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ($1,985 \text{ cal}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$) poněvadž platí, že při rovnováze je:

$$\Delta G = 0 \quad (6.5)$$

Koroze je soubor fyzikálních, chemických a biologických procesů, kterými se mění postupně vlastnosti materiálů natolik, že objekty ztrácejí svoji původní funkční nebo užitnou hodnotu. Koroze se projevuje různými způsoby, např. rovnoměrným úbytkem materiálu, vznikem korozních důlků nebo skvrn, křehnutím materiálu, praskáním, odlupováním aj. Nejedná se tedy pouze o změny geometrie, objemu, povrchu aj., ale i o změny, které vedou k zvýšení hluku, vibrací snížení výkonu a dalších negativních změn na TO (obr. 6.2).

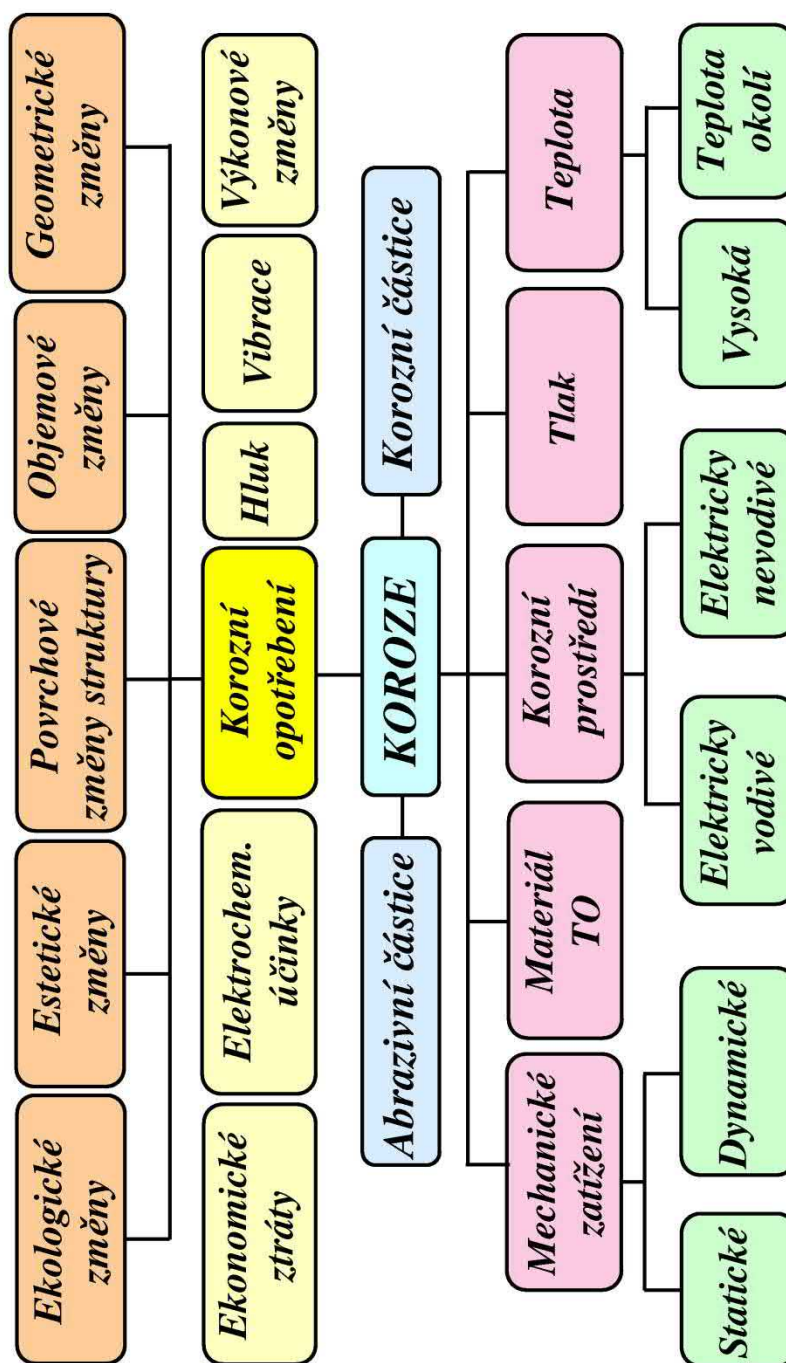
Mechanismy a faktory, které korozi způsobují, lze rozčlenit na:

- korozi bludnými proudy (stejnoseměrná trakce);
- elektrochemickou korozi (kovy);
- fotochemickou korozi (polymery);
- chemickou korozi (za vysokých teplot, v plynech);
- korozi při mechanickém namáhání (vibrace, aj.).

Základní příčinou koroze převážné většiny kovů je termodynamická nestabilita v různých prostředích. Obvykle je korozní proces složen ze tří hlavních dějů:

- Přenosu látek, které reagují směrem k povrchu fázového rozhraní kov–okolní prostředí, k reakční zóně;
- Elektrochemické, popř. chemické reakce na reakčním rozhraní s následnou sekundární reakcí mezi primárně vzniklými produkty a složkami okolního prostředí;
- Transportu reakčních produktů od reakčního rozhraní.

Rychlost korozního procesu je dána hnací silou a zpomalováním procesů, kdy se obvykle jedná o zpomalení difúze reagentů korozního procesu nebo produktů reakce v obráceném směru nebo zpomalení reakce kovů s korozním prostředím nebo jeho složkami (proces řízený fyzikálně chemickou, popř. chemickou reakcí).



Obr. 6.2 Korozní opotřebení

Pasivita kovů

Je to jev, při kterém dochází k významnému zpomalování anodického korozního děje a to za podmínek, kdy podle hodnoty termodynamické ušlechtilosti by kov měl být v korozně aktivním stavu. Zpomalení anodického děje rozpouštění kovu vzniká až při sorpci méně než jedné vrstvy atomů kyslíku na povrch kovu. Dochází k blokování aktivních center povrchu. Nejde však jen o adsorbované vrstvy kyslíku, ale i o vrstvy oxidů, resp. dalších chemických sloučenin, jejichž tloušťka se pohybuje v rozsahu 1 – 10 nm. Tyto vrstvy mají amfoterní charakter, množství kyslíku v nich neodpovídá stechiometrii stavby oxidu, což jim dává polovodičové vlastnosti. Mnohé

případy pasivity železa, ocelí aj. vznikají působením právě takových bariérově-pasivačních vrstev. Charakter a stabilita pasivního stavu je rozdílná v závislosti na podmínkách korozního procesu. Některé kovy (ocel, nikl, cín aj.) jsou pasivní jen v omezené oblasti pH. Jejich pasivní vrstva má oxidační charakter a podmínky korozního procesu nesmí ovlivňovat přítomnost redukující složky. Využití odolnosti kovu v pasivní oblasti je podmíněno obvykle přítomností elektrochemicky ušlechtilých kovů (Cu, Ni, Mo). Naopak přítomnost některých látek v prostředí (chloridy, fluoridy) vede k porušení pasivního stavu a tvorbě důlků a typických bodových napadení – pittingu.

Koroze za vysokých teplot

Rychlost koroze závisí značnou měrou i na teplotě. Rychlostní konstanta k , která se určuje podle úbytku koncentrace některé z reagujících látek za jednotku času, stoupá při zvýšení teploty o 10 až 20 °C zhruba na dvojnásobek až trojnásobek. Závislost rychlostní konstanty je dána Arrheniovým vztahem:

$$k = A e^{-E^*/RT}, \quad (6.6)$$

kde A je frekvenční faktor a E^* aktivační energie.

Vrstvy korozních produktů – korozní zplodiny, které v mnoha případech vznikají během korozního rozrušení, mají značný vliv na charakter i rychlost koroze. Tyto produkty jsou většinou krystalické, tedy obsahují strukturní poruchy jako jsou vakance, substituční (kationtové a aniontové) a intersticiální ionty, po nichž dochází k transportu reagujících složek difúzí. Charakter poruch, využitých v procesu difúze v tuhém stavu řízené Fickovými zákony, může být rozhodujícím faktorem pro rychlost korozního děje při vzniku tuhých korozních produktů.

Podle I. Fickova zákona:

$$\frac{dm}{d\tau} = -qD \frac{dc}{dx}, \quad (6.7)$$

kde m je množství látky, které projde průřezem S ve vzdálenosti x od daného místa za čas τ úměrně úbytku aktivity difundující látky v daném místě při změně koncentrace c . Difúzní součinitel D je závislý na teplotě podle Arrheniova vztahu jako rychlostní konstanta.

Průběžně vrstvy produktů narůstají, čímž dochází ke snížení koncentračního spádu (gradientu chemického potenciálu) na jednotkovou vzdálenost a celý difúzní proces se zpomaluje. Časová změna koncentrace je úměrná změně koncentračního spádu difundujících látek, jak vyplývá z II. Fickova zákona:

$$\frac{dc}{d\tau} = D \frac{d^2c}{dx^2} \quad (6.8)$$

Vedle difúzního mechanismu mohou ovlivňovat rychlost koroze i jiné pochody. Časovou závislost rychlosti koroze ovlivňuje charakter vznikajících korozních reakčních produktů.

Pokud jsou plynné, kapalně nebo bez ochranného charakteru, je tato závislost lineární a koroze probíhá při stálé teplotě stejnou rychlostí:

$$a) m = k_1 \tau \quad (6.9)$$

Vznikají-li korozní produkty, které mají částečně ochranný charakter např. za zvýšených teplot, tvoří překážku difundujícím iontům, čímž koroze zmenšuje svou rychlost podle parabolické závislosti $m^z = k_2 \tau$ s exponentem pohybujícím se v mezích $z = 1,5$ až $2,8$.

Při změně probíhající koroze z vysokých teplot na nízké teploty je možné v některých případech registrovat kubickou závislost:

$$b) m^3 = k_3 \tau \quad (6.10)$$

Při relativně nízkých teplotách a za vzniku velmi tenkých vrstev vzniká závislost logaritmická a recipročně logaritmická:

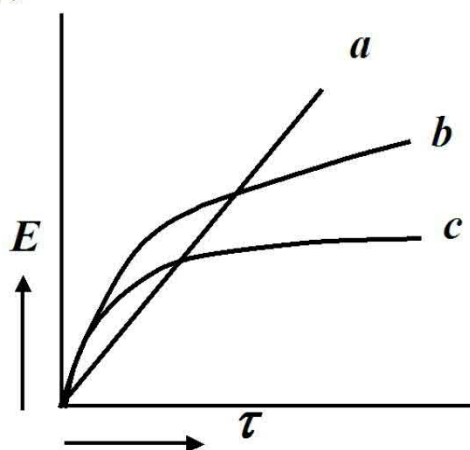
$$c) m = k_4 / \ln k_5 + k_6 \tau \quad \text{a} \quad 1/m = k_7 - k_8 \ln \tau \quad (6.11)$$

popř. asymptotická:

$$dm/d\tau = k_a e^{-am} d\tau \quad (6.12)$$

Průběh oxidace v závislosti přírůstku na váze m (odpovídá vázanému kyslíku během oxidačních reakcí) na čase τ , obr. 6.3:

- a – lineární,
- b – parabolický,
- c – asymptotický (charakteristický pro kovy tvořící stálé ochranné vrstvy oxidů jako jsou Cr, Al aj.)



Obr. 6.3 Časová závislost rychlosti koroze

Vyjádření Pillingova-Bedworthova pravidla pro ochrannou účinnost platí, že při atomové váze kovu M_M a jeho hustotě ρ_M , je atomový objem jednoho gramatomu:

$$V_M = M_M / \rho_M \quad (6.13)$$

Je-li molekulová váha vzniklé sloučeniny M_{MX} a její hustota ρ_{MX} , její molekulární objem je:

$$V_{MX} = M_{MX} / \rho_{MX} \quad (6.14)$$

Poměr obou objemů je při n počtu atomů kovu v molekule sloučeniny dán vztahem:

$$\frac{V_{MX}}{V_M} = \frac{M_{MX} \rho_M}{M_M \rho_{MX}^n} \leq 1 \quad (6.15)$$

Vysokoteplotní oxidace ocelí probíhá analogicky jako oxidace čistého železa. Na povrchu oxidovaného materiálu se tvoří oxidová vrstva složená z hematitu, magnetitu a wüstitu.

Z kinetických měření oxidace však vyplývá, že rychlost oxidace oceli je zřetelně pomalejší než rychlost oxidace čistého železa (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO). Jestliže se oxidace železa řídí parabolickou zákonitostí, pak oxidace je reakce na rozhraní wüstit–ocel.

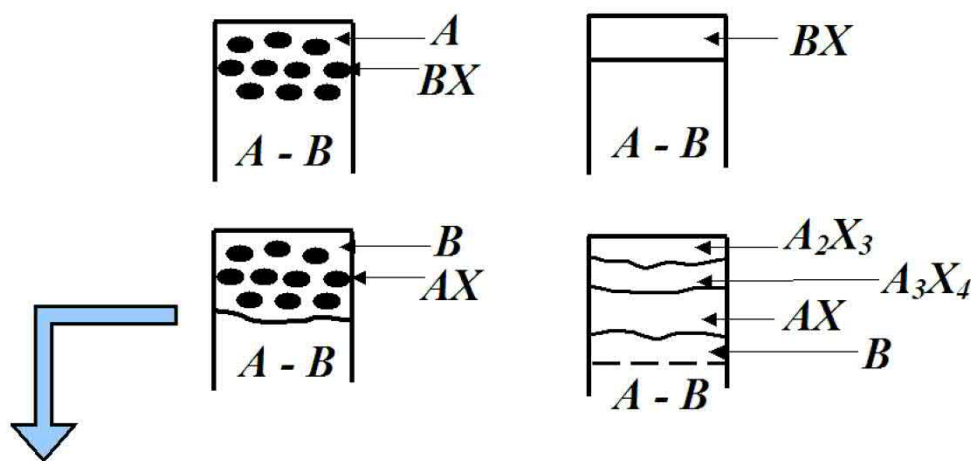
Nelze také opomenout, že oxidace oceli je doprovázena oduhlčováním podpovrchových vrstev, což vede k růstu zrna. Významně se projeví i charakter atmosféry. Přítomnost vodní páry způsobuje zvýšení počtu poruch v oxidové vrstvě a snížení koheze na rozhraní okuje–kov. Rozkladem vodní páry se zvyšuje počet atomů kyslíku, které mohou reagovat s atomy železa a přispívat k rychlosti oxidace.

Lineární přírůstek hmotnosti po náběhové periodě oxidace koreluje s morfologií oxidové vrstvy vyznačující se značnou pórovitostí, trhlinami a velkým výskytem kavit.

Prostřednictvím těchto poruch je oxidační atmosféra ve stálém kontaktu s kovovým povrchem za přítomnosti vznikajícího oxidu uhličitého, který může unikat z rozhraní kov–oxid.

U slitin může přednostně oxidovat jedna ze složek (A, B) popř. některá ze složek neoxiduje vůbec, přičemž může nastat vnitřní oxidace nebo obohacení povrchu slitiny některou ze složek.

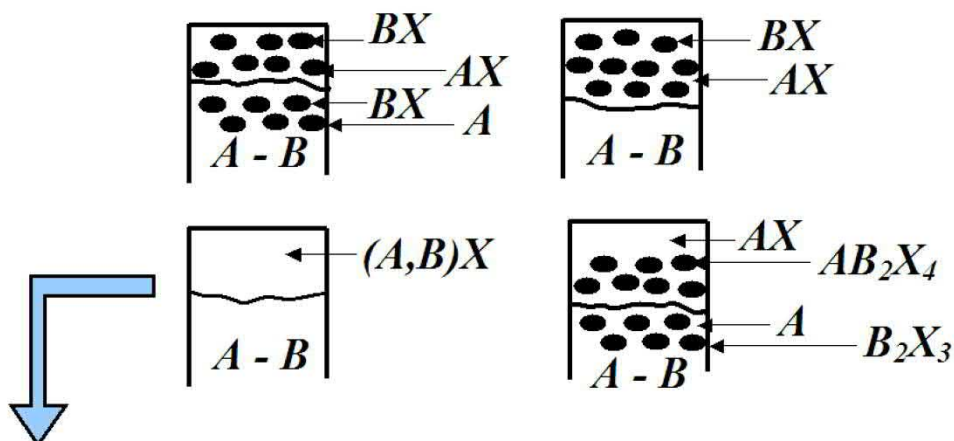
Modely oxidace slitiny tvořené dvěma složkami A-B při přednostní oxidaci jedné ze složek zobrazuje obr. 6.4.



Obr. 6.4 Modely oxidace slitiny tvořené dvěma složkami A-B při přednostní oxidaci jedné ze složek

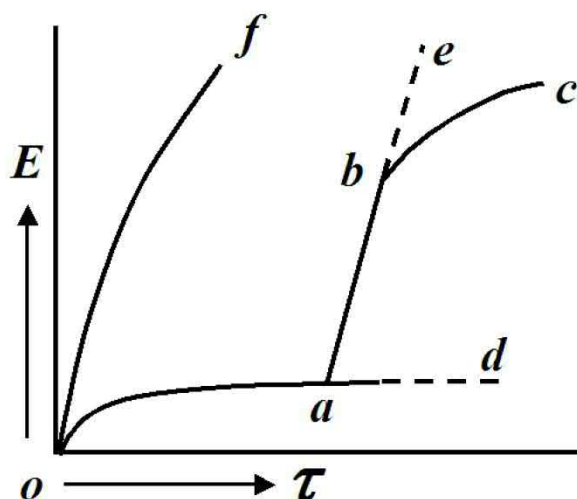
V případě schopnosti oxidace obou složek rozhodují o charakteru a morfologii vrstev rozdíly v afinitě složek k prostředí a jejich vzájemná rozpustnost ve tvořících se fázích blízkých stechiometrickým sloučeninám. I v tomto případě se může vyskytnout vnitřní oxidace.

Modely oxidace slitiny tvořené dvěma složkami A-B při oxidaci obou složek jsou uvedeny na obr. 6.5.



Obr. 6.5 Modely oxidace slitiny tvořené dvěma složkami A-B při oxidaci obou složek

Většina empirických vyjádření oxidace korozivzdorných ocelí a slitin je shrnuta v grafickém vyjádření na obr. 6.6.



Obr. 6.6 Časový průběh oxidace korozivzdorných ocelí

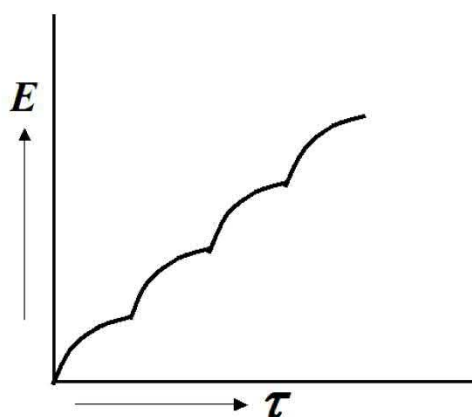
Průběh oxidace v závislosti na čase za různých podmínek korozivzdorných ocelí s obsahem do 20 hm % Cr lze popsat následovně :

- *oad* – 750°C, vzduch, tenká ochranná vrstva odpovídající vrstvě spinelu $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ (FeCr_2O_4) nebo Cr_2O_3 ;
- *abc* > 870°C, oxidační atmosféra, nečistoty zvláště sirmé sloučeniny, vrstva odpovídá duplexnímu oxidu (Cr , Fe_2O_3 – chromit a sesquioxid), modifikace ochranné vrstvy vede ke zpomalení oxidace;
- *bc* (periodicky se může tento průběh opakovat);
- *be* > 1 050°C, v extrémních podmínkách pokračuje oxidace velkou rychlostí, oxidace pod porušenou vrstvou probíhá na oceli ochuzené o chrom za vzniku

spinelu a Fe_2O_3 po dosažení původního obsahu chrómu vzniká Cr_2O_3 a oxidace pokračuje podle závislosti $0a$;

➤ $0f \approx 1250^\circ\text{C}$, vysoká rychlost oxidace.

Za mírných podmínek se tvoří ochranný film a oxidace klesá podle závislosti $0ad$ (přibližně parabolická závislost). V náročných podmínkách následuje po počáteční periodě $0a$ zvýšení korozní rychlosti – popraskání ochranné vrstvy – podle závislosti ab . V závislosti na složení slitiny a oxidačních podmínkách proběhne tzv. zacelení vrstvy a rychlost oxidace se na čas zmírní podle křivky bc , přičemž se tyto změny mohou periodicky opakovat a závislost rychlosti probíhá podle typického průběhu pro měď nebo železo, obr. 6.7.



Obr. 6.7 Průběh oxidace při periodickém odprýskávání korozních vrstev

Nedochází-li k uzdravování poškozené vrstvy, pokračuje oxidace velkou rychlostí dále podle závislosti be . Za velmi těžkých podmínek může oxidace probíhat za vzniku produktů oxidace bez ochranného charakteru podle závislosti of .

Přísada chrómu a niklu do železa zvyšuje odolnost proti oxidaci, neboť nahrazuje vřstvit stabilnější fázi, přičemž chróm se jeví neúčinnějším, protože při obsahu vyšším než asi 13 % se tvoří na povrchu oxid bohatý na chróm (Cr_2O_3) obsahující malé množství železa a niklu. Po periodě zpomalující se rychlosti oxidace a vzniku zlomu na křivce $0ab$ se tvoří (zřejmě i v souvislosti s obnaženou a o chróm ochuzenou vrstvou slitiny) vnitřní vrstva spinelu $\text{FeFe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$, kde $0 < x < 2$, a vnější vrstva Fe_2O_3 , nebo se na zcela obnaženém povrchu znovu vytváří ochranná vrstva, a to na slitině původního složení podle závislosti bc .

Příznivý vliv niklu na odolnost proti oxidaci zůstává, i přes jeho nižší afinitu ke kyslíku zřejmě je dán příznivým působením na složení, přilnavost a mechanické vlastnosti vrstev.

Předpokládá se, že nikl rozpuštěný v Cr_2O_3 snižuje rychlost difúze kationtů a zpomaluje přeměnu Cr_2O_3 na spinel nebo Fe_2O_3 . Nikl také snižuje rozdíl v tepelné roztažnosti mezi slitinou a oxidy, čímž snižuje napětí mezi slitinou a vrstvou během ochlazování nebo během cyklických změn teploty.

Význam niklu v žáruvzdorných slitinách spočívá ve zvýšení odolnosti proti křehnutí tvorbou fáze sigma za vysokých teplot.

Odolnost proti oxidaci i při cyklických změnách teploty příznivě ovlivňují vedle niklu i vzácné zeminy – cér, yttrium, thorium a zirkonium, které zajišťují žáruvzdor-

nost austenitických ocelí. Vedle chrómu zvyšuje žáruvzdornost také křemík a hliník. Na vzduchu v porovnání s čistým kyslíkem mohou hliník a chróm v důsledku tvorby nitridů ztrácet svoji účinnost na zvýšení žáruvzdornosti.

Z dalších slitinových prvků je třeba uvést molybden, wolfram, vanad a bór, které u nízkolegovaných ocelí působí příznivě do teploty asi 600°C, zřejmě s ohledem na tvorbu oxidů nižší oxidační skupiny. Od teploty asi 800°C mohou však vyvolávat silnou (katastrofální) oxidaci vlivem nízké teploty tavení a vypařování jejich oxidů. V páře lze pozorovat příznivé působení molybdenu v austenitických ocelích až do teplot 750 až 800°C.

V oxidačních spalínách bez sirných sloučenin je rychlost koroze ocelí za přítomnosti vodní páry jen o málo vyšší než na vzduchu. Redukční spaliny mohou zamezit v některých případech vzniku okují, způsobují však nauhličení povrchových vrstev. Za přítomnosti sirných sloučenin (většinou okolo 0,1 % SO₂) probíhá koroze za vysokých teplot v oxidačních podmínkách až 3-krát rychleji než na vzduchu, v redukčních podmínkách ještě intenzivněji. Nejnebezpečnější je střídání oxidační a redukční atmosféry, neboť za vysokých teplot vzniká oxisulfidická tavenina vyvolávající i mezikystalové napadení. V redukujících spalínách vyvolávají sirné složky podobné napadení jako sirovodík.

Při spalování plyných paliv je intenzita korozního napadení závislá na čistotě plynu. Koroze ve spalínách zemního plynu, který obsahuje jen stopy sirovodíku, odpovídá v podstatě korozi na vzduchu, který obsahuje vodní páru a oxid uhličitý.

Ve směsích sirovodíku a vodíku probíhá v závislosti na teplotě tvorba sulfidů jen do určitého poměru parciálních tlaků sirovodíku a vodíku. Protože afinita železa a dalších prvků k sirovodíku je značně veliká, probíhá *sirovodíková koroze* i ve směsích, ve kterých je parciální tlak desetitisíckrát větší než parciální tlak sirovodíku. Pro směsi vodíku a sirovodíku je nutné volit oceli vodíkovzdorné, avšak s relativně vysokým obsahem chrómu pro zabezpečení dostatečné odolnosti proti sirovodíku.

Při *vodíkové korozi* se ve struktuře ocelí tvoří metan jako důsledek reakce atomárního vodíku s uhlíkem. Proto je nutné pro volbu materiálu do prostředí vodíku za vysokého tlaku soustředit pozornost na vazbu uhlíku do termochemicky stálých komplexních nebo speciálních karbidů, které při daných teplotách a tlacích s vodíkem nereagují. K tomu se především využívá legování ocelí chrómem a prvky tvořícími speciálními karbidy, přičemž odolnost při nejvyšších teplotách zaručují korozivzdorné oceli.

Uplatnění korozivzdorných ocelí a slitin je významné i pro směsi vodíku s oxidem uhelnatým se zřetelem na zabránění tzv. *karbonylové korozi* při 150 až 400°C za vysokých tlaků, kdy dochází k tvorbě těžkého pentakarbonylu železa Fe(CO)₅. Napadený povrch zůstává bez korozních produktů, ale ve směru proudu prostředí se při nižších teplotách vylučuje pentakarbonyl ve formě kapaliny, při vyšších teplotách se ukládá vrstva železa vzniklá jeho teplotním rozkladem. V oblasti středních teplot je nutné volit korozivzdorné materiály. Středně legované oceli odolné proti vodíku je možné volit až pro teploty zhruba nad 320°C. Jejich odolnost proti tečení v atmosféře vysokotlakého vodíku je závislá na obsahu chrómu.

Při tepelném štěpení čpavku např. v zařízení syntézy amoniaku je třeba se vypořádat s nitridací a korozí vysokotlakou směsí vodíku, dusíku a čpavku. Všechny jevy vodíkové koroze zde přicházejí v úvahu a přistupuje k nim absorpce dusíku a intenzivní *nitridace* ocelí v téměř klasických nitridačních podmínkách. Nitridaci zde je třeba brát za určitou formu vysokoteplotní plynné koroze, která se projevuje vznikem křehké vrstvy nitridů.

Při tlacích syntézy amoniaku nelze zanedbat ani doprovodnou vodíkovou korozi, která může ovlivnit rychlost i poškození nitridací.

Elektrochemická koroze kovů

Mechanismus elektrochemické koroze kovů je založen na termodynamické nestabilitě kovů v korozním prostředí a v příslušných podmínkách. Elektrochemická koroze probíhá v prostředí, které má povahu elektrolytu (rozpuštěná sůl, vodné roztoky solí, kyselin, zásad). Různé druhy kovů a elektrolyt vytvářejí zdroj napětí – galvanický článek. Proces v galvanickém článku lze zjednodušeně popsat následovně: ponoří-li se dva různé kovové materiály (např. měď a zinek) do elektrolytu (např. zředěné kyseliny sírové), pak se v elektrolytu oba nabijí na svůj potenciál (Zn přibližně na $-0,76$ V a Cu na $+0,34$ V). Mezi zinkovou a měděnou elektrodou vznikne elektromotorická síla o napětí $1,1$ V, což je rozdíl elektrochemických potenciálů ($0,34 - (-0,76) = 1,1$). V galvanickém článku vzniká chemickými procesy stejnosměrný proud, který proudí ve vodiči od anody ke katodě. Méně ušlechtilý kov (např. zinek, který má minus potenciál) tvoří anodu, ušlechtilejší kov (např. měď, která má plus potenciál) katodu. V galvanickém článku je vždy narušena anoda. Současné teoretické poznatky o elektrochemické korozi lze shrnout následovně: ponoří-li se kov do vodného prostředí, stane se elektrodou, kdy její potenciál E (V) má charakter termodynamické veličiny a je závislý na změně Gibbsovy energie ΔG (J/mol) při elektrodové reakci:

$$\Delta G = z \cdot F \cdot E, \quad (6.16)$$

kde z je oxidační číslo vznikajícího kovového iontu (počet nábojů vyměněných při reakci), F je Faradayova konstanta ($96\,494$ C/mol).

Pro každou elektrochemickou reakci existuje její rovnovážný potenciál E_r (V). V případě, že hodnota potenciálu E je rovna hodnotě rovnovážného potenciálu E_r , probíhá reakce oběma směry stejnou rychlostí. Rovnovážný potenciál závisí na ušlechtilosti příslušného kovu, která se vyjadřuje standardním potenciálem E^0 a dále na aktivitě a koncentraci vlastních iontů kovu přítomných v roztoku. Aktivita iontů se vyjadřuje podle Nernstova vztahu:

$$E_r = E^0 + \frac{R \cdot T}{2,3 \cdot z \cdot F} \cdot \log a_{Me}^{z+}, \quad (6.17)$$

kde R je molární konstanta ($8,314$ J/K/mol), T je teplota (K) a a_{Me}^{z+} je aktivita kovových iontů v roztoku ($\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$).

Je-li potenciál elektrody E rozdílný od rovnovážného potenciálu E_r , potom jejich rozdíl μ se nazývá předpětí (V) a je určen vztahem.

$$E - E_r = \mu \neq 0, \quad (6.18)$$

který určuje směr reakcí: $\mu > 0$ oxidační reakce (elektroda má kladnější potenciál než E_r) a $\mu < 0$ redukční reakce. Potenciálový rozdíl μ charakterizuje hnací sílu korozní reakce, kdy s rostoucím μ roste rychlost reakce, pokud není omezena transportními procesy.

Rovnovážný potenciál E_r oxidačně-redukční reakce (depolarizace) je vyjádřen analogickým Nernstovým-Petersonovým vztahem (s přenosem jednoho elektronu):

$$E_r = E^o + \frac{R \cdot T}{2,23 \cdot z \cdot F} \cdot \log \frac{a_{ox}}{a_{red}}, \quad (6.19)$$

kde a_{ox} je poměr aktivit oxidované formy reagující látky, a_{red} je poměr aktivit redukované formy reagující látky.

Vybrané hodnoty standardních potenciálů při korozi kovů jsou uvedeny v tab. 6.1.

Tab. 6.1 Standardní elektrodové potenciály vybraných kovů

Druh kovu	Potenciál (V)	Druh kovu	Potenciál (V)
Sodík	- 2,71	Kobalt	- 0,29
Hořčík	- 1,55	Nikl	- 0,23
Hliník	- 1,33	Cín	- 0,14
Titan	- 1,21	Olovo	- 0,12
Vanad	- 1,18	Vodík	0,00
Zinek	- 0,36	Měď	+ 0,34
Chróm	- 0,56	Stříbro	+ 0,80
Železo	- 0,44	Platina	+ 1,19
Kadmium	- 0,40	Zlato	+ 1,36

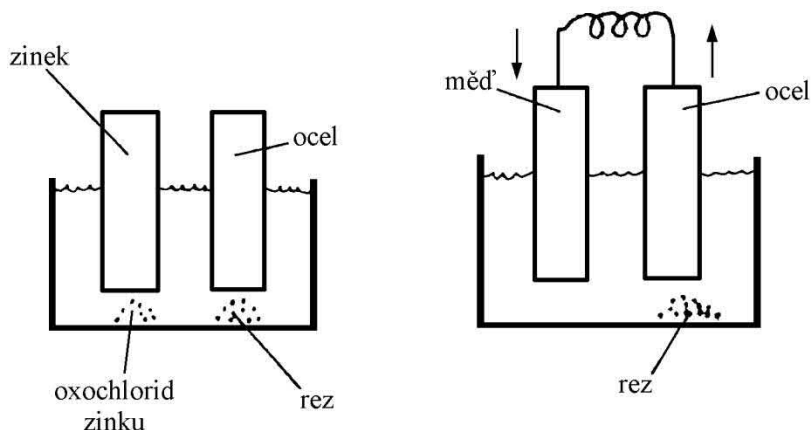
Kovy, mající elektrodový potenciál v rozmezí -3 až 0,4 V, jsou neušlechtilé, termodynamicky nestabilní. V rozmezí -0,4 až 0 V jsou kovy nestabilní a v rozmezí 0 až +0,8 V mají zvýšenou stabilitu (poloušlechtilé kovy). Vysokou stabilitu mají ušlechtilé kovy s potenciálem 0,8 až 1,2 V a při hodnotách nad 1,5 jsou kovy zcela termodynamicky stabilní. Více informací o termodynamické stabilitě kovů z hlediska elektrochemické koroze lze získat na základě analýzy diagramu potenciál kovu – pH prostředí.

Korozní článěk

Ponoří-li se dva termodynamicky rozdílné kovy do vodivého prostředí, dochází u obou nezávisle ke koroznímu procesu za tvorby korozních produktů. Např. destička zinku a destička nízkouhlíkové oceli ponořené do vodného roztoku chloridu sodného vede již v krátké době ke korozi doprovázené vznikem korozních produktů. Když se spojí obě destičky vodičem, začne kov s nižším potenciálem (zinek) korodovat, ale ocel zůstane beze změny obr. 6.8.

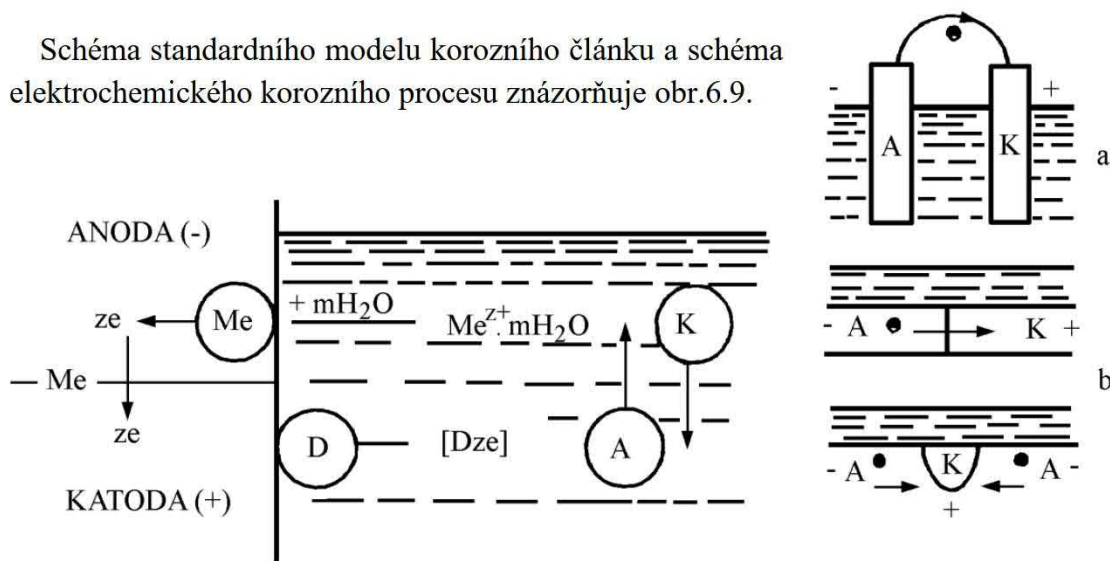
Když se přejde z makro měřítka kovových destiček do mikrorozměrů (např. heterogenity na povrchu nebo uvnitř kovu), je možné analogicky popsat mechanismus elektrochemické koroze. Stávající teorie elektrochemické koroze vychází z představ

iniciace a průběhu koroze jako heterogenní elektrody, i když lze na kovový povrch v roztoku pohlížet jako na homogenní elektrodu. Jedná se o lokální články, které jsou podstatou elektrochemické koroze pomocí povrchové a strukturní heterogenity kovů. Ke korozi dochází lokalizací povrchu na anodická a katodická místa tvořící mikroskopický galvanický článek za přítomnosti elektrolytu.



Obr. 6.8 Koroze dvou termodynamicky odlišných kovů (zinek, měď–ocel) bez spojení a při vodivém spojení

Schéma standardního modelu korozního článku a schéma elektrochemického korozního procesu znázorňuje obr.6.9.



Obr. 6.9 Schéma standardního modelu korozního článku a schéma elektrochemického korozního procesu

Elektrochemická koroze kovů je proces, který se skládá z anodického děje, tj. tvorby hydratovaných iontů kovů v elektrolytu a volných elektronů na anodických místech:

$$(6.20)$$

a katodického děje, tj. asimilace elektronů ionty nebo molekulami roztoku (depolarizátory D), které se redukují na katodických místech podle reakce:

$$(6.21)$$

V případě koroze železa ve vodném prostředí dochází na anodě k přechodu kového železa na železnaté ionty za současné ztráty dvou elektronů. Probíhá-li koroze v kyselém roztoku, dochází na anodě k aktivnímu rozpouštění železa za současného přechodu vodíkových kationtů po asimilaci elektronů na vodík. Jedná se o korozi s tzv. vodíkovou depolarizací. V neutrálním prostředí dochází k přechodu železa na železnaté ionty a k jejich následné reakci s hydroxylovými ionty na hydroxid železnatý s následnou reakcí s kyslíkem rozpuštěným ve vodě na rez. Katodickou reakcí je v tomto prostředí asimilace čtyř uvolněných elektronů, kdy reakcí s kyslíkem vznikají podle podmínek např. hydroxylové ionty, tj. kyslíková depolarizace. Pro korozní proces je důležité, co je považováno za anodu a katodu. Pokud jsou posuzované dva kovy, pak anodou je kov méně ušlechtilý, mající záporný elektrodový potenciál, ovšem za podmínky, že se v daném prostředí nepasivuje. Čím větší je rozdíl elektrodových potenciálů – přepětí, tím větší je hnací síla korozního procesu. Pokud dochází ke změnám pH prostředí, teploty a jiných stimulatorů, jsou probíhající elektrodové reakce mnohem složitější.

Kinetika elektrochemické koroze

Při elektrochemické korozi odpovídá elektrický proud podle Faradayova zákona rychlosti reakce, kdy platí:

$$\frac{m}{t} = \frac{M \cdot I}{z \cdot F}, \quad (6.22)$$

kde $\frac{m}{t}$ je rychlost reakce, tj. množství zkorodované látky za čas (g/s), I je proud (A); M je relativní atomová hmotnost kovu, popř. molekulová hmotnost látky (g); z je mocenství vznikajícího kovového iontu (počet nábojů vyměněných při reakci); F je Faradayova konstanta (96 494 C).

Proud vztažený na jednotku plochy je proudová hustota s . Elektrický náboj $Q = I \cdot t$ je přímo úměrný množství zreagované látky. Korozní rychlost vyjádřenou proudovou hustotou ($\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$) lze převést na hloubku průniku h , při rovnoměrné korozi udanou např. v mm/rok, pokud bude uvažovaný náboj prošlý za rok a hustotu kovu ρ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$):

$$h = 3,27 \cdot \frac{s \cdot M}{z \cdot \rho} \quad (6.23)$$

Přepětí μ charakterizuje hnací sílu korozního procesu, ale zároveň s jeho růstem se urychluje i elektrodová reakce v příslušném směru a to podle exponenciálních funkcí pro:

- Anodický děj

$$J_A = J_0 \cdot \exp \left[\frac{\alpha \cdot z \cdot F}{2,3 \cdot R \cdot T} \mu \right] \quad (6.24)$$

- Katodický děj

$$J_K = -J_0 \cdot \exp \left[-\frac{(1-\alpha) \cdot z \cdot F}{2,3 \cdot R \cdot T} \eta \right] \quad (6.25)$$

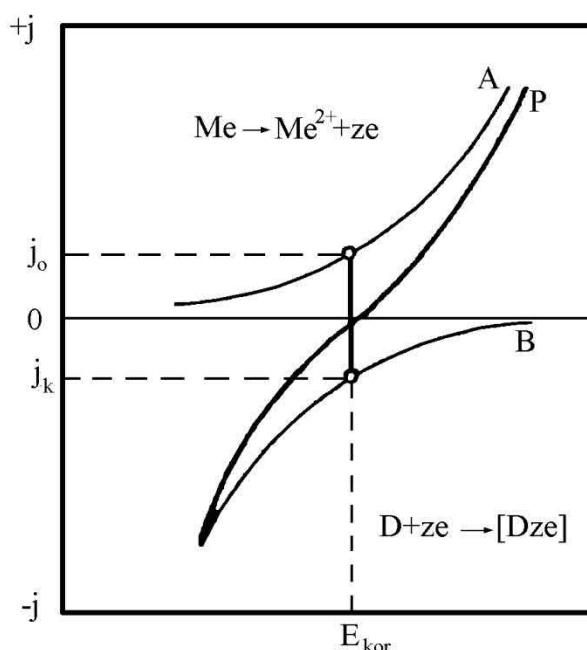
kde J_A , J_K je anodická, resp. katodická proudová hustota (A/m^2); J_0 je výměnná proudová hustota charakterizující rychlost (A/m); α je součinitel přenosu náboje.

Anodický a katodický korozní děj probíhá podle (6.24) a (6.25), ale součet jejich proudových hustot je roven nule:

$$J_A + J_K = 0 \quad (6.26)$$

Přitom se potenciál E posune na takovou hodnotu, aby došlo k vyrovnání dílčích rychlostí obou dějů a stanoví se tzv. korozní potenciál E_{kor} . Rychlost popisující elektrodové reakce v závislosti na proudové hustotě J a hodnotě potenciálu E je dána vztahem:

$$J = J_0 \cdot \left[\exp \left[\frac{\alpha \cdot z \cdot F}{2,3 \cdot R \cdot T} \mu \right] - \exp \left[-\frac{(1-\alpha) \cdot z \cdot F}{2,3 \cdot R \cdot T} \eta \right] \right] \quad (6.27)$$



Obr. 6.10 Korozní diagram

Její grafické vyjádření znázorňuje tzv. korozní diagram, obr. 6.10, kde potenciál E je mírou hnací síly a proudová hustota J_{kor} mírou rychlosti procesu koroze.

Elektrochemická koroze je samovolný proces vzájemné interakce kovu s okolním elektrolyticky vodivým prostředím, při kterém ionizace atomu kovu a redukce oxidační složky korozního prostředí probíhají současně a jejich rychlosti závisí na hodnotě elektrodového potenciálu kovu.

Atmosférická koroze

Je zvláštním druhem elektrochemické koroze. Pro její průběh, obdobně jako ve vodném prostředí, je nezbytná existence složek korozního systému, tj. přítomnost elektrolytu na kovovém povrchu a rozdělení heterogenního povrchu na anodická a katodická místa. Elektrolytem mohou být vodní srážky (mlha, déšť) nebo adsorpce vodní páry ze vzduchu. V něm jsou rozpuštěny nebo dispergovány látky představující hlavní složky znečištění atmosféry – prach, oxid siřičitý aj. Významnou hodnotou

relativní vlhkosti je hodnota v rozmezí 70 až 80 %. Tato hodnota se nazývá kritickou relativní vlhkostí vzduchu. Z hodnocení vzájemných vztahů mezi rychlostmi koroze významných technických kovů a činiteli atmosféry vyplynulo, že rozhodující pro atmosférickou korozi oceli je především obsah oxidu siřičitého a tzv. doba odvlhčení.

Počáteční koroze v prvních dvou, popř. třech letech, probíhá rychleji (exponenciálně), později se rychlost ustálí, probíhá pomaleji (lineárně). Příklad součásti vystavené atmosférické korozi je uveden na obr. 6.11.

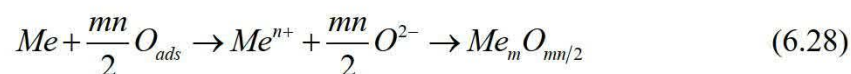


Obr. 6.11 Korozní opotřebení trubek

Chemická koroze

Je to samovolná vzájemná interakce kovu s korozním prostředím, při které oxidace kovu a redukce oxidující složky probíhají současně. Vzniká působením vzdušného kyslíku (oxidací), ale také kyselin, luhů a solí. Vyskytuje se obvykle při působení plynů (spaliny, vzduch aj.) na kovy. Nejrozšířenější je chemická koroze kovů v plynech za vyšších teplot. U mnohých kovů zamezí tenká vnější vrstva oxidů průnik koroze do hloubky materiálu, např.: zelená patina u mědi nebo oxidační vrstva u hliníku. Proti tomu u železných slitin postupuje koroze velkou rychlostí nezadržitelně směrem dovnitř.

Prvním stadiem chemické koroze je adsorpce oxidující složky na povrchu, kdy vzniká iontová vazba mezi kyslíkem a povrchovými atomy kovu. Kov předává atomu kyslíku dva elektrony a vznikající vazba je odlišná od vazby kyslíku s kovem v oxidu. Adsorpce molekul je při tvorbě vazby s kovem vyjádřena prostřednictvím atomu kyslíku. Dochází k výměně elektronů v opačném směru, kdy atom kyslíku předává elektrony kovu. Vnější povrch vzniklé vrstvy má kladný náboj, vnitřní povrch záporný. Adsorbovaná vrstva přechází ve vrstvičku oxidu podle chemické reakce:



kde Me je libovolný kov, Me^{n+} je iont kovu, O_{ads} je adsorbovaná forma kyslíku, O^{2-} je iontová forma kyslíku, a m, n je počet.

Reakce probíhá za současné přestavby atomů kovu a kyslíku, která odpovídá jejich prostorovému rozdělení v oxidu. Vlastnosti vznikajících vrstev oxidu jsou určovány

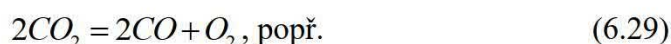
různými vlivy, např. tloušťkou vrstvy (tenké v nanometrech – neviditelné, střední – barevné zbarvení, tlusté – viditelné, např. okuje na oceli). Některé rovnoměrné vrstvy mohou mít ochranné vlastnosti, kdy platí, že pokud je molární objem vznikající vrstvy menší než molární obsah kovu, nestačí vrstva pokrýt povrch kovu a reagující plynná složka má k povrchu přístup a taková vrstva potom nemá ochranné vlastnosti. Toto pravidlo neplatí absolutně a je ovlivněno řadou dalších činitelů (čas, druh oxidu, teplota, tlak aj.).

a) Oxidové vrstvy na železe

Na povrchu železa se v oxidujícím plynném prostředí tvoří oxidová vrstva, kdy rychlost tvorby stoupá s růstem teploty. Oxidové vrstvy jsou tvořeny třemi sloučeninami, ve kterých je oxidační číslo železa Fe^n a Fe^m . Při teplotách do 560 °C se vrstva okují skládá hlavně z magnetitu Fe_2O_3 , nad touto teplotou je tvořena tzv. wüstitem FeO . Přítomnost dalšího typu oxidu hematitu α Fe_2O_3 a maghemitu γ $-Fe_2O_3$ je podmíněna vysokým parciálním tlakem kyslíku.

b) Oxidační atmosféry

V kyslíkatých plynných prostředích tvoří kovy korozní produkty tvořené z oxidů. Kromě kyslíku a vzduchu do těchto atmosfér patří oxid uhličitý CO_2 a např. vodní pára, jejichž tepelnou disociací se uvolňuje dostatečné množství kyslíku k tvorbě oxidů podle vztahů:



c) Sírná prostředí

Nejdůležitější je oxid siřičitý a sirovodík, které způsobují vysokoteplotní korozi. Jsou nebezpečné zejména proto, že způsobují korozi i ve velmi malých koncentracích (desetiny %).

d) Vodíkové prostředí

Vodík reaguje s řadou kovů při zvýšené teplotě za vzniku hydridů, které se v základním kovu dobře rozpouštějí. I malá množství hydridů vedou k vážným mechanickým poškozením materiálů, tzv. vodíkové křehnutí, které je pokládáno za strukturní formu koroze.

e) Dusíkaté prostředí

Vytváří s některými čistými kovy (legurami Al, Mn, V, Cr, Ti aj.) nitridy, které tvoří buď samostatně vrstvy korozních produktů nebo se rozpouští a tvoří v kovu tuhé roztoky, které zvyšují křehkost. S většinou kovů (Fe aj.) však dusík nereaguje a proto se chová jako ochranná atmosféra.

f) Prostředí oxidu uhelnatého

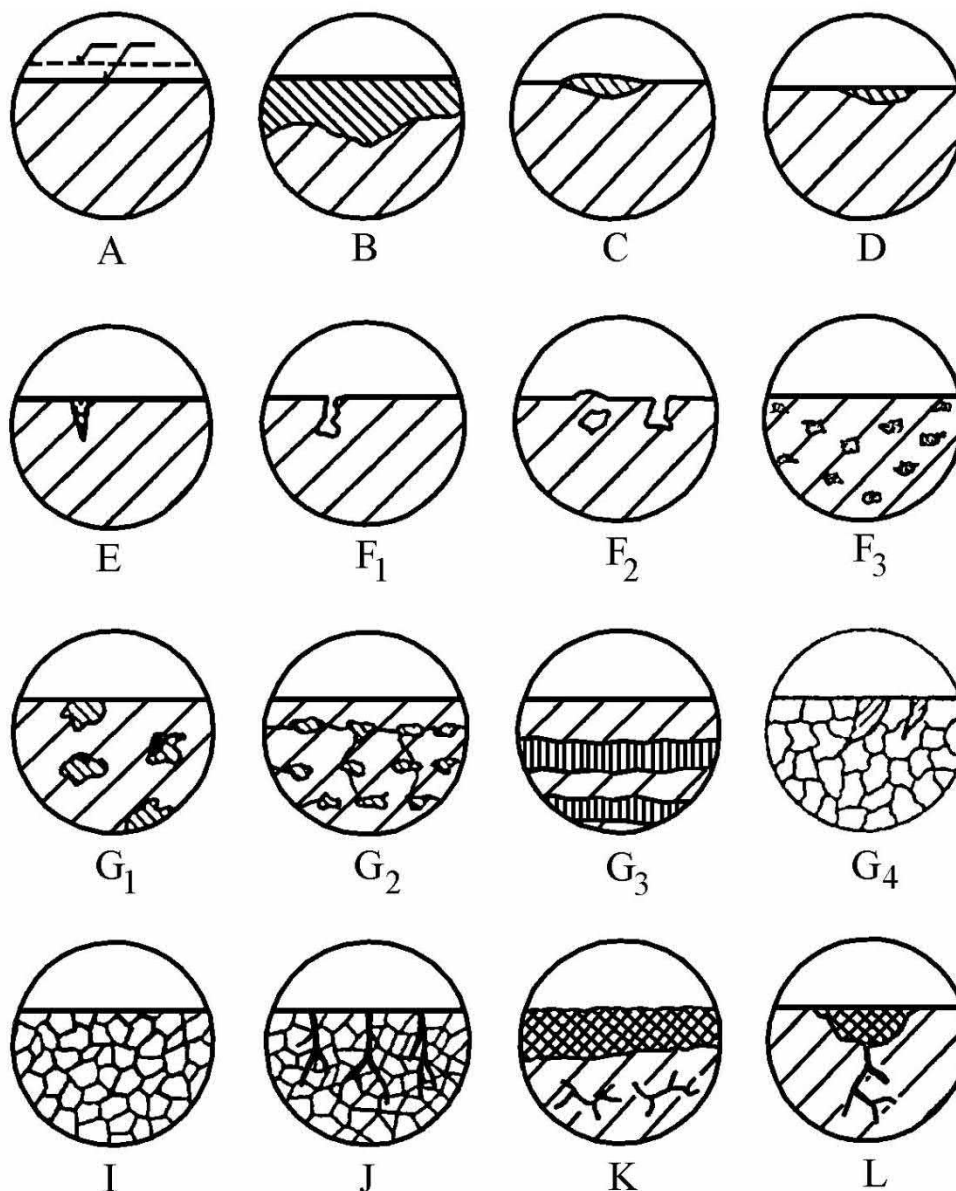
Nenapadá kovy za normální teploty, ale je nebezpečný při vysokých teplotách, kdy se může rozkládat na uhlík a oxid uhličitý podle vztahu:



Tuto reakci urychlují kovy skupiny železa při teplotách (500 až 700 °C) a může dojít k nauhličení, popř. oduhličení, což jsou nežádoucí jevy, které podstatně zhoršují mechanické vlastnosti materiálů.

6.1. FORMY (DRUHY) KOROZNÍHO NAPADENÍ

Koroze materiálů se může projevovat různými formami (graficky znázorněné na obr. 6.12 a schematicky uvedené na obr. 6.13), některé z nich nemusí být spojeny s úbytkem materiálu, např. křehnutí oceli způsobené sorpcí atomárního vodíku, tedy pochodem, při kterém se hmotnost materiálu dokonce zvyšuje.

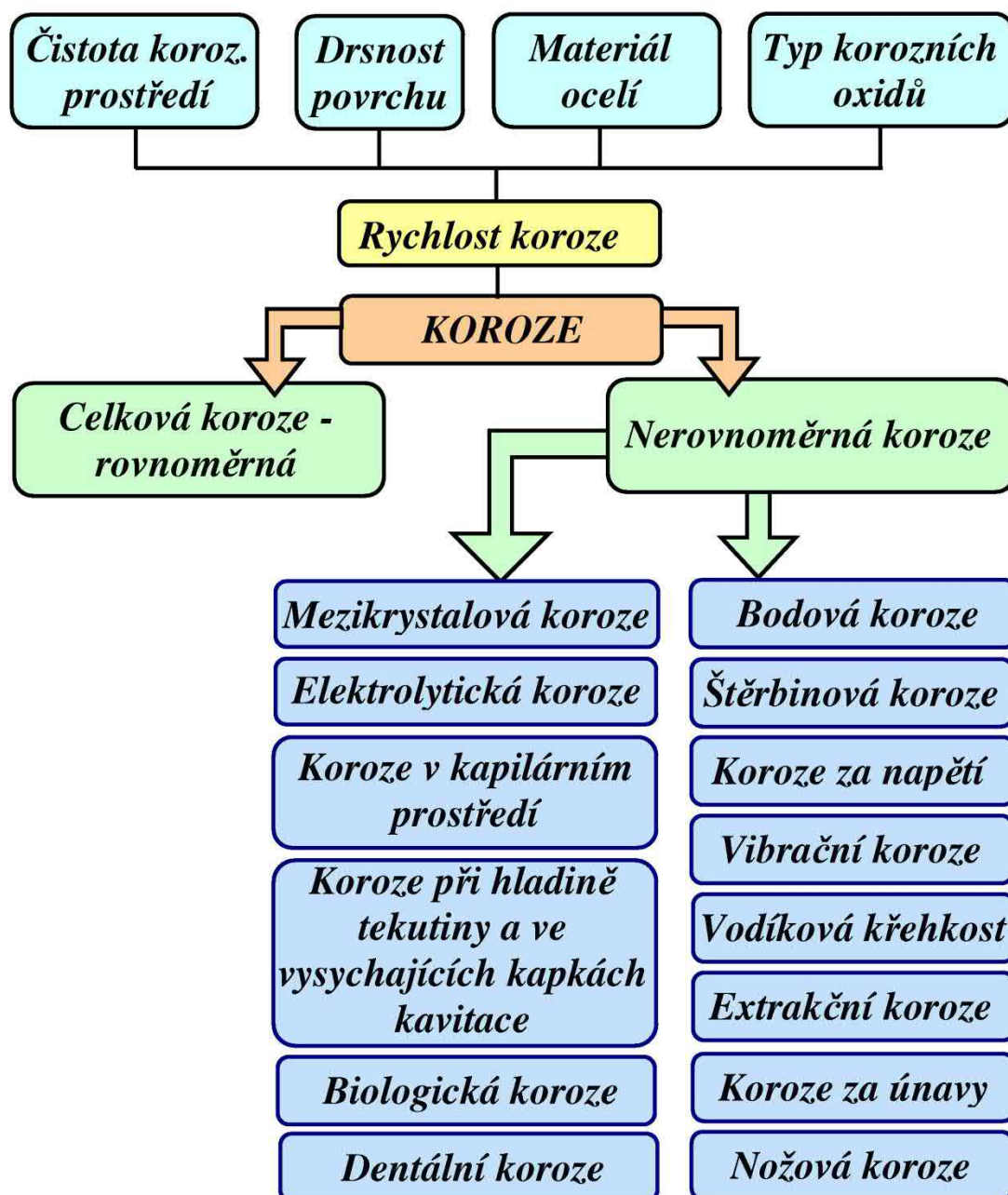


Obr. 6.12 Vybrané druhy korozního napadení (A rovnoměrné, B nerovnoměrné, C skvrnité, D důlkové, E bodové, F podpovrchové, G selektivní, I mezikrystalické, J transkrystalické, K extrakční, L korozní trhliny)

➤ Celková koroze

Při celkové korozi koroduje povrch oceli rovnoměrně a rozsah korozního poškození lze obvykle předpovídat.

Korozní rychlost závisí na čistotě korozního prostředí. Vysoké korozní odolnosti lze dosáhnout zvýšením obsahu chromu, niklu a molybdenu.



Obr. 6.13 Koroze a její druhy

➤ Rovnoměrná (plošná) koroze

Rovnoměrné napadení obr. 6.12 A, při něm nastává rovnoměrné rozpouštění kovu stejnoměrně po celém povrchu. Obvykle tento proces pozorujeme u homogenního kovu, kdy se produkty koroze ihned po vzniku z povrchu odstraňují. Běžně má tato forma koroze konstantní rychlost, je velmi nápadná, ale přitom nejméně nebezpečná. Množství zkorodovaného povrchu, tj. rychlost koroze, lze vyjádřit množstvím látky, která zkoroduje za jednotku času a plochy ($\text{g}\cdot\text{mm}^{-2}\cdot\text{den}^{-1}$), popř. tloušťkou vrstvy, která se za určitý čas koroze rozpustí ($\text{mm}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$). Korozní rychlost se obvykle mění s časem, kdy počáteční rychlost je větší než konečná, proto se obvykle udává její střední hodnota.

➤ **Nerovnoměrné druhy napadení (obr. 12 B)**

Velmi nebezpečnými formami této koroze jsou:

- mezikrystalová koroze,
- bodová a štěrbinová koroze,
- korozní praskání,
- korozní únava aj.

Z pohledu pevnosti konstrukcí z korozivzdorných ocelí jsou nejnebezpečnější tzv. strukturní druhy koroze hlavně u materiálů odolných proti celkové korozi v jejich pasivním stavu.

➤ **Důlková a bodová koroze**

Důlková a bodová koroze obr. 6.12 D a E, je charakteristická pro snadno pasivovatelné kovy (železo, hliník, nerezové oceli aj.). Probíhá jen na několika místech materiálu, jde do hloubky, zatímco jiná místa zůstávají beze změny. Množství rozpouštěného kovu je malé, ale nebezpečí spočívá v tom, že korodovaná místa mohou náhle proděravět. Důlková koroze nastává zejména v případech, kdy je povrch součásti pokryt ochranou vrstvou, která má póry a defekty, jimiž např. proniká agresivní činidlo. Často nastává u nerezových ocelí, které jsou opatřeny oxidickou ochrannou vrstvou. Touto vrstvou pronikají chloridové ionty, resp. ionty jiných halogenidů. Tento druh koroze se často označuje jako „pitting“, charakteristické je to, že vzniká až po určité inkubační době nutné k tomu, aby ionty pronikly ochrannou vrstvičkou. Pitting má některé charakteristické rysy, které ho odlišují od ostatních druhů důlkové koroze. Je to hlavně tvar důlku, kde průměr bývá mnohem menší než jeho hloubka, tak jako by byl vyvrtán. Důlky se vyskytují častěji na vodorovných plochách než ve vertikálních. Je to pravděpodobně tím, že se vyskytují mnohem častěji, jestliže kapalná fáze je v klidu. Bodová koroze, která nemá charakter pittingu, se často vyskytuje v případech, jestliže povrch kovu je nedostatečně chráněn nátěrem, kde se vyskytují póry, škrábance aj. U plechů např. v případě, kdy jsou pokryty vrstvou oxidů vzniklých při válcování aj.

Pro její vznik musí být v prostředí:

- dostatečná koncentrace agresivních aniontů,
- dostatečná koncentrace oxidačních činidel,
- korozní potenciál musí být vyšší než kritický pro iniciaci bodové koroze.

Dochází k ní především v roztocích obsahujících chlór, bróm, fluór nebo jód, jejich soli, zejména halogenidy těžkých kovů nebo chlornany.

Ionty těchto halogenů pronikají snadno ochranným pasivním filmem s následným místním anodovým rozpouštěním v aktivním stavu.

K místnímu porušení pasivního filmu může přednostně docházet v místech vad materiálu vyúsťujících na povrch, nekovových vměstků, z nichž zvláště MnS, FeS, CaS se v kyselých roztocích snadno rozpouštějí za tvorby H₂S, který může urychlovat anodové i katodové děje korozních pochodů tvorbou přechodných komplexních produktů s katalytickými účinky.

Rozpuštěním nekovových vměstků nebo kovu obklopujícího vměstky vznikají mikrošterbiny.

Určujícími činiteli z hlediska odolnosti materiálu proti iniciaci bodové koroze jsou vedle složení kovové matrice i složení, tvar, počet a rozložení vměstků popř. dalších nehomogenit.

Zůstane-li však součást nebo prostředí dostatečně dlouhou dobu v klidu a vznikne zárodek bodu, začne tento bod růst *autokatalytickým pochodem*, pro který je příznivý i obvykle se uplatňující gravitační efekt. Body jsou často pokryty membránou korozních produktů, jež mohou, pokud odpadnou, iniciovat další body v místě jejich zachycení na povrchu.

Mechanismus bodové koroze lze rozdělit na dvě stadia:

- *nukleární* – spočívající v místním narušení pasivního filmu po určité inkubační době a v iniciaci aktivního korozního centra,
- *vývojové* – kdy aktivní korozní centra rostou ve formě bodů autokatalytickým pochodem.

V počátečním stadiu bodové koroze však dochází k přednostnímu rozpouštění železa podle reakce:

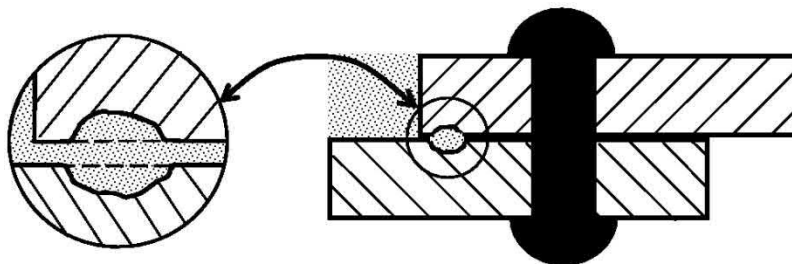


Vedle spojitě rostoucích bodů je třeba uvažovat průběh depasivačních a repasivačních dějů na povrchu, tedy schopnosti obnovy místně narušeného pasivního filmu.

➤ **Koroze ve šterbinách**

Preferovaným místem koroze jsou ta místa, kde je např. mezi součástmi (plechy aj.) mezera, tedy tam, kde na sebe těsně nepřiléhají. Koroze vzniká tím, že kapalina, která do mezery vnikne, je nestejně prokysličená, na styku s atmosférou je nasycena kyslíkem, uvnitř pak je kyslík oxidací spotřebován. Značný význam má tvar mezery, kritické poměry jsou v případě, že šterbina je menší než 1 mm. Často se tento druh koroze projevuje u svarů, armatur aj. Časté je korozní napadení ve šterbinách u nerezových ocelí, které jsou citlivé na redukční prostředí.

Úzká šterbina představuje důležitý geometrický činitel zvyšující v ní agresivitu okolního roztoku, který je ve styku s volným povrchem. Od bodové koroze se liší především mechanismem iniciace, obr. 6.14.

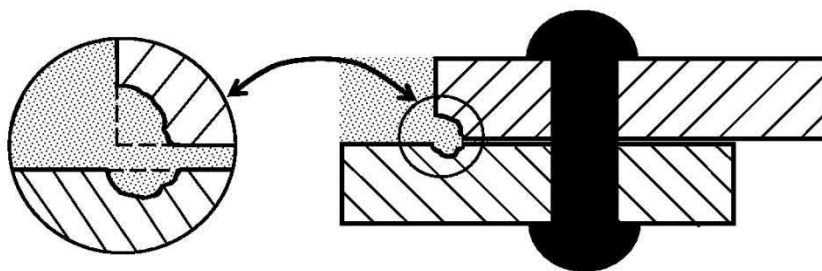


Obr. 6.14 Šterbinová koroze nýtovaného spoje v důsledku rozdílného přístupu kyslíku

Inkubační doba štěrbinové koroze bývá poměrně dlouhá, zvláště pak v reálných podmínkách, což je charakteristické pro vznik koncentračních článků kovů v pasivním stavu s elektrochemickými pochody o nízkých proudových hustotách.

Na obr. 6.15 je zobrazena štěrbinová koroze nýtovaného spoje v důsledku různé koncentrace – vysoká koncentrace iontů kovu uvnitř štěrbin, anodová oblast s nízkou koncentrací iontů kovu vně štěrbin.

Rozhodující příčinou vzniku místní koroze v aktivním stavu ve štěrbině je silné oxyselení roztoku, které je dáno hydrolyzou kovových iontů ve štěrbině.



Obr. 6.15 Štěrbínová koroze nýtovaného spoje v důsledku různé koncentrace

➤ Mezikrystalická koroze

Mezikrystalická (mezikrystalová) koroze, obr. 6.12 I, se objevuje při podstatně odlišném složení hranic zrn proti objemu zrna. Běžné kovové konstrukční materiály jsou polykrystalické a sestávají z velkého počtu malých krystalů, které jsou vzájemně spojeny látkou, která ztuhne poněkud později. Nejde-li o mimořádně čisté kovy, je složení této látky odlišné od složení krystalů a to proto, že se v ní jako v později tuhnoucí fázi nahromadily nečistoty. V důsledku toho hranice zrn má zpravidla menší mechanickou odolnost než vlastní krystaly a snáze se rozpouští v agresivním prostředí. Tento druh koroze je zvláště nebezpečný tím, že se viditelně neprojevuje, protože produkty vzniklé koroze zůstávají na místě. Korodovaná místa však zcela ztrácejí svoje mechanické vlastnosti. Mezikrystalická koroze často nastává u slitin, kde chybným tepelným zpracováním došlo k vyloučení některých složek, např. u nerezových ocelí při nesprávném svařování. Pokud tato ocel obsahuje malé množství uhlíku, může se za určitých podmínek slučovat s chromem, který tvoří podstatnou složku nerezové oceli. Vzniká pak karbid chromu a tím se chrom odstraní z tuhého roztoku, ve kterém byl původně obsažen. Rozhraní mezi zrny karbidu chromu a zbylým kovem je zvláště citlivé na mezikrystalickou korozi. Mezikrystalická koroze se většinou projevuje jen na určitých místech, obdobně jako důlková. Zatímco důlková koroze závisí na vlastnostech povrchu, mezikrystalická koroze je záležitostí kovu jako celku. Velmi často se s touto koroze setkáváme u korozi-vzdorných austenitických ocelí, které byly ohřáté v oblasti teplot 500 až 800 °C. Ve výjimečných případech přechází mezikrystalická koroze z hranic krystalů na samotné krystaly, jde o tzv. transkrystalickou (transkrystalovou) korozi, obr. 6.12 J.

Mezikrystalová koroze probíhá za jistých podmínek přednostně mezi krystaly (zrny) podél jejich rozhraní.

Je nebezpečná zejména pro:

- korozivzdorné oceli,
- niklové slitiny,
- slitiny hliníku apod.,

a to v závislosti na jejich:

- chemickém složení,
- struktuře,
- tepelném zpracování.

Porušením soudržnosti zrn slitina postupně ztrácí pevnost a houževnatost, strukturně degraduje, až ji lze rozetřít na prášek.

Je-li náchylná slitina v agresivním činidle aktivní, mezikrystalová koroze předbíhá celkovou korozi.

U stabilizovaných ocelí, ve kterých je mezikrystalová koroze v oblasti těchto teplot potlačena, se za určitých podmínek objevuje mezikrystalové napadení v úzké přehřáté zóně přiléhající např. ke svarovému kovu. Vzhledově toto napadení připomíná zářez nožem a podle toho je pojmenování *nožová koroze*, ke které jsou nejvíce citlivé oceli stabilizované titanem v silně oxidačních prostředích.

➤ **Koroze při namáhání**

Jedná se o zvláštní druh mezikrystalické koroze, který je významný pro svoji nebezpečnost, protože dochází k náhlému kolapsu materiálu (konstrukce). Nastává tehdy, když korodovaný materiál je současně mechanicky namáhán, a to zvláště v tahu. Mechanismus koroze při namáhání je obdobný jako u mezikrystalické koroze. Spočívá v tom, že korozivně nejméně odolná místa, ať již jsou to hranice krystalů nebo přímo krystaly, se naleptávají a tím zeslabují a nejsou odolná proti namáhání. Mechanické namáhání se v nich soustředí a nakonec dojde k úplnému rozrušení. Některá činidla urychlují průběh koroze při namáhání, např. roztoky dusičnanů, louhů aj. Kromě těchto běžných druhů koroze při namáhání, které mají povahu elektrochemické koroze, existují další, které se projevují za speciálních podmínek. Patří k nim např. vodíková křehkost způsobená tím, že atomární vodík ve stavu zrodu (leptání železa kyselinou) vniká do krystalové mřížky (z důvodu svého malého atomu, resp. molekuly) a tak ji porušuje. Zvláštním způsobem koroze, která je přechodem k čistě mechanickému porušování, je kavitace. Nastává tehdy, když na povrch materiálu vystavenému velmi rychle proudící kapalině působí střídání podtlaku vyvolaného hydrodynamickými víry a přetlaku způsobenému rozpadem malých vzduchových bublin. Lokálními změnami tlaku dochází k porušování ochranné vrstvy a vytrhávání částic z povrchu.

➤ **Koroze kovů plyny**

Koroze kovů reakcí s plyny je velmi častá, je elektrochemické podstaty, rozdílem je skutečnost, že úlohu kapalného elektrolytu má sám korozní produkt. Každý čistý povrch kovu vystavený působení vzduchu se za čas pokrývá reakčními produkty. Za normální teploty vzniká pouze tenká vrstvička, často neviditelná, která kov chrání. V některých případech reakce pokračuje, až veškerý kov zoxiduje. V jiných se reakce

brzy zastaví. Příčinou tohoto rozdílného chování je např. skutečnost, že specifický objem oxidu je větší než objem kovu a může se vytvořit neporézní pokrývka, která další reakci omezuje. Jakmile povrch zoxidoval, rychlost dalších reakcí závisí na fyzikálních a elektrických vlastnostech korozního produktu. Složitější je problematika mechanismu dalšího růstu vrstev. Základní představou je skutečnost, že korozní vrstvou procházejí ionty reagujících látek, tedy nikoli atomy nebo molekuly. Dílčími pochody jsou: povrchová oxidace, kdy se uvolňují kovové ionty a jim odpovídající valenční elektrony. Uvolněné elektrony putují z povrchu kovu k rozhraní mezi korozními zplodinami a plynem. Elektrony, které dospěly na rozhraní fáze, reagují s molekulami plynu za tvorby příslušných iontů. Nakonec nastává přechod vzniklých iontů k příslušným elektrodám, tj. buď kationtů ke katodě (fázovému rozhraní) a nebo aniontů k anodě (povrchu kovu). Který z pochodů nastane, závisí na povaze korozního produktu.

Mechanismus tvorby oxidových vrstev vychází z teorie, která je založena na předpokladu, že se vrstvou oxidů mohou pohybovat (difundovat) nezávisle na sobě ionty a elektrony. Teoreticky lze tedy vysvětlit vznik trubiček oxidu měďnatého při oxidaci měděného drátu jednoduše tím, že ionty mědi putují z vnitřku na povrch, kde se slučují s kyslíkovými ionty. Tento mechanismus umožňuje vysvětlení faktu, že rychlost oxidace kovů závisí na přítomnosti některých stopových nečistot. Faktory, které zvyšují koncentraci volných míst (vakancí) krystalové mřížky, zvyšují i rychlost koroze. Naopak látky, které odstraňují vakance, snižují vodivost a rychlost koroze. Tím se vysvětluje značný vliv stopových nečistot na stálost kovů při zvýšených teplotách. Rovněž přítomnost i malých množství cizích plynů ovlivňuje průběh koroze. Reakční produkty těchto nečistot ovlivňují složení korozních produktů, pozměňují jejich elektrickou vodivost, která rozhoduje o intenzitě korozního proudu. Např. koroze silně agresivními plyny, jako je koroze železa chlorovodíkem, nastává až při poměrně vysokých teplotách 200 – 300 °C, zatímco při normálních teplotách chlorovodíku zcela odolává. Jiná teorie oxidace je založena na předpokladu vzniku elektrického pole, které existenci potenciálu mezi kovem a oxidem významně ovlivňuje, zejména charakter růstu tenkých filmů v závislosti na jejich tloušťce. Vychází se z představy elektrické dvojvrstvy, která umožňuje přechod iontů za podmínek, kdy jejich aktivační energie je ještě nízká. Výsledkem je potom odvození logaritmické závislosti růstu vrstev. Agresivita vlhkých plynů je závislá na tom, zda pracuje pod teplotou rosného bodu nebo nad ní. Má-li vlhkost možnost při teplotách pod teplotou rosného bodu kondenzovat, nastává elektrochemická koroze. Zvláštní postavení má tzv. vodíková koroze, se kterou se setkáváme při působení vodíku na ocel za vyšších teplot a tlaků. Může být též vyvolána vodíkem ve stavu zrodu, např. když se na železné katodě vyvíjí vodík. Může tedy nastat i při katodické ochraně oceli. Vodík působí tak, že se rozpouští v železe, deformuje jeho krystalickou mřížku a vyvolává pnutí. Za vyšších teplot tento vodík reaguje s uhlíkem, který je v oceli vždy obsažen, za tvorby metanu podle vztahu:



Metan rozrušuje strukturu a ocel ztrátou uhlíku ztrácí pevnost. Analogicky vodík rozrušuje za vyšších teplot např. měď a další kovy.

➤ **Koroze za napětí, korozní praskání**

Tento druh koroze je zvláště škodlivým a nebezpečným případem poškození kovů a slitin často i v málo agresivních prostředích (ale obsahujících chloridy nebo hydroxidy) je často nepředvídatelný a jeho průběh je velmi rychlý.

Při současném působení koroze a mechanických vlivů může být korozní napadení intenzivnější, často však proniká místně značnou rychlostí, než která by odpovídala poškození při odděleném působení obou vlivů.

Jde o jev *korozního porušování*, ke kterému dochází u některých materiálů v určitých prostředích za působení tahových napětí a to interkrystalicky, transkrystalicky nebo smíšeně.

U některých slitin může být praskání vyvoláno též absorpcí vodíku vznikajícího v průběhu korozní reakce i v poměrně málo agresivním prostředí, přecházející do tzv. vodíkové křehkosti.

Dále to mohou být napětí zbytková od dřívějšího tváření za studena, tepelného zpracování, svařování apod., bez vnějšího zatížení.

S rostoucí velikostí zrna roste citlivost ke koroznímu praskání. Mohou to být hranice zrn, kluzné roviny, dislokace, precipitáty a jejich rozhraní, které se uplatňují při povrchových jevech a vedou ke koroznímu praskání.

Existují dvě základní teorie vysvětlující jev korozního praskání:

- 1) *Elektrochemická teorie* – uvažuje vznik místního korozního článku za vývoje elektrochemického rozpouštění kovu;
- 2) *Napětové sorpční praskání* – teorie je založena na oslabení kohezních vazeb mezi atomy na povrchu kovů a slitin adsorpcí specifické složky prostředí.

Pro vznik a vývoj korozního praskání je nezbytné tahové napětí, které lze rozdělit do dvou skupin:

- vyvolané tahovým zatížením,
- vycházející ze zbytkových napětí.

Vysoké hodnoty napětí mohou být v materiálu vyvolány velkým tepelným spádem přímo v provozujícím zařízení. Je známo, že již samotné zvyšování teploty v mnoha případech podporuje vznik a vývoj korozního praskání.

Jestliže je materiál vystaven střídavému namáhání a současně koroznímu prostředí, podstatně se snižuje i mez únavy, čímž může docházet ke *korozní únavě*.

Rozdíl mezi korozním porušováním a únavou spočívá v tom, že v případě korozní únavy je materiál namáhán střídavě se měnícím napětím. Při ní nelze uvažovat o mezi únavy, protože se korozní průřez součástí stále zmenšuje.

Únavová křivka se stoupajícím počtem cyklů stále klesá při klesajícím napětí, takže i pod mezí únavy dochází k lomu.

Trhliny vznikající při korozní únavě jsou obvykle transkrystalického charakteru a mohou se dále větvit. Jev korozního praskání, ke kterému dochází u některých materiálů v určitých prostředích (viz. tab. 6.2) za působení např. tahových napětí, je charakteristický interkrystalickou a transkrystalickou popř. smíšenou korozi.

Tab. 6.2 Prostředí vyvolávající korozní praskání některých slitin

Druh slitiny kovu	Prostředí vyvolávající korozní praskání
Uhlíková ocel	NaOH roztoky, roztoky dusičnanu vápenatého, sodného a amonného, směsi kyselin, mořská voda, čpavek
Korozivzdorné oceli	Kyselé roztoky chloridů, mořská voda, voda za vyšších teplot a tlaků, kondenzáty obsahující chloridy, kyslík
Hliník a jeho slitiny	NaCl – H ₂ O ₂ roztoky, NaCl roztoky, mořská voda, vzduch, pára
Měď a její slitiny	Pára a roztoky čpavku, aminy, voda, pára
Olovo	Kyselina octová, octan olovnatý
Nikl a jeho slitiny (monel, inconel)	Soda – roztoky, tavenina, kyselina fluorovodíková, kyselina fluorokřemičitá

Znamé je interkrystalické korozní porušování uhlíkových ocelí v dusičnanech a alkáliích (tzv. louhová křehkost kotlů), interkrystalické a transkrystalické porušování mosazi v prostředích obsahujících čpavek (tzv. sezónní praskání), transkrystalické korozní porušování austenitických chromniklových ocelí v prostředí chloridů aj. Napětí bývají převážně zbytková od předcházejícího tváření za studena, tepelného zpracování, svařování aj. Obecně lze konstatovat, že všechny kovy a jejich slitiny jsou citlivé ke koroznímu porušování, většina z nich se však porušuje pouze v určitých prostředích a za jistých podmínek.

➤ **Koroze polymerů**

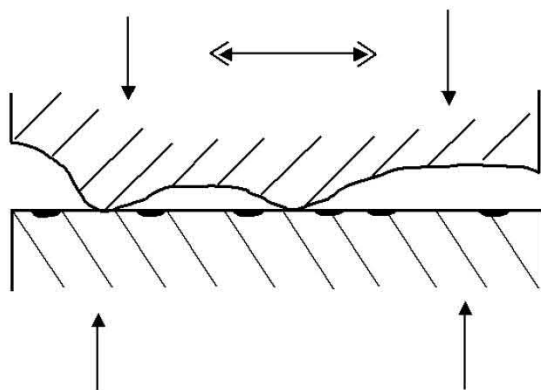
Je to nežádoucí změna jejich chemického složení, zbarvení, mechanických vlastností aj. vlivem vnějšího prostředí. Významným činitelem je teplota, sluneční světlo, povětrnostní podmínky, vzdušný kyslík, ultrafialové záření, voda aj. Tato degradace je běžná u všech polymerů, rozlišujeme ji na degradaci tepelnou (termickou), kde dochází k vytváření nenasyčených vrstev v řetězci polymeru a tím k jeho degradaci, dále na degradaci povětrnostní (světelnou), kde dochází k oxidaci, trhání řetězců a poklesu mechanických vlastností polymeru (lámání, praskání, křehnutí). Tyto negativní vlastnosti lze do značné míry omezovat úpravou výrobního procesu, použitím vhodných přísad (aditiv) ve formě tepelných nebo světelných stabilizátorů.

➤ **Vibrační koroze**

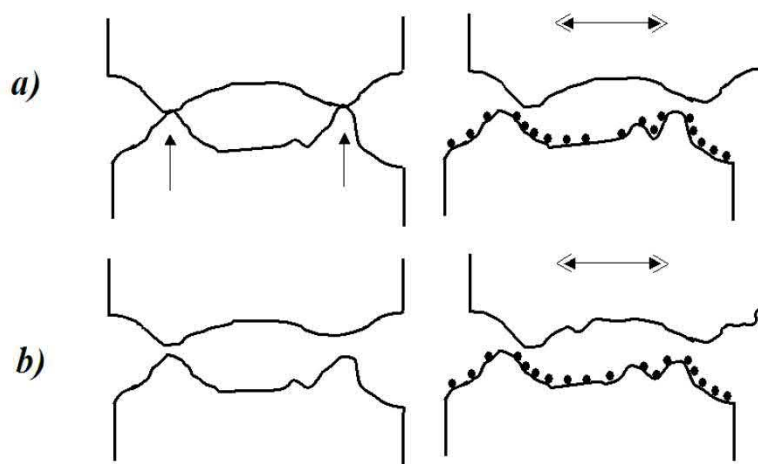
Mechanické namáhání a vzájemné tangenciální kmitavé pohyby dvou stýkajících se součástí mohou vyvolat tzv. vibrační (třecí) korozi označovanou jako třecí opotřebení (fretting), obr. 6.16. Z různých mechanismů tohoto poškození vyplývá, že se při něm uplatňují jak složka mechanická tak i chemická.

Značná intenzita vibračního opotřebení je dána dynamickým charakterem namáhání povrchu při vysokém měrném tlaku. Jejím specifickým rysem je zadržování vytvořených oxidačních produktů mezi styčnými plochami a jejich rozmělnění mezi vrstvy ocelových součástí.

Odlíšnost vibrační koroze od opotřebení, ke kterému dochází při jednosměrném tření, spočívá v relativně malé dráze pohybu a stálém styku otírajících se ploch, viz. obr. 6.17.



Obr. 6.16 Schéma vzniku vibrační koroze na styku dvou třecích ploch při vysokém měrném zatížení – napadená část je pokryta vrstvou oxidů



Obr. 6.17 Mechanismus vibrační koroze uvažující studené svary, vydrolování kovu a oxidačních částic (a) nebo porušení primárního povrchového oxidového filmu a jeho rozdrčení (b)

Vzájemný pohyb způsobující toto mechanicko-korozní poškození povrchů má různý původ. Může jít o pohyb:

- přímočarý vratný (např. u vibrátorů),
- způsobený přenesenými vibracemi,
- vzniklý následkem pružných změn v uložení mechanicky namáhaných součástí.

Poškození způsobené vibračním opotřebením bylo pozorováno nejen u součástí s pohyblivým uložením, ale i u součástí s tak pevným uložením, jaké je u lisovaných spojů, dojde-li k jejich vzájemnému skluzu.

Často vzniká vibrační koroze ve stykových plochách nábojů kol a kroužků valivých ložisek, nalisovaných na hřídeli, v kterých průhybem rotujícího hřídele dochází k vratnému mikropohybu.

Značný vliv na vibrační opotřebení má prostředí, v němž proces probíhá. Se zvyšováním relativní vlhkosti se vibrační opotřebení zmenšuje, což je v rozporu s vlivem vlhkosti při atmosférické korozi.

➤ **Vodíková křehkost, záření**

Extrémní poškození může vyvolat v kovové mřížce vodík. Projevuje se to několika formami, např. vločkovitostí, křehnutím a při vyšších teplotách vodíkovou korozi nebo oduhličením. Proniká-li atomární vodík kovem, může docházet k místní deformaci, která často vede až k celkovému lomu součásti, tlakové nádoby, potrubí aj.

Dalším důsledkem vniknutí vodíku do kovu a slitiny je křehkost tzn. snižování tažnosti, houževnatosti a pevnosti. Vodík za vysokých teplot iniciuje k povrchovému oduhličení se snížením pevnostních charakteristik. Za středně vysokých teplot může vodík vyvolat i tzv. vodíkovou korozi reaguje-li s některým prvkem, např. uhlíkem nebo karbidy v oceli za vzniku metanu, popř. kyslíkem v mědi za tvorby vodní páry, kdy dochází k tzv. rozpadu mědi – *vodíkové nemoci*.

Vodík má úzký vztah ke koroznímu praskání v závislosti na zdroji, ze kterého pochází. Je-li vodík produktem probíhajícího elektrochemického pochodu, mohou být výsledné trhliny a lomy zařazeny do skupiny poškození vyvolaných korozním praskáním. Jedná-li se o vodík vzniklý disociací nebo elektrolýzou, pak toto poškození lze klasifikovat jako *vodíkové křehnutí*.

Pouze atomární vodík je schopen difúze kovovou mřížkou. Například aplikace katodové ochrany, elektrokrytalizace kovů a jiné povrchové procesy (moření) mohou být zdrojem atomárního vodíku a tím i vodíkového křehnutí.

Silné ozáření v jaderných reaktorech nebo jiných zařízeních může vést k mřížkovým změnám ve struktuře kovů, jejichž konečný efekt se projeví výrazným stupněm vytvrzení. Tím mohou vznikat fázové diskontinuity, které jsou zdrojem vnitřního napětí a často i praskání.

➤ **Extrakční koroze**

V případě, že dochází ke korozi jen jedné chemické složky slitiny, pak se toto napadení označuje jako *extrakční (selektivní) koroze*. V místě napadení se mění strukturní mřížka tuhých roztoků v důsledku koncentračního spádu chemické složky z extrahované slitiny v místě koroze. Napadení extrakční korozi potom může:

- Probíhat po celém povrchu rovnoměrně a rovněž rovnoměrně pronikat do hloubky slitiny,
- být pouze místní, vytvářet důlky,
- probíhat po hranicích zrn.

Změna strukturní mřížky a rozrušení povrchu snižuje mechanické vlastnosti slitiny a může rozvíjet korozi za napětí při současném působení mechanického namáhání.

Extrakční napadení bylo poměrně dlouhou dobu známé také pod názvem *odzinkování mosazí*.

➤ **Biologická koroze**

Na mikrobiální korozi korozivzdorných ocelí se zúčastňují různé druhy aerobních bakterií vytvářející slizovité kolonie, aerobní železité bakterie, aerobní, anaerobní sírné bakterie aj.

Bakteriální slizovité usazeniny (účastnit se mohou i jiné organismy jako plísňe, řasy nebo měkkýši) osídlí povrch kovu a vytvoří na něm souvislý slizovitý povlak

s různou tloušťkou, zvláště pak ve štěrbinách, nerovnostech, nečistotách a nedostatečně odstraněných okujích z povrchů svarů apod.

Slizovitá vrstva zachycuje sírné a železité bakterie z vody a kromě toho různé látky rozpuštěné ve vodě, jako jsou ionty chlóru nebo látky bakteriemi asimilované, např. sloučeniny železa, síry, manganu a další. Za přítomnosti těchto látek je okolní prostředí ochuzováno o kyslík.

Ve spodní vrstvě jsou takto vytvořeny podmínky pro vegetaci anaerobních sírných bakterií, např. z rodu *Desulfovibrio*, *Desulfotomsculum*, *Desulfuricans* a *Clostridium*. Anaerobní sírné bakterie redukují sírany z vody na sinitany, siřičitany, sírníky a sirovodík. Aerobní sírné bakterie, jako např. druhy *Pseudomonas*, *Aerobacter*, *Flavobacterium*, *Bacillus*, naopak oxidují redukované formy sírných sloučenin až na kyselinu sírovou. Železité bakterie zároveň oxidují ionty dvojmocného železa a manganu na vícemocné.

Trojmocné ionty kovů se slučují s ionty chlóru ve vodě na chloridy – železité a manganité, zvyšují korozní potenciál a podporují bodovou a štěrbinovou korozi objevující se pod typickým červenohnědým nánosem aerobních bakterií. Účinkem všech těchto sloučenin a řady dalších látek ve stojaté vodě, může dojít k narušení pasivní vrstvy korozivzdorných ocelí, a to i během několika hodin při optimálních podmínkách pro bakteriální růst (teplotě 40 až 50 °C).

Železité bakterie oxidují ionty železa a manganu, které se uvolňují z oceli do prostředí, anaerobní sírné bakterie, které při redukci síranů spotřebovávají vodík, urychlují katodovou depolarizační reakci a tím i korozní proces.

Reakce mezi chloridovými ionty z vody a oxidovanými sloučeninami trojmocného železa a manganu za vzniku chloridů železitého a manganitého může aktivovat bodovou a štěrbinovou korozi.

6.2. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ KOROZNÍ OPOTŘEBENÍ

Faktory lze podle působení na korozní opotřebení rozdělit na vnitřní (obr. 6.18) a vnější (obr. 6.19).

➤ Volba materiálu

Chemické složení příslušného kovového materiálu vychází z norem, popř. z technických podmínek daného výrobku. Normativní údaje však plně nevystihují všechny vlastnosti materiálu, které jsou pro korozi rozhodující. Proto se často uvádí vedle chemického složení rovněž jeho korozní odolnost v příslušném prostředí a další podmínky, za kterých byla korozní odolnost hodnocena. Významným parametrem korozní odolnosti je struktura materiálu daná tepelným zpracováním, počtem fází, obsahem složek nad hranici rozpustnosti, orientace krystalů aj. Příkladem mohou být korozivzdorné ocele obr. 6.20. Nečistoty a nežádoucí příměsi (síra v oceli, povrchové vměstky, okuje aj.) představují potenciální mikroelektrody, které mohou vytvářet nebezpečné korozní články. Významným činitelem korozního procesu je také jakost povrchu. Z hlediska mikrogeometrie se vyšší drsnost povrchu může projevit vyšší náchylností ke korozi. Významným faktorem je čistota povrchu součásti. Nečistoty způsobují tvorbu korozních článků, kdy v místě styku nečistoty s povrchem se vytváří galvanické (kov je anodou), aerační (rozdílný obsah kyslíku) nebo koncentrační

(rozdílnost koncentrace složek prostředí v místě styku a okolního prostředí) články, což vede k urychlení procesu koroze, popř. nerovnoměrnému průběhu koroze.



Obr. 6.18 Vnější faktory působící na korozní opotřebení

➤ **Volba konstrukce**

Zvláště významným konstrukčním činitelem je nevhodná kombinace materiálů, která vede ke tvorbě korozních článků. Přitom se nejedná jen o posouzení rozdílu potenciálů použitých kovů. Podstatnější je hodnota korozního potenciálu systému. V poslední době vystupuje do popředí nutnost posoudit kombinace použitých kovů a nekovových materiálů. Degradace plastu může v časovém horizontu znamenat vážné nebezpečí koroze, obdobně jako užití materiálu s vysokou schopností přijímat vodu, aj. Konstrukční uspořádání může zvyšovat rychlost korozního procesu, při něm obvykle dochází k rozdílným teplotním, hydrodynamickým a dalším podmínkám, zvyšuje se doba existence elektrolytu na kovovém povrchu, vytváří se podmínky pro vznik štěrbinové koroze aj.

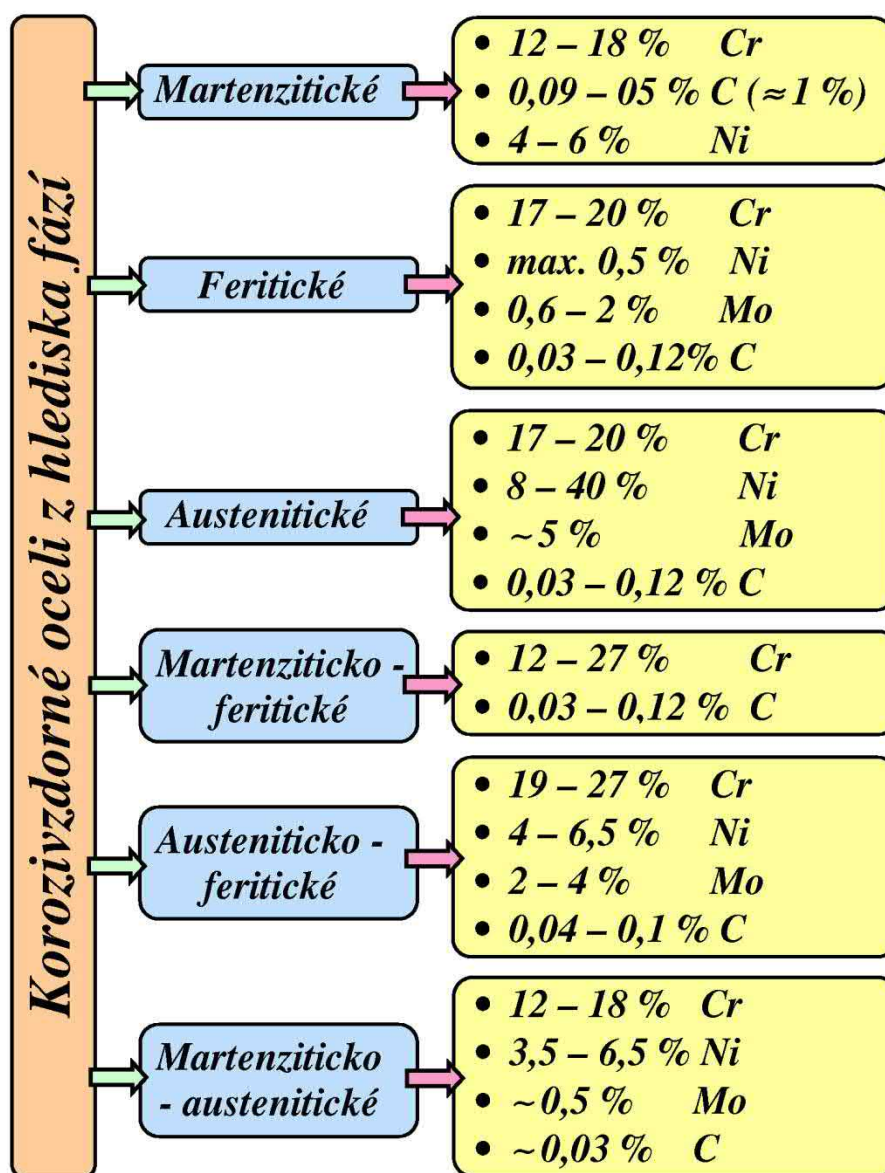


Obr. 6.19 Vnitřní faktory působící na korozní opotřebení

➤ **Volba pH-prostředí**

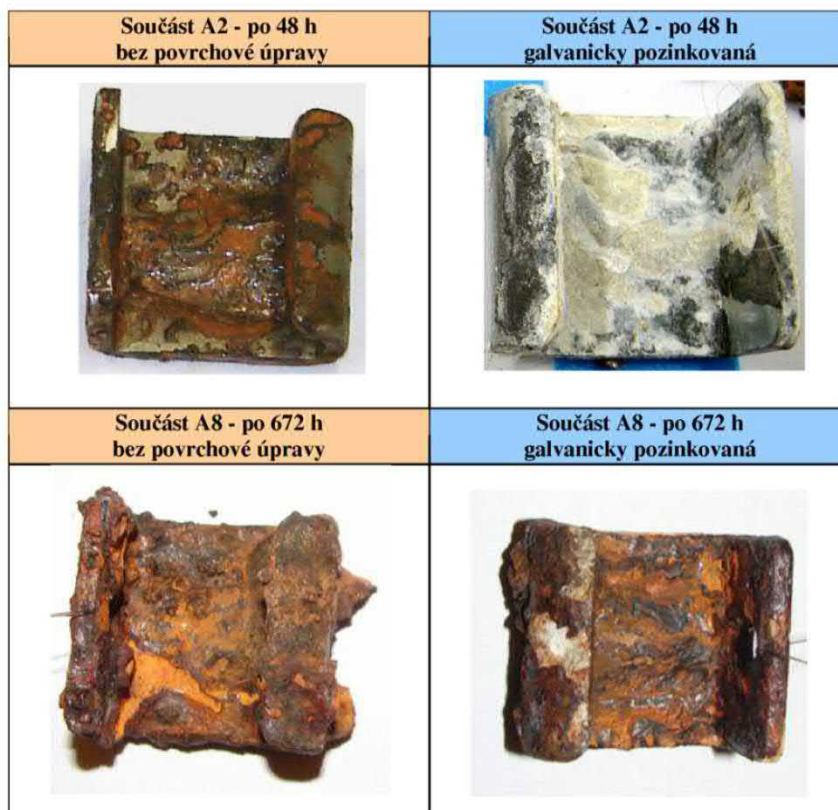
Chemické složení materiálu je dominantním činitelem korozního procesu, protože ovlivňuje mechanismus koroze i její kinetiku. Chemickým složením je dána hodnota pH-prostředí a podle její hodnoty dochází k aktivnímu rozpouštění kovu, jeho pasivaci nebo inaktivaci. Odlišné chemické složení v prostředí na různých místech kovu vede obvykle k nerovnoměrné korozi. Přítomnost stimulatorů nebo inhibitorů koroze mění kinetiku korozního procesu. Stimulátory jsou takové součásti korozního prostředí, jež zvyšují rychlost korozního procesu. Stimulátory koroze ve vodném prostředí jsou např. síranové a chloridové ionty aj., tvořící tzv. „solná hnízda“.

Inhibitory koroze jako součásti korozního prostředí snižují rychlost korozního procesu. Mechanismy působení inhibitorů zahrnují adsorpci inhibitoru a následné působení adsorbované látky na průběh elektrochemických reakcí, tj. ovlivnění anodických a katodických jevů. Procesy mohou probíhat na fázovém rozhraní, v difúzní vrstvě, membránově (porézní vrstva), aj. Účinnými inhibitory koroze kovů jsou chrómové, borité, fosforečné, křemičitanové aj. anionty, resp. některé organické látky (aminy, nitroderiváty aj.). Teplota a teplotní změny podstatně ovlivňují kinetiku korozních procesů. S růstem teploty se obvykle zvyšuje korozní rychlost, může však nastat i opačná situace. Proto je potřebné posuzovat teplotu jako činitele korozního systému individuálně, případ od případu.

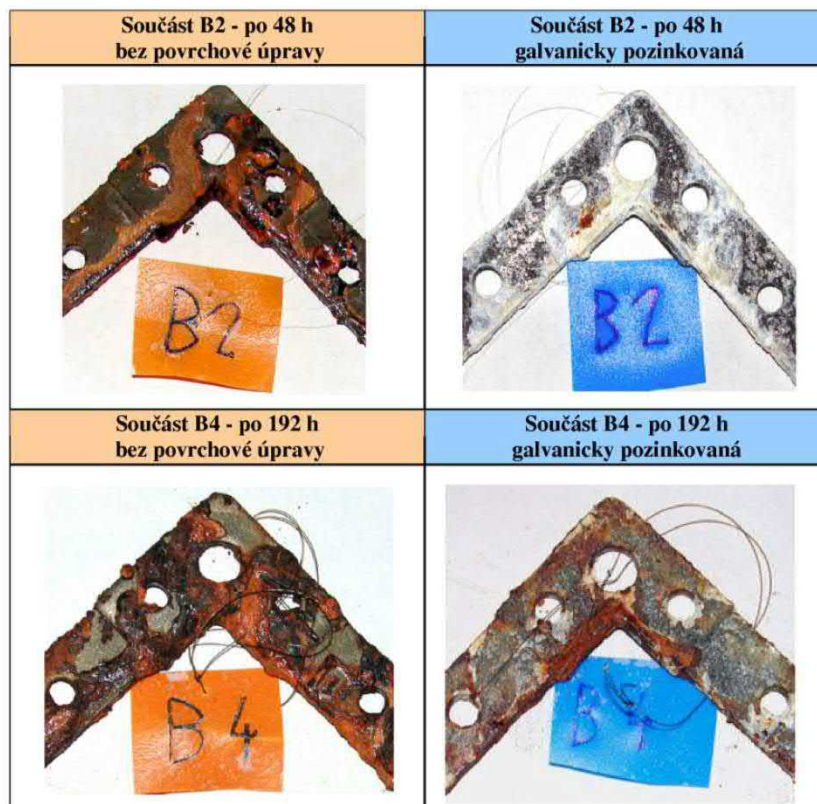


Obr. 6.20 Korozivzdorné ocele

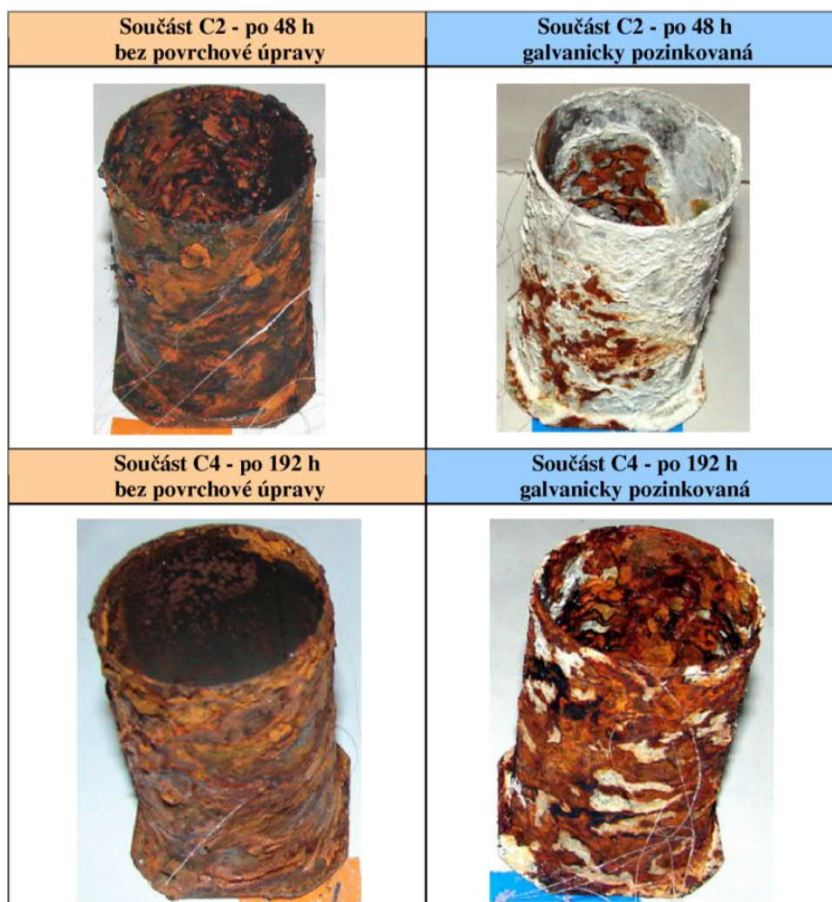
Příklady součástí vystavené korozi – obr. 6.21 až 6.26.



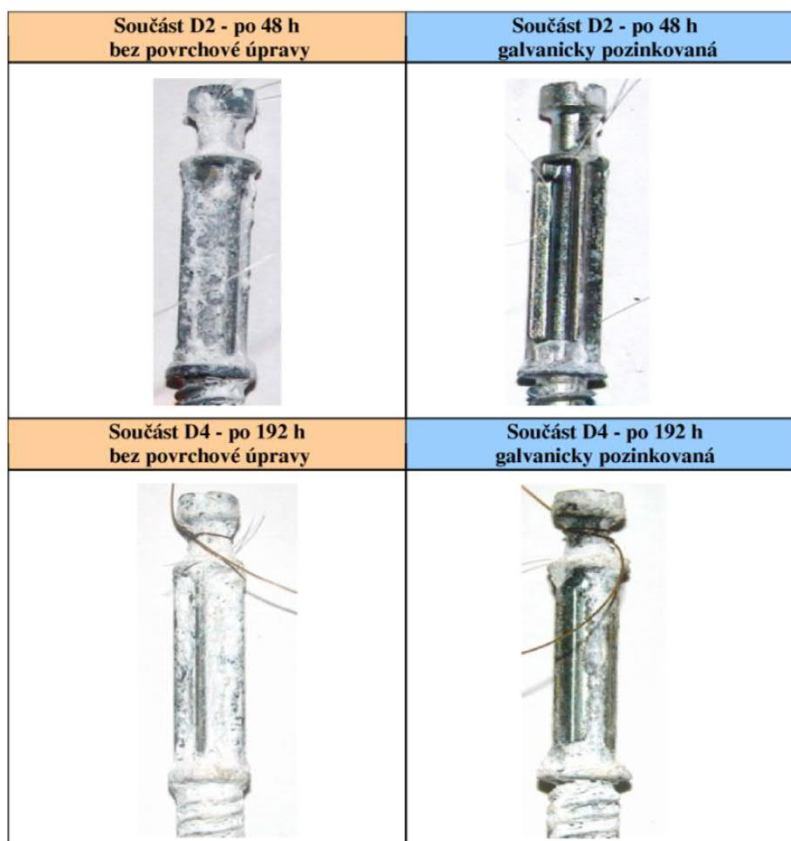
Obr. 6.21 Průběh koroze na součásti A







Obr. 6.22 Průběh koroze na součásti B







Obr. 6.23 Průběh koroze na součásti C



Obr. 6.24 Průběh koroze na součásti D

Teploty zkoušky	Součást B2 - po 48 h bez povrchové úpravy	Součást B2 - po 48 h galvanicky pozinkovaná
$T_k = 50$ $T_m = 70$		
Teploty zkoušky	Součást B2 - po 48 h bez povrchové úpravy	Součást B2 - po 48 h galvanicky pozinkovaná
$T_k = 50$ $T_m = 35$		

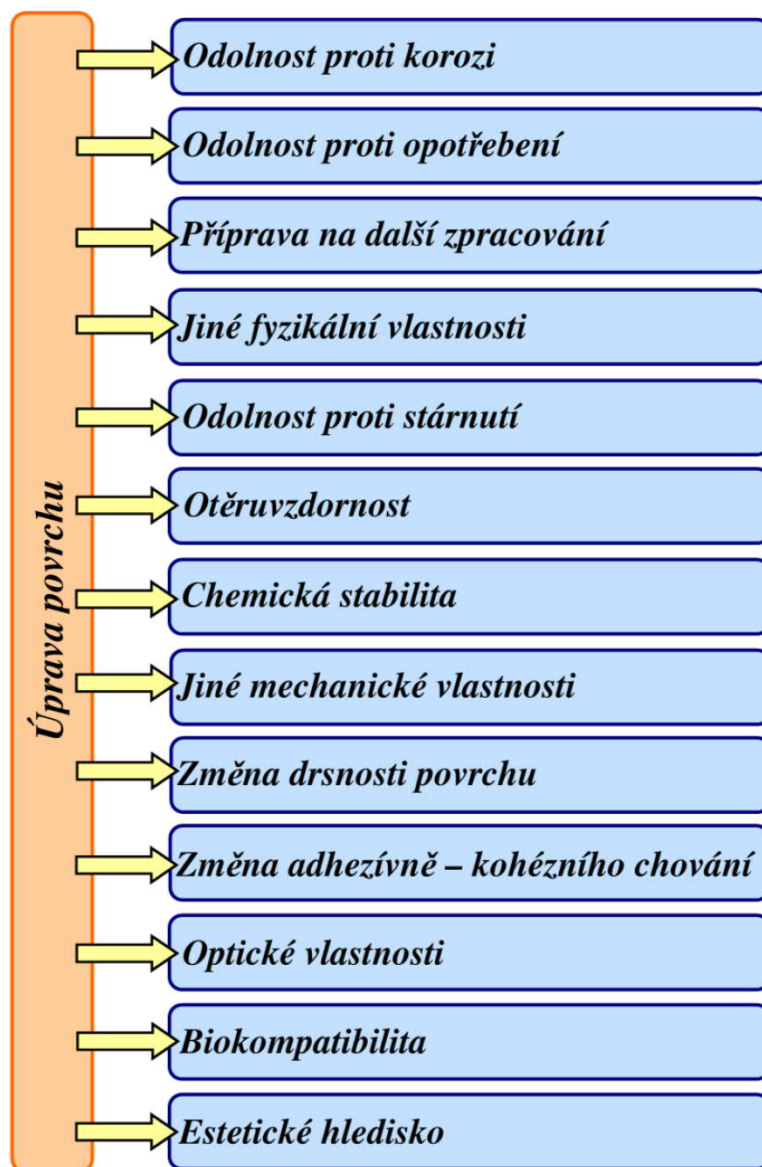
Obr. 6.25 Průběh koroze při rozdílných teplotách média– součást B

Teploty zkoušky	Součást C2 - po 48 h bez povrchové úpravy	Součást C2 - po 48 h galvanicky pozinkovaná
$T_1 = 50$ $T_2 = 70$		
Teploty zkoušky	Součást C2 - po 48 h bez povrchové úpravy	Součást C2 - po 48 h galvanicky pozinkovaná
$T_1 = 35$ $T_2 = 35$		

Obr. 6.26 Průběh koroze při rozdílných teplotách média– součást C

7. ÚPRAVA POVRCHŮ TECHNICKÉHO OBJEKTU

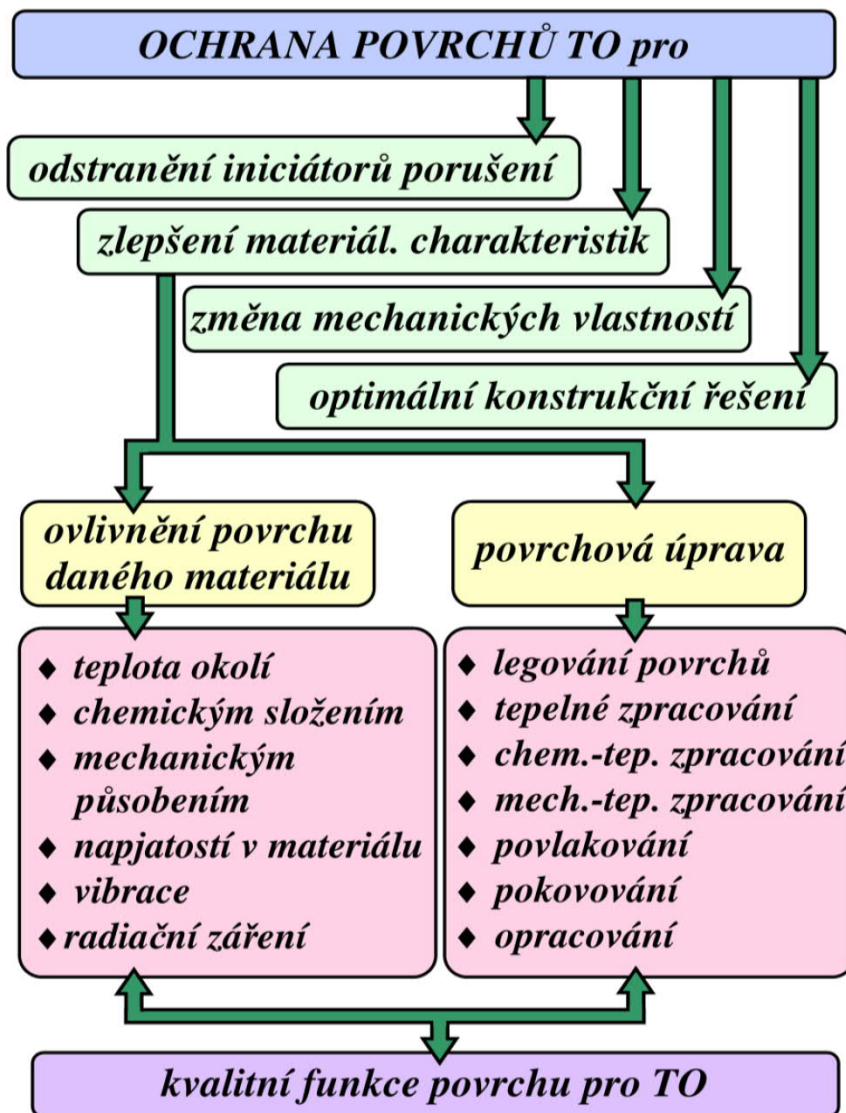
Úprava povrchů na TO slouží pro získání specifických vlastností povrchu (obr. 7.1.), které jsou rozdílné vzhledem k vlastnostem základního materiálu. V technické praxi volba úpravy povrchu záleží na funkci součásti a jejím zatěžování.



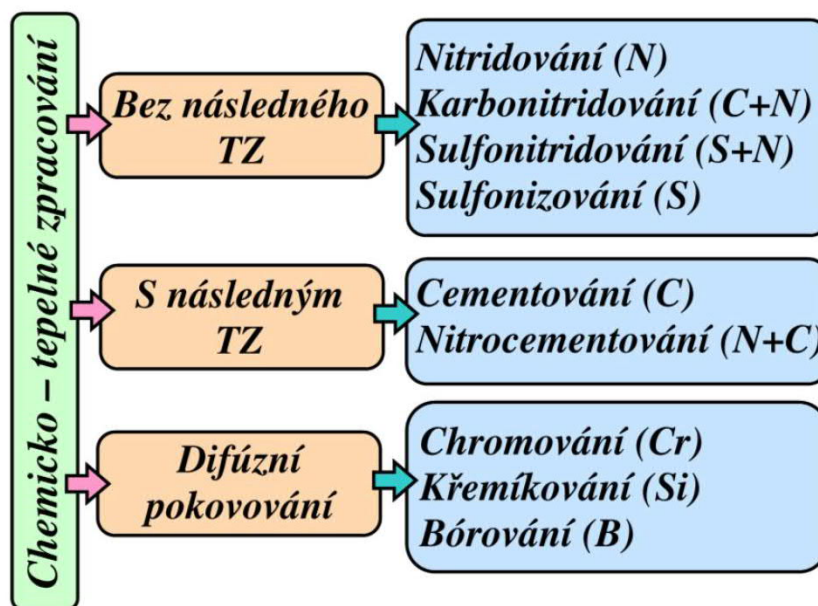
Obr. 7.1 Úprava povrchů pro získání specifických vlastností

V případě, že se jedná o ochranu povrchu součásti, je důležité volbu ochrany podřídit opotřebení, kterému je součást v provozu vystavena, obr. 7.2. Obvykle se jedná o odstranění povrchových iniciátorů napětí, které vedou ke vzniku trhlin, dále o zlepšení materiálových charakteristik, mechanických vlastností a konstrukčních požadavků.

Na úpravu povrchu se využívá tepelné, mechanicko-tepelné a chemicko-tepelné zpracování, popř. jiné technologické úpravy. Nejrozšířenější metodou povrchových úprav je stále využívané chemicko-tepelné zpracování, obr. 7.3.



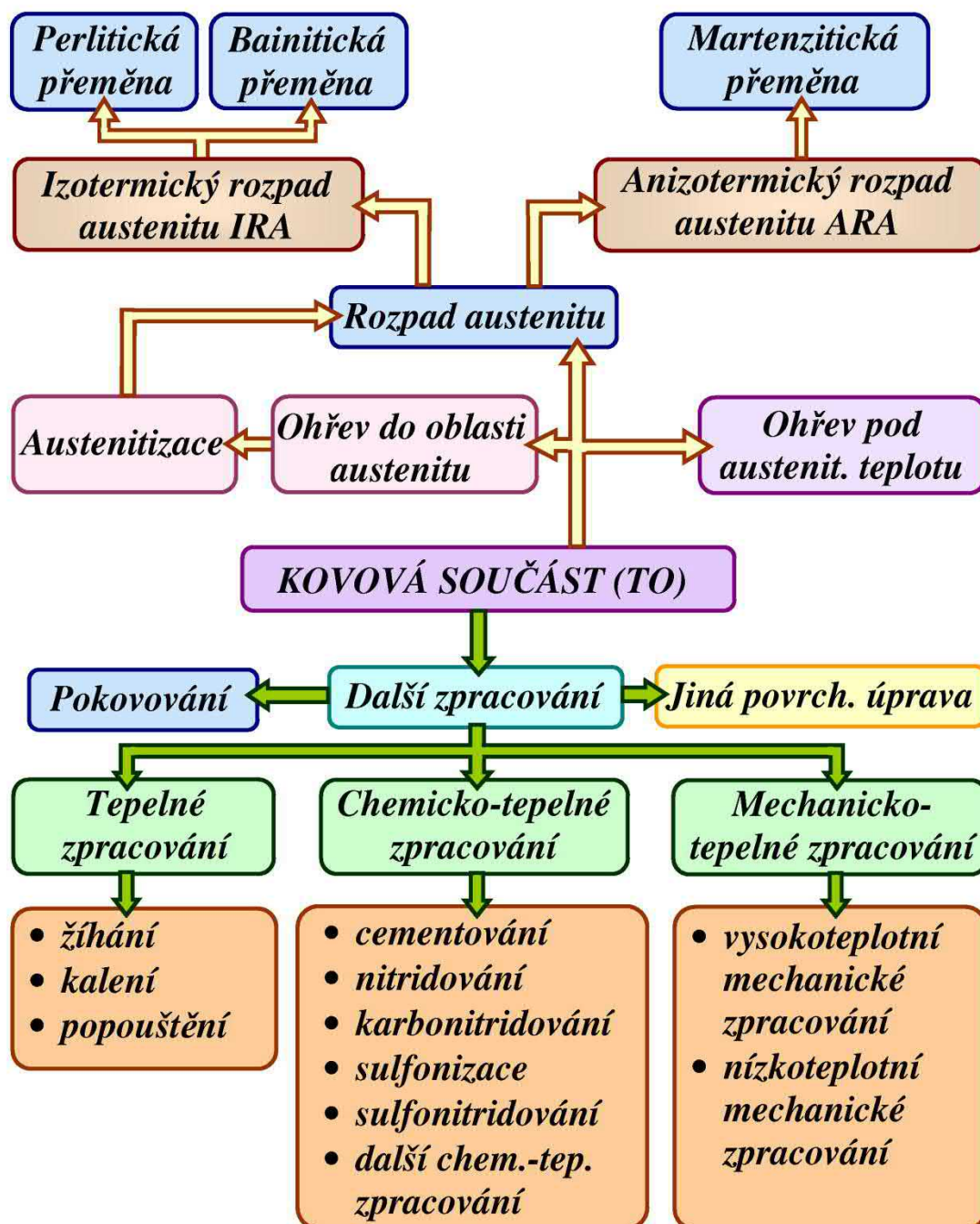
Obr. 7.2 Ochrana povrchů



Obr. 7.3 Chemicko-tepelné zpracování

Chemicko-tepelné zpracování využívá difúzní nasycování povrchových vrstev součásti prvky, které mají schopnost vytvářet intermediální fáze za účelem pozitivní změny mechanických, fyzikálních a chemických vlastností vrstev součástí. Tyto mohou nebo nemusí být ještě dále tepelně zpracované (kalené, zušlechťované aj.).

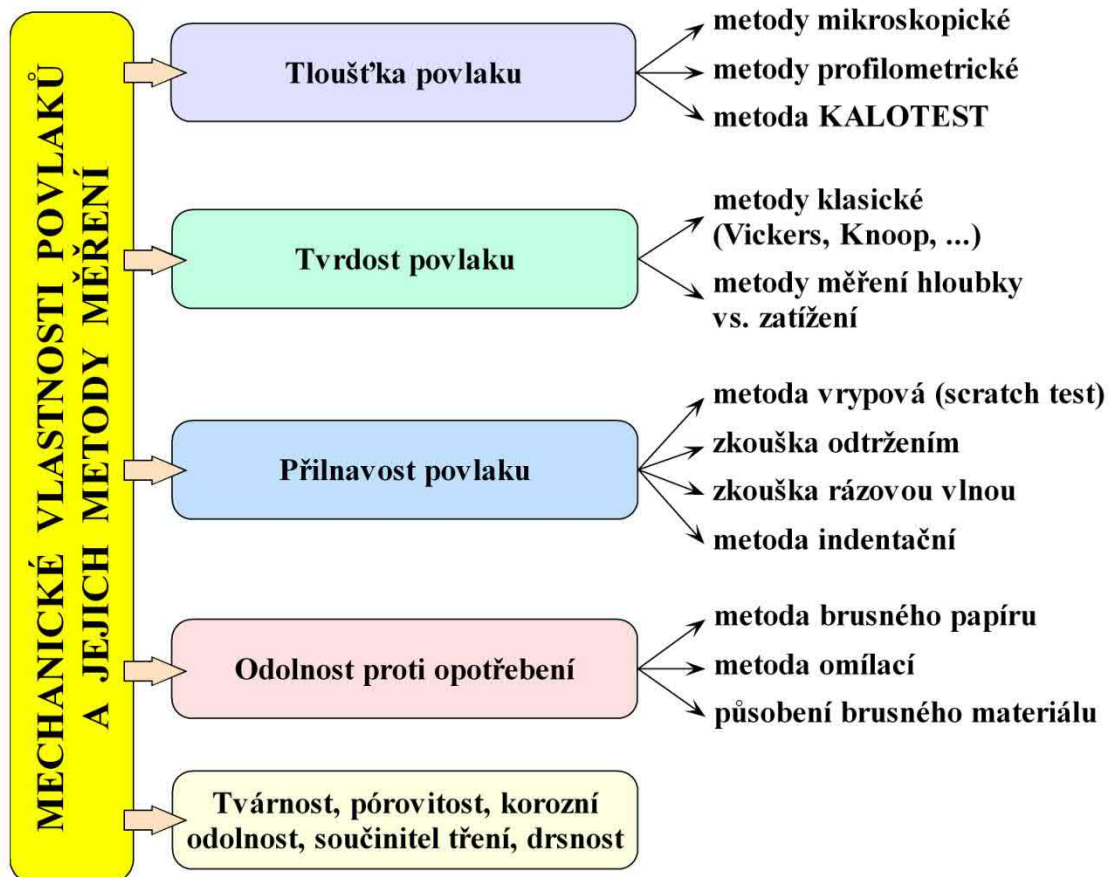
Příkladem je kovová součást, která má danou technologii tepelného zpracování s ohledem na složení materiálu, který podléhá strukturní transformaci, obr. 7.4. V současné technické praxi se nejvíce uplatňují různé metody povlakování.



Obr. 7.4 Struktura dalšího zpracování kovové součásti

7.1. POVLAKOVÁNÍ

Povlakem se nazývá látka, která je určitým způsobem nanesena na povrch základního materiálu – substrátu. Povlak je charakteristický typem, složením a tloušťkou nanesené nebo jinak vytvořené nové vrstvy materiálu. Vlastnosti povlaků (obr. 7.5) jsou dané způsobem jejich přípravy, která ovlivní také jejich soudržnost se základním materiálem.



Obr. 7.5 Mechanické vlastnosti povlaků

❖ Soudržnost (adheze)

Dobré spojení mezi povlakem a základním kovem nebo slitinou je pro kvalitní povlakování rozhodující. Obecně může být mezi kovy a slitinami vazba kovová nebo se mezi atomy obou materiálů uplatňují síly Van Der Waalovy. V případě spojení kovů se sloučeninami přistupují ještě vazby iontové a kovalentní podle charakteru látek.

Odpor proti šíření trhliny mezi povlakem a základním materiálem je měřítkem adheze a lze ho určit parametry lomové mechaniky a pevnosti, přičemž pevnost je ovlivňována poruchami a napětím v povlaku.

Existují tři možnosti lomu. Úplné odstranění povlaku, místní (plošně omezené) oddělení povlaku při menším zatížení. Mezní případ nastává, když se při posuvu na délce 1 cm zjistí jakékoli malé odtržení.

Ke zjištění trhlin se využívá akustická emise, optické pozorování s odraženým světlem a selektivním odleptáním, za použití elektronové mikroskopie nebo měření třecí síly, což je vhodné především pro velmi tenké a tvrdé povlaky.

Odolnost povlaku proti porušení je určována především jeho typem a složením, rozhodující však mohou být i další charakteristiky, zejména tloušťka, struktura, velikost napětí, jakost spojení se základním materiálem a způsob namáhání. Odolnost proti porušování povlaků často rozhoduje o užitných vlastnostech těles a součástí.

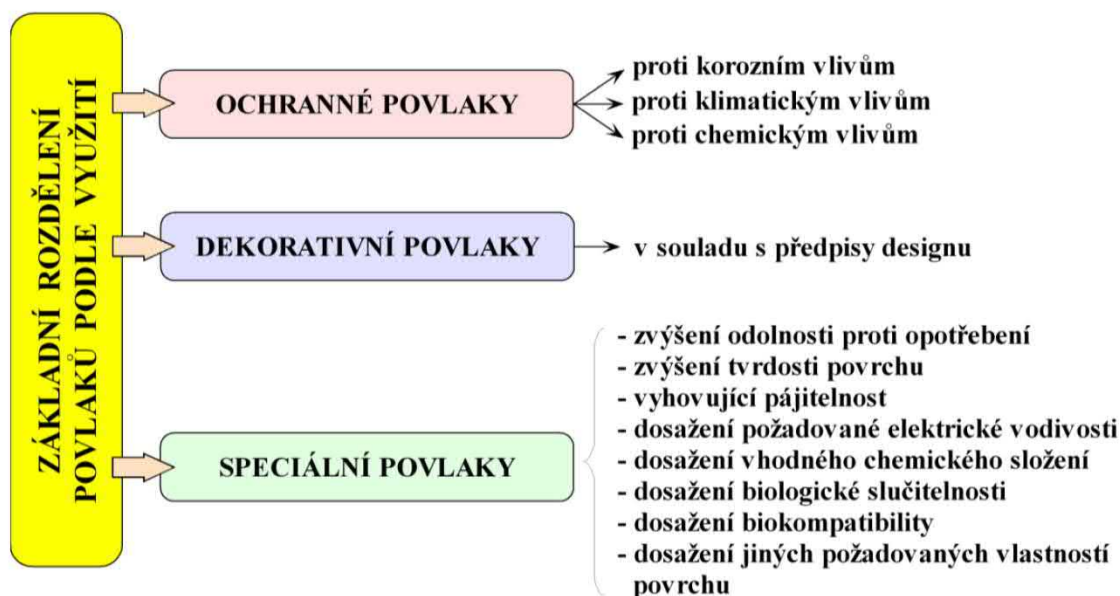
K porušení tělesa nedochází při vnějším namáhání charakterizovaném hodnotou „meze pevnosti“, ale mnohem dříve u předem daných defektů, vad a trhlin, které v materiálech a především v povlacích vznikají během výroby, popř. při mnohem menších napětích. Porušování může probíhat na mnoha místech najednou a může mít diskontinuální, kvantovaný charakter.

Pro experimentální určování adhezní i kohezní pevnosti materiálu s povlakem je známa řada zkoušek. Výsledky však závisí také na metodě a velikosti zkušebních těles. Odlupování povlaků může být vyvoláno existencí a šířením defektů rozhraní, vznikem a šířením trhliny v povlaku při vytvoření „krajového efektu“ a urychlením růstu trhlin v rozhraní. Kritická deformace pro odtržení povlaku je silně závislá na tloušťce povlaku.

Pro studium lomů v povlacích byla vypracována metoda založená na analýze distribučních vzdáleností mezi trhlínami. Rozborem únavových vlastností povlaků se dosud zabývalo poměrně málo prací.

Vzájemný pohyb dvou těles může být posuvný, valivý nebo vratný. Síla, jež je k sobě přitlačuje, vyvolá v místě styku odpor proti pohybu, který označujeme jako tření. Zvýší-li se tlak a zmenší rychlost pohybu, může dojít k meznímu tření (nebo zadření), při nichž součinitele tření jsou velmi vysoké.

Vlastnosti povlaků se určují pomocí speciálních zkoušek, které využívají nové i klasické metody experimentálního modelování.



Obr. 7.6 Základní rozdělení povlaků

❖ **Základní rozdělení povlaků**

Povlaky podle jejich využití lze rozdělit do třech skupin, a to povlaky ochranné, dekorativní a speciální, obr. 7.6.

Principiálně lze metody přípravy povlaků rozdělit do čtyř skupin podle toho, v jaké formě se povlak na povrch nanáší:

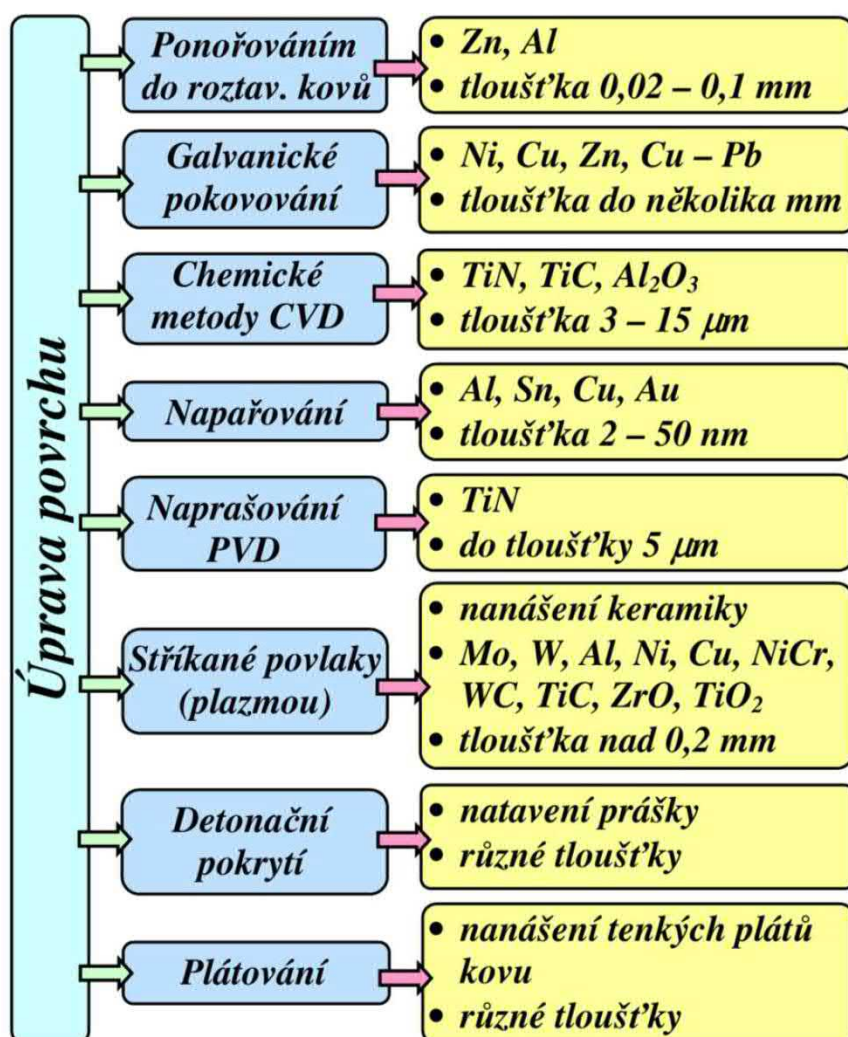
- první skupinu tvoří metody využívající atomů, iontů a molekul ve formě par;
- druhou skupinou jsou povlaky látek, nanesených ve formě tekutých nebo pevných částic;
- třetí skupina využívá kompaktních materiálů v pevném stavu;
- čtvrtá skupina zahrnuje metody využívající disperzní látky převážně k přípravě organických povlaků.

Podle principu technologie nanášení vrstvy se povlakování označuje zkratkami dané metodiky. Stručný přehled metod přípravy povlakování podle typu materiálů uvádí tabulka tab. 7.1.

Tab. 7.1 Přehled hlavních metod pro přípravu povlaků

Metoda	Způsob	Materiály
PVD	napařování	čisté kovy a slitiny
	naprašování	sloučeniny
	iontové plátování	sloučeniny
CVD	různé zdroje	sloučeniny
	přípravy par	
elektrolytické vylučování	katodické	kovy a slitiny
	anodické	
	oxidické	Al, Ta
chemické vylučování	bezproudové	kovy a slitiny
	precipitační	Cu, Ni, Cr
	chrómátování	ocele
	fosfátování	
nastříkávání	plamenem	Zn, Al a slitiny kovů
	obloukem	kovy a slitiny
	plasmou	sloučeniny
	výbuchem	cermety
navařování	plamenem	ocele a slitiny kovů
	obloukem	
	pod struskou	
	plasmou	
	laserem	
plátování	litím	kovy a slitiny
	válcováním	Al, Cu, Ni, a slitiny
	výbuchem	ocele, Mo, Ti, Ta aj.
nanášení z tavenin	ponořením	kovy a slitiny
	nastříkáním	s nižším bodem tání

Všechny technologie vytváření povlaků (obr. 7.7) si vyžadují čištění povrchů, tj. odstranění těch látek, které by bránily dobrému spojení povlaku se základním materiálem.



Obr. 7.7 Metody úpravy povrchu

Klasickou metodou přípravy povlaků je ponoření do roztaveného kovu nebo slitiny. U těchto metod je rozhodující teplota a viskozita lázně, doba ponoření a podmínky krystalizace z taveniny. Dále se používají metody galvanického nebo bezproudového vylučování kovů a slitin z vodných roztoků. U galvanických metod jsou rozhodující napěťové a proudové hodnoty, které spolu se složením, teplotou lázně, uspořádáním elektrod a mícháním lázně rozhodují o vylučování kovů příp. slitin a budoucích vlastnostech povlaků.

Mezi klasické hutní metody patří plátování, tj. vytvoření zpravidla kovových povlaků na hutních výrobcích, nejčastěji pásech plechů např. válcováním. Na povrch očištěného bloku (tlusté desky) se položí plátovací materiál v požadované tloušťce (zpravidla 5–10 % tloušťky výchozího rozměru) a po ohřevu se společně oba materiály zpracovávají na požadovaný rozměr tvářením za tepla, příp. za studena.

Jinou metodou pro vytváření tenkých povlaků je kondenzace z par (napařování). Je vhodná pro takové kovy, u nichž lze ve vysokém vakuu a v ochranné atmosféře při

malém tlaku ohřevem připravit páry kovu, které se pak usazují na tělese. Tato klasická metoda byla v posledních letech zdokonalena využitím ionizace nanášené látky a urychlením ionizovaných částic k povrchu nanášeného předmětu vloženým záporným napětím označeného jako iontové napařování. Tento proces probíhá při tlaku 0,1–1 Pa pro velikost povlaku 10^{-2} – 10^{-3} m.

Základními metodami vytváření tenkých vrstev jsou PVD a CVD.

Metoda PVD

Princip fyzikálních metod PVD (Physical Vapour Deposition = fyzikální napařování) je založený na tom, že se povlakovací materiál v reakční nádobě převádí do plynné fáze pomocí elektronového děla nebo nízkonapěťového oblouku, příp. bombardováním urychlenými ionty interního plynu. Podmínkou je vytvoření vysokého vakua (kolem 10^{-3} Pa) nebo snížení tlaku ochranné atmosféry (zpravidla argonu). Metoda PVD je charakteristická nízkými pracovními teplotami (pod 600 °C). Nízká teplota zaručuje, že nedojde k tepelnému ovlivnění objektu, na který se povlak nanáší.

Povlak je vytvářen:

- napařováním (evaporation),
- naprašováním (sputtering),
- iontovým plátováním (ion-plating).

➤ Napařování

Při napařování je čistý kov odpařován pomocí:

- elektrického oblouku,
- svazkem elektronů,
- klasickým odporovým ohřevem.

Emitované atomární částice reagují s:

- atmosférou komory,
- inertním plynem,
- reaktivními prvky (Ar, N₂).

Atomární částice teplotní energií 0,1–0,5 eV dopadají na povrch substrátu a tvoří povlak o tloušťce 5 μm.

➤ Naprašování

Využívá elektrický výboj v plynné atmosféře, při kterém vznikají kationty, které bombardují katodu z čistého kovu, na níž je připojen záporný pól.

➤ Iontové plátování

Tento proces je kombinací napařování a naprašování. Mezi substrátem (katoda, záporný potenciál 50–1000 V) a odpařovačem je vytvořeno silné elektrické pole. Tím dochází k elektrickému výboji v plynné atmosféře, který ionizuje částice plynu i odpařené částice čistého kovu. Reakcí iontů vzniká povlak, který se usazuje na povrchu předmětů uložených ve vsázce. Pro danou metodu je v důsledku plazmaticky aktivovaného procesu charakteristický zvýšený podíl iontů v toku materiálu a s ním spojená i vyšší energie částic.

Výhody PVD:

- odstraňuje kontaminované vrstvy na povrchu substrátu bombardováním částicemi s vysokou energií,
- získává se přesně definované chemické složení povlaku,
- je zabezpečený rovnoměrný průběh procesu a s ním spojený dokonalý růst vrstvy povlaku,
- garantuje vynikající adheze povlaku v podkladu,
- získává se vysoká hustota vytvořeného povlaku,
- je možnost snížení teploty substrátu pod 160 °C,
- je zabezpečeno povlakování i ostrých hran s poloměrem zaoblení pod 20 μm,
- lze využít široký rozsah podkladových i povlakových materiálů. Nejčastěji se provádí povlaky tvořené vrstvou TiN, TiCN, TiAlN, TiAlVN, CrN, CrAlN, TiNbN, TiZrN,
- vývoj multivrstev a nanokrystalických kompozitů dosáhl takových unikátních struktur a substruktur povlaků, které se tvrdostí blíží diamantu, ale mají vyšší teplotní odolnost.

Nevýhody PVD:

- relativně složitý vakuový systém,
- požadavek pohybovat předměty určené k povlakování, aby bylo zaručeno rovnoměrné ukládání povlaku po celém jejich povrchu,
- vzniká stínový efekt, který u dané metody způsobuje, že na plochách, které neleží ve směru pohybu odpařovaných částic, se vytváří nedokonalá vrstva povlaku, případně se povlak vůbec netvoří.

Metoda CVD

Tyto metody (Chemical Vapour Deposition = chemické napařování z plynné fáze) dávají možnost vytváření povlaků i ze sloučenin. Metoda CVD probíhá za vysokých teplot (700–1500 °C). Metoda může být realizována ve třech variantách:

- tepelně indukovaná,
- plazmaticky aktivovaná,
- fotonově indukovaná (např. laserem).

Chemický proces povlakování je založen na reakci plynných chemických sloučenin v bezprostřední blízkosti povrchu podkladového materiálu a následném uložení produktů z reakce na tomto povrchu. Výchozí plyny obsahují stabilní, ale přitom prchavou sloučeninu, která se v důsledku ohřevu plazmovým obloukem laseru chemicky rozkládá.

Produkty rozkladu sloučenin se pak ukládají na ohřátý povrch povlakovaného předmětu. V plynech musí být obsažen i nekovový reaktivní plyn (např. N₂, NH₄, CH₄).

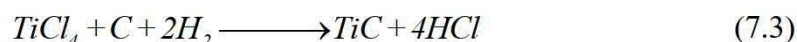
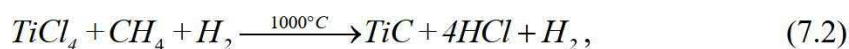
Ve velkém zastoupení je v přidávaných plynech tzv. nosný plyn (např. Ar, H₂), který umožňuje řízení celého procesu a ovlivňuje rychlost růstu vrstvy.

Cíleným řízením obsahu plynné směsi lze dosáhnout plynulé změny ve složení povlakové vrstvy a vytvářet tak multivrstvé povlaky až čtvrté generace.

Typickou reakci lze popsat rovnicí:



nebo rovnicemi



Výhody CVD:

- vysoká hustota povlaku,
- vynikající adheze k povlakovému materiálu,
- dobrá stechiometrie povlaku,
- rovnoměrné povlakování předmětu bez ohledu na geometrický tvar.

Nevýhody CVD:

- vysoké reakční teploty, které omezují výběr materiálů pro povlakování i velikost částí zařízení,
- nepříznivý vliv na vlastnosti a volbu povlakovaného předmětu,
- i když jsou tvrdé vrstvy odolné proti abrazi, adhezi, difúzi, tepelně mechanickému namáhání, vzhledem k termodynamicky nerovnovážným podmínkám při vytváření vrstev je řada finálních vlastností ochranných vrstev doposud obtížně predikovatelná.

V technologii povlakování lze využít i kombinaci jednotlivých metod, a to buď přidáváním prášku do laserového paprsku nebo kombinací CVD a PVD metod s iontovou implantací.

Zcela zvláštním způsobem je nanášení povlaků plasmovým nástřikem. Ve speciálním hořáku se vytvoří plasma vysoké teploty (až 10 000 °C), do které se nosným plynem přivádí práškový materiál pro tvorbu povlaku. Během letu se úplně nebo částečně nataví a velkou rychlostí dopadá na povrch povlakovaného předmětu, kde ztuhne a vytváří jednotlivé vrstvy povlaku libovolné tloušťky. Výhodou je možnost nanášení nejen kovů a slitin, ale i keramických materiálů. Nevýhodou jsou změny struktury i složení prášků a technologická náročnost pro dodržení dobré přilnavosti a homogenity celkově vytvořeného povlaku.

V technologii vytváření tenkých ořezvzdorných vrstev se rozšiřují tzv. plazmaticky aktivované CVD metody:

- PCVD nebo PACVD (Plasma CVD),
- PECVD (Plasma Enhanced CVD),
- MWPCVD (Micro Wave Plasma CVD) – mikrovlnná plazmatická metoda.

Tyto metody se od klasické CVD metody liší nízkými pracovními teplotami (600 °C), podle některých autorů i méně (480–560 °C), přičemž se nemění princip vytváření vrstev z plynné fáze.

Plazmatická CVD metoda (PCVD)

Metoda PCVD je založena na zvýšení energie plynné atmosféry v povlakovací komoře pomocí její ionizace a aktivace v plazmatickém výboji. Proces povlakování je jednodušší, protože probíhá při tlaku 0,1⁻¹ kPa.

Generování plazmy můžeme členit podle použitého napájecího zdroje:

- nízkofrekvenční střídavé napětí,
- vysokofrekvenční střídavé napětí,
- stejnosměrné napětí,
- pulzní stejnosměrné napětí.

Nejvýhodnější se jeví pulzní stejnosměrné napětí, které zajišťuje vysokou hustotu energie bez požadavku na dodatečný ohřev povlakovaných předmětů. Na těchto zařízeních lze vytvářet jednovrstvé i vícevrstvé povlaky.

Výhody PCVD:

- nižší pracovní teploty (400–600 °C),
- čistící účinek iontového bombardování povrchu substrátu před vlastním povlakováním,
- rovnoměrnost povlakové vrstvy,
- vynikající adheze k podkladu,
- v důsledku nízkých pracovních teplot nedochází k reakci mezi povlakem a podkladem,
- nevytvářejí se na povrchu nežádoucí difúzní mezivrstvy,
- následně už neprobíhají dodatečné fázové transformace,
- vytváření multivrstev probíhá v jednom cyklu,
- jednoduché vkládání povlakovaných předmětů,
- ekonomicky výhodná vakuová technika s vysokým ekonomickým efektem,
- ekologická nezávadnost,
- vrstvy jsou připravovány za termodynamicky nerovnovážných podmínek, což umožňuje přípravu nových typů vrstev s unikátními fyzikálními vlastnostmi (např. ZrN, HfN, CrN, TiAlN, TiAlSiN a jejich kombinace v multivrstvách a nanokrystalických kompozitech).

Snížení depozičních teplot umožňuje i MTCVD metoda. Na rozdíl od konvenční CVD technologie s teplotami 1 000–1 040 °C, umožňuje technologie MTCVD nanášet vrstvy z plynné fáze za teplot nižších 700–850 °C.

Zatímco u metody CVD je používán plynný metan CH₄ (zdroj uhlíku) a čistý dusík, MTCVD metoda využívá acetonitril (CH₃CN) nebo vysoce toxický a hořlavý metylkyanid. Rychlost růstu vrstvy TiCN je u metody MTCVD přibližně třikrát vyšší než u klasické vysokoteplotní CVD metody.

❖ Vlastnosti povlaků

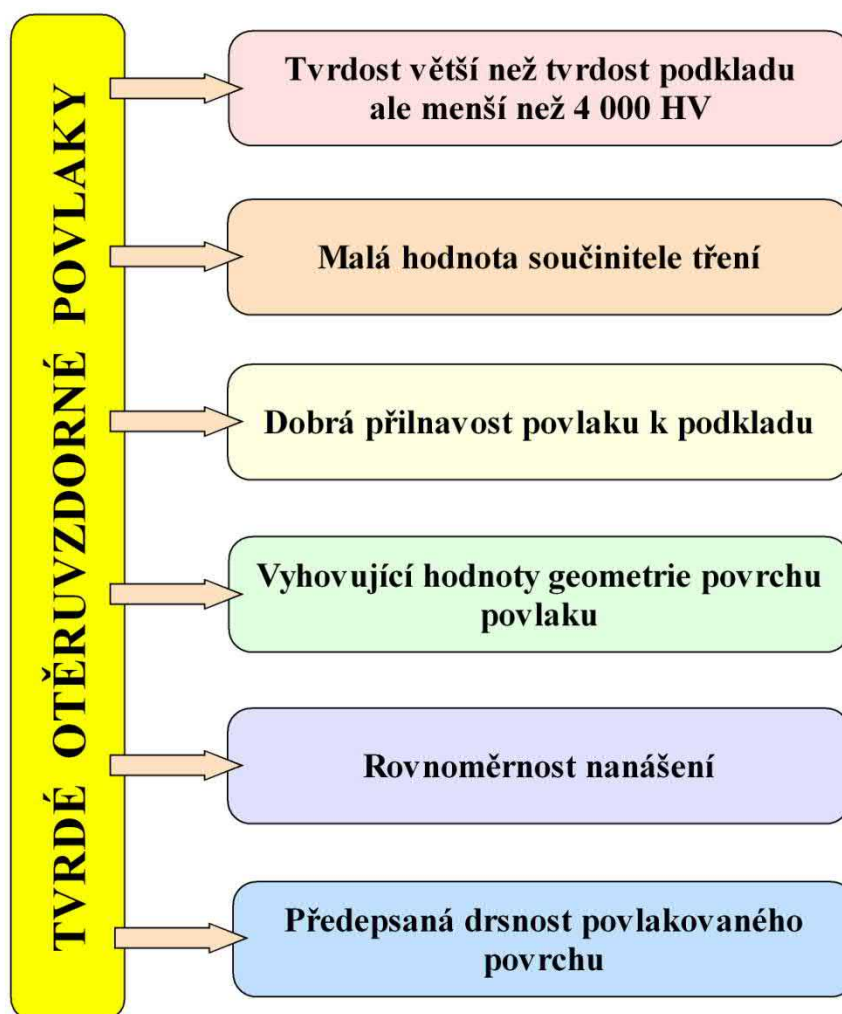
Odolnost povlaku proti opotřebení závisí na typu a tloušťce povlaku, metodě povlakování a charakteru opotřebení. Např. abrazivní opotřebení je ovlivňováno tvrdostí povlaků. Tepelné a difúzní opotřebení (u nástrojů) termochemickou stabilitou apod.

Obecně lze povlaky podle odolnosti proti tepelnému opotřebení seřadit následovně:



pořadí podle odolnosti proti abrazivnímu opotřebení je opačné.

Povlaky používané v praxi s požadavkem otěruvzdornosti (obr. 7.8) musí mít vždy tvrdost větší než je tvrdost podkladu – substrátu, ale tato tvrdost by neměla překročit 4 000 HV.



Využití: Nitridy, karbidy, karbonitridy, oxidy, Ti, Zr, Hf, Cr, Al, W, V, Nb, Ta, aj.

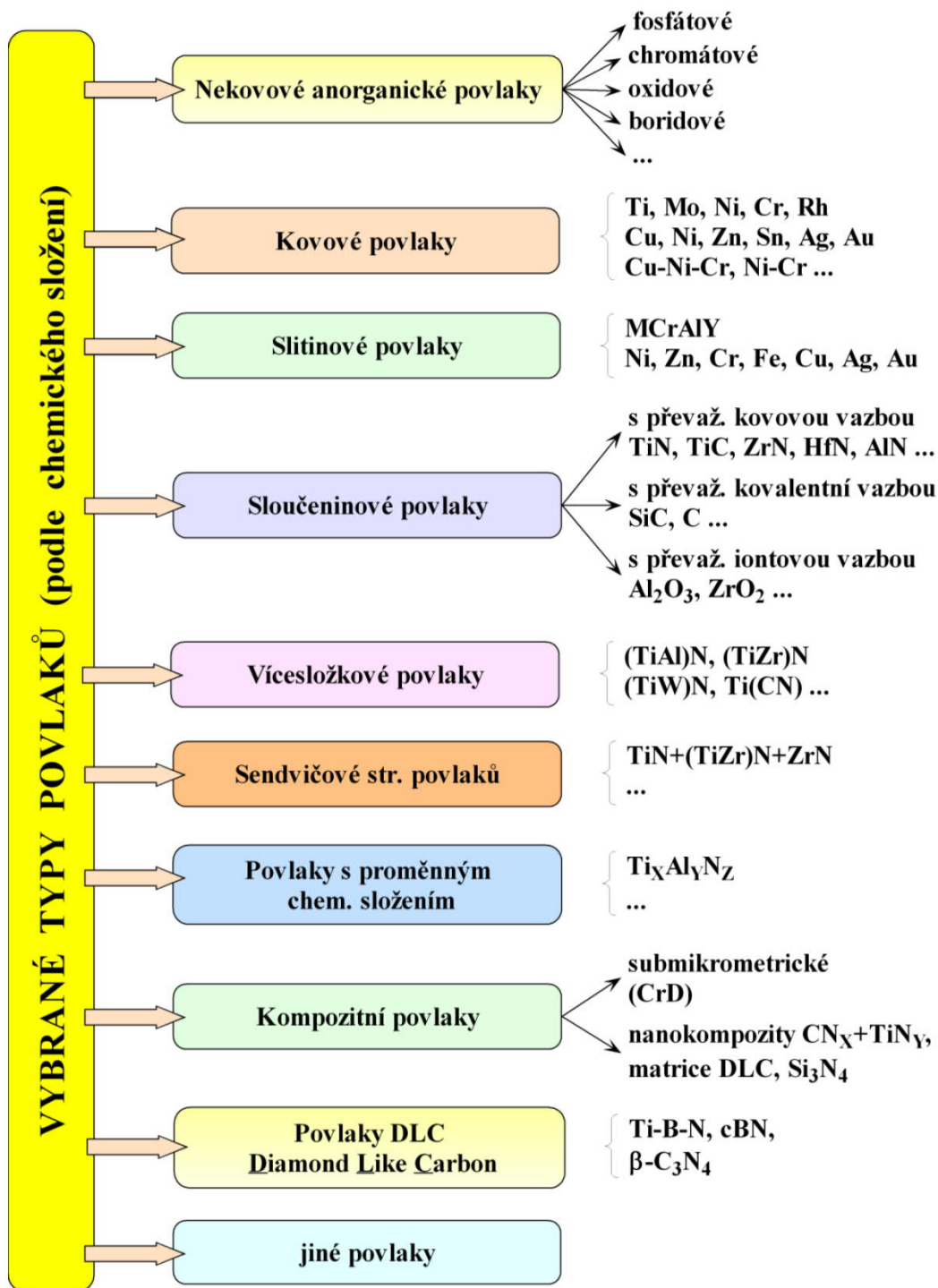
Obr. 7.8 Požadavky na otěruvzdorné povlaky

Charakter povlaků se přizpůsobuje jejich chemickému složení, obr. 7.9.

V případě použití nových typů chemických sloučenin lze získat supertvrdé povlaky, obr. 7.10, využívané pro velmi zatížené povrchy technických objektů, které je předurčuje ke konkrétnímu použití.

Všechny materiály pro řezné nástroje (slnuté karbidy, cermety, řezná keramika) jsou opatřovány tvrdými a otěruvzdornými povlaky.

Nové technologie nanášení povlaků dovolují jejich využití i v biomateriálech pro biokompatibilní povlakování materiálových náhrad v živém organismu, viz. obr. 7.11.

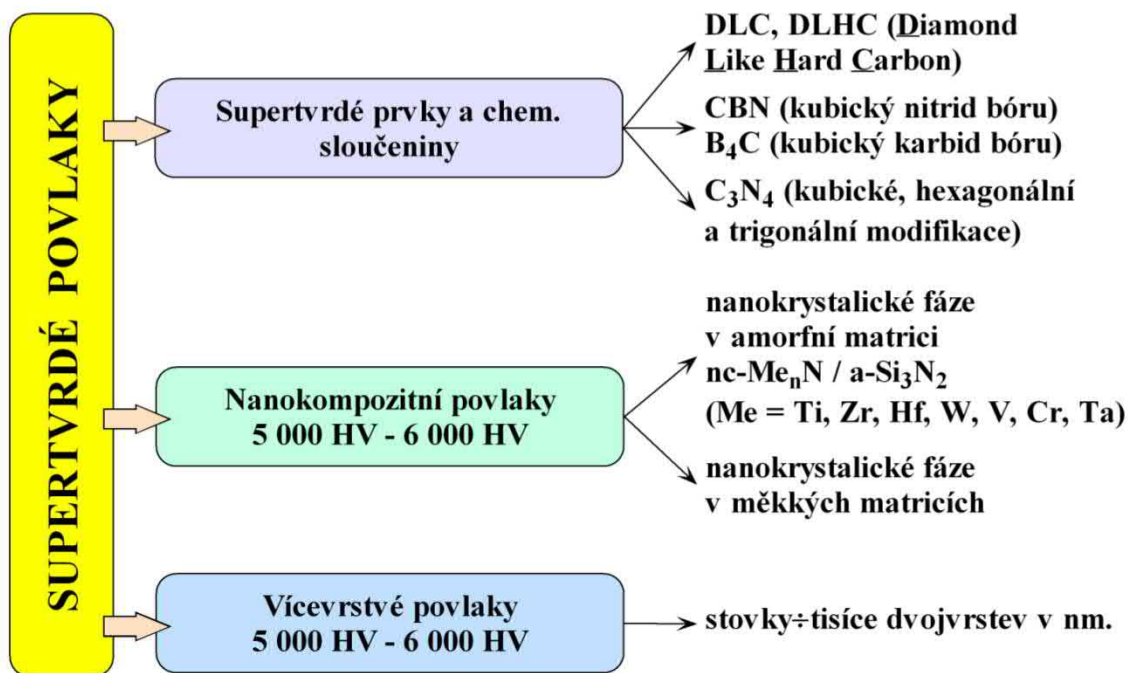


Obr. 7.9 Rozdělení povlaků podle chemického složení

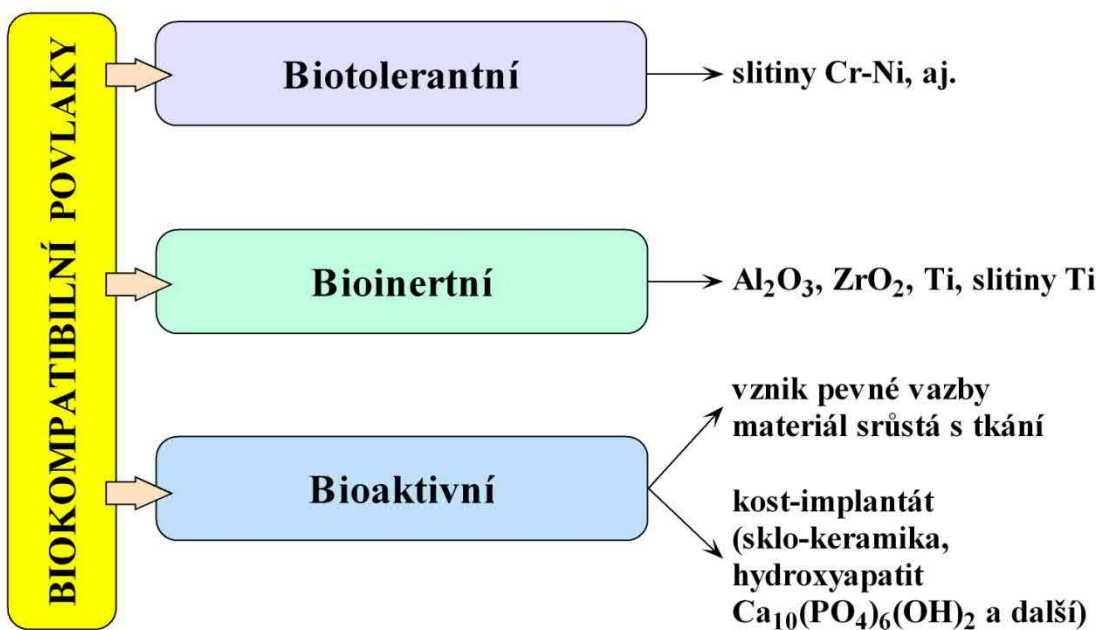
❖ Vývoj tenkých vrstev

1. Vrstvy první generace

Jsou to monovrstvy z jednoho typu materiálu. Nejpoužívanější vrstvou s dobrou adhezí a elasticitou je vrstva na bázi TiN, použitelná téměř pro všechny aplikace. ZrN má podobné mechanické vlastnosti a k tomu má lepší kompatibilitu a barvu téměř nerozeznatelnou od zlata, ale je dražší. Další typy vrstev mohou být na bázi TiC, TiCN, CrN, Al₂O₃ aj.



Obr. 7.10 Supertvrde povlaky



Obr. 7.11 Biokompatibilní povlaky

2. Vrstvy druhé generace

Jsou to vrstvy ze složitějších sloučenin např. AlTiN, TiAlN, TiAlSiN, TiCrCN, TiZrN. Nejpoužívanější jsou monovrstvy, popř. strukturované vrstvy TiAlN s vysokou tvrdostí a tepelnou odolností, které s přísadami Hf, Cr, Nb, Si apod. dosahují velmi jemné a stabilní struktury. Diamantu podobné vrstvy DLC (Diamond Like Coatings) lze připravit CVD technologiemi nebo při nižších teplotách pomocí

PVD (ale s nižší tvrdostí a tepelnou odolností). V technické praxi se DLC vrstvy používají pro jejich:

- vysokou tvrdost,
- dobrou adhezi,
- nízký koeficient tření,
- dobrou korozní odolnost,
- odolnost proti opotřebení,
- patří mezi povrchy vysoké jakosti.

Do této skupiny patří a stále se zdokonalují kombinované vrstvy Me-BN (Me–kov) s podílem BN (CBN - Cubic Boron Nitride).

3. Vrstvy třetí generace

Jsou to vícevrstvé povlaky (obvykle dvě až tři, případně i více vrstev) s ostře ohraničenými přechody mezi jednotlivými vrstvami. Za typického představitele vrstev třetí generace lze považovat např. materiály UE6020 a UE6035 pro řezné destičky: na speciální podkladový slinutý karbid je jako první nanесena vrstva TiCN s výrazně vláknitou (sloupcovitou) strukturou, která zvyšuje odolnost břitové destičky proti mechanickému opotřebení jako je vydrolování a vylamování. Následuje vrstva Al_2O_3 pro zvýšení odolnosti proti difúznímu a adhezivnímu opotřebení (tvorba nárůstků), která současně zajišťuje nízkou drsnost povrchu břitové destičky, snižuje její tepelné zatížení a umožňuje nasazení při vysokých řezných rychlostech. Poslední vrstva TiN snižuje koeficient tření a zvyšuje odolnost proti oxidaci. Tyto vrstvy mohou mít navíc mezi substrátem a první vrstvou TiC ještě další tenkou mezivrstvu s vysokou houževnatostí.

Vrstvy třetí generace využívané pro slinuté karbidy mohou mít poslední vrstvu vytvořenou i z dalších nově použitých materiálů, jako jsou např. ZrCN, ZrTiCN, TiHfCN, ZrCN/ZrO₂ nebo Al_2O_3/ZrO_2 . Příkladem může být povrchová vrstva ZrCN, která vykazuje:

- velmi dobré třecí vlastnosti,
- má vysokou ohybovou pevnost, tvrdost,
- má velmi kompaktní jemnozrnnou strukturu.

Vícefázová vrstva ZrCN/ZrO₂ synergicky využívá výhody materiálů, kterými je tvořena. Oxid zirkoničitý je vysoce inertní vůči působení kapalin a horkých kovů, má velmi nízkou tepelnou vodivost a nízký koeficient tření vůči kovům. Povrchovou vrstvu může tvořit i tato fáze rovnoměrně rozptýlená v základní matici Al_2O_3 s převažujícím podílem B₅₀C₂.

S použitím technologie MWPCVD (mikrovlnná plazmatická CVD metoda) může být vytvořena speciální vrstva na lapovaném podkladu ze slinutého karbidu WC-Co (94 % - 6 %) s tloušťkou 15 μm při použití mezivrstvy z karbidu titanu a jiné kombinace.

4. Vrstvy čtvrté generace

Jsou to speciální mnohovrstvé povlaky s přechody mezi jednotlivými vrstvami. K původním materiálům pro jednotlivé vrstvy přibývají postupně další nové materiály jako např.: $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2$, B_4C , CrC , Cr_3C_2 , HfN , MgO , SiO_2 , TaC , TaCN , TaN , TiN/NbN , TiN/TaN , Ti_2N , Ti_2O , $\text{TiC}+\text{TiB}_2$, Y_2O_3 , ZrC . Některé z nich se prozatím nedostaly do stadia sériové výroby a stále čekají na další praktické využití.

Břítové destičky ze slinutých karbidů s tzv. multivrstvými povlaky, které jsou založeny na principu pravidelného střídání dvou typů vrstev s rozdílnými fyzikálními vlastnostmi, dosahují vysokou trvanlivost a s ní spojené vysoké úběry obráběného materiálu.

Fyzikální vlastnosti výsledné multivrstvy jsou výrazně odlišné od vlastností homogenních monovrstev stejného složení. Tvrdost a houževnatost multivrstvých povlaků závisí na tloušťce jednotlivých vrstev, poměru složek, ale i na druhu kombinovaných materiálů.

Používají se např. multivrstvy TiN/TiCN , TiN/TaN s tloušťkou jednotlivých „nanovrstev“ kolem 10 nm nebo multivrstvé povlaky TiAlN/TiN , TiN/TiC , s tloušťkou obou střídajících se vrstev 140 nm, které obsahují 62 alternujících vrstev a jsou zvláště odolné proti šíření trhlin. U multivrstvého povlaku je každé rozhraní vrstev bariérou, která šíření trhliny zpomalí, případně zcela zastaví. Tyto vrstvy mají velmi malou drsnost, a proto výrazně snižují tření mezi třískou a čelem nástroje, což vede k podstatnému snížení množství vzniklého tepla.

Významnou roli při zvyšování výkonů řezných nástrojů hrají i tzv. lubrikační (samomazné) povlakové vrstvy, jejichž nejdůležitější funkcí je výrazně snížit tření mezi čelem nástroje a odcházející třískou. Strukturné vrstvy mají svá specifika, která je předurčují ke konkrétnímu použití podle složení nebo jejich vlastností, obr. 7.11.

❖ Příklady praktického využití plasmaticky stříkaných povlaků

1. Letecký průmysl využívá:

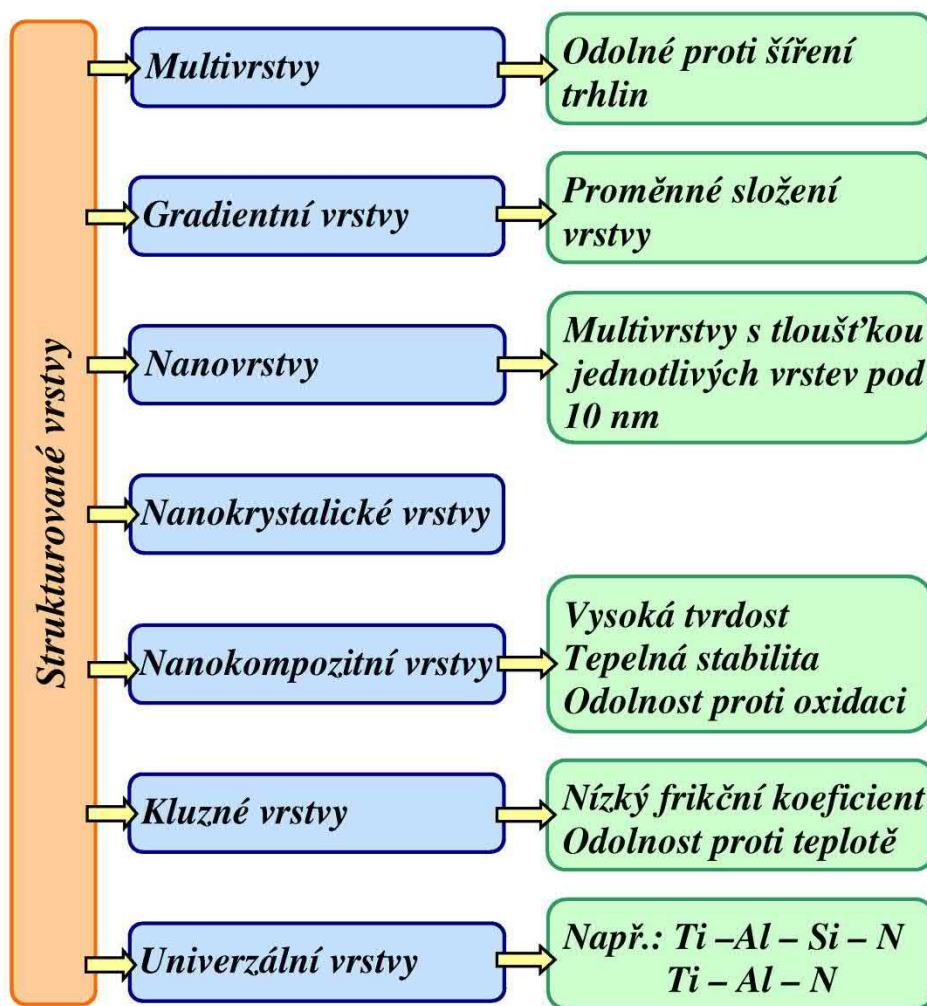
- povlaky tepelných bariér (gradované povlaky) $\text{ZrO}_2\text{-CeO}_2$, $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$, $\text{ZrO}_2\text{-Sc}_2\text{O}_3$,
- povlaky odolné proti opotřebení za vysokých teplot $\text{Cr}_2\text{C}_3\text{-NiCr}$,
- povlaky těsnění a ucpávek Ni-grafit , BN-Al .

2. Lékařství, podle míst kde jsou povlaky aplikovány jsou:

- dentální chirurgie a ortopedie,
- biokompatibilní povlaky na bázi apatitu $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{X}$ ($\text{X}=\text{F}, \text{Cl}, \text{OH}$) s řízenou porózitou, které umožňují biologické spojení kostní tkáně s povlakovaným implantátem bez použití umělého cementu s vyloučením toxicity.

3. Automobilový průmysl pro povlakování součástí kde mohou být:

- povlaky tepelných bariér $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$, $\text{ZrO}_2\text{-CeO}_2$,
- povlaky odolné proti opotřebení Mo , WC-CO , WC-CO-Cr , Si_3N_4 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$, TiC , Cr_2O_3 ,
- kluzné povlaky Mo , MoS_2 , Si_3N_4 .



Obr. 7.12 Rozdělení strukturovaných vrstev

4. Všeobecné strojírenství

- čerpací a hydraulická zařízení – povlaky odolné proti opotřebení, korozi a působení agresivních médií Cr_2O_3 , $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, WC-CO , WC-Co-Cr , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, Ta, Si, ZrB_2 ,
- textilní průmysl – povlaky odolné proti opotřebení $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, Cr_2O_3 ,
- chemický průmysl – agresivní prostředí Ni-Al, Al_2O_3 , ZrB_2 , Ti a Zr,
- spalovací pece a kotle – gradované kovokeramické povlaky se zvýšenou odolností proti vysokým teplotám v korozním a oxidačním prostředí a mechanickému namáhání W-ZrO_2 ,
- elektrotechnický průmysl – elektroizolační povlaky Al_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, povlaky odolné proti erozi způsobené silnoproudými jiskrovými výboji W-ThO_2 ,
- speciální aplikace – supravodivé povlaky $\text{Yb}_2\text{Cu}_3\text{O}_2\text{-X}$,
- tepelné izolace termických konvertorů na bázi Nb.

5. Kosmický průmysl aj.

8. PŘÍKLADY OPOTŘEBENÍ TECHNICKÝCH OBJEKTŮ

❖ DEGRADAČNÍ MECHANIZMY V KONTAKTU KOLO-KOLEJNICE Z POHLEDU KOMBINOVANÉHO OPOTŘEBENÍ KOLEJNICOVÝCH MATERIÁLŮ

Záměrem realizovaných analýz je podat ucelený obraz vnitřní reakce materiálu na konkrétní provozní zatížení v jeho typických povrchových projevech poškození. Poznání reálných degradačních mechanismů v souvislosti s makroskopicky rozlišitelnými parametry opotřebení kontaktních ploch může umožnit predikci životnosti kolejnicového materiálu v provozních podmínkách.

Rozvoj kolejové dopravy je spojen vedle zvyšování přepravních rychlostí, zejména nárůstem průměrného zatížení. V podmínkách ČR běžná zátěž dosahuje hodnot cca 25 t/nápravu. To přináší relevantní zvýšení požadavků na kolejnicové oceli – zejména komponentů tratí, které jsou spojeny ještě s vysokým rázovým zatížením. Zvyšování odolnosti součástí kolejového svršku proti opotřebení je z daného pohledu perspektivní cesta.

Použití ocelí o vyšší pevnosti v rámci „standardního“ rozsahu perlitických kolejnicových materiálů vedlo k značné redukci povrchového opotřebení kolejnic. Jako jeden z následků potlačení abrazivní složky opotřebení lze označit skutečnost, že povrchově iniciovaná kontaktní únava (RCF) se stala významnější.

Vysoce perspektivní pro řešení problému se ukázala aplikace nově vyvinuté bainitické oceli (dále označené LO), která představuje velmi výhodnou kombinaci materiálových a technologických parametrů právě k použití pro srdcovky tramvajových i železničních výhybek. Litá nízkouhlíková legovaná ocel LO patří s ohledem na stanovené chemické složení (viz tab. 8.1) a úroveň mechanických vlastností do skupiny vysocepevných ocelí. Jedná se o materiál, jehož bainitická struktura zaručuje vysokou úroveň odolnosti proti opotřebení, se zvýšenou tvrdostí, mezi skluzu a mezi pevnosti.

Tab. 8.1 Chemické složení a mechanické vlastnosti vývojové oceli LO

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0,11-0,15	< 5,0	0,5-0,80	< 510,0	< 210,0	2,6-3,0	1,6-2,0
Mo	B	Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]	A5 [%]	Z [%]	HV 10
0,4-0,5	< 300,0	1185	1050	12	48	380-400

Ocel je vysoce houževnatá a ve srovnání s manganovou ocelí je přímo předurčena jako atraktivní náhrada oceli Hadfieldského typu. Nevyhnutelnou podmínkou pro vývoj a úspěšné přijetí nového materiálu je identifikace dominantního mechanismu opotřebení v praxi a jeho simulace v laboratorních testech.

V praxi je nutno rozlišovat mezi opotřebením na vrcholu pojezdové plochy kolejnice a pojezdové hrany. Mechanismus porušení je značně rozdílný, protože míra skluzu je typicky mnohem vyšší v interakci kolo-vnitřní pojezdová hrana v oblouku. Opotřebení pojezdové hrany představuje v provozu extrémní podíl abrazivního zatížení. Proto značná část výzkumu byla v minulosti věnována právě tomuto

fenoménu, prezentovanému experimentálně zkouškami kontaktní únavy za zvýšeného podílu skluzu (cca 35 % skluz v poměru k vyvozenému kontaktnímu tlaku), dále pak jako časté kritérium v testování kolejnicových ocelí slouží laboratorní studie výlučně kluzného opotřebení.

Kritérium mezního stavu používané pro stanovení kontaktně únavové životnosti představují povrchové ztráty materiálu, popř. limitní únavové poškození povrchu. Z hlediska podrobného studia působících mechanismů je problematická skutečnost, že mezní počty cyklů do limitu prezentované životnosti oceli zahrnují jak stadium iniciace povrchových defektů, tak i růst trhlin.

Pro studovaný materiál je, vzhledem k jeho aplikaci – především pro odlitky srdcovek výhybek, vymezení jednotlivých složek konkrétního provozního zatížení velice obtížné. Změny pojezdových charakteristik, profilu v místě kontaktu kolo-kolejnice (a tím i kontaktní plochy), spolu s vlivy rozdílných geometrických parametrů kol (vlivem rozdílné míry jejich provozního opotřebení) prakticky znemožňují přesné stanovení typických poměrů kontaktního tlaku vs. skluzu. Rovněž korelace mezi výsledky experimentálních studií při uváděných parametrech je velice omezená.

Experimentální materiál, metodika hodnocení

Korektní studium mechanismu opotřebení a jeho závislosti na materiálových parametrech je proto nutné opřít zejména o přímé pozorování procesu opotřebení v provozu. Jednotlivá pozorování a dále deklarované vyvozené závěry vycházejí zejména z analýz provozně exponovaných povrchových vrstev bainitické oceli. Vzhledem ke stěžejní aplikaci dané oceli byly jednotlivé vzorky odebrány z odlitků srdcovek výhybek, konkrétně z oblastí, kde dochází k maximálnímu provoznímu zatížení.

V rámci celého komplexu jednotlivých složek vnějších činitelů – hladina kontaktního tlaku, dynamické rázy vlivem opotřebení profilu kol, podíl tangenciální složky zatížení od podélných a příčných prokluzů kol, abrazivní působení částic z prostředí atd., je diskretizace jednotlivých mechanismů velice obtížná. Kvantitativní stanovení základních složek složitého spektra zatížení jednotlivých profilů není reálné. Pro studium chování vyvinuté lité oceli na odlišné strukturní bázi byla zvolena metoda řešení inverzního problému z porušení povrchových vrstev.

Mikroskopická hodnocení

Pozorování je v souladu s cíly identifikace opotřebení zaměřeno na charakteristiku jednotlivých mechanismů, limitujících životnost studovaného kolejnicového materiálu.

Současný výzkum odolnosti kolejnicových materiálů proti opotřebení prezentuje jako dominantní mechanismus opotřebení u vysokouhlíkových ocelí tvorbu mikrotrhlin vlivem kontaktně únavového procesu a produktů povrchové abraze materiálu („spalingu“).

Pro poznání mechanismu degradace povrchových vrstev studované bainitické oceli je rozhodující odlišení vlivu:

- míry plastického přetvoření (rozsah a výška povrchového zpevnění);
- tendence tvorby kontaktně únavových pittingů;
- podílu abrazivního opotřebení na povrchových „ztrátách“ oceli.

Základní odhad řídicí tendence porušení pojezdové plochy kolejnice lze založit na makroskopickém pozorování morfologie provozně exponovaných částí. Charakteristická je vazba převažujícího módu degradace na konkrétní oblast kontaktní plochy. Je zřejmé, že nejvyšší plastické přetvoření vzniká v místech, kde je maximální smyková složka zatížení, tj. v oblasti pojezdové hrany kolejnicového profilu.

Výrazné rozdíly mezi morfologií povrchových defektů mají na základě pozorování rovněž spojitost s odpovídající výškou kontaktního tlaku. V místech povrchu, kde z hlediska provozního zatížení lze předpokládat vysoké kontaktní zatížení, jsou linie trhlin spojeny s viditelnou plastickou deformací ve směru pojezdu, zatímco trhliny v místech s aktuálním nižším kontaktním tlakem tvoří jasně rozlišitelné jemné linie. Tento efekt byl evidován a v případě standardních kolejnicových ocelí i popsán. V případě studovaného nově vyvinutého typu bainitického materiálu je pozornost zaměřena na charakter trhlin a rozsahu, spojené s plastickou deformací.

Metalograficky byly hodnoceny povrchové vrstvy pojezdových ploch v místech s extrémními projevy povrchové degradace a to jak v příčných, tak podélných řezech vzhledem k ose kolejového profilu. Z hlediska limitujících faktorů provozní odolnosti je podstatný charakter povrchových mikrotrhlin – místa iniciace, orientace rozvoje, vazba na vnitřní stavbu (homogenitu, mikrostrukturní parametry, mikročistotu, apod.), dále pak rozsah vzhledem k šířce plasticky zdeformované oblasti.

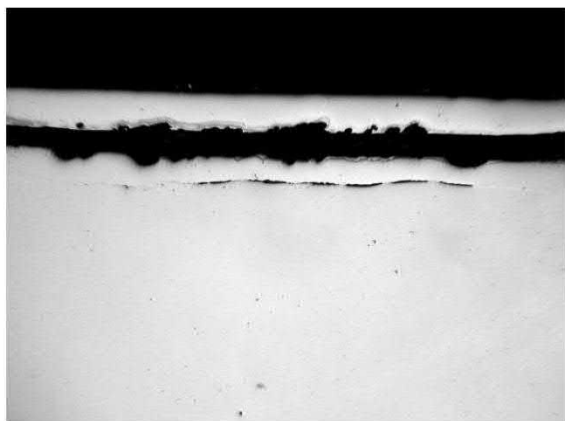
Bylo zjištěno, že zplastizovaná zóna pojezdové hrany dosahuje hloubku do cca 1 mm, zřejmá je značná nerovnoměrnost v rozsahu plasticky zdeformované struktury, což svědčí o typicky proměnlivém zatížení v oblasti kontaktu vlivem aktuálních provozních podmínek. Podrobněji byl studován i charakter trhlin v návaznosti na typické povrchové projevy degradace kontaktních ploch.

Pro kompletnost byla rovněž studována otázka rozvoje defektů v podélném směru, tj. v řezech ve směru podélné osy vybrané části srdcovky. Výsledky podepřely uvedené závislosti na rozsahu plastického toku, rovněž tak teorie ohledně rozložení kontaktního napětí po zatěžovaném průřezu. Na obr. 8.1 je zachyceno stadium postupného oddělování vrstev v silně zplastované oblasti. V souladu s teorií kontaktně-únavového porušování jsou porušení iniciovaná pod povrchem materiálu a dále rozvíjena cyklickým zatěžováním za intenzivní podpory koroze a abrazivního působení korozních zplodin. V pokročilém stadiu dochází k odlupování velice tenkých vrstev materiálu – obr. 8.2 dokumentuje tvorbu stříhových můstků a dokladuje tak charakteristický mód porušování.

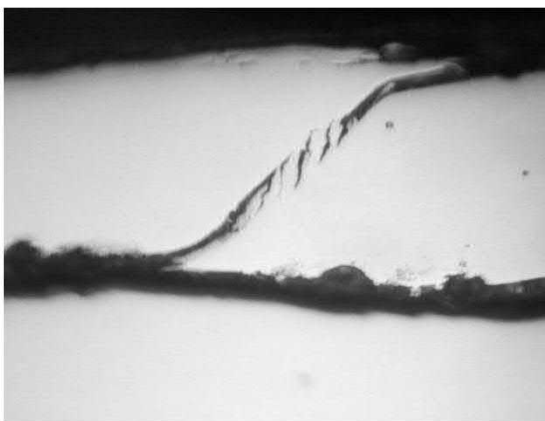
Pro provozní odolnost může být limitní především tendence k odkloňování kontaktně-únavových trhlin od převažující orientace cca 40° a k výraznějšímu větvení. Ve shodě s působícími mechanismy to znamená překročení plastické zóny do vnitřního průřezu profilu a tedy zřejmá provozní rizika. Ve všech sledovaných případech jsou změny původního směru rozvoje defektu v souladu se zviditelněným plastickým tokem oceli, obr. 8.3.

Z hlediska životnosti je podstatné vedle změny orientace defektů jednoznačně definovat okolnosti větvení trhlin. Bylo prokázáno, že větvení trhlin je reakce na rozdílné stupně plastické deformace po stranách magistralní trhliny. V stadiu, kdy primární kontaktně-únavové porušení dosáhne určitého rozměru, se začíná pod dalším

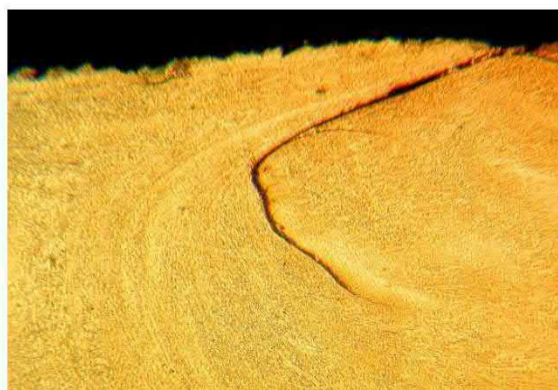
cyklickým zatěžováním přenášet působící napětí izolovaně v trhlinou oddělených mikroobjemech oceli. Původní trhlina zamezí přenosu napětí do hlubších vrstev oceli, plastická deformace se lokalizuje a nárůst stupně protváření vede ke kritické ztrátě tažnosti v izolovaných mikroobjemech materiálu. Důsledkem je zrod nových větví trhliny, které jsou opět řízeny plastickým tokem. Detail na obr. 8.4 dokumentuje popsany mechanismus za podmínek vysoké smykové složky provozního zatížení – tj. v oblasti pojezdové hrany kolejnicového profilu.



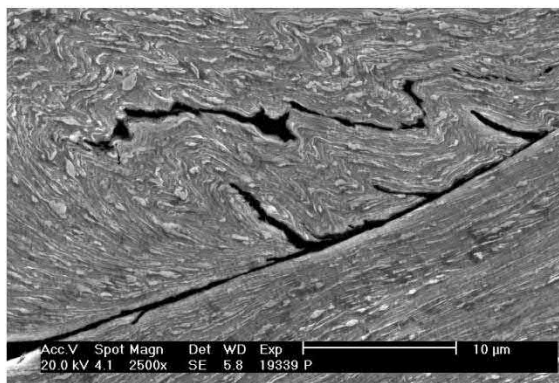
Obr. 8.1 Podpovrchová iniciace kontaktně-únavového porušení (zv. 50x)



Obr. 8.2 Stříhový mechanismus oddělování silně zplastizovaných vrstev (zv. 250x)



Obr. 8.3 Rozvoj porušení, řízený plastickým tokem materiálu (zv. 100x)



Obr. 8.4 Detail plastického toku v okolí porušení, kolize s vyloučenými karbidy v bainitické oceli (zv. 2 500x)

Provedené analýzy prokazují, že orientace trhlin na povrchu je určována modelem stříhového toku. Trhliny jsou všechny uvnitř výrazně deformované oblasti.

Rovněž při nižším kontaktním tlaku (posuzováno v závislosti od konkrétních podmínek přenosu zatížení) je trhlina uvnitř plytké, zdrsňené deformované vrstvy, a další rozvoj porušení sleduje formu toku. Nebyly pozorovány tendence k větvení – typické u perlitických kolejničových ocelí při přerůstání kontaktně-únavových trhlin pod deformační zónou.

Hodnocení změn povrchových vlastností

Vyhodnocení změn povrchové tvrdosti na analyzované sadě vzorků umožnilo kvantitativní popis deformačního zpevnění a jeho přiřazení odpovídajícím mikrostrukturním změnám. Charakteristický nárůst mikrotvrdosti, naměřený v podpovrchové vrstvě představuje jeho reakci na konkrétní provozní zatížení. S ohledem na prezentované výsledky o závislosti zpevnění na podmínkách kontaktního zatížení lze vyvodit závěry ohledně aktuálního vlivu zatížení. V souladu s pozorováním mikrostrukturních změn je materiál zpevněn v povrchové vrstvě cca 0,8 až 1 mm, tedy vrstvě, kde byl metalograficky dokumentován plastický tok materiálu. Této hloubce odpovídá naměřené zpevnění nad hodnotu 400 HVm.

Analýza degradačních mechanismů, postavena na experimentálním zatěžování, je vzhledem k vysoké citlivosti bainitických ocelí na hladinu kontaktního tlaku velice problematická – na rozdíl od perlitických ocelí byla zjištěna nelineární závislost únavové životnosti na kontaktním tlaku. Měření míry zpevnění provozně zatěžovaných konkrétních profilů na pozadí odpovídajících strukturních změn tak představuje reálnou možnost studia mezního stavu kontaktní únavy v konkrétních zátěžových podmínkách.

Vliv mikrostrukturní charakteristiky

Bainit jako typ mikrostruktury je formován dekompozicí austenitu v rozsahu transformačních teplot 250–650 °C. Homogenní bainitická transformace je obtížně dosažitelná u většiny nízkolegovaných ocelí, protože bainitická reakce je stíněná perlitickou, proto mnoho výchozích prací na bainitických ocelích bylo zaměřeno na izotermálně zpracované oceli. To vede ke dvěma formám bainitické mikrostruktury, označované jako horní a dolní bainit, se vztahem k teplotě transformace – tyto se staly známé jako klasické bainitické mikrostruktury.

Jedna z možností zpomalení austenitické reakce na ferit a perlit je legování 0,5 % Mo a 0,003 % B. To otevírá možnost produkce bainitu kontinuálním ochlazením v širokém rozsahu ochlazovacích rychlostí. Za podmínek takového kontinuálního ochlazení mohou být formovány další specifické substruktury bainitu. Zde jsou definovány další dvě formy bainitické struktury bez presence typických karbidů:

1. horní bainit tvořený svazky relativně hrubých desek feritu a hrubších karbidických útvarů po hranicích feritu;
2. dolní bainit obsahující pakety silně dislokovaných feritických látek a cementit přítomný uvnitř látek pod úhlem 55–60° vzhledem k podélným osám látek;
3. bainit bez přítomných karbidů, sestávající z paketů značně dislokovaných feritických látek, obvykle z interlaťkového uspořádání fází zbytkového austenitu;

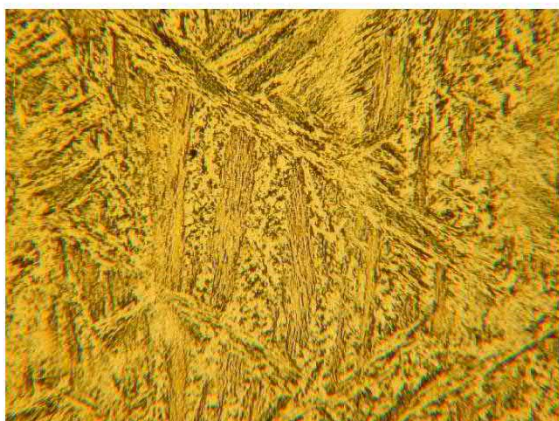
4. granulární bainit se silně dislokovanými masívy (ne ve tvaru latěk) bainitického feritu obvykle s ostrůvky martenzit/zbytkový austenit (M/A fáze).

Řada publikovaných prací prokázala zvýšenou odolnost proti opotřebení u ocelí s bainitickou strukturou bez vyloučených karbidů. Nevýhodná je rovněž morfologie hrubého acikulárního bainitu, která u prvních provozně testovaných bainitických kolejnic vedla k rychlejšímu opotřebení (o 50 %) vzhledem ke konvenční perlitické kolejnicové oceli. Vystává zřejmá otázka, jak vysoký obsah uhlíku může materiál tohoto typu obsahovat bez toho, aby rezultoval do tvorby karbidů. Jejich potlačení je spojováno s obsahem Si, vyhnutím se precipitaci karbidů je stabilizován zbytkový austenit.

Účinný nástroj ke zvýšení odolnosti modifikací substruktury bainitu představuje vhodné tepelné zpracování. Zvýšení ochlazovací rychlosti vede k produkci laťkového feritu a potlačení tvorby karbidů.

U dané kolejnicové oceli byly, vzhledem k prezentovaným závislostem, studované vzorky ze dvou stěžejních oblastí – bezprostředně pod zatěžovaným povrchem profilu a v objemech mimo vlivu provozně, nebo technologicky indukovaného napěťového a deformačního cyklu.

Z dalších prezentovaných snímků je zřejmé, že analyzovaný materiál daného složení s aplikovaným postupem tepelného zpracování má převážně strukturu dolního bainitu – obr. 8.5. Licí struktura oceli je zviditelněna leptáním pro zvýraznění dendritické segregace legujících prvků (obr. 8.6), kdy tvorbu makroheterogenit řídí proces primární krystalizace. Postup krystalizace přes delta-ferit přináší obohacení primárních dendritických větví především o chrom a molybden, poslední krystalizující mikroobjemy jsou oproti tomu obohaceny o nikl. Z jednotlivých metalografických analýz vyplývá charakter lokálních strukturních heterogenit – jedná se především o určitý podíl martenzitické fáze, ojediněle zbytkový austenit.



Obr. 8.5 Charakteristická mikrostruktura hodnocené oceli
(zv. 250x)



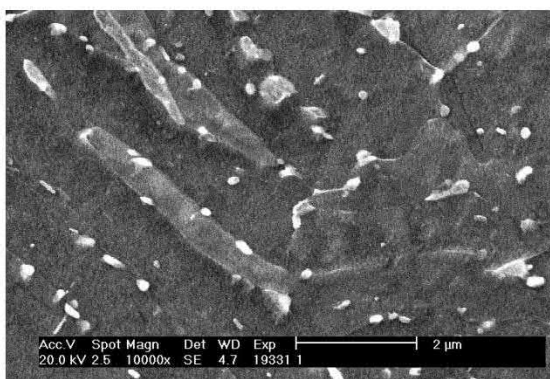
Obr. 8.6 Mikrosegregace legujících prvků v návaznosti na primární stavbu oceli (zv. 50x)

Nebezpečí přítomné martenzitické fáze je potlačeno relativně nízkým obsahem uhlíku. Vedle nízkouhlíkové formy martenzitu je možno předpokládat i formování jehlicovitého martenzitu, kterého tvorba se pak vztahuje k uhlíkem obohacenému

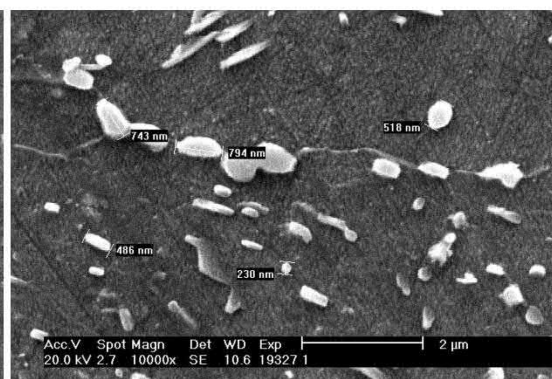
austenitu. Nízkouhlíkový martenzit, vyskytující se v malých lokalitách, bývá charakteristický zbylými nerozpuštěnými karbidy s negativními účinky mezifázového rozhraní karbidů a matrice jako potenciálního místa nukleace dutin při jakémkoliv zatížení.

Uvedené heterogenity nemají podstatný negativní vliv na odolnost proti provozní degradaci, jednak s ohledem na zaznamenaný nízký podíl ve struktuře, jednak vzhledem na jejich vztah k převažujícím složkám zatížení. Kvůli určitému podílu zbytkového austenitu byl z dostupných prací vyvozen dokonce jeho pozitivní vliv na iniciaci i rozvoj únavových vad ve smyslu vyšší tažnosti mikrolokalit na čele trhlin.

Z hlediska provozní odolnosti, tj. odporu proti tvorbě kontaktně-únavového porušení a abrazivnímu opotřebení, má stěžejní význam podíl a charakter karbidické fáze. Proto byly analýzy zaměřeny na prezenci karbidů. Hodnocení vlivu na charakter pozorovaných porušení se opírá o porovnání struktury dvou sad vzorků a to z oblastí zatěžovaných povrchů a oblastí bez provozních vlivů. Distribuce karbidů, v zatížením nezměněné části průřezu, je dokumentovaná na obr. 8.7 a obr. 8.8. Charakteristická je tendence tvorby karbidů uvnitř feritických útvarů (částečně feritické laťky, částečně masivní ferit), místy tvoří nesouvislou karbidickou obálku původních austenitických zrn. Jedná se o velice drobné precipitáty do cca 0,5 μm .

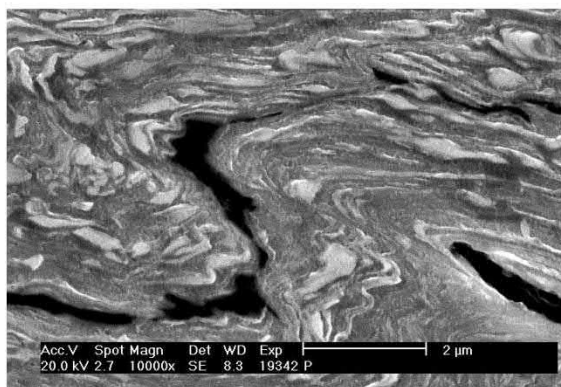


Obr. 8.7 Distribuce karbidů na hranicích feritických útvarů (zv. 10 000x)



Obr. 8.8 Rozměry karbidické fáze na hranicích a v interiéru zrn (zv. 10 000x)

Detailně byl studován vztah provozně iniciovaných kontaktně-únavových vad v kritických objemech průřezů a distribuce karbidické fáze. Nebyla pozorována návaznost ojedinělých preferencí v jejich rozložení (hranice feritických útvarů, hranice původního austenitického zrna) a rozvoje, popř. iniciace trhlin. Charakteristické je pro tuto strukturu přeuspořádání přítomných karbidů v plastickém toku zatěžované oblasti. Nahromadění karbidů na čele postupující trhliny může opačně pozastavit rozvíjející se vady, její linie je dále tvarována průběžnou plastickou deformací. V případě, že postup trhliny koliduje s rozměrnějším karbidickým precipitátem ve směru plastického toku, může tento vést k větvení defektu, obr. 8.9. Dochází k pohlcení vyšší hladiny energie a zpomalí se rozvoj vady do vzdálenějších objemů struktury.



Obr. 8.9 Vztah rozvoje defektů a uspořádání karbidické fáze (zv. 10 000x)

Lze tedy konstatovat, že nebyl přímo prokázán negativní vliv karbidické fáze na provozní odolnost studované oceli. Z dostupných empirických studií ale jednoznačně vyplývá, že potlačením vyloučení karbidů se odpor bainitické oceli zvyšuje v podmínkách kontaktně-únavového i abrazivního zatížení. To vede k asociaci na spojitost odolnosti oceli a zpevnění tuhého roztoku, naznačena byla již i otázka pozitivního vlivu přesyceného zbytkového austenitu. Rovněž působení martenzitické fáze nebylo dosud podrobně prošetřeno.

Na cestě k pochopení komplikovaného vztahu mikrostruktury a chování bainitické oceli při opotřebení, když tato má smíšenou strukturu po anizotermické transformaci, je nutný komplexní výzkumný program. Obecný trend je zvyšování tvrdosti se zvyšováním obsahu uhlíku a objemem zlomků laťkového feritu bez karbidické fáze ve struktuře.

Vliv mikročistoty

Z hlediska možností ovlivnění provozní odolnosti oceli v podmínkách (daných vztahem meze skluzu oceli a modelem reálného zatížení), kde je limitující působení kontaktní únavy, je důležitá především první fáze únavového poškození.

Radiální tlakové zatížení vyvolá trojosou plastickou napjatost a valivé tření smykové napětí s velkými gradienty. Výsledné namáhání má cyklický charakter s vysokou hladinou středního napětí, největší tahová napětí působí v určité hloubce pod povrchem pojezdové plochy ve směru s mírným sklonem k povrchu. Z toho důvodu malé únavové trhliny vznikají na inkluzích a slabých místech struktury, v následující etapě se dále rozvíjejí přednostně k povrchu, kdy směr je řízen podílem smykové složky zatížení. Růst poškození od určité délky a hustoty trhlín lze obtížně ovlivnit, proto je rozhodující oddálení inkubační etapy procesu.

Z toho plyne požadavek na vysokou čistotu oceli, homogenitu (z hlediska odolnosti k rozvoji defektu je důležitá vzdálenost inkluzí) a jakost povrchu, která modifikuje rozdělení napětí v kontaktní ploše.

Jako prezentace vlivu lokálního poklesu mikročistoty oceli pod pojezdovou plochou jsou dále prezentovány výsledky analýz vzorků, kde došlo k ojedinělému poškození povrchu se specifickou morfologií.

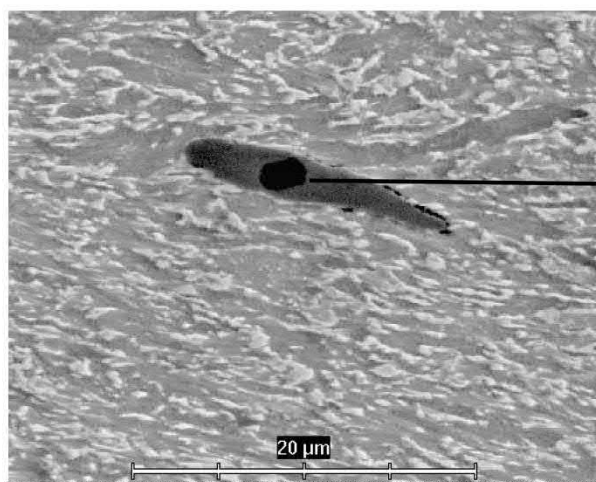
V oblastech s podstatným zvýšením opotřebení byla provedena strukturní analýza v řezech kolmo k povrchu profilu.

Průběh pozorovaných trhlin odpovídá charakteristickým parametrům kontaktně-únarového porušení. Magistrální trhlina je iniciovaná ve hloubce cca 4 mm v souvislosti s výskytem mikroskopických licích vad. Postupuje směrem k povrchu, kde je trhlina odkloněna deformačním přetvořením struktury pod kontaktní plochou, obr. 8.10 a obr. 8.11. Postupem trhliny je izolována podpovrchová část objemu oceli, dochází k zamezení rozvoje plastické deformace do hloubky a k urychlené ztrátě tažnosti nejvíce zatížených vrstev. Proces vede vedle limitních změn mechanických vlastností současně k podstatnému zvýšení vlivu vyloučených vměstků. Na obr. 8.12 je detail komplexního oxi-sulfidického vměstku v deformaci ovlivněné vrstvě. Viditelné jsou známky počínající dekoheze vměstku.



Obr. 8.10 Porušení v souvislosti s lokálním poklesem mikročistoty kovu

Obr. 8.11 Morfologie lomu v objemu se zvýšeným obsahem sírníkových vměstků



**EDS analýza
vměstku: [hm.%]**

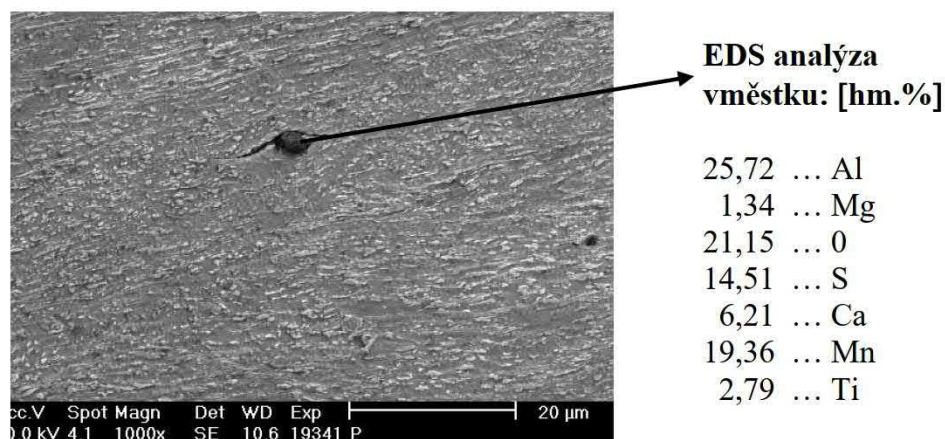
29,8	...	Al
11,2	...	S
4,30	...	Ca
18,30	...	Mn
0,90	...	Cr

Obr. 8.12 Detail komplexního vměstku ve vrstvě s výraznou makroplastickou deformací vlivem zatížení (zv. 3 000x)

Uvedeným mechanismem došlo v ojedinělé lokalitě k tendenci vzniku tzv. „dřevitého lomu“, tj. efektu, spojenému s vysokým obsahem sulfidických vměstků u tvářených ocelích (obr. 8.12). I když uvedený mechanismus degradace povrchové vrstvy lze z hlediska frekvence označit za ojedinělý, prokazuje tento případ důležitost dostatečné čistoty a homogenity oceli v objemech pod pojezdovou plochou kolejnicového profilu. Podstatné lokální zvýšení rozsahu inkluzí, které byly lokálními analýzami identifikovány jako převážně sulfidické, částečně komplexní oxi-sulfidické vměstky, jednoznačně vedlo k velkým rozdílům v rozsahu opotřebení. Zvýšení degradace povrchové vrstvy je vyvoláno deformací MnS inkluzí v poli působení deformačně-napěťového cyklu.

Obdobná pozorování byla provedena na standardních perlitických kolejnicových ocelích. Bylo experimentálně prokázáno lineární zvýšení rozsahu opotřebení při parametru délky zdeformovaného sulfidu na jednotku plochy v poli sledované struktury, obsahující Mn/S inkluze. Hodnocený parametr délky sulfidů je u perlitické kolejnice řízen stupněm protváření materiálu na daný profil. Oproti tomu bainitická litá ocel získává předpoklady pro deformaci vměstků až v procesu zatěžování pojezdové plochy. Rozvoj vady má proto u bainitu delší inkubační dobu, mechanismus dalšího rozvoje vady je identický.

Jiný mechanismus poškození nejvíce zatěžovaných objemů se uplatňuje v souvislosti s obsahem neplastických vměstků. Iniciace kontaktně-únavové mikrotrhliny probíhá na fázovém rozhraní oxid-matrice, kde došlo ke kumulaci provozně indukovaného napětí (obr. 8.13). Bohatá distribuce karbidů vzhledem k výrazně menším rozměrům oproti inkluzím přímo rozvoj defektů nepodporuje.



Obr. 8.13 Komplexní oxid jako iniciátor mikrotrhliny v plastické zóně (zv. 1 000x)

Pro komplexní posouzení vlivu mikročistoty na provozní odolnost bainitické oceli v dané aplikaci je nutno uvést pozorované efekty v souvislosti s výskytem zbývajících typů vměstků – především nitridů, resp. karbonitridů a silikátů. V obou případech bylo v souvislosti s hodnocením reakce bainitické oceli na komplex technologických a provozních vlivů potvrzeno, že v případě náhodného výskytu ve vybraném kritickém objemu mohou působit jako iniciátory porušení. V prvním případě je vlivnou bariérou proti rozvoji v makroskopickou vadu vysoká lomová odolnost oceli, v druhém před vlivem vměstků převládá přímý mechanismus tvorby kontaktně-únavových defektů v silně přetvářené povrchové vrstvě se sníženou tažností.

Reálně je ovšem pro životnost zatěžovaných částí profilů z hlediska hladiny vyskytujících se vměstků rozhodující především homogenita oceli obou strukturních variant. Celkový stupeň mikročistoty, dosahovaný v současnosti u kolejnicových materiálů, nedává obecně předpoklady pro realizaci popsaného degračního mechanismu, ten je podmíněn uváděným lokálním zvýšením přímo v podpovrchových vrstvách.

Vlivy mechanických vlastností na provozní odolnost

Podle obecně přijímaných studií je povrchový kontaktně-únavový proces mnohem více závislý na mechanických vlastnostech než na mikrostrukturu. Únavová data ocelí

rozdílných strukturních typů kolejnicových ocelí – standardní perlitické i vyvinuté bainitické, prokazují u řady experimentů stejné chování. Při daném kontaktním tlaku je odpor proti degradaci jasně závislý na pevnosti materiálu – v některých pracích je deklarován až dvojnásobný nárůst životnosti vybraných typů tvářených bainitických ocelí oproti standardním materiálům.

Z praktického pohledu je ale nesporná řada vlivů, která znemožňuje přímou interpretaci výsledků na provozní podmínky. Stanovené závislosti jsou odvozené pouze pro malé měřítko laboratorních testů a experimentálně aplikovaný pevný poměr smyk/normálový tlak (nejčastěji ve variantě 10 a 35 %) může být značně pod vlivem změn hladiny skluzu. Nebyly publikovány práce, vztahující deformaci za cyklus při provozních podmínkách vzhledem k laboratorně indukovaným deformacím, a korektní hladina poměru pro vyvolání dobré korelace nebyla zkoušena. Určitou reálnou možnost představuje hodnocení deformačního zpevnění povrchu, které je nutno vztahovat ke konkrétním poměrům zatížení.

Zároveň je ale nutno uvést, že pevnostní charakteristiky nejsou jediné kritérium, a to zejména u bainitických materiálů. Jestliže kritická deformace, vedoucí k iniciaci stříhových trhlin, klesá se zvyšující se tvrdostí, je zřejmé, že výsledný mechanismus porušování může být v rozhodující míře řízen tažností, resp. celkově deformačními charakteristikami studované oceli. Rovněž vliv velikosti apriorního austenitického zrna na šíření rozvětvené trhliny nebyl dostatečně prozkoumán.

Odolnost proti opotřebení je standardně vztahována k hodnotě výchozí tvrdosti. Pro oceli s perlitickou strukturou bylo prokázáno, že zejména rozsah abrazivního opotřebení (u komplexního provozního opotřebení s rostoucí tvrdostí převládá kontaktně-únavová složka degradace materiálu) klesá s dosahovanou tvrdostí. U oceli s bainitickou strukturou je situace podstatně odlišná, tj. především komplikovaná konkrétní substrukturou bainitu. V řadě prací byla zjištěna rozdílná intenzita závislosti odolnosti proti opotřebení s nárůstem tvrdosti.

Celkově tedy lze přijmout závěr, že odolnost proti opotřebení (ani v případě převládající abrazivní složky) není v jednoduché závislosti k tvrdosti materiálu, ale je určena také mikrostrukturou a lomovými vlastnostmi. V případě, že je snížení tvrdosti spojeno se zvýšením zbytkového austenitu, vede opačně ke zvýšení odporu k iniciaci typických kontaktně-únavových vad. Získané poznatky lze shrnout do konstatování, že odolnost proti opotřebení není řízená výchozí tvrdostí, tj. tvrdost není dobrým indikátorem chování bainitických ocelí při opotřebení.

V dané aplikaci musí být závislost mechanických vlastností a odezvy materiálu při provozním zatížení zkoumána na základě poznání konkrétní substruktury bainitu. Mechanické vlastnosti, zejména mez kluzu ve stříhu a tažnost, při daných specifikách kontaktní únavy jsou řídicím parametrem k pochopení vlivu struktury, generované v nízkouhlíkových, kontinuálně ochlazovaných bainitických ocelích.

Shrnutí komplexního přístupu k odolnosti jízdnicových ploch proti opotřebení

Technologie lití a následného tepelného zpracování zde představuje donor výchozích materiálových parametrů, modifikujících užitečné vlastnosti. Byly deklarovány základní charakteristiky a studován vliv vybraných parametrů oceli na provozní odolnost proti opotřebení. Provedené rozbory umožnily specifikovat degradační

mechanizmy v souvislosti se studovanými ukazateli jakosti oceli – konkrétně obsahu a druhu vnitřních licích vad, mikročistoty a strukturní homogenity materiálu. Pro daný účel byla provedena podrobná mikrostrukturní charakteristika oceli. Jednotlivé zjištěné strukturní parametry pak byly sledovány v souvislosti s charakterem provozního opotřebení. Jako stěžejní lze vyjmout rozsah dendritických mikrostaženin a případnou kumulaci nekovových vměstků v objemech přenosu kontaktního zatížení.

Studium působících degradačních mechanismů pojezdových ploch se opíralo o hodnocení provozně zatěžovaných kolejnicových profilů. Byly prokázány rozdílné procesy iniciace kontaktně-únavového porušování:

- v návaznosti na vyvolané povrchové nerovnosti, nebo
- jako reakce na intenzivní plastické přetvoření a tedy limitní pokles tažnosti podpovrchových vrstev.

Z hlediska predikce životnosti výrobku lze jako podstatné přijmout zjištění o rozvoji únavové trhliny nepřesahující plasticky modifikovanou povrchovou vrstvu oceli. Orientace defektů je řízena modelem stříhového toku, čímž je prakticky omezen jejich další rozvoj do profilu kolejnice. To představuje podstatný rozdíl vzhledem k charakteru porušování standardních perlitických ocelí, kde je překročení porušení mimo plastickou zónu spojeno s rozsáhlým větvením trhlín a tedy i rizikem rozvoje defektů v celistvé příčné lomy kolejnicových profilů.

Celkový proces mezního stavu studované bainitické oceli je dotvářen působením povrchového abrazivního opotřebení. Průběžné odstraňování zoxidovaných povrchových vrstev znamená důležitý samoregulační mechanismus provozní odolnosti kontaktních ploch v systému kolo-kolejnice.

Daný typ bainitické oceli představuje výhodnou kombinaci materiálových charakteristik pro kontaktně-únavové zatížení při značném podílu rázů a tedy přináší perspektivní řešení pro výrobu vysoce exponovaných litých součástí kolejového svršku.

Vysoká provozní odolnost studovaného materiálu souvisí se specifickým mechanismem degradace povrchových vrstev. Značná schopnost plastického přetvoření při zároveň podstatně vyšší pevnosti lité oceli oproti standardnímu materiálu znamená prodloužení doby iniciace kontaktně-únavových vad. Ve stadiu rozvoje povrchového porušení působí plastická deformace jako účinný modifikátor porušení – lokalizuje degradaci na povrchové vrstvy pod kontaktní plochou kolejnice, kde je současně potlačen další rozvoj vad povrchovou abrazí. Zvyšování životnosti exponovaných úseků tedy jednoznačně vyžaduje optimalizaci poměru meze únavy ve stříhu k odolnosti proti abrazi.

Návrh pro výpočtový model opotřebení jízdních ploch kol (a kolejnic)

Výpočtové modelování degradačních procesů, které byly způsobené kombinovaným opotřebením, usnadňuje i jejich predikci v jednotlivých lokalitách. Důležité jsou vstupní informace, vycházející z algoritmů při zatěžování povrchů jízdních ploch kol – kolejnic a jejich odezvy jako je:

- A1. Algoritmus pro kvantifikování zatížení jízdní plochy železničních kol (platí i pro kolejnice). Bude záviset na hmotnosti železničních vozů a jejich provozování (údržba, počet ujetých km, přetížení, příčné a podélné kmitání vozů aj.);

- A2. Algoritmus pro automatické generování topologie struktury ocelí pro železniční kola a charakter měnící se struktury při ohřevu a ochlazování (množství feritu, perlitu, přeměněného martenzitu, příp. jiných fází vyskytujících se na povrchu a těsně pod povrchem jízdnic ploch);
- A3. Algoritmus průběžně reagující na změny mechanických vlastností předchozích zatížení (rozběhy, brzdění, dynamické působení aj.), změny tvrdosti, pevnosti, houževnatosti;
- A4. Algoritmus určující hodnoty elastických a pevnostních materiálových charakteristik v každém časovém okamžiku, kdy na něm probíhá degradace a této změně odpovídá příslušný deformačně-napěťový stav podle zatížení;
- A5. Algoritmus určující reziduální zbytkové napjatosti od výrobních technologických procesů tepelného zpracování, popř. nekvalitně provedených reprofilací;
- A6. Algoritmus určující provozní deformace, přetvoření a napjatosti od provozního zatěžování (provozní napjatost v povrchových mikroobjemech železniční kol a kolejnic);
- A7. Algoritmus určující deformace a napjatosti v povrchové vrstvě jízdnic ploch od mechanických a teplotních šoků (plochá kola, nekruhovitost, opotřebení, změna jízdnicového profilu);
- A8. Algoritmus určující výslednou napjatost, která je průnikem napjatosti zbytkové, provozní a povrchové napjatosti z komplexu opotřebení;
- A9. Algoritmus určující změny geometrie jízdnic plochy železničních kol způsobenými deformačně-napěťovými stavy a komplexem povrchového opotřebení (projevující se „vlnkovitostí“ jízdnic ploch kolejnic);
- A10. Algoritmus popisující procesy opotřebení jízdnic plochy (adhezivní, vibrační, únavové a korozní);
- A11. Algoritmus určující dobu a místo vzniku mezního stavu souvisejícího s porušováním soudržnosti materiálu (mezní stav pružnosti, tvárné pevnosti, křehké pevnosti, únavové pevnosti, mezní stav trhlin) v jednotlivých lokalitách jízdnic ploch a to na:
- historii zatížení a celkové doby trvání,
 - aktuálního stavu napjatosti v jednotlivých bodech jízdnic plochy (obecná, blízká se k rovnoměrné tahové napjatosti, příp. k potenciální možnosti vzniku křehkého porušení),
 - aktualizace hodnot pevnostních a materiálových charakteristik;
- A12. Algoritmus posuzující stavy trhlin (od iniciace až po nestabilní šíření) a to při synergii dalších vlivů opotřebení;
- A13. Algoritmus znázorňující prostorovou topologii lomových ploch v každém časovém okamžiku a posuzující, zda tyto tvoří vydroleniny.

Jednou z bariér při vytváření systému veličin může být nerealizovatelnost experimentálního ověření podstatnosti určitého prvku v systému veličin. To je právě případ kombinovaného opotřebení jízdnic ploch vedoucího k porušení. U nich se obtížně realizují experimenty pro posuzování významnosti a tím i podstatnosti

jednotlivých veličin pro výpočtové modelování. Nezahrnutí podstatného prvku do systému veličin obvykle znehodnotí výsledky řešení problému výpočtovým modelováním. Zahrnutí prvků nepodstatných může proces řešení velmi zkomplikovat, protože v důsledku složitosti je náchylný ke vzniku chyb.

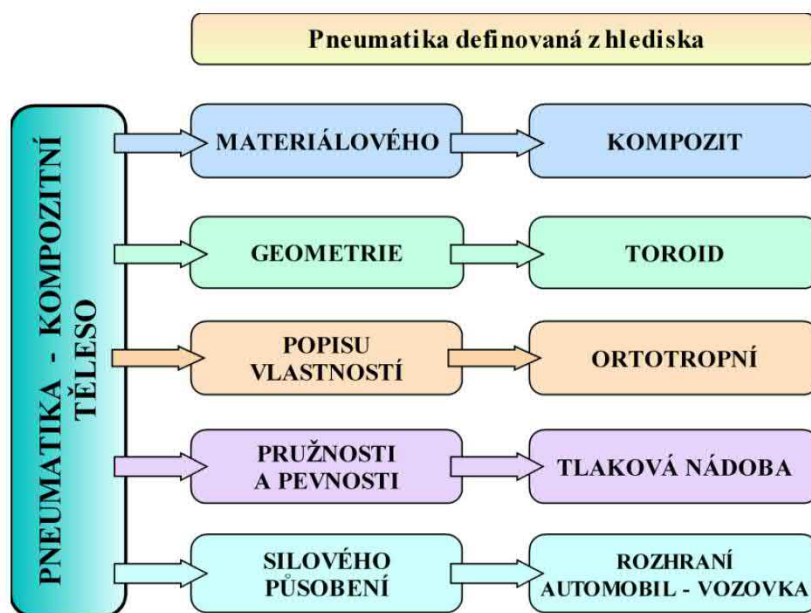
❖ PNEUMATIKA Z POHLEDU OPOTŘEBENÍ

Na automobily je kladen vysoký důraz na bezpečnostní kritéria za vysokých rychlostí, např. defekt za jízdy po dálnici musí být řidičem zvládnutelný, aniž by došlo k tragické havárii.

Konstrukce pneumatik musí být proto uzpůsobena podmínkám jejich provozování. Rozdílná konstrukce je vyžadována pro osobní automobily, jiná pro nákladní, terénní a sportovní vozidla. Pneumatiky pro leteckou dopravu, zemědělské, důlní a jiné stroje mají daleko složitější strukturu v porovnání např. s běžnými osobními radiálními pneumatikami. Struktura se liší počtem výztužných vrstev v nárazníkové části, konstrukcí a materiály kordů, úhlem kladení ocelové a textilní výztuže, rozměrovými parametry pláště, šířkou nárazníků aj. Všechny tyto aspekty ovlivňují výsledné chování pneumatiky jako složitého kompozitního prvku např. jejich deformační charakteristiky aj.

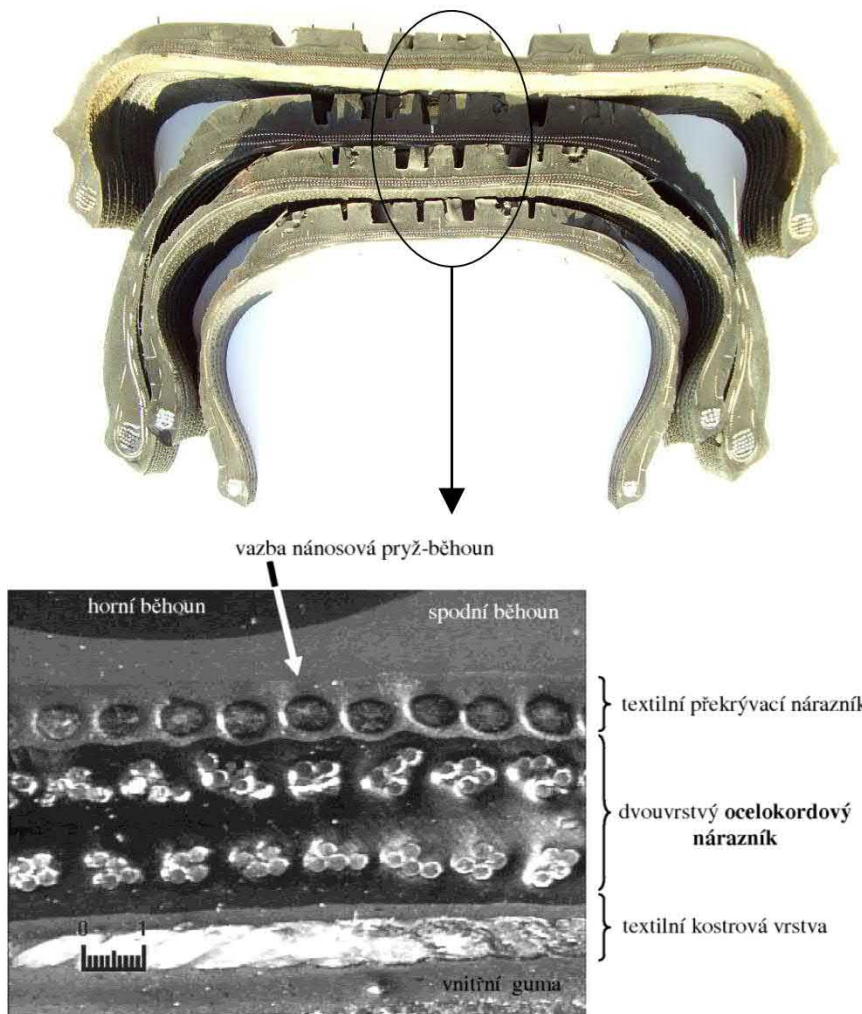
Pneumatika je v provozu vystavena různým mechanismům opotřebení, které může být navíc superponované prostředím, ve kterém je provozovaná.

Plášť pneumatiky je kompozit s pryžovou maticí, která je zpevněna ocelovými a textilními kordy. Ortotropní materiál a jeho geometrie, tvořící tento složitý kompozit, má své pevnostní charakteristiky, které ovlivňují nejen vlastnosti celé pneumatiky, ale i její chování ve styku pneumatiky s vozovkou. Charakteristické uspořádání prvků do specifické geometrie, tj. toroidu, se odráží v odolnosti pneumatiky proti jejímu opotřebení. Pneumatiku jako konstrukční prvek lze charakterizovat z několika hledisek, obr. 8.14, které budou ovlivňovat její chování v zátěžových situacích.

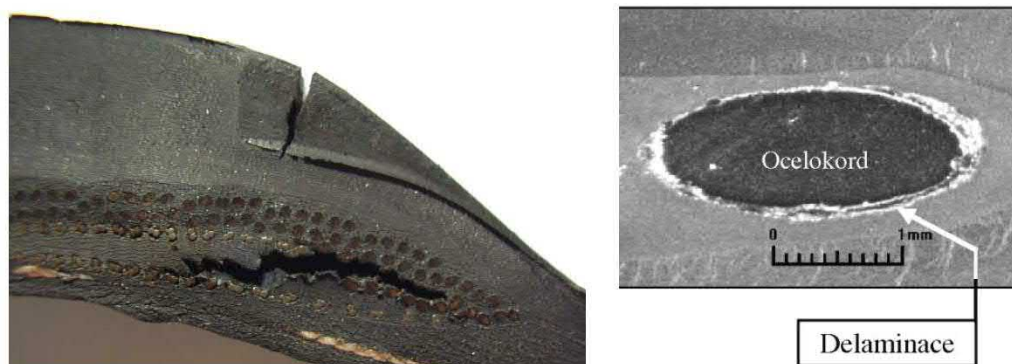


Obr. 8.14 Pneumatika definovaná z různých hledisek

Složitost kompozitu znázorňují řezy pneumatiky osobního automobilu na obr. 8.15. Kompozit – pneumatika má strukturu tvořenou různými charakteristickými oblastmi (obr. 8.15 detail), které se podílí na celkovém procesu poškozování. Snížení odolnosti kompozitu proti porušování může vést k problémovým situacím, ohrožujícím bezpečnost provozu vozidla. Může nastat např. případ uvolňování kordů z pneumatiky, vzniku separací-delaminací (obr. 8.16), vibrací, kombinované opotřebení až následně k celkové degradaci pneumatiky vedoucí k havárii vozidla.

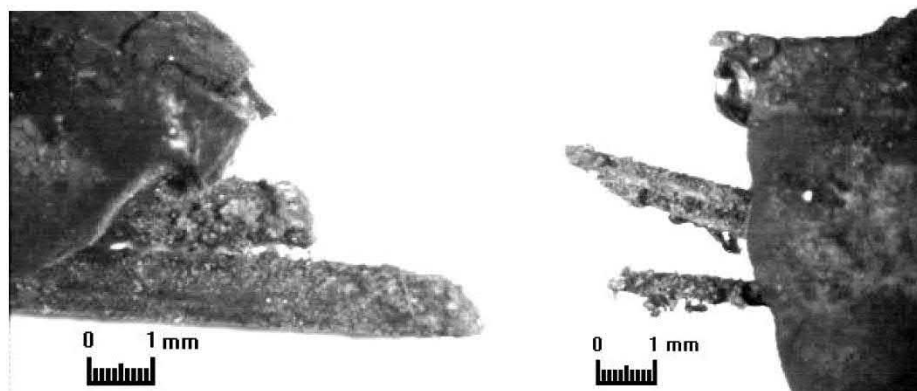


Obr. 8.15 Řezy pláštěm radiální pneumatiky s detailem podběhounové části



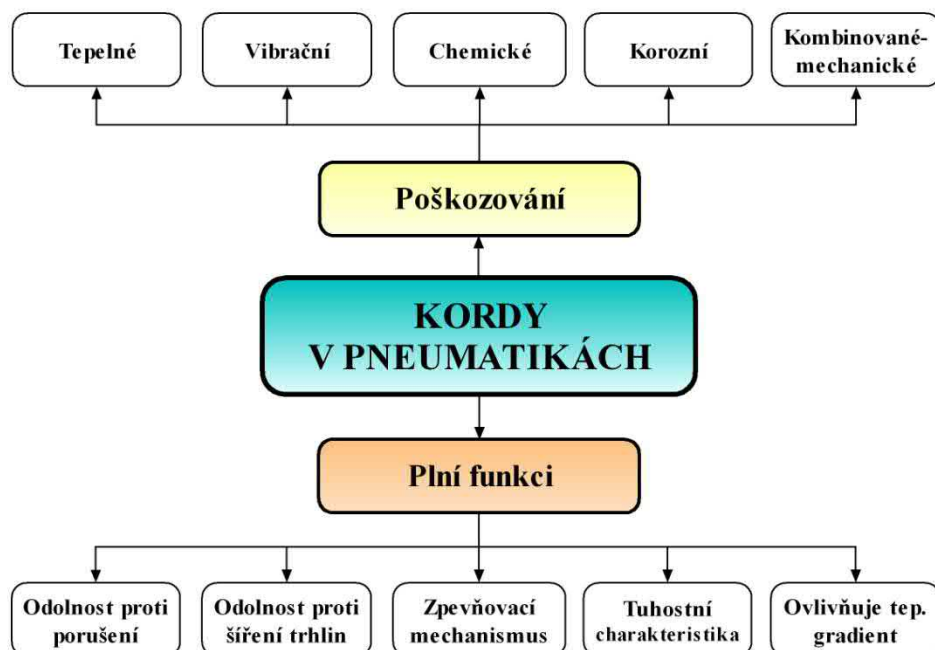
Obr. 8.16 Oddělení nárazníkových vrstev a oddělení kordu od pryže (vpravo)

Při provozování pneumatiky může dokonce docházet k chemickým reakcím některých agresivnějších prvků z okolního prostředí v tepelných zónách pneumatiky. Pneumatiky jsou běžně vystavené vlhkému prostředí a působení ozonu, což způsobuje urychlování procesu stárnutí pryže jako matrice, která tímto ztrácí svoji homogenitu. Navíc působením korozního procesu dochází k porušení povrchů kordů v matrici (obr.8.17), tedy ke snížení adheze, se vznikem korozních produktů v pryži vedoucí k dalšímu snižování materiálových a deformačních charakteristik celé pneumatiky.



Obr. 8.17 Zoxidované kordy v pneumatice (drát vs. lanko)

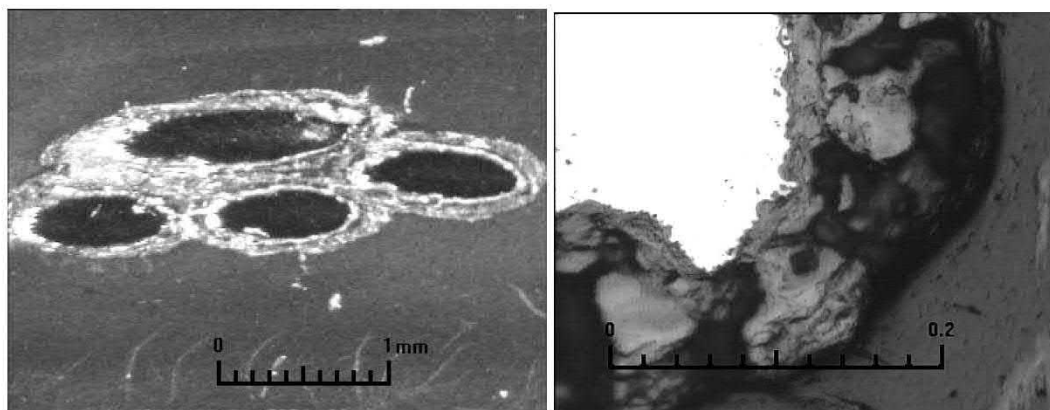
Úkolem ocelových kordů v koruně pláště pneumatiky (obr. 8.18) je zpevňování pryžové matrice, zastavování nebo zpomalování šíření trhlin a vytváření tepelných bariér v pneumatice, např. při prudkém brzdění vozidla. Zároveň existuje nebezpečí, že kordy budou vystaveny tepelnému, vibračnímu a chemickému zatížení a také průběžně adhezivnímu a korozivnímu opotřebení. Ocelové kordy jsou vyráběny technologií tažením z drátů s následným pokovením za účelem zlepšení adhezivní vazby výztuž-matrice a pro zvýšení korozní odolnosti celé kovové kostry.



Obr. 8.18 Funkce kordů v pneumatikách a možnosti jejich poškození

Koroze jako dlouhodobý degradační proces kordů v synergii s celkovým opotřebením dezénu pláště může ovlivnit bezpečnost automobilu. Tato změna kvality nepřímo působí i na jiné části automobilu. Vznikají vibrace podvozkové části, kmitání součástí, popř. dochází k výkonovým ztrátám, doprovázeným zvýšenou hladinou hluku aj.

Největší nebezpečí vzniku oxidace ocelokordů (obr. 8.19) je v případě, kdy je povrchová vrstva mechanicky porušena (při samotném splétání a manipulaci drátků může docházet k porušení povrchové úpravy) nebo částečně odstraněna adhezním opotřebením v zátěžových situacích. Charakter okují nebo jiných korozních zplodin závisí na difuzitě prvků, které budou účastny na chemických reakcích v povrchových vrstvách kordů.



Obr. 8.19 Oxidace ocelokordů s porušenou adhezní vazbou ocelový kord-pryž

Oxidace kovových kordů probíhá buď jako:

- děje na rozhraní mezi kovem a vrstvou produktů;
- difúze intersticiálních iontů a volných elektronů z povrchu kovu do vrstvy oxidů;
- chemický děj na povrchu vrstvy oxidů s prvky nacházejícími se v pryži (síra, křemík, uhlík aj.).

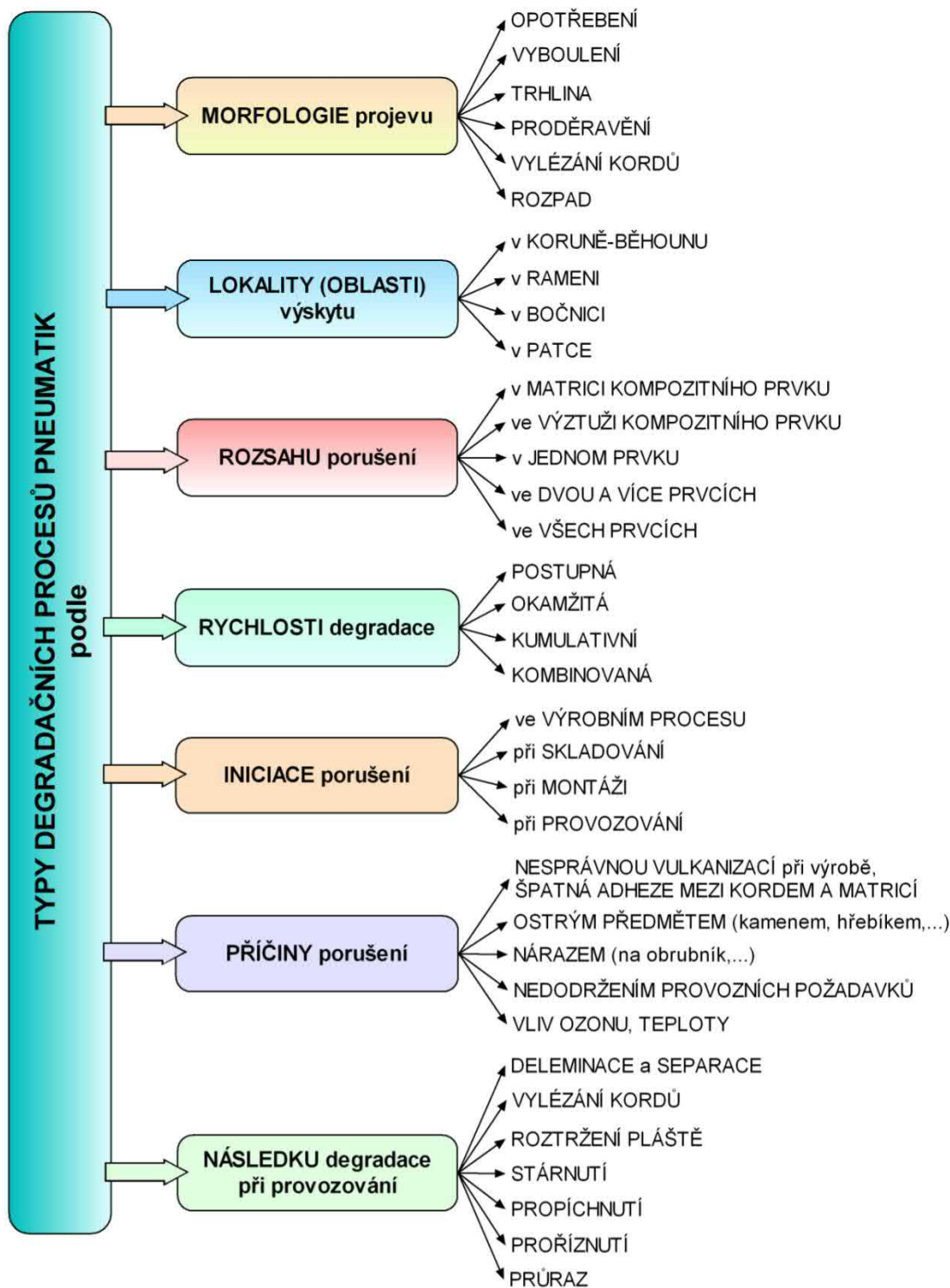
Korozní proces souvisí s difúzí atomů z korozního prostředí a difúzní schopností atomů kovu v povrchové vrstvě. Rychlost difundující látky je ovlivněna teplotou a koncentračním spádem chemických prvků. Dá se předpokládat, že čím bude tenčí ochranná vrstva, tím bude průběh difúze rychlejší, což souvisí i s charakterem následného opotřebení kordů.

Dojde-li k porušení vlákna, existuje několik příčin, které vysvětlují následné chování kompozitu, jedná se o:

- ❖ vysoké mezifázové smykové napětí, které může vyvolat porušení mezi fázemi s tím, že může pokračovat trhlinka podél vlákna. Řešením je dostatečná mezifázová soudržnost;
- ❖ nedostatečnou houževnatost matrice (způsobenou např. stárnutím pryže), podporující rozvoj a šíření trhlín rovnoběžně s vlákny;
- ❖ nedostatečnou lomovou houževnatost matrice, kdy může dojít k rozvoji trhliny napříč kompozitem;
- ❖ zkorodovaný kord do velké hloubky, což způsobí následně zmenšení jeho tloušťky.

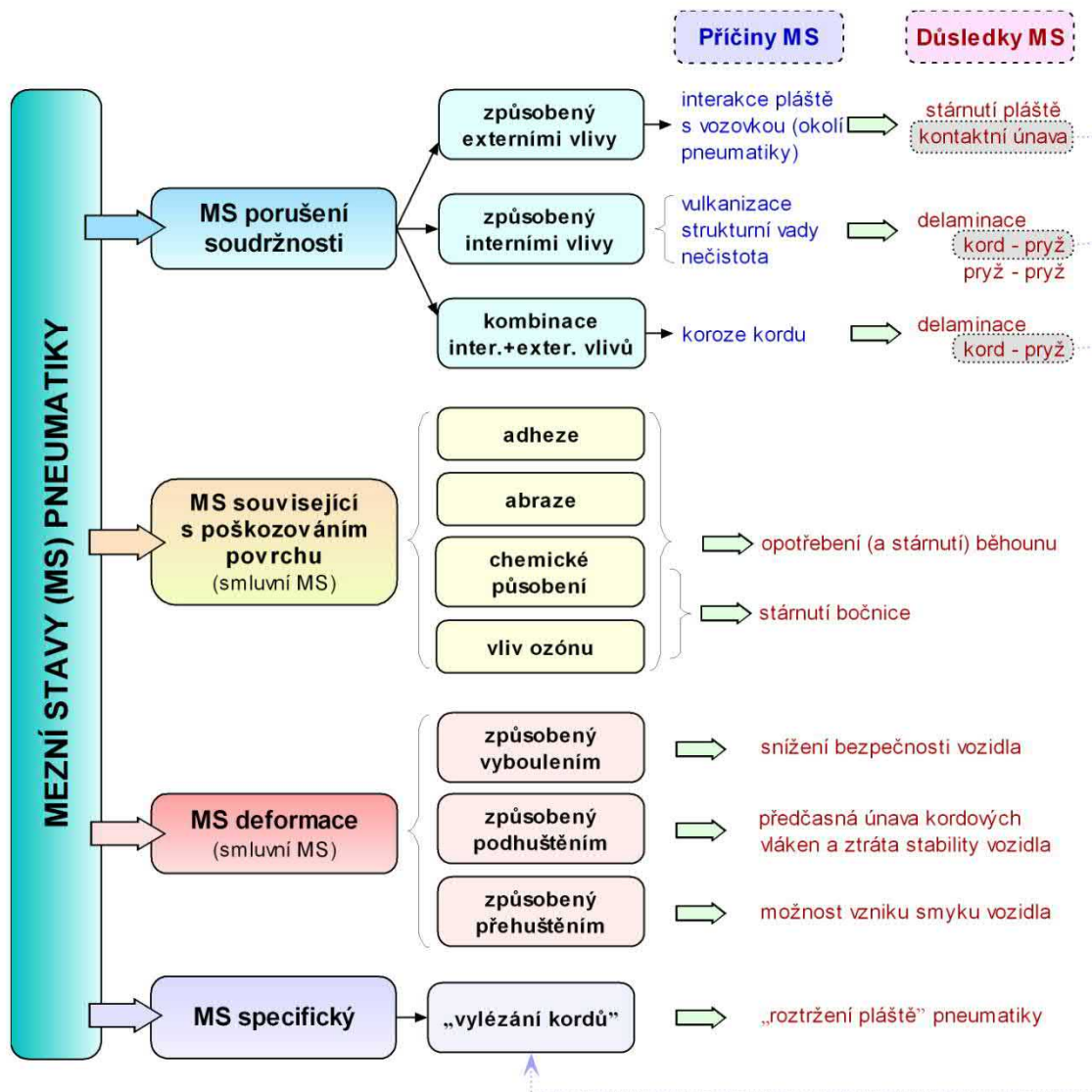
V praxi se při porušení vyskytují všechny uvedené efekty. Celý proces porušování kompozitů aplikovaných na pneumatikách je velmi složitý a náročný pro exaktní výpočet, umožňující predikci vzniku degračních mezních stavů.

Poznatky o iniciaci porušování adhezních vazeb jsou důležité pro studium procesu mezního stavu opotřebení, který vede k typickým projevům degradace celé pneumatiky, obr. 8.20.



Obr. 8.20 Typy degračních procesů pneumatik

Charakter projevu opotřebení (vyboulení, trhliny, proděravění aj.) ovlivněný lokalitou, ve které bude docházet k mezním stavům porušení (obr. 8.21), se odráží v rozsahu a velikosti porušení související s rychlostí degradačního procesu. Nedodržení technologické kázně iniciuje vznik budoucí degradace zobrazené delaminací, průrazem, roztržením pláště aj. s nebezpečím havárie celého vozidla.



Obr. 8.21 Struktura mezních stavů pneumatik

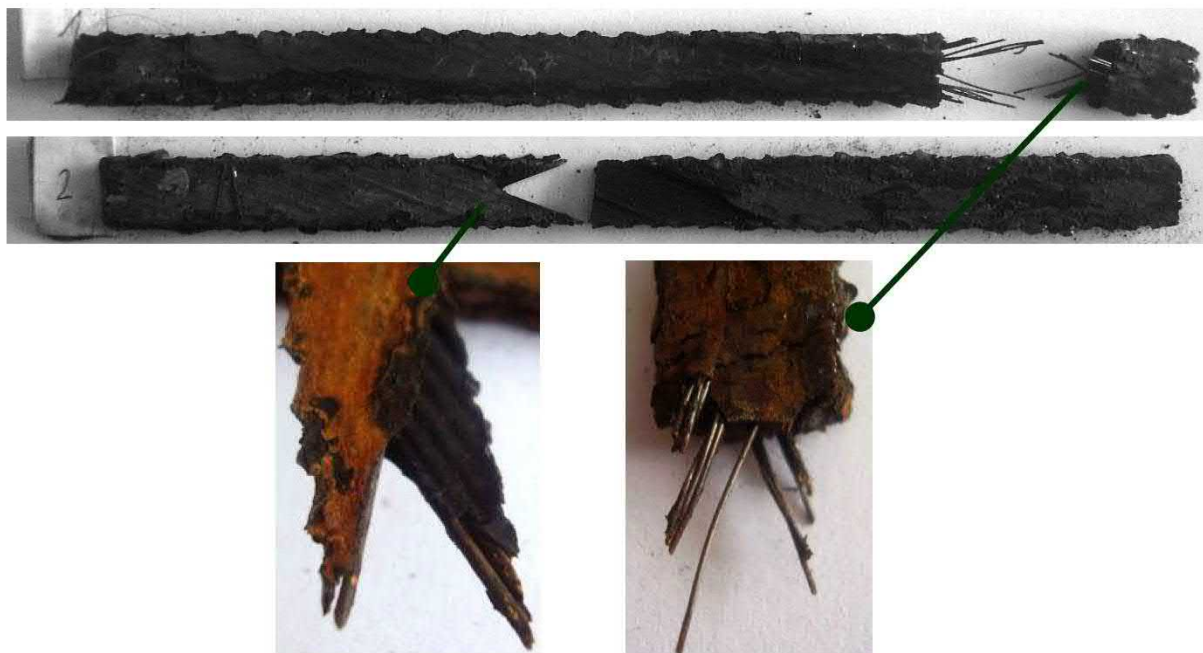
Cesta ke snížení opotřebení pneumatik je v návrhu vhodné volby nových druhů kompozitů, technologie výroby pryže, konstrukcí pneumatiky a optimálního geometrického uspořádání zpevňujících vláken. Je potřebné rozlišovat vyskytující se opotřebení v mikrolokality (kord-matice) a z pohledu makro jízdni plochu pneumatiky vs. vozovka. Z toho vyplývá, že se jedná o komplexní přístup k řešení náročné kontaktní úlohy složitých kompozitů s rozmanitými povrchy. Nezbytná je znalost věrohodných vstupních parametrů, které lze získat specifickým experimentálním modelováním. Přesné modely a výpočty jsou masivním nástrojem k predikci vzniku mezních stavů opotřebení vedoucích k degradacím, které jsou velmi nebezpečné pro provoz automobilových a leteckých pneumatik.

Zkoušky ocelokordového nárazníku po korozním působení

Pro simulaci korozního působení byla provedena korozní zkouška v korozní komoře Gebr. Liebisch S 400 M TR. Účelem korozních zkoušek je studium vlivu degradačního procesu na tuhostní charakteristiky kompozitních prvků.

Zkušební vzorky a zkušební podmínky: jsou použity jednovrstvé a dvouvrstvé kompozitní zkušební vzorky s rozměry 120 x 10 mm, které představují jednovrstvý a dvouvrstvý ocelokordový nárazník z radiálního pláště. Zkušební vzorky byly vystaveny korozním zkouškám v korozní komoře (po dobu 500 a 265 hodin při aplikaci solného roztoku při teplotě 70 °C) a statické zkoušky tahu. Podmínky statických zkoušek tahu jsou: počáteční délka mezi čelistmi testovacího stroje 92 mm a rychlost zatěžování 25 mm/min.

Výsledky zkoušek v tahu: vzorky po korozních zkouškách a zkoušce v tahu jsou na obr. 8.22. Úhel kordů je $\pm 22,5^\circ$. Vzorek 1 je vzorek dvouvrstvého ocelokordového nárazníku s konstrukcí kordu 2+2x0,28 ve formě lanka. Vzorek 2 má výztuž tvořenou jedním drátkem o průměru 0,94 mm.

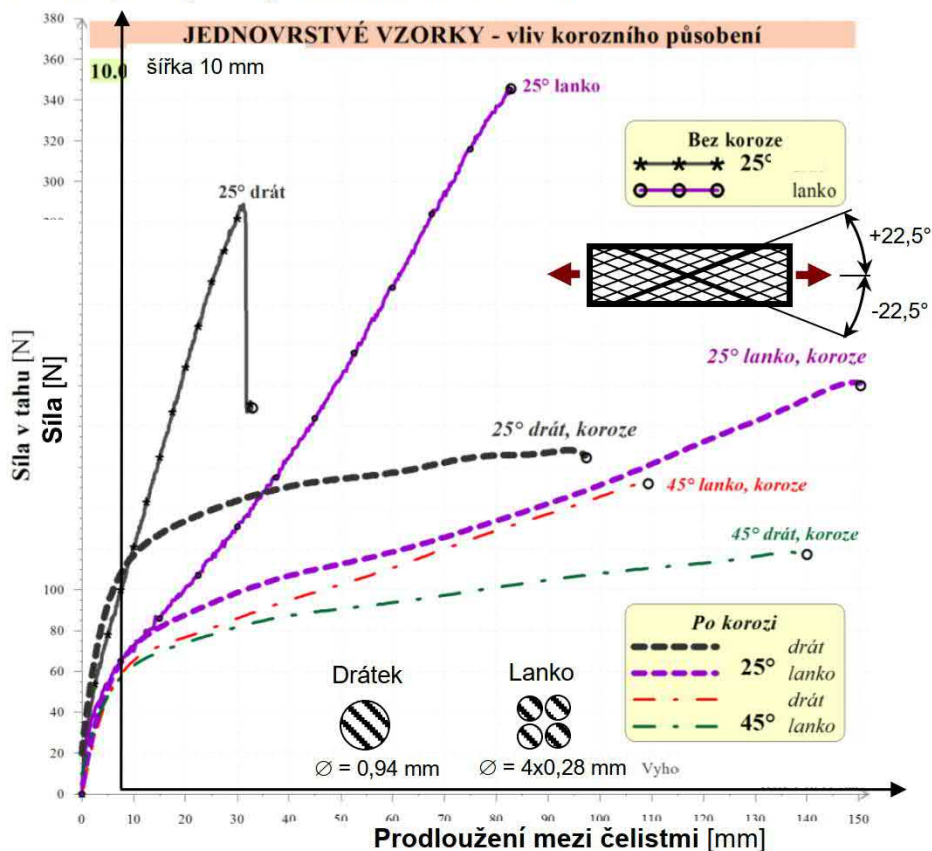


Obr. 8.22 Vzorky ocelokordového nárazníku po porušení

Výsledky získané ze zkoušky v tahu zkušebních vzorků bez korozního působení jsou porovnávány s výsledky vzorků po korozní zkoušce a zkoušce v tahu. Jako příklad byly vybrány výsledky vzorků dvouvrstvého ocelokordového nárazníku $\pm 22,5^\circ$ na obr. 8.23 ve formě závislosti napětí na poměrném prodloužení, zkušební vzorky mají stejné geometrické parametry.

Vliv korozního působení na tuhost vzorků je výrazný. V počáteční části závislosti se vliv tvrdých oxidů na rozhraní výztuž-matrice projevil vyšší tuhostí vzorků po korozním působení oproti vzorkům bez koroze. Zkoušky ocelových výztužných materiálů v tahu lze provést v rámci zkoušek kompozitních prvků jednovrstvých podélně orientovaných

se zatížením ve směru výztuže, popř. jsou deklarovány výrobcí výztužných materiálů. Při zkouškách je důležitým údajem prodloužení, které např. u kordu s označením 2x0,30 HT činí 0,33–0,39 % při zatížení silou 100 N.



Obr. 8.23 Výstupy ze zkoušky v tahu vzorků ocelokordového nárazníku po korozní zkoušce a bez korozního působení pro vzorky 10 mm

❖ KOMBINOVANÉ OPOTŘEBENÍ SKLÁŘSKÝCH TALÍŘŮ

Sklářský talíř je součástí sklářské formy určený k formování tekuté skloviny do rozšířeného tvaru stopky, který je v primárním kontaktu s horkou sklovinou. Sklovina ve tvaru kapky teplé $\approx 1\,046\text{ }^{\circ}\text{C}$ je rozlisovaná razníkem (tlakem $\approx 25\text{ MPa}$) v celé pracovní ploše talíře (obr. 8.24) tak, že část skloviny nahříváné plamenem je prolisovaná přes vnitřní průměr talíře do spodní formy na vytvarování stopky poháru. V průběhu jednotlivých etap je sklářská forma vystavena tepelnému zatížení $\approx 800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po jeho vyjmutí dochází k předehřevu sklářské formy i s talířem na teplotu $\approx 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro vstup do nového pracovního cyklu automatu.

Sklářská forma je v celém pracovním cyklu vystavena nejen teplotnímu, ale i tlakovému zatížení (teplota v celém provozním cyklu nepoklesne pod $400\text{ }^{\circ}\text{C}$), čím dochází k celkovému opotřebení čelní plochy sklářského talíře, obr. 8.25.

V případě, že dojde k nepřijatelnému opotřebení povrchu talíře (obr. 8.25), dochází ke vzniku zmetkovitosti i sklářských výrobků. Vlivem složitých gradientů napětí při omezené dilatační možnosti talířů vznikají teplotní pole způsobující časově proměnlivou napjatost.



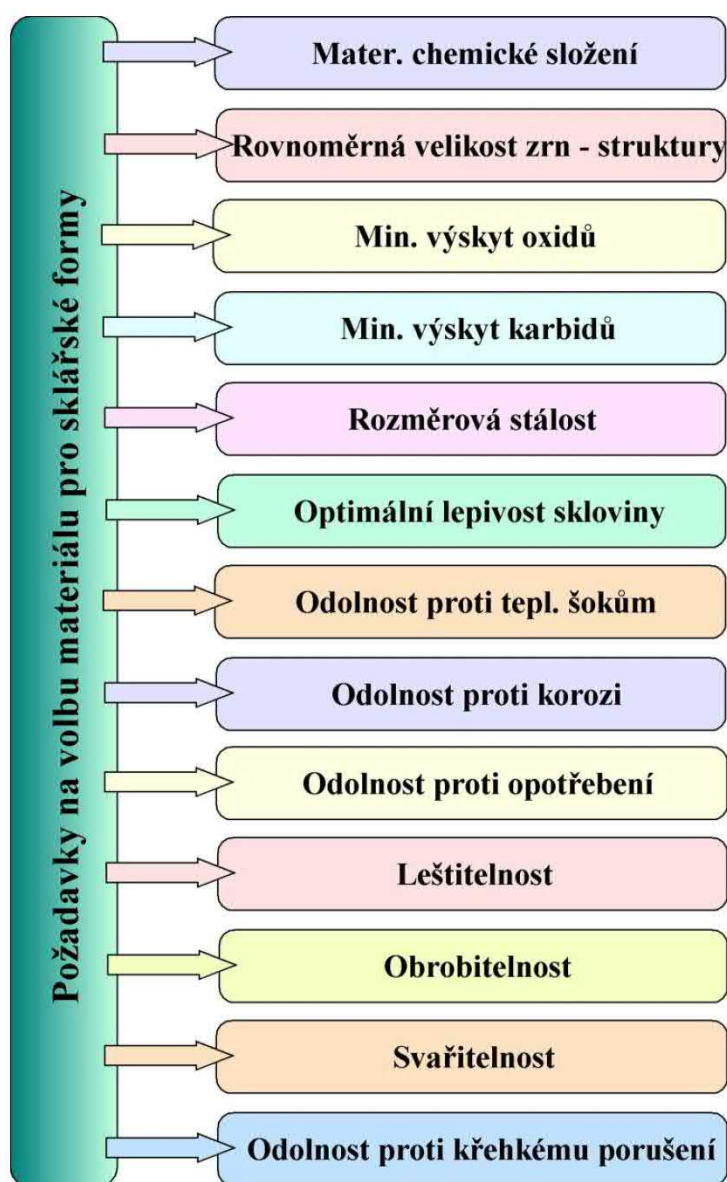
Obr. 8.24 Sklářský talíř – forma ve výrobním procesu



Obr. 8.25 Charakteristické opotřebení materiálu sklářského talíře

Lze předpokládat, že výsledkem opakovaných teplotních cyklů je degradace talířů způsobena tepelnou únavou synergicky s korozním opotřebením a případnou kavitací způsobenou polotekutou sklovinou. Dochází ke kombinovanému opotřebení, které je superponované teplotním působením plamene hořáků. Dále je sklářská forma vystavena působení horké skloviny, která svým chemickým složením a fyzikálními vlastnostmi (viskozita, lepivost skloviny aj.) působí v proměnném čase na celý povrch. I když je sklářská forma přehřátá na teplotu $\approx 350\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$, budou změny teplotních gradientů ovlivňovat povrch sklářských forem – talířů někdy natolik, že jakékoliv „slabé místo“ v kvalitě materiálu, technologii výroby, povrchové úpravě aj. přispěje k rychlé degradaci materiálu. Potom se porušení a změna povrchu sklářských forem – talířů odráží na nežádoucí změně sklářského povrchu vedoucí k jejich zmetkovitosti.

Na výrobu sklářských talířů jsou kladeny vysoké nároky jak z hlediska volby materiálu, obr. 8.26, tak i z hlediska tvaru a geometrie.



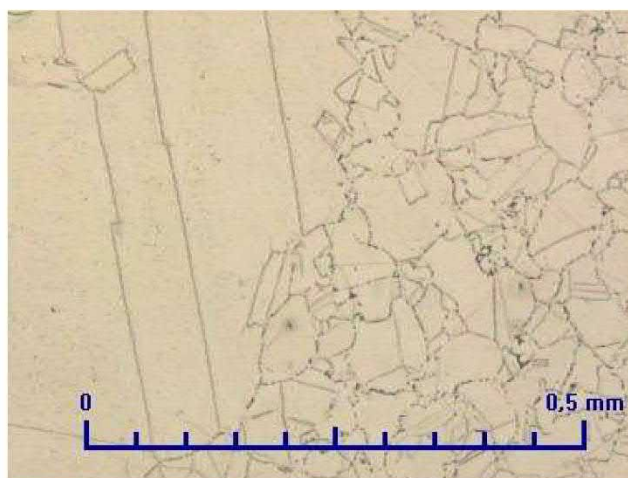
Obr. 8.26 Požadavky na volbu materiálu pro sklářské formy

Sklářský talíř je náročný na výrobu, protože je zde nebezpečí, že výrobním procesem mohou být vnášena do talíře reziduální napětí po předcházejících technologiích.

Ve sklárnách se sklářské talíře vyrábějí převážně z austenitických chromniklových ocelí. Tyto ocele je potom nutné zkoumat z pohledu:

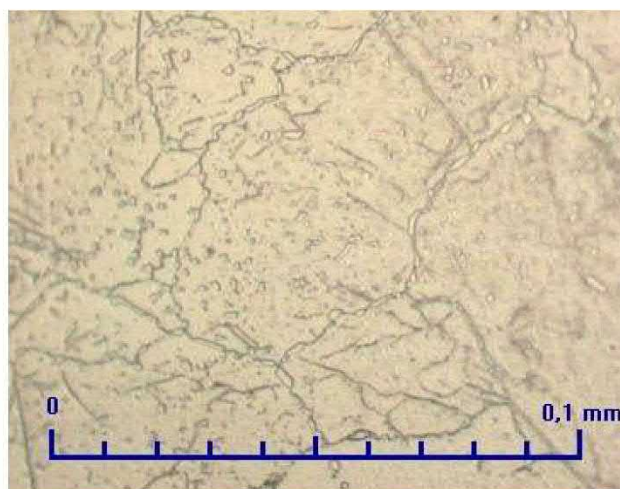
- a) chemického složení materiálů, ze kterých se talíře vyrábějí,
- b) metalografického studia mikrostruktur.

Výchozí struktura těchto sklářských talířů je typická velkou rozdílností ve velikosti zrn, obr. 8.27. Tato konfigurace je nevýhodná i z pohledu napěťových stavů, které se nejvíce projeví při vnějším zatížení materiálu, čímž se degradační proces opotřebení urychluje.



Obr. 8.27 Výchozí materiál – austenitická ocel

Rozložení a charakter vyskytujících se karbidických částic na obr. 8.28 činí tento materiál více či méně citlivý na mezikrystalickou korozi, která se v průběhu teplotního procesu v některých lokalitách na povrchu sklářských talířů projeví velmi výrazně. V případě, že zůstanou na povrchu stopy po opracování, tato koroze vyplní jednotlivé prohlubně mezi rýhami. Proces koroze se projeví i ve vznikajících trhlinách, viz. obr. 8.29, které se zoxidováním rozevírají.

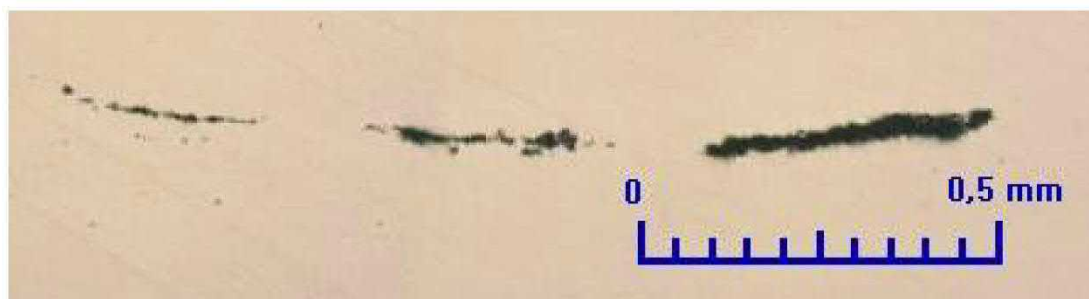


Obr. 8.28 Precipitace karbidů a výskyt delta feritu

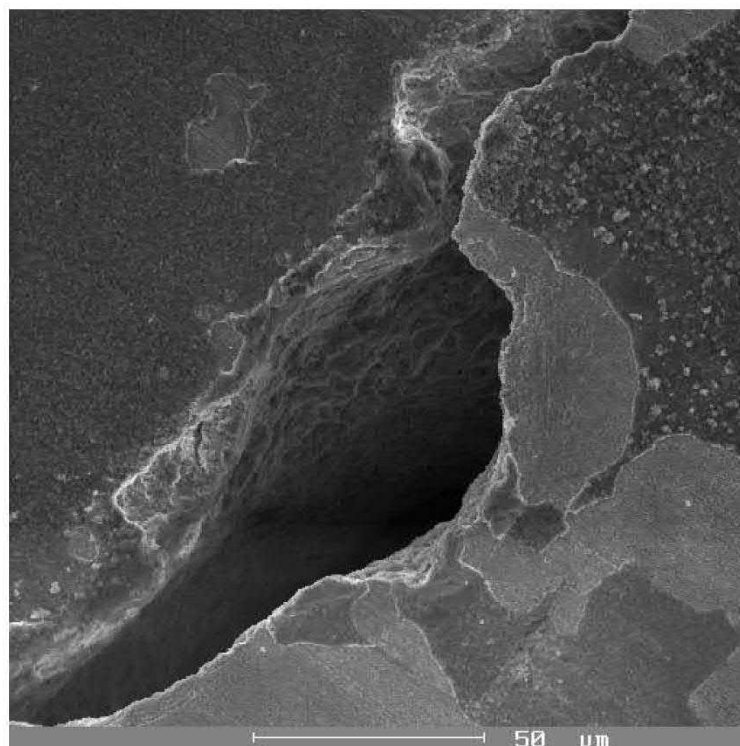


Obr. 8.29 Zoxidovaná trhlina po tepelném zatížení

Největším nebezpečím pro sklářské talíře je výskyt nekovových vměstků na povrchu nebo uvnitř materiálu, které mohou způsobovat další napěťové stavy vedoucí k urychlenému porušování – tedy rychlejší degradaci sklářských forem, obr. 8.30. Výřez talíře s typickými trhlinami, které se mohou vyskytovat u sklářských talířů, byl zkoumán detailně na elektronovém mikroskopu, obr. 8.31.



Obr. 8.30 Výskyt nekovových vměstků



Obr. 8.31 Oblast v okolí trhliny s oxidací

Skokový charakter trhlin vyjadřuje napěťové stavy, které průběžně vznikaly teplotně-mechanickou únavou. Chromniklové austenitické ocele jsou známé tím, že při plastické deformaci dochází nejprve k jejich zpevňování. Teplotní cykly snižují mez kluzu a proto plastické skluzu vznikají již při menších napětích. Plastické skluzu vedou ke zpevnění kovové matrice a k přerozdělení napětí uvnitř zrn a mezi rozdílně velikými zrny.

Zpevňováním plastických oblastí se napětí zvětšuje až dosáhne meze pevnosti, čímž dochází k iniciaci trhlin a dalšímu porušování. Tím dochází ke vzniku vysoké koncentrace napětí, hlavně na vnitřním průměru talíře, který má ostré zakončení. Jedná se o tepelnou únavu, která je umocňovaná průběžným, byť malým zatížením, trhliny jsou zoxidované v celé lomové ploše, která má potom charakter křehkého transkrystalického i interkrystalického porušení.

V případě, že se jedná o defektní talíře, jak znázorňuje obr. 8.32, tj. že mohou mít již iniciované porušení v podobě rýh, necelistvosti nebo dokonce trhlin, celý únavový proces je tak urychlovaný, že životnost se pohybuje řádově jen v několika hodinách.

Teplotní gradienty u složitých geometrických částí, jako je sklářská forma s ostrými přechody, vyjadřují nerovnoměrné teplotní namáhání, které podporuje jednostranné průběžné ohřívání vedoucí k rychlému a nerovnoměrnému opotřebení povrchů talířů v průběhu provozování.



Obr. 8.32 Přední a zadní plocha v oblasti trhlinky

Lze konstatovat, že:

- V případě nedodržení chemického složení se austenitická ocel stává citlivější na vznik a vylučování karbidů, intermediálních fází, delta-feritu, případně sigma-fáze;
- Segregace karbidů na hranicích zrn a precipitace uvnitř zrn vede k náchylnosti oceli k větší oxidaci a tedy k možnému zkřehnutí materiálu. Záleží na velikosti, morfologii a rozložení již vyloučených karbidů;
- Výskyt skluzových pásů, dvojčat, svědčí o přítomnosti zbytkových napětí po plastické deformaci způsobené teplotním nebo mechanickým zatížením;
- Z pozorování na elektronovém mikroskopu lze usoudit, že zůstávají povrchové stopy nerovností po nástroji, jejichž špičky jsou přešetěné. Zoxidování probíhá v jednotlivých rýhách tak, že dochází k odlupování oxidických vrstev;
- Drsnost na povrchu pracovní části sklářského talíře způsobuje zachytávání oleje, nečistot a jiných nánosů, které teplotou získávají větší přilnavost k talíři, čímž je proces opotřebení urychlován;
- „Klikatost“ trhlin, která je daná změnou stavu napjatosti v mikrolokality, svědčí o výskytu různých teplotních polí a výskytu karbidických částí v objemu talíře.

Opatření vedoucí ke snížení opotřebení materiálu

- Dodržení chemického složení materiálu – kontrola atestu;
- Dodržení rozměrové přesnosti vnitřního průměru a tloušťky sklářského talíře;
- Vizuelní nebo mikroskopická kontrola drsnosti pracovního povrchu talíře;
- Povrch sklářských talířů musí být bez jakéhokoliv poškození, beze změny lesku a barvy – vizuelní kontrola;
- Sklářský talíř nesmí mít ani minimální trhlinu, 100 % defektoskopická kapilární metoda kontroly;
- Poloha talířů v držácích musí být vždy stabilizovaná (fixace proti kmitání) a šetrné zacházení s talíři při vkládání a vyjímání z držáků;
- Mazání forem, které ovlivňuje chování povrchu materiálu při teplotním zatížení, musí být optimální jak z hlediska kvality mazacího média (austenitické struktury jsou velmi citlivé na mazuty při 700 °C), tak z hlediska jeho množství, aby nedocházelo ke spalování přebytečného maziva a tím k jeho nalepování na povrch talíře;
- Namátková kontrola sklářských talířů z hlediska metalografie struktury (struktura austenitických zrn by měla být rovnoměrná);
- Při přejímání, balení, ukládání a uchycování musí být dodržena maximální šetrnost při zacházení se sklářskými formami (austenitických ocelí) pro jejich citlivost na případné nežádoucí vnější mechanické působení;
- Nalézt optimální tvar a odstranit ostré zakončení vnitřního průměru talíře, což může být výhodnější i z hlediska tepelné vodivosti;
- Využít výpočtového modelování deformačně-napěťových stavů pro predikci mezních stavů porušováním z procesu kombinovaného opotřebení..

❖ KOROZNÍ ODOLNOST CHRÓM-NIKLOVÉ FERITICKÉ OCELI

Celková korozní odolnost feritických chrómových ocelí plyne z vysokého obsahu chrómu, resp. z jejich dolegování niklem nebo molybdenem. Tyto oceli nacházejí uplatnění v petrochemickém průmyslu, dopravě, vzduchotechnice aj. Průmyslová a přímořská atmosféra není pro tento typ materiálu příliš vhodná. Dále ji není vhodné používat na svařované konstrukce, protože ohřátí v okolí svaru nad teplotu 1000 °C znamená nebezpečí zvýšení křehkosti a náchylnosti k mezikrystalické korozi. Hlavní předností této oceli je lepší odolnost proti koroznímu porušení pod napětím i za přítomnosti chloridů.

Korozivzdorné feritické oceli jsou charakteristické obsahem uhlíku pod 0,1 % a obsahem Cr od 10,5 do 30 %. Tyto oceli jsou typické svou feritickou strukturou v celém intervalu teplot, s možností výskytu karbidů. Pevnostní vlastnosti lze zvýšit plastickou deformací za studena. Při tepelném zpracování feritických ocelí je nutné respektovat tři typy křehnutí a to při vysokých teplotách do 900 °C, dále nad 1 000 °C, křehnutí vylučováním fází σ (při teplotách okolo 700 °C) a křehnutí v oblasti teplot okolo 475 °C. Tyto tři oblasti jsou z hlediska charakteru struktury nevýhodné, proto se v praxi převážně používá žihání v oblasti teplot 780 až 800 °C s řízeným ochlazováním.

Vzhledem k tomu, že tento druh oceli stále patří k materiálům využívaným na součásti dopravních prostředků, je třeba věnovat pozornost feritické oceli z pohledu její odolnosti proti korozi v daném prostředí. Na studium korozních vlastností se využívají expoziční korozní zkoušky v korozních komorách simulujících pracovní prostředí.

Expoziční korozní zkoušky se obvykle provádí v korozních komorách podle STN EN ISO 3231. V tomto případě pro testovanou ocel, byla zvolena expozice trvající 7 dní střídavě v 8 hodinových cyklech v uzavřené korozní komoře za přítomnosti SO₂. Takovéto prostředí simulovalo velmi agresivní průmyslovou atmosféru se 16ti hodinovými cykly v laboratorních podmínkách. Na základě korozních úbytků lze vypočítat korozní rychlost a charakter korozního napadení. Chemické složení hodnocené korozivzdorné feritické oceli udává tab. 8.2 a její strukturní charakteristiku zobrazuje obr. 8.33.

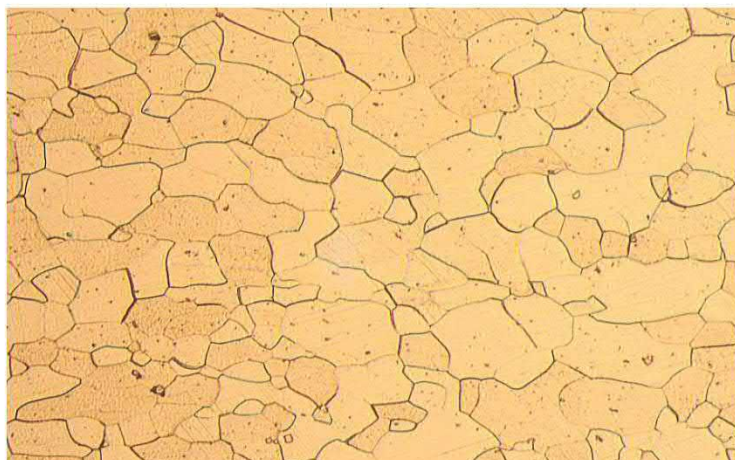
Tab. 8.2 Chemické složení testované oceli 1. 4510

Prvek	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Al
Hm. %	0,04	0,37	0,37	0,02	0,004	16,3	0,20	0,10	0,02	0,12	0,005

Příklad zkoušky v korozní komoře

Zrychlené zkoušky slouží na sledování korozního chování kovů v korozním prostředí různě simulovaných atmosfér, při kterých se obvykle zvyšuje teplota pro dosažení urychlených korozních reakcí. Mezi nejběžnější prostředí patří zkoušky v čisté atmosféře, atmosféře obsahující chloridy (mořská atmosféra), atmosféře obsahující SO₂ (simulovaná průmyslová atmosféra) a kombinace znečištění chloridy a oxidem siřičitým (mořská průmyslová atmosféra). Zkoušky se provádějí v korozní kondenzační komoře, ve které lze připravit požadované prostředí. Zkouška je vhodná

hlavně na posuzování odolnosti kovových materiálů a ochrany povlaků (kovových / nekovových) ve vlhkých, čistých nebo průmyslově znečištěných atmosférách.



Obr. 8.33 Struktura testované feritické oceli (zv. 250x)

Před expozicí je vzorek testované oceli očištěný brusným papírem, odmaštěný v toluenu a po vysušení zvážen na analytických vahách s přesností 10^{-5} g.

Hmotnost testovaného vzorku z feritické oceli před expozicí m_1 byla zvážena 23,78064 g a dále byla změřena plocha $S = 12,8 \text{ cm}^2$. Následně byla realizována korozní zkouška v korozní komoře podle STN EN ISO 3231. Po vyjmutí byl zhodnocen stav vzorku vizuálně, což je dokumentováno na obr. 8.34. Povrch byl napadnutý celkovou nerovnoměrnou korozí, jejíž charakter se projevil ihned po prvním dni v komoře. Korozní zplodiny hnědočerné barvy pórovité morfologie ulpěly na povrchu v různých tloušťkách.



Obr. 8.34 Korozní zplodiny na povrchu testované oceli po expozici v korozní komoře

Po odstranění korozních produktů bylo potvrzené nerovnoměrné korozní napadení jak je patrné z obr. 8.35. Vzorek byl znovu zvážen na analytických vahách a určena jeho hmotnost m_2 , která byla 23,53960 g. Z naměřených hodnot, se vypočítala korozní rychlost v_k , podle vzorce $(m_1 - m_2) / S$. Čas expozice byl podle normy stanovený 7 dní, viz. 8.1.

$$\begin{aligned} \bar{V}_k &= (23,78064 - 23,53960) / (12,8 \cdot 7) \\ V_k &= 0,0027 \text{ g} \cdot \text{cm}^2 / \text{den} \\ V_k &= 0,985 \text{ g} \cdot \text{cm}^2 / \text{rok} \end{aligned} \quad (8.1)$$



Obr. 8.35 Očištěný povrch po odstranění korozních zplodin



Obr. 8.36 Charakter korozního napadení po expozici v korozní komoře
(neleptané, zv 100x)

Na základě výpočtu lze konstatovat, že korozní rychlost je velmi vysoká a materiál je málo odolný proti agresivní průmyslové atmosféře.

Z metalografického hodnocení (obr. 8.36), je patrné, že se jedná o celkovou, velmi nerovnoměrnou korozi, která zasahuje materiál do poměrně velké hloubky. Hodnocením korozního napadení na naleptaných vzorcích lze poukázat na to, jak struktura modifikuje charakter korozního napadení (obr. 8.37).



Obr. 8.37 Charakter korozního napadení, sledovaný na leptaných vzorcích
(zv 100x)

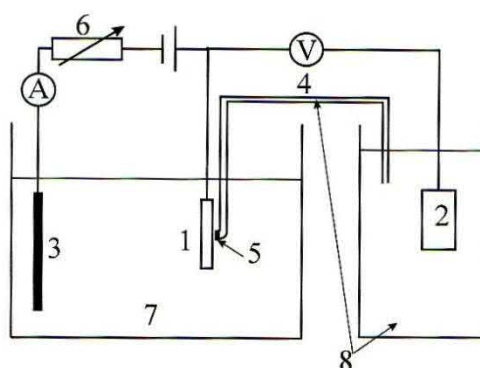
Elektrochemické zkoušky

Elektrochemické metody jsou založené na teorii elektrochemické koroze ve vodivém prostředí a jejich využití se uplatní při zjišťování elektrochemických charakteristik kovových materiálů v různých korozních podmínkách. Z výsledků elektrochemických metod lze vypočítat předpokládanou korozní rychlost úbytku materiálu v daném prostředí a zjistit náchylnost materiálu na bodovou, interkristalickou, galvanickou korozi, korozní porušování apod.

Potenciodynamická zkouška

Potenciodynamickou zkouškou se potenciál vzorku postupně posouvá anodickým směrem (případně katodickým), což znamená, že se vzorek chová jako anoda a postupně koroduje. Potenciál vzorku ponořeného do korozního roztoku (elektrolytu) se vůči referenční elektrodě ustálí na určité hodnotě, která odpovídá velikosti korozního potenciálu E_{kor} . Při hodnotě E_{kor} je vzorek v rovnováze s prostředím (anodické a katodické proudy mají stejnou velikost) a rychlost oxidace vzorku je stejná jako rychlost redukce. Jestliže se použije vnější regulovatelný zdroj napětí a vzorek se začne polarizovat (v anodickém nebo katodickém směru), vychyluje se z rovnovážného potenciálu. Polarizace vzorku v kladném směru (vzorek se chová jako anoda) způsobí, že se zvýší anodický proud na úkor katodického a vzorek začne korodovat. Princip potenciodynamické zkoušky je schematicky znázorněn na obr. 8.38.

Polarizační charakteristika je měřena tak, že se sleduje závislost proudové hustoty na potenciálu vzorku vůči referenční elektrodě. Z toho důvodu, že proudová hustota může v průběhu měření růst i o několik řádů, používají se logaritmické souřadnice a potenciál je lineární – výsledná křivka je zobrazená v semilogaritmických souřadnicích. Takový diagram se nazývá potenciodynamický polarizační diagram nebo potenciodynamická polarizační křivka.



Obr. 8.38 Princip potenciodynamické zkoušky (1-vzorek, 2-referenční elektroda, 3-pracovní elektroda, 4-solný můstek, 5-polopropustná membrána, 6-regulační prvek, 7-elektrolyt, 8-roztok vlastních iontů referenční elektrody)

Tafelovou (Sternovou) analýzou naměřené křivky se určí sklon anodické (b_a) a katodické křivky (b_k). Získané Tafelové křivky se protínají v hodnotě korozního potenciálu (E_{kor}) a korozní proudové hustoty (i_{kor}). Sternovou analýzou potenciodynamické křivky se zjišťuje polarizační odpor (R_p) jako sklon křivky při nulové

hodnotě proudové hustoty. Korozní proudovou hustotu potom lze vypočítat podle vzorce:

$$i_{kor} = \frac{1}{2,303 \cdot R_p} \cdot \frac{b_a \cdot |b_k|}{b_a + |b_k|} \quad (8.2)$$

Na základě experimentálně zjištěné proudové hustoty lze pomocí Faradayova zákona určit korozní rychlost:

$$r_{kor} = \frac{i_{kor} \cdot M_n}{\nu \cdot F}, \quad (8.3)$$

kde M_m je hmotnost 1 molu látky (g), ν je valence prvku a F je Faradayova konstanta (C).

Podmínky probíhajících potenciodynamických testů

Potenciodynamické zkoušky feritické legované oceli byly vykonané v 0,1 molárním (pH = 7,03, vodivost 15,94 mS) a 1 molárním (pH = 6,66, vodivost = 88,3 mS) roztoku Na₂SO₄ tak, aby byl účinek nejagresivnější složky průmyslové atmosféry SO₂. Měření probíhalo v rozmezí potenciálů od -250 mV po 250 mV proti volnému potenciálu feritické oceli, který se ustaloval 10 min před posunem potenciálu. Rychlost posunu potenciálu byla 1 mV/s a měřená plocha vzorku 1 cm². V tab. 8.3 jsou uvedené výsledky měření v 0,10 molárním roztoku Na₂SO₄.

V tab. 8.4 jsou změřené elektrochemické charakteristiky získané potenciodynamickou zkouškou testované oceli, ale v agresivnějším roztoku – 1 M Na₂SO₄.

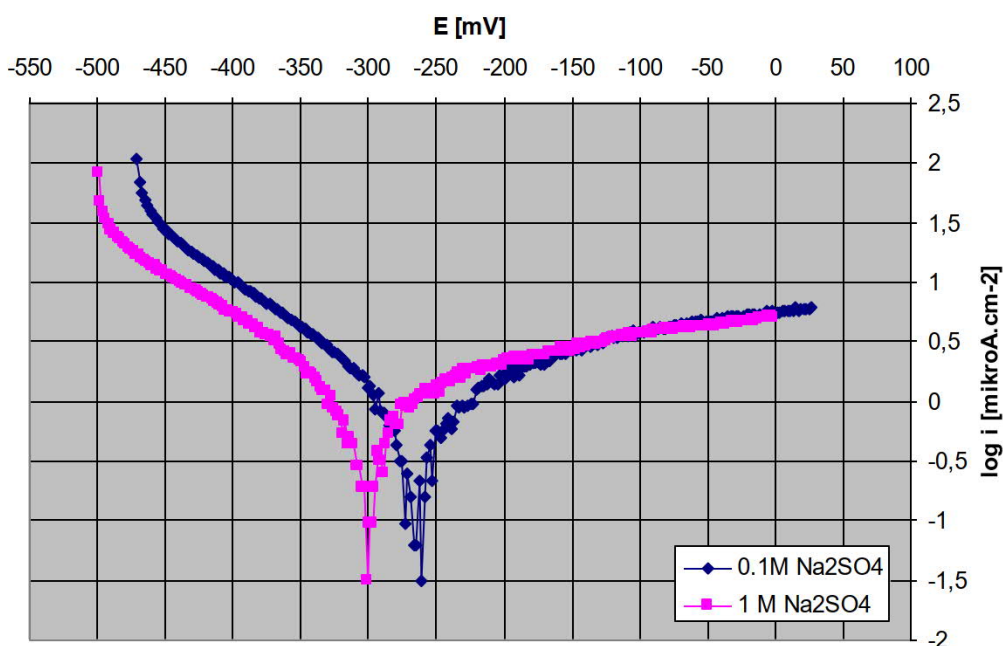
Průběh potenciodynamických křivek, které byly pro testovanou ocel naměřené v obou roztocích, je znázorněn na obr. 8.39. Podle získaných výsledků potenciodynamické zkoušky je vidět, že se stoupající koncentrací síranů vzrůstá korozní rychlost testované feritické oceli, což je průkazné na hodnotách proudové hustoty. Náchylnost ke korozi prezentuje i posunutí korozního potenciálu k zápornějším hodnotám až o 40 mV.

Tab. 8.3 Elektrochemické charakteristiky testované oceli v 0,1 M roztoku Na₂SO₄

0.1M Na ₂ SO ₄	E_{kor} [mV]	i_{kor} [mikroA/cm ²]	R_p [ohm]
m.č.1	-259,6	0,9638	31720
m.č.2	-269,5	0,9972	34290
průměr	-264,6	0,9805	33005
sigma	7,0	0,0236	1817
sigma %	2,65 %	2,41 %	5,51 %

Tab. 8.4 Elektrochemické charakteristiky testované oceli v 1 M roztoku Na₂SO₄

0.1M Na ₂ SO ₄	E_{kor} [mV]	i_{kor} [mikroA/cm ²]	R_p [ohm]
m.č.1	-304,7	1,5131	23900
m.č.2	-303,8	1,2856	29620
průměr	-304,3	1,4	26760,0
sigma	0,6	0,2	4044,7
sigma %	0,21 %	11,50 %	15,11 %



Obr. 8.39 Potenciodynamické diagramy testované oceli v 0,1 a 1 molárním roztoku Na₂SO₄

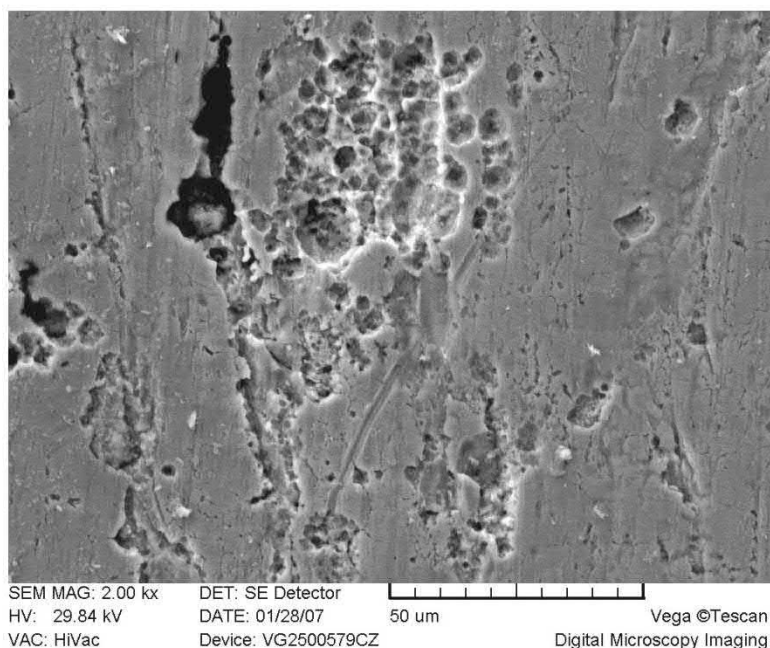
Dlouhodobé korozní zkoušky v kondenzační komoře

Pro tyto dlouhodobé zkoušky byla využita korozní kondenzační komora (Gebr. Liebisch S 400 M TR), ve které lze připravit požadované prostředí. Doba zkoušky odpovídala specifikaci pro feritickou ocel.

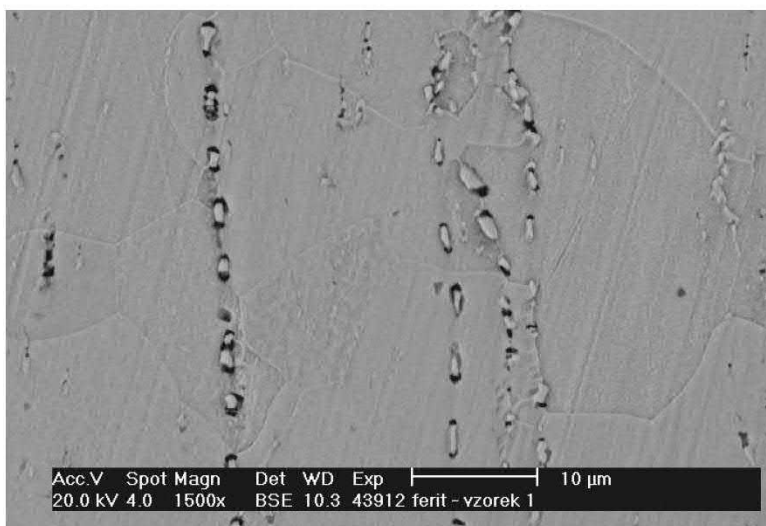
Z dodaných materiálů byly vyhotoveny vzorky pro korozní zkoušky za následujících podmínek:

- 1500 hodin, při 50 °C a 70 °C v 5 % NaCl,
- 3000 hodin, při 50 °C a 70 °C v 5 % NaCl.

Při delší expozici se korozní proces projevoval v místech porušení materiálu výrazněji. Příklad korozního napadení feritické korozivzdorné oceli, zobrazuje obr. 8.40.



Obr. 8.40 Povrch materiálu 1.4016, detail výchozí dekoheze v oblasti iniciace koroze povrchu



Obr. 8.41 Rozložení oxidických částic v Cr-Ni feritické oceli

Studium prokázalo, že feritická ocel 1.4510 je málo vhodná pro agresivní průmyslovou atmosféru. Výrazné korozní napadení povrchu vzorku se projevilo už po první osmihodinové expozici v korozní komoře za přítomnosti SO₂.

Korozní napadení lze charakterizovat jako celkové s velmi různorodou hloubkou napadení, což je podmíněno výskytem oxidických nebo jiných intermediárních částic, obr. 8.41. Korozní úbytek za rok, vypočítaný na základě expoziční zkoušky, je 9,85 kg·m²/rok.

Potenciodynamické zkoušky potvrdily korozní nestabilitu oceli v atmosféře s obsahem SO₂ a také to, že s jeho vzrůstající koncentrací roste náchylnost nejen ke korozi, ale i zvýšení korozní rychlosti.

V případě použití korozivzdorných ocelí ve velmi agresivním prostředí jsou důležité korozní zkoušky, které prokážou, jak velkou životnost TO lze v takovém prostředí predikovat bez toho, že dojde k MS porušování nebo k nepřijatelnému narušování povrchů technických objektů.

❖ HADFIELDOVA OCEL PRO ODLITKY

Tato část se zabývá výrobou tenkostěnných odlitků z Hadfieldové ocele, který je odléváný do skořepin. V tomto odlitku se nachází poměrně hodně technologických vad ve formě ředin nebo trhlin. Z pohledu materiálového inženýra je nutný systémový přístup k dané problematice, protože se jedná o technologii výroby, která se odráží na celkové kvalitě hotového výrobku. Zda tento bude uznán za „dobrý“ nebo „zmetkový“, bude záviset na mnoha aspektech.

Problém primárních vad

Výrobci velmi často stojí před problémem, zda mohou na trh pustit výrobek, který je více nebo méně zatížený nějakou primární výrobní vadou. Z pohledu materiálového inženýra by odpověď byla jednoznačná: v nové součásti (výrobku, konstrukčním prvku) by neměla být žádná primární vada a trhlina už vůbec ne, protože jakékoliv zatížení by mohlo způsobit rychlý vznik mezního stavu porušení, čímž by součást nemohla nadále plnit svoji funkci, ke které byla předurčena.

Z pohledu inženýrské mechaniky se tento problém dá řešit buď experimentálním, nebo výpočtovým modelováním:

- Experimentální modelování vyžaduje, aby existovaly vstupní informace o zatížení (silové, deformační, teplotní aj.) a o vazbách tělesa (součásti), ke svému okolí např. typ vazby, umístění, tuhost vazby aj.;
- Výpočtové modelování potom vychází z lomové mechaniky, jak se bude trhlina chovat při různém zatížení. Toto si vyžaduje informace o deformačně-napětových stavech ve sledovaném tělese a v okolí vyskytujících se trhlín dále informace o materiálových parametrech, které budou rozhodovat o vzniku mezního stavu stabilního nebo nestabilního šíření trhliny;
- Deformačně-napětové stavy lze určit i výpočtovým modelováním, např. pomocí metody konečných prvků (MKP).

Pro použití této aplikace výpočtového modelu jsou důležité vstupní informace o:

- Geometrii tělesa a jeho velikosti (složitý tenkostěnný odlitek – kryt zámku);
- Druhu zatížení tělesa (není uvedeno proti jakému zatížení tento kryt bude odolávat, zda to bude statické, nebo dynamické, např. při násilném vniknutí a likvidaci zámku);
- Vazbách tělesa ke svému okolí (jak bude kryt zámku upevněn, které body budou pohyblivé a které uchycené napevno);
- Materiálové charakteristiky (lze je přebrat z norem – jsou k dispozici);
- Morfologie povrchů (různé výstupky na povrchu se nedají označit, zda jsou funkční nebo to jsou technologické přídatky);

- Charakter vystupujících trhlin (je potřebná statisticky významná škála metalograficky připravených struktur s vyhodnocením trhlin – jaký charakter mají primární trhliny).

Popis zkoumaných součástí

Jedná se o součást krytu bezpečnostního zámku tedy odlitku vyrobeného skořepinovým litím z Hadfieldové austenitické oceli o složení viz. tab. 1.

Tab. 8.5 Chemické složení lité Hadfieldové oceli

Chemický prvek	Obsah v %
C	1,1 – 1,3
Mn	11,0 – 13,5
Si	0,7
Cr	0,7 – 1,2
P	max 0,09
S	max 0,05

Austenitická manganová ocel (Hadfieldova) je známá svoji schopností se po plastické deformaci za studena, zpevňovat a tedy zvyšovat odolnost proti opotřebení. Tato schopnost bude využita v těch lokalitách krytu zámku, kde přichází do styku s klíčem. Pro komplexní přístup k výpočtovému modelování bude důležité znát, která jsou slabá místa v tomto odlitku z hlediska silového působení.

Z hlediska technologie se výroba těchto odlitků jeví jako vysoce náročná, protože se jedná o ocel, která má velkou lineární roztažnost a malou tepelnou vodivost. Tyto fyzikální vlastnosti mohou částečně ovlivnit proces tuhnutí taveniny příp. i zabíhavost taveniny. Z těchto poznatků se vycházelo i při přehodnocování teploty lití a proto byly odzkoušeny teploty: 1500, 1530, 1560 a 1620 °C, při kterých byla sledovaná změna chemických prvků, struktura, charakter a morfologie vyloučených karbidů, příp. výskyt jiných fází.

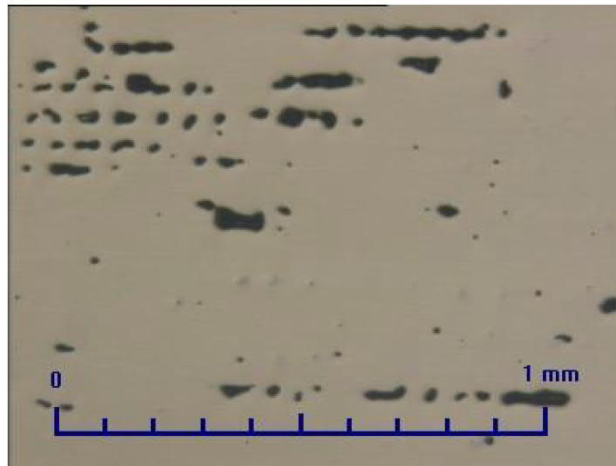
Hodnocení struktur

Při teplotě 1500 °C byly v nenaleptaném stavu sledované (podle normy STN 42 0015) řediny obr. 8.42 a trhliny obr. 8.43. V naleptané struktuře obr. 8.44, byly pozorované poměrně velké zrna austenitu s výskytem jehlicovitých karbidů (Fe, Mn) 3°C a α -feritu, což je dobře viditelné při větším zvětšení na obr. 8.45.

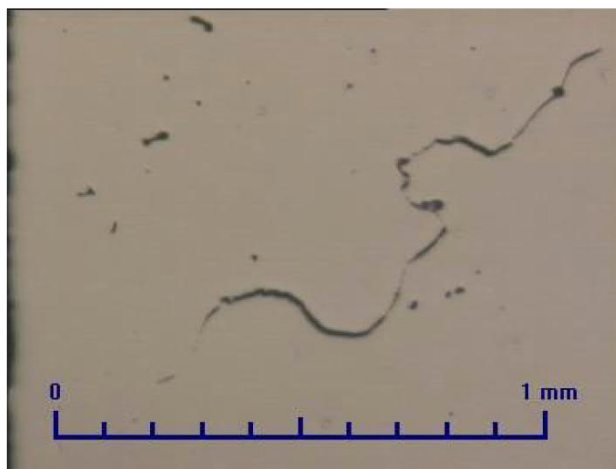
Teplota lití 1620 °C se ukázala jako nejvýhodnější z hlediska zabíhavosti a výskytu trhlin (ty se vyskytovaly jen ojedinele). Řediny měly jemnější morfologii a sporadické rozložení, obr. 8.46.

Tavení oceli probíhalo v elektrické peci o výkonu 0,6 KV s desoxidací FeSi.

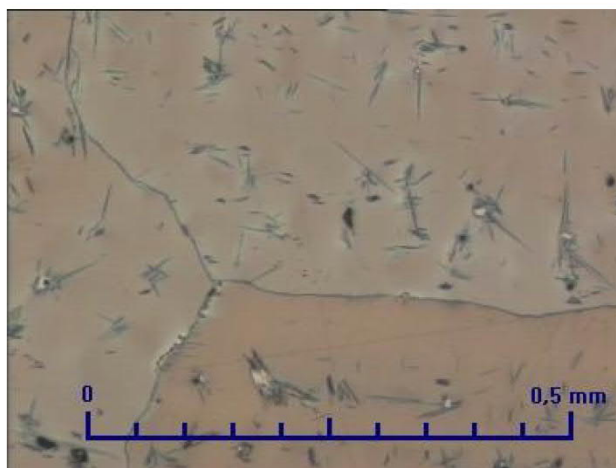
Odlitky se tepelně zpracovávaly s rychlostí ohřevu 10 °C/min, na 1000 °C po setrvání 30 min. se dohřály se stejnou rychlostí na teplotu 1070 °C s výdrží 120 min. a následným ochlazením v oleji.



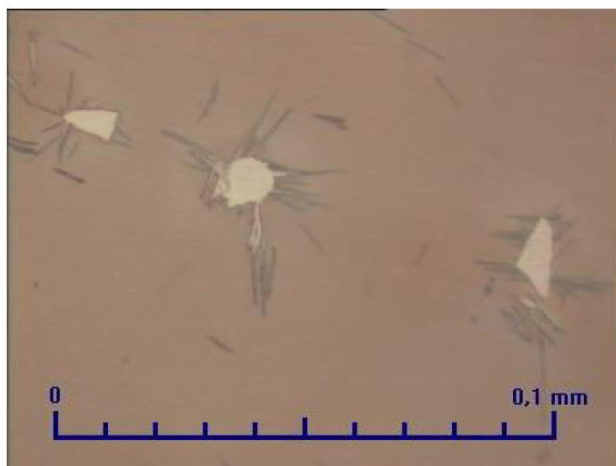
Obr. 8.42 Výskyt ředin při lici teplotě 1500 °C



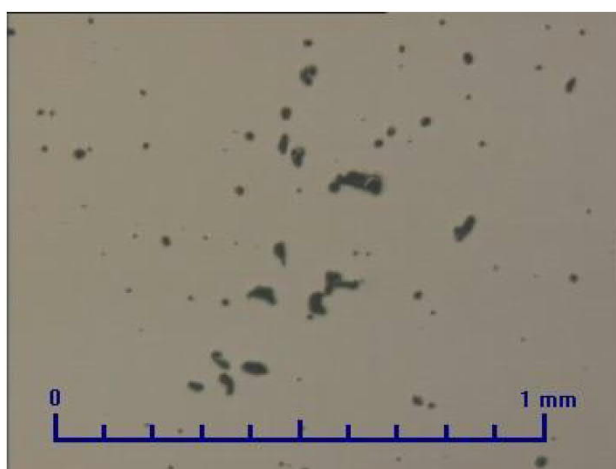
Obr. 8.43 Struktura s trhlinou



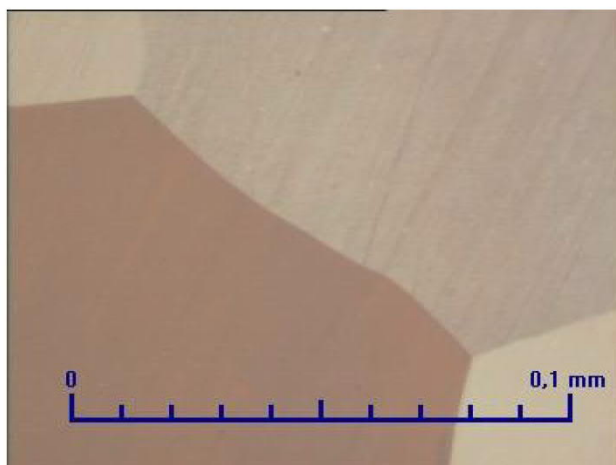
Obr. 8.44 Licí struktura při teplotě 1500 °C



Obr. 8.45 Detail struktury austenitu s výskytem karbidů a α -feritu



Obr. 8.46 Struktura s teplotou lití 1620 °C

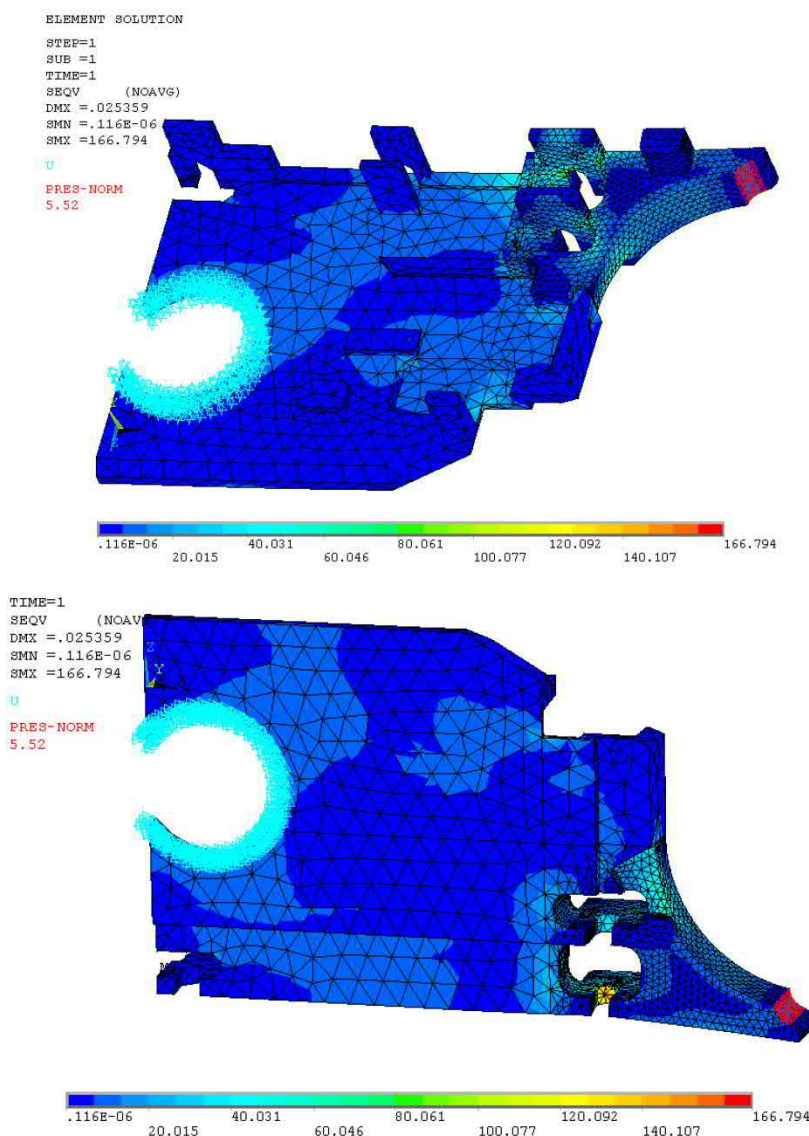


Obr. 8.47 Struktura po tepelném zpracování

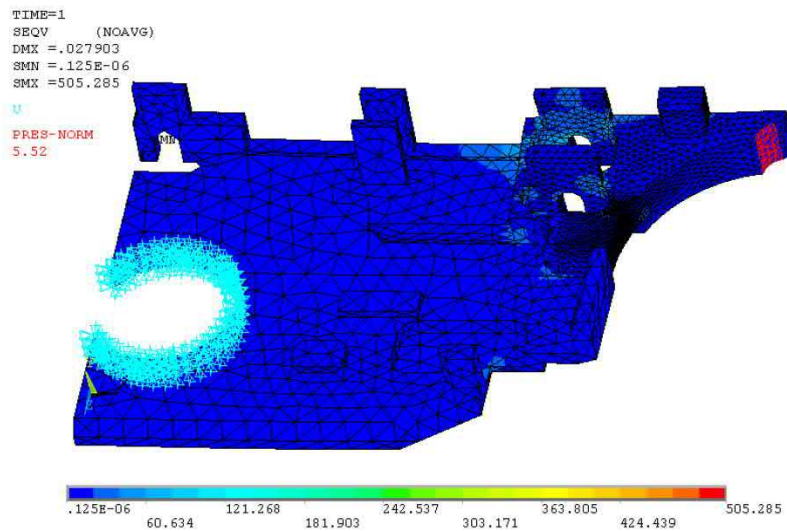
Tepelným zpracováním se eliminovaly jehlicovité karbidy, ale austenitické zrno zůstávalo zachované v poměrně velké zrnitosti obr. 8.47, kdy se už nedala vyhodnotit velikost zrn podle normy.

Výpočtové modelování

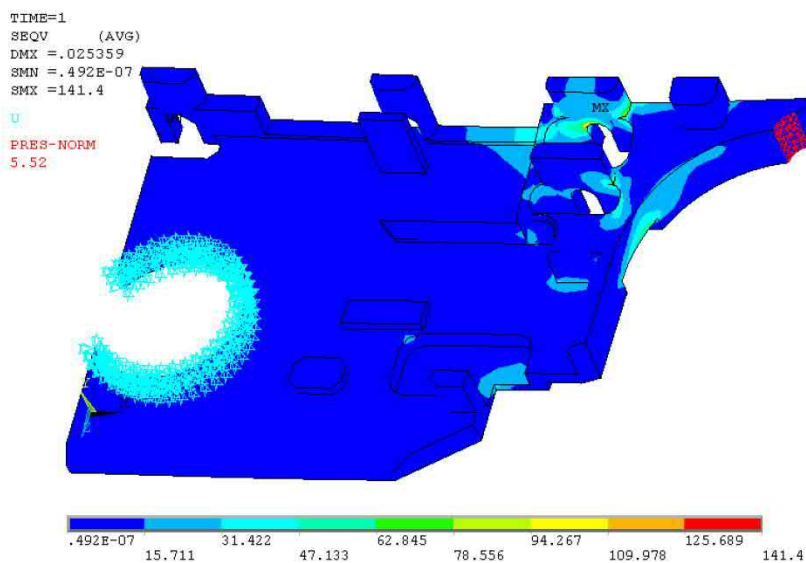
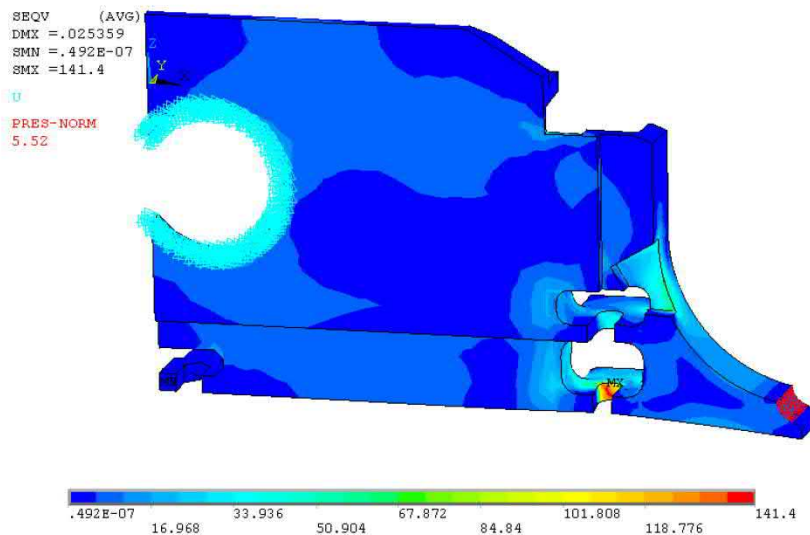
Z toho důvodu, že nebyla k dispozici výkresová dokumentace, realizovalo se výpočtové modelování na modelové součásti jedné poloviny krytu zámku z hlediska tvaru a zatížení. Kryt zámku byl uchycen v místě otvoru (dá se předpokládat, že kryt zámku v tomto místě, bude propojený klikou – tedy uchycen napevno). Geometrie modelu je tvořena tak, že zahrnuje uchycení krytu zámku ve spojení s dveřmi a dále ve vztahu k určování napjatosti v místech technologických trhlin. Do výpočtu byly zadány materiálové charakteristiky: $E = 21000 \text{ MPa}$, Poissonova konstanta 0,3. Modelovaný byl stav, kdy se v tělese nevyskytovala trhlina (obr. 8.48) a stav, kdy těleso bylo zatíženo trhlinkou (obr. 8.49). Dále působila silová výslednice o velikosti pouhých 10 N v místě „jazýčka“ zámku. Byl sledovaný deformačně-napěťový stav v okolí nejslabšího místa, obr. 8.50 a obr. 8.51. V kořenu technologické trhliny jsou redukovaná napětí i napětí σ_1 podstatně menší než ve slabých místech, kde se trhliny nevyskytují. Na základě těchto předpokladů by byla pravděpodobnost, že se trhlina nebude dále šířit.



Obr. 8.48 Síť výpočtového modelu bez trhliny



Obr. 8.49 Síť výpočtového modelu s trhlinou



Obr. 8.50 Zámek bez trhlinky

- Rychlosti ochlazování;
- Teplotě odlévání;
- Dokončovacích operacích;
- Úpravě, vytloukání odlitků z forem;
- Povrchových úpravách;
- Tepelném zpracování;
- Manipulaci s hotovými odlitky;
- Lidském faktoru aj.

Pro odstranění zmetkovitosti zkoumaných odlitků doporučujeme:

1. Přehodnotit geometrii součásti z hlediska technologie odlévání – rádiusy, přechody stěn, technologické přídavky;
2. Kontrolovat teplotní spát ochlazování – správným návrhem a výrobou skořepin;
3. Dodržet režim tepelného zpracování – rychlost ohřevu, rychlost ochlazování, výšku teploty pro Hadfieldovu manganovou ocel;
4. Dodržet ověřenou lící teplotu (1620 °C) při odlévání do skořepin;
5. Provést výpočtové modelování deformačně-napět'ových stavů dané součástí se vstupy získanými z experimentálního modelování.



Korozní opotřebení helmy

9. KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY VERSUS OPOTŘEBENÍ

Každý materiál má své specifické vlastnosti, které ho předurčují k použití u technických objektů, vystavených různým formám opotřebení. Je velmi důležité znát výchozí strukturu materiálu pro zaujmutí stanoviska k následným degradačním procesům, probíhajícím na daném materiálu.

Na jakost oceli má vliv kvalita metalurgického procesu, obsah nekovových vměstků ve struktuře, jejich množství, velikost, tvar, chemické složení a způsob distribuce. Obsah vměstků je závislý na čistotě výchozích surovin a použité technologii výroby oceli, dále na dezoxidaci a způsobu lití. Tváření (např. válcování) má velký vliv na velikost, tvar a rozložení vměstků. Mikročistota oceli je považovaná za jeden z rozhodujících faktorů ovlivňujících rychlost a velikost opotřebení. Obsah nečistot (vměstků) urychluje proces jakéhokoliv opotřebení, protože nečistoty iniciují napětí vedoucí k porušení.

Při cyklickém zatěžování plechů, jaké představuje např. dynamické působení abrazivních částic, se na povrchu vytvářejí persistentní skluzová pásma. Pokud působí napětí rovnoměrně určitým počtem cyklů, dochází k tvorbě zárodků únavových trhlin. Únavové chování daného materiálu je velmi závislé na jakosti povrchu. Je-li větší drsnost povrchu, oduhličení povrchu, vady, mikrovruby včetně vměstků, snižují se tím únavové vlastnosti materiálu. Korozní prostředí může na ocelový plech působit buď plošně nebo bodově při tvorbě korozních mikročlánků. Proces opotřebení je pak urychlovaný agresivním prostředím, vlhkostí nebo teplotou.

Povrchová vrstva vykazuje nižší napětí pro vznik plastických deformací než vnitřní část materiálu. V povrchové vrstvě je pohyb dislokací maximální a strukturní bariéry proti jejich pohybu bývají nejvíce narušeny. Z praktických zkušeností je známé, že u nezpevněného povrchu kovových těles může být lokální mez skluzu snížena až na polovinu průměrné hodnoty v průřezu pozorovaných částí. Agresivní účinky prostředí se převážně koncentrují na povrchu součástí. Vlivem rozrušení vazby mezi zrny dochází i ke snížení modulu pružnosti. Tyto změny vlastností materiálu v povrchové vrstvě jsou velmi důležité při sledování rozvoje únavových trhlin. Povrchová vrstva je tedy nejslabší částí z celého objemu materiálu a je nejvíce náchylná na iniciaci trhlin.

Proces vzniku a šíření trhliny se uplatňuje při MS porušování, které bylo způsobeno opotřebením povrchu, kde zaznamenáváme typický průběh v následujících etapách:

- a) *iniciace trhliny*, která se objevuje jako důsledek porušení povrchového filmu, vycházejícími dislokacemi ve skluzových pásmech, se vznikem bodových poruch;
- b) *rozpuštění kovu v místech koncentrace napětí* (za předpokladu tahových napětí v povrchové vrstvě);
- c) *dosažení kritické koncentrace napětí v mikrodefektu*, který mohl vzniknout i elektrochemickou korozí.

Šíření trhlin v korozním prostředí se uskutečňuje skokovitým mechanismem. Tahové napětí, které způsobuje korozní porušování, bývá převážně vyvolané vnějším zatížením a zbytkovým napětím v materiálu. Predikce budoucích mezních stavů si vyžaduje specifikaci dominantních faktorů v procesu opotřebení ovlivňujících vznik a šíření trhlin z povrchu do vnitřního objemu materiálu. Toto vyžaduje i správnou

volbu materiálu podle toho, jak bude materiál v daných součástech, nebo konstrukčních prvcích, provozně zatěžovaný.

V následujícím textu jsou uvedené příklady materiálů vhodných pro návrh TO, které budou vystaveny některému druhu opotřebení.

9.1. VÝBĚR MATERIÁLŮ ODOLNÝCH PROTI OPOTŘEBENÍ

❖ Oceli

Z nízkolegovaných ocelí jsou (na základě poznatků získaných ze zkoušek opotřebení) nejvýhodnější oceli 14 209 kalené, 14 220 cementované a kalené a 14 223 cementované a kalené na teplotu 200 °C s odolností proti opotřebení nebo oceli třídy 15 330 kalené na 630 °C a nitridované, případně ocel 16 220 cementovaná a kalená.

Dále je vhodná ocel třídy 14 320 s bainitickou strukturou nebo z litých ocelí patří k abrazivně odolným, materiály označované podle ČSN: 42 2735, 42 2736, 42 2739, 42 2753, 42 2767, 42 2920 – ocel manganová austenitická, 42 2921 – ocel Mn-Cr-austenitická.

K známým materiálům patří manganová ocel se zvýšenou odolností proti opotřebení, tzv. Hadfieldova ocel, která je typická tím, že v průběhu dynamického zatížení vykazuje tendenci ke zpevňování. Do této kategorie ocelí patří materiály označované 17 618, 42 2920, 42 2921 s obsahem Mn 11 až 14 %. Obvyklé chemické složení tohoto materiálu udává tab. 9.1.

Tab. 9.1 Chemické složení Hadfieldské oceli

Prvek	C	Mn	Si	S	P
Hm. %	1–1,5	14,5	max. 1,0	max. 0,10	max. 0,10

❖ Vermikulární litina, legovaná hliníkem

Ověřený materiál z vermikulární litiny o chemickém složení (v hmot. %) udává tab. 9.2.

Tab. 9.2 Chemické složení vermikulární litiny legované hliníkem

Prvek	C	Mn	Si	S	P	ISiM	FeSi	Al
Hm. %	3,3–3,5	0,60–0,65	2,3–2,4	0,011	0,035	0,45	1	1,8–2,0

Mechanické vlastnosti vermikulární litiny legované hliníkem: $R_m = 540$ MPa; $KC = 16,4$ J/cm²; tvrdost = 185 HB.

Specifikace mikrostruktury: grafit III G; matrice Fe70.

Vermikulární litina je charakteristická rozložením grafitu, který sestává z množství vzájemně propojených grafitových seskupení o hustotě typické pro eutektickou buňku. Struktura matrice vermikulární litiny legované hliníkem je tvořena feritem a perlitem. Hliník a křemík jsou ve feritu rozpuštěny substitučně tak, že zastupují atomy železa v krystalické mřížce Fe α , čímž způsobují jeho substituční zpevnění.

Při tavení, legování a lití je nutno akceptovat opatření vyplývající z vysoké afinity hliníku ke kyslíku, dusíku a vodíku, tj. vyšší přehřátí taveniny, předehřívání legur a jejich rychlý ponor do taveniny.

Tento odzkoušený materiál je odolný proti korozi, kavitaci, abrazivnímu opotřebení a adhezivnímu opotřebení. V současné době se využívá pro součásti zemědělských strojů a zařízení, které jsou ve styku se zeminou a jsou vystavené mimo abrazivního a korozivního opotřebení velkému dynamickému namáhání.

❖ **Bainitická tvárná litina**

Návrh tohoto materiálu pro součásti vystavené opotřebení vychází ze skutečnosti, že se jedná o materiál, u kterého je experimentálně ověřena jeho odolnost proti různým mechanismům opotřebení. Výroba vychází z tvárné perlitické litiny, jejíž jakost se zvyšuje kalením a zušlechťením. Austenit je nasycován uhlíkem jednak z přítomného grafitu a jednak z cementitu. Izotermický rozpad austenitu charakterizuje rozpad podchlazeného austenitu na bainit. V bainitické oblasti okolo 350 °C je nejvyšší rychlost přeměny se zvětšující se výslednou tvrdostí struktury. Chemické složení (v hmotnostních %) může odpovídat tab. 9.3.

Tab. 9.3 Chemické složení výchozí struktury bainitické tvárné litiny

Prvek	C	Mn	Si	S	P
Hm. %	3,5	0,68	2,8	0,04	0,021

Mechanické vlastnosti litiny: $R_m = 450 \text{ MPa}$; $KC = 18,8 \text{ J/cm}^2$; tvrdost = 180 HB.

Tato bainitická litina je modifikovaná 0,15 % prvky na bázi komplexních slitin lantanoidů s následujícím očkováním 0,5 % FeSi 75 do proudu kovu.

Působení izotermického zušlechťování na strukturu ovlivňuje mechanické vlastnosti této tvárné litiny s globulárním tvarem grafitu. Základní podmínkou změny struktury a tím i změny vlastností je přeměna výchozí struktury na homogenní austenit, pokud nehrozí zhrubnutí austenitického zrna.

Rychlost bainitické přeměny podstatnou mírou ovlivňuje teplota izotermického rozpadu austenitu. Při vyšších rychlostech rozpadu austenitu je heterogenita jednotlivých strukturních složek výraznější. V teplotách okolo 400 °C je rychlost bainitické přeměny buď velmi malá nebo neprobíhá vůbec i když zůstala feriticko-perlitická matrice. Tvárná bainitická litina při teplotě austenitizace 860 °C a době výdrže 30 minut, teplotě izotermického rozpadu austenitu 20 °C, času rozpadu 90 minut dosahuje vysokých hodnot mechanických vlastností. Nevznikají ani trhliny ve struktuře a nevyskytuje se ve struktuře zbytkové napětí.

❖ **Litina ADI**

Litina ADI byla vyvinuta speciálním tepelným zpracováním litiny s kuličkovým grafitem jako náhrada klasické manganové oceli. Chemické složení výchozí litiny pro výrobu odlitků z ADI je podobné jako u běžně vyráběné litiny s kuličkovým grafitem. To znamená, že obsahuje přibližně 3,6 % C, 2,5 % Si, 0,3 % Mn, max. 0,015 % S, max. 0,06 % P a 0,035 až 0,060 % Mg. Kromě toho se k základnímu složení přidávají legující prvky (např. Cu, Ni, Mo), které nemají za účel zvýšení pevnosti nebo tvrdosti odlitku, ale přidávají se pro podporu správného průběhu tepelného zpracování.

Podstatou tepelného zpracování je izotermické neboli mezistupňové zušlechťování. Odlitek se nejprve ohřeje na teplotu 850 až 950 °C s dobou výdrže 1 až 3 hodiny.

Během této doby se základní hmota stane plně austenitickou a nasytí se uhlíkem; po celkové austenitizaci je odlitek izotermicky zušlechťen v kalícím prostředí při teplotě 230 až 400 °C a dále je při této teplotě udržován po dobu půl až čtyři hodiny. Výdrž na této teplotě určuje konečnou strukturu a vlastnosti odlitků z ADI.

Mikrostruktura ADI je mezi litinami ojedinělá. Skládá se z jehlicovitého feritu a stabilního austenitu s vysokým obsahem uhlíku. Tato kombinace strukturních složek propůjčuje ADI velkou pevnost a tažnost při zachování velké tvrdosti. Litina je normována (DIN EN 1564, ASTM A 897M-90) a její použití je pro různé součásti značně široké. Často je odlévána s výchozí strukturou feritickou, zabezpečující výbornou obrobitelnost, kdy tepelné zpracování následuje až po konečném opracování, případně se provádí jen dobroušení některých rozměrů.

Litina ADI má kombinaci vlastností, která jí umožňuje konkurovat ocelím ve velmi rozmanitých aplikacích, proto je tato litina také výhodná pro výrobu součástí, které jsou vystaveny různým formám opotřebení.

❖ Termoplastické materiály

Materiály na bázi ultravysokomolekulárního polyetylenu představují materiál, který pro své jedinečné vlastnosti, jako je vysoká houževnatost, nízký součinitel tření a odolnost vůči opotřebení, nachází uplatnění v celé řadě strojírenských aplikací.

Vybrané druhy – materiály Solidur a Tivar vedle toho vynikají zejména vysokou vrubovou houževnatostí, schopností absorbovat energii při vysokých rychlostech deformace a vysokou odolností vůči korozi za napětí. Přitom si však ponechávají vlastnosti typické pro ostatní typy polyetylenu, tj. nízkou relativní hmotnost, vysokou chemickou odolnost, absolutní nenavlhavost, tepelnou a elektrickou nevodivost. Modifikované materiály Solidur Special DS, Solidur Ceram P a Solidur Super se vyznačují vyšší odolností vůči opotřebení s nižším součinitelem tření ve srovnání s nemodifikovanými materiály.

❖ Konstrukční keramika

Mezi konstrukční keramiku se v současné době zahrnují hlavně materiály na bázi Al_2O_3 .

Oxid hlinitý Al_2O_3 (korund) se získává kalcinací hydroxidu hlinitého při teplotě 1 400 °C. Materiál má vysokou tvrdost, odolnost vůči erozivnímu opotřebení plynů (mimo fluoru), má dobrou abrazivní odolnost, elektrickou izolační schopnost, žáruvzdornost, dobrou tepelnou odolnost a odolnost proti tepelným rázům. Pro zlepšení vlastností keramiky se přidává MgO , SiO_2 ($\approx 3\%$) v jemném rozptýlení v matici. Využívá se pro: trubice, kelímky, pyrometrické trubice, izolátory zapalovacích svíček, nástroje na obrábění a tváření, destičky zdvihátek ventilů spalovacích motorů, součásti pecí, oběžná kola, lopatky, písty vodních čerpadel a jiné.

Keramické materiály na bázi ZrO_2 . Oxid zirkoničitý se v tuhém stavu nachází ve třech modifikacích:

- monoklinická → při teplotách 1 100 °C,
- tetragonální → do 2 300 °C,
- potom přechází na krychlovou.

ZrO₂ se předem kalcinuje na 1 500 až 1 800 °C nebo elektricky taví. Dále je stabilizován a následně se z mletého kalcinátu tvarují výrobky. Úplné slinutí se dosáhne nad 1 900 °C, tlakové slinování při teplotě 1 000 °C. Součásti jsou odolné proti korozi, erozi a abrazivnímu opotřebení.

Karbidy a nitridy

Výrobky lze použít při teplotách 2 400 °C, proto se využívají na keramické topné články. Tato keramika má větší odolnost proti iniciaci křehkého lomu z defektu. Lomová houževnatost je 2-krát větší jako než Al₂O₃.

Karbidy a nitridy mají nejvyšší teploty tání. Převažuje u nich vazba kovalentní (B₄C, Si₃N₄, BN) nebo kovová (TiC, UC, WC, TaC, TiN). Kovalentní vazba charakterizuje vysoký elektrický odpor a polovodivé chování. Kovová vazba charakterizuje podobné vlastnosti jako kovy, s možností vzniku intersticiálních tuhých roztoků.

Pro slinování je třeba vysokých teplot v atmosféře bez kyslíku. Je zde využití tlakových metod slinování v redukční, neutrální atmosféře nebo vakuu.

Příklady karbidické keramiky:

NiC a TaC – teplota tání je přibližně 3 900 °C. Vlastnosti: extrémní tvrdost a odolnost proti abrazivnímu opotřebení, dobrá tepelná a elektrická vodivost, vysoká stabilita.

Největší význam mají karbidy křemíku, karbidy kovu, přechodných prvků, vzácných zemin a lantanoidů.

Výroba karbidů:

- příprava vlastní sloučeniny (syntézou z prvků, redukcí oxidů, aj.);
- tvarování prášku a zpevnění v žáru na kompaktní těleso tlakovým nebo reakčním slinováním, vytvářením vrstev na různých substrátech depozicí z par plasmovým nanášením.

WC – je základem řezných součástí obráběcích strojů;

SiC – využívá se pro vysokou tvrdost jako brusivo;

SiC a malé množství přebytku Si – používají se pro elektrické topné články (silitové);

SiC v modifikacích β-SiC – atomy SiC jsou umístěny střídavě v uzlech kubické mřížky typu diamantů. Každý atom zaujímá polovinu tetraedrických poloh; SiC v modifikacích α-SiC (polotypy) – různá analogická hexagonální a rhombická seskupení Si a C s oběma prvky v čtyřstěnové koordinaci. Při teplotě 1 600 až 2 000 °C probíhá rekonstrukční přeměna β-formy na směs α-SiC polotypů;

B₄C – s teplotou tání 2 330 °C se používá pro vysokou odolnost proti abrazi k leštění tvrdých kovů. Vyrábí se reakcí B₂O₃ a koksu v obloukové peci při 2 600 °C;

TiC – se vyrábí redukcí TiO₂ s uhlíkem. Kompaktní součásti se získávají tlakovým slinováním prášků, které tvoří významnou složku jejich frakmentů;

BN – jsou tvrdé, křehké, oxidaci odolávající do 1 000 °C. Vyskytují se ve třech modifikacích:

- tabulkově hexagonální struktura podobná grafitu (tzv. bílý grafit), je velmi dobrým izolantem;
- forma tzv. borozanu s kubickou strukturou podobnou diamantu, vzniká zahříváním první formy za vysoké teploty a tlaku s extrémní tvrdostí, větší než diamant. Odolává oxidaci do 2 000 °C;
- forma romboedrická.

Vyrábí se reakcí B_2O_3 nebo BCl_3 s amoniakem při 1 000 °C. Jejich použití: elektroizolační součástky, kelímky, v práškové formě je BN vhodný jako tepelná izolace pro indukční vakuové pece. Použitelnost do 3 000 °C.

Keramika na bázi nitridu křemíku Si_3N_4

Tato keramika patří k novým konstrukčním materiálům pro vysokoteplotní aplikace.

Vlastnosti: odolává dobře abrazi, korozi, má dobrou tepelnou vodivost, nízkou tepelnou roztažnost, je odolná vůči teplotním rázům apod. Tvrdost keramiky se rovná tvrdosti safíru. Neoxiduje do 1 200 °C a rozkládá se až při 1 900 °C.

Tato keramika ve srovnání s kovy je křehká s dobrou lomovou houževnatostí způsobenou vláknitou strukturou. Použití pro součástky plynových turbín, trysky k tažení kovů, obráběcí stroje, tavící kelímky.

Boridy

Mají teplotu tání 1 900 až 3 000 °C.

Vlastnosti: jsou stabilní, málo těkavé do 2 500 °C, dají se využít ve vakuu za vysokých teplot, odolné proti oxidaci, mají vysokou odolnost proti opotřebení a jsou lepší než karbidy svou vysokou tvrdostí a elektrickou vodivostí. Jsou vhodné pro elektrické kontakty a elektrody.

Připravují se přímou syntézou z prvků nebo reakcí boru s oxidem kovu za přítomnosti činidla (B_4C), tvarováním bez tlaku nebo za použití tlaku.

Použití: ZrB_2 pro termočlávkové ochranné trubice; $ZrB_2 + TiB_2$ je materiál vhodný pro trysky raket a k výrobě hliníku.

Silicidy

Na bázi $MoSi_2$ jsou vhodné pro elektrické topné články do teplot do 1 650 °C a využívají se na ochranné povlaky topných článků (z SiC). Odolnost vůči oxidaci se vysvětluje tvorbou tenkého kompaktního křemičitého filmu.

Grafitové materiály

Výchozí surovinou je převážně petrolejový koks s nízkým obsahem nečistot. Plastikující pojivo je dehet s použitím fendformaldehydové pryskyřice.

Postup: kalcinace koksu při 1 250 °C, drcení na vhodné frakce a tvarování s pojivem za tepla. Následuje vypálení v plynové peci 750 – 950 °C kdy se vytěsňují těkavé složky a pojivo karbonizuje, čímž vzniká zpevněný ale pórovitý produkt.

Vlastnosti se mění podle zrnitosti, druhu pojiva a způsobu tvarování a dále podle teploty grafitizace.

Plynulý růst pevnosti s teplotou (při 2 000 – 2 500 °C pevnost 2-krát větší), nad teplotou 2 600 °C R_m klesá.

Použití: topné články, elektrody jaderných elektráren, nukleární grafit pro moderní kovy a reflektory, pro zpevňování kompozitů jako vysokoteplotní izolace.

Vlastnosti keramických materiálů

Mechanické vlastnosti: $E \approx 70\,000\text{ MPa}$ (porcelán) až $480\,000\text{ MPa}$ (žárově lisovaný např. SiC); $\mu \approx 0,17\text{--}0,36$ ($\approx 0,25$).

Deformace:

- za studena se keramika chová jako tvrdý, křehký materiál;
- za zvýšených teplot → může probíhat plastická deformace.

Pevnost:

- nejvyšší R_m – přes 1 000 MPa (u speciálních keramických materiálů);
- mimo grafitové keramiky R_m s teplotou klesá.

Keramický materiál se využívá pro součásti vystavené různým druhům opotřebení a korozi. Může sloužit i jako materiál pro povlakování a povrchové úpravy.

❖ Spékané oceli

Spékané *uhlíkové* oceli – nejčastěji se vyrábějí ze směsi železného prášku a grafitu. Pevnost součástek výrazně ovlivňuje jejich hustota.

Spékané *legované* oceli – vyrábějí se ze směsi práškového železa a prášků legur. U legujících prvků je třeba brát zřetel na jejich aktivitu ke kyslíku. Během ohřevu a spékání je třeba používat ochrannou atmosféru. Jako legující prvky se nejvíce používají: Cu, Ni, Mo, protože mají nízkou aktivitu ke kyslíku.

Spékané *vysokotavitelné* kovy – W, Mo, Ta – vyrábějí se součástky zejména pro elektrotechniku, které jsou vystavené elektroerozivnímu opotřebení.

❖ Disperzně zpevněné materiály

Pseudoslitiny – základ tvoří kovová matrice (např. Al), ve které se vytváří vysoce stabilní disperze nekoherentních částic (Al_2O_3), které se základní hmotou nereagují.

Hliník (SAP) – přednosti jsou velmi dobré vlastnosti za tepla, nízká hustota, dobrá odolnost proti korozi, dobrá tepelná vodivost.

Nikl – disperzně zpevněný – oxidy hliníku ($\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$) – oxidy thoria (Ni-ThO_2) s velkou odolností proti korozi a erozi.

❖ Kompozitní povlaky

Vzhledem k povlakům na bázi jednoho typu polymeru představují kompozitní povlaky řadu povlakových materiálů, jejichž základem je polytetrafluoretylen (PTFE) se zcela novými a specifickými vlastnostmi (tailored coatings) a s propracovanou technologií nanášení.

Povlaky Xylar jsou založeny na bázi anorganického (keramického) pojiva s aditivou a plnivou ve vodním nosiči. Nanášejí se stříkáním a vytvrzují při teplotě 343 °C.

Systém Excalibur je zakotven na substrátu tepelným nástřikem tenké porézní vrstvy nerezavějící oceli, do níž jsou zachyceny jedna či více vrstev různých typů kompozit-

ního povlaku, kde PTFE zaručuje dosažení nejlepších antiadhezivních vlastností. Tento povlak lze nanášet na ocel, nerezavějící ocel, šedou litinu a hliníkové slitiny. Hliníkové slitiny vyžadují předběžnou úpravu speciálním keramickým povlakem. Tloušťka povlaku se pohybuje kolem 40 μm . Povlak Excalibur představuje nejvyšší jakost antiadhezivních vlastností a odolnosti proti opotřebení.

❖ **Korozivzdorné oceli**

Od objevení a rozvoje korozivzdorných ocelí a slitin bylo cílem jejich aplikací zvýšit technické parametry v různých odvětvích a zajistit dostatečně dlouhou životnost a bezpečnost provozu. Pokrok v mnohých výrobních technologiích by bez korozivzdorných materiálů nebyl vůbec možný. V posledních letech se jeví použití těchto materiálů nezbytným pro ekonomické zvládnutí snah vyspělých průmyslových států zvláště po soběstačnosti v energii a surovinách na jedné straně a po zlepšování životního prostředí na straně druhé. Úspěšná realizace všech těchto snah je nemyslitelná bez použití různých druhů korozivzdorných ocelí a slitin se stále vyššími nároky na jejich množství, ale především na jejich jakost. Splnění přísných požadavků lze dosáhnout jednak vývojem nových materiálů, jednak zavedením progresivnějších technologií výroby a zpracování, které mohou být cestou zvyšování jakosti často i při poměrně malé modifikaci chemického složení stávajících druhů ocelí a slitin.

Při použití nákladných jakostních materiálů, tak i běžných korozivzdorných ocelí a slitin platí stejné zásady pro jejich volbu a zacházení s nimi i to, že dražší, avšak optimálně volený materiál bude po zvážení všech ekonomických hledisek výsledně levnější. Takové ekonomické efekty lze docílit lepšími parametry materiálů a jejich mnohonásobně vyšší životností bez nutnosti renovace.

Korozivzdorné oceli a slitiny, v nichž rozhodující úlohu má obsah chrómu, mohou ještě obsahovat další slitinové prvky, především nikl. Rozvojové trendy ve zvyšování korozivzdornosti jsou doprovázeny snahou o lepší mechanické vlastnosti a zpracovatelnost, včetně žáropevnosti, svařitelnosti a pevnostních vlastností za nízkých teplot při zachování dobré tažnosti a houževnatosti.

Čas od času byla řešena otázka náhrady některých slitinových prvků, zvláště niklu, jinými. Tzv. úsporné korozivzdorné oceli legované dusíkem se ukazují i dnes být novým konstrukčním materiálem se specifickými vlastnostmi. Nové technologie chemických procesů, energetika, stavebnictví, zdravotnictví a další obory přicházejí stále s novými požadavky na zvyšování parametrů korozivzdorných ocelí a slitin, snižování obsahu nečistot apod. Současné požadavky na korozivzdorné oceli jsou již takového druhu (např. při odsolování mořské vody, odsiřování plynu, konverzi uhlí, těžbě ropy a plynů z velkých hloubek apod.), že se nevystačí ani s maximálně legovanými ocelmi a je nutné přejít v řadě případů na použití slitin na bázi niklu popř. titanu. Za posledních několik desetiletí došlo ke zdokonalení řady typů ocelí a slitin. Pokrokem je zavedení ocelí a slitin s nízkým obsahem uhlíku, martenzitických, dvoufázových a austenitických typů, nebo s velmi nízkým obsahem intersticiálních prvků u typů feritických. Významné je též využití legování dusíkem austenitických a austeniticko-feritických ocelí a komplexní legování speciálních vysokolegovaných typů. Termodynamické poznatky, zejména fázových rovnovážných diagramů více-složkových soustav a kinetika fázových transformací, předpovídají, že kombinace

chrómu a molybdenu jako legujících prvků v ocelích s vysokým obsahem dusíku může nahradit mangan při zachování požadované struktury a zvýšit korozní odolnost.

Slitiny na bázi niklu jsou používány v případech maximálního namáhání, pokud jde o odolnost proti korozi, popř. žárovevnost. Vynikajících korozivzdorných vlastností se dosáhne u těchto slitin vhodným legováním prvky tvořícími substituční tuhé roztoky, zatímco vysokých pevnostních hodnot za vysokých teplot se docílí přísadou jednak prvků zpevňujících základní tuhý roztok, jednak prvků dovolujících precipitační zpevňování. Mezi korozivzdorné materiály patří i technicky čistý nikl a titan, slitiny titanu s palladiem, tantalem aj.

Slitiny na bázi niklu (korozivzdorné i žárovevné) se používají ve stavu tvářeném i litém, superslitiny se vyrábějí i technikou práškové metalurgie. Moderní metalurgické pochody, podobně jako u korozivzdorných ocelí, umožňují výrobu slitin o vysoké čistotě a s až extrémně nízkým obsahem intersticiálních prvků, a tím docílení zlepšených zpracovatelských i užitných vlastností.

9.2. SMĚRY VE VÝVOJI MATERIÁLŮ ODOLNÝCH PROTI KOROZI A OPOTŘEBENÍ

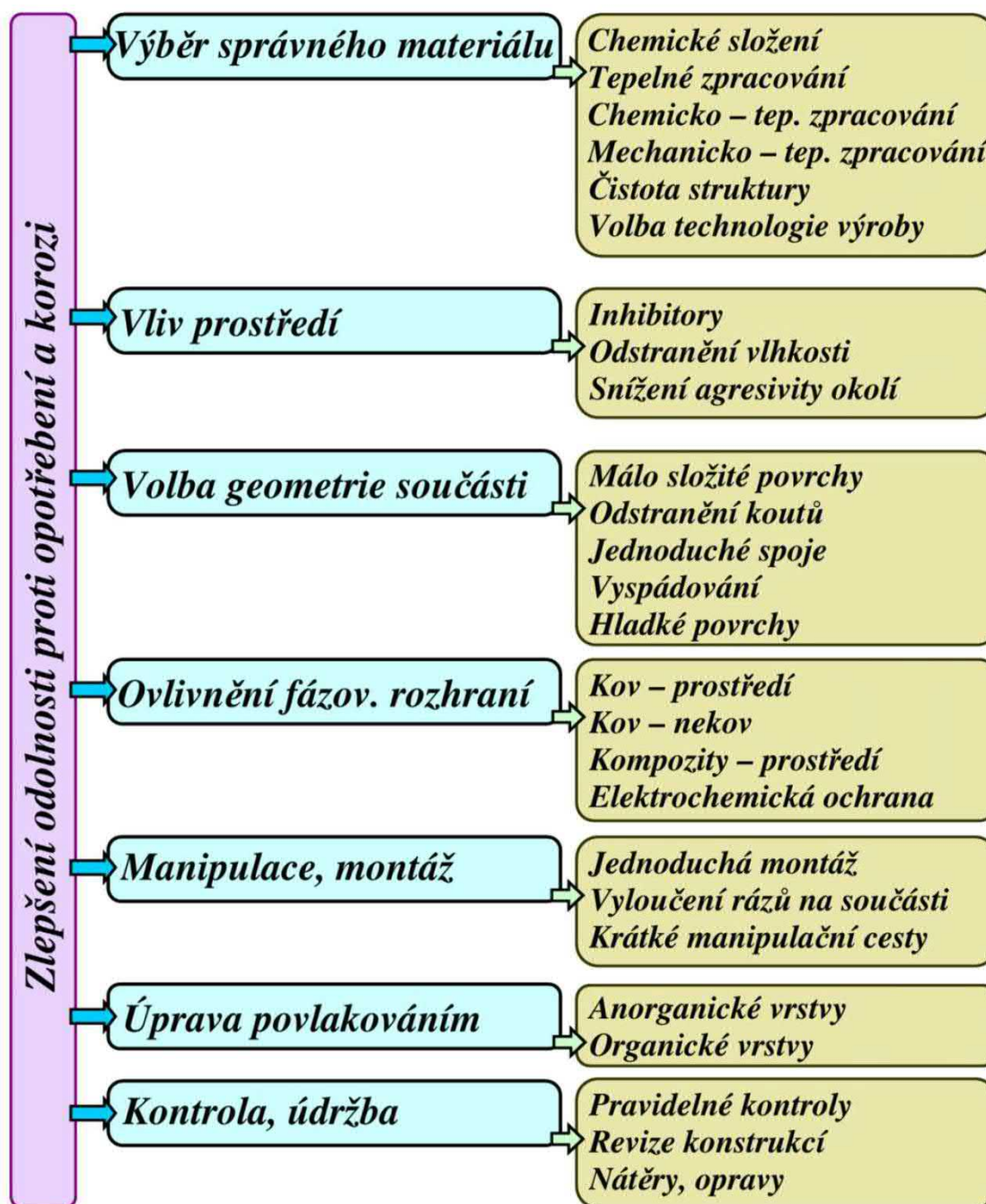
Ve všech skupinách materiálů dochází k více či méně progresivním modifikacím zaměřeným především na zvýšení jakosti a jejich technologické zpracování, vedoucí ke zvýšení odolnosti proti opotřebení a korozi, obr. 9.1.

U martenzitických korozivzdorných ocelí probíhá vývoj především s ohledem na jejich svařitelnost směrem snižování obsahu uhlíku postupně na 0,07 až 0,03 %, přičemž za přísady niklu a po tepelném zpracování se dospělo k martenziticko-austenitické struktuře s 10 až 40 % austenitu, popř. s nízkým obsahem feritu při zvýšených obsazích chrómu, popř. molybdenu. V posledních letech se obsah uhlíku dále snižuje až pod 0,015 % a dospívá se k svařitelným, tzv. supermartenzitickým ocelím.

V případě feritických ocelí se rozsáhlý vývoj nízkointersticiálních tzv. superferitických ocelí, rozvinutý až k obsahům chrómu 29 % za přísady molybdenu, popř. niklu, v této skupině ocelí spíše směřuje k jejich využití jako žáruvzdorných, s uplatněním např. vzácných zemin pro zvýšení jejich korozní odolnosti.

K výraznému vývoji se zřetelem na jejich využití v náročných agresivních podmínkách dochází u dvoufázových a austenitických korozivzdorných ocelí. Především obsah molybdenu vzrůstá od 3,5 až do 7 % s eventuální modifikací dalšími slitinovými prvky, mědi, wolframu a především pak dusíku, jehož obsah dosahuje podle jednotlivých typů 0,3 až 0,55 %. Vysoký obsah dusíku je dnes uplatňován i u austenitických chrómmanganových ocelí s přísadou molybdenu. Využití legování dusíkem je i u slitin s vysokým obsahem chrómu nad 30 %, pochopitelně v kombinaci s příslušným obsahem niklu a dalšími slitinovými prvky.

U slitin na bázi niklu je snaha po dosažení co nejvyšší čistoty se zřetelem na optimální korozní odolnost. Využíváno je zvýšení obsahu chrómu nad 20 %, u některých typů až nad 30 %. S ohledem na omezené možnosti zvyšování obsahu molybdenu nad 16 % zůstává u těchto slitin významným uplatněním wolframu, popř. niobu, jako slitinových prvků.



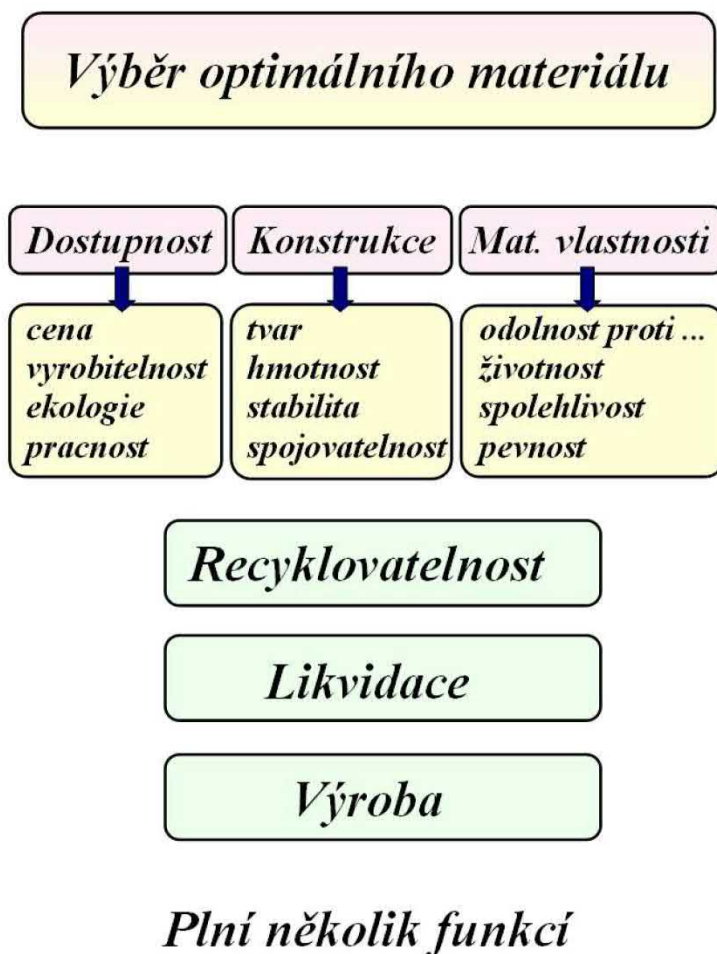
Obr. 9.1 Faktory zlepšující odolnost proti opotřebení a korozi

Titan a jeho slitiny pro použití především v redukčních prostředích vyžadují legování palladiem pohybující se v rozmezí 0,05 až 0,5 %, případně uplatnění slitinových prvků – molybden, niklu, popř. tantalu. S požadavky na zvýšení mechanických vlastností titanu jsou brány v úvahu prvky jako vanad, hliník, cín, chrom, popř. zirkon, přičemž jejich vliv na korozní odolnost souvisí s podmínkami jejich použití. Pro erozně - korozní namáhání povrchu je uplatňována i nitridace.

❖ Hlediska pro volbu materiálu

Pro volbu optimálního materiálu je rozhodující dostupnost výchozích materiálů, charakter navrhovaných konstrukcí a hlavně požadované materiálové charakteristiky, které se od těchto navrhovaných materiálů očekávají, viz. obr. 9.2:

- *materiálové charakteristiky* → houževnatost, odolnost proti opotřebení, působení teploty, únavové vlastnosti, odolnost proti korozi aj.;
- *podle zatěžování* – statické, dynamické, cyklické, působení různých teplot, koroze;
- *technologie výroby* → uplatňovat poznatky o vlivu technologie na složení, strukturu a mechanické vlastnosti např. bezodpadové technologie – práškové metalurgie, přesné lití apod.;
- *materiálové a výrobní náklady* → ekonomicko-materiálové zhodnocení pro návrh TO;
- *ekologičnost* → možnost recyklace a netoxičita;
- *rozpadavost materiálu v relativně krátkém čase*;
- *jiná kritéria* → chování materiálu v daném prostředí a jeho přímé nebo nepřímé působení na okolí.



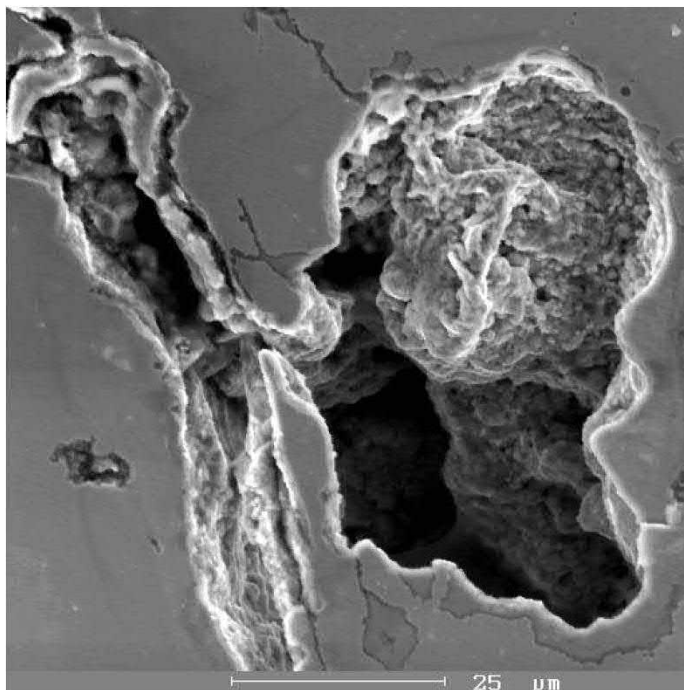
Obr. 9.2 Výběr optimálního materiálu

Materiály mohou být rozdělené podle jejich uplatnění v oboru, čím jsou dané i podmínky konkrétního opotřebení. Jsou to např. obory:

- medicíny,
- potravinářské a užitné spotřeby,
- strojírenství,
- energetiky,
- elektroniky,
- chemického a hutního průmyslu,
- leteckého a kosmického průmyslu,
- vojenské techniky,
- dopravy aj.

Lze konstatovat, že studium opotřebení materiálů TO vyžaduje komplexní systémový přístup, který musí zahrnovat všechny atributy související s danou problematikou. V současné době velkého množství informací je důležité uplatňování priorit, které pomohou daný problém zúžit na podstatné veličiny, které se v řešení musí zobrazit.

Tato publikace naznačuje, jak široký záběr řešení si problematika „opotřebení materiálů ve strojírenství“ vyžaduje, aby byla řešena komplexně a strukturovaně s využitím experimentálního a výpočtového modelování.



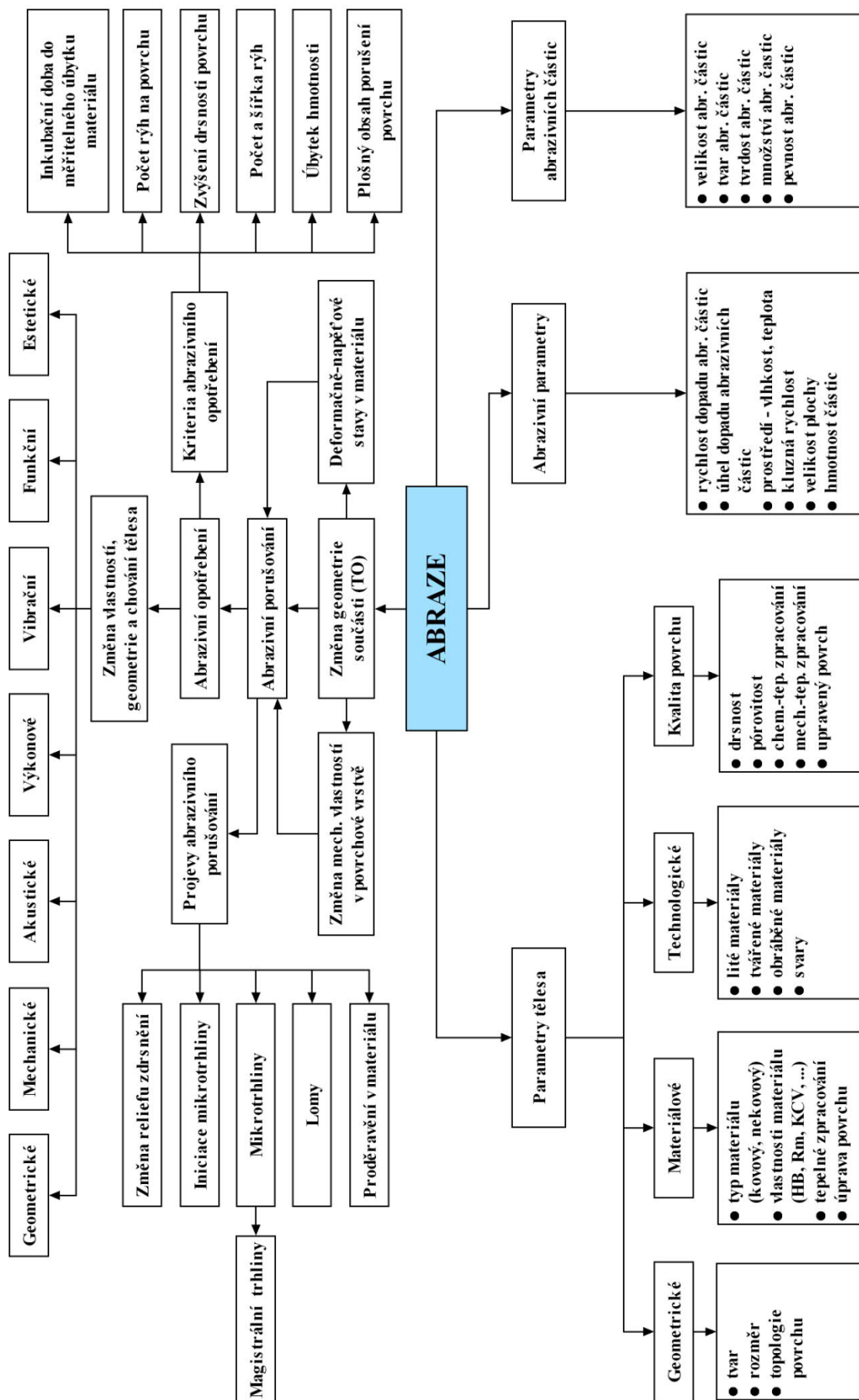
Vypadnutý vměstek v materiálu

LITERATURA

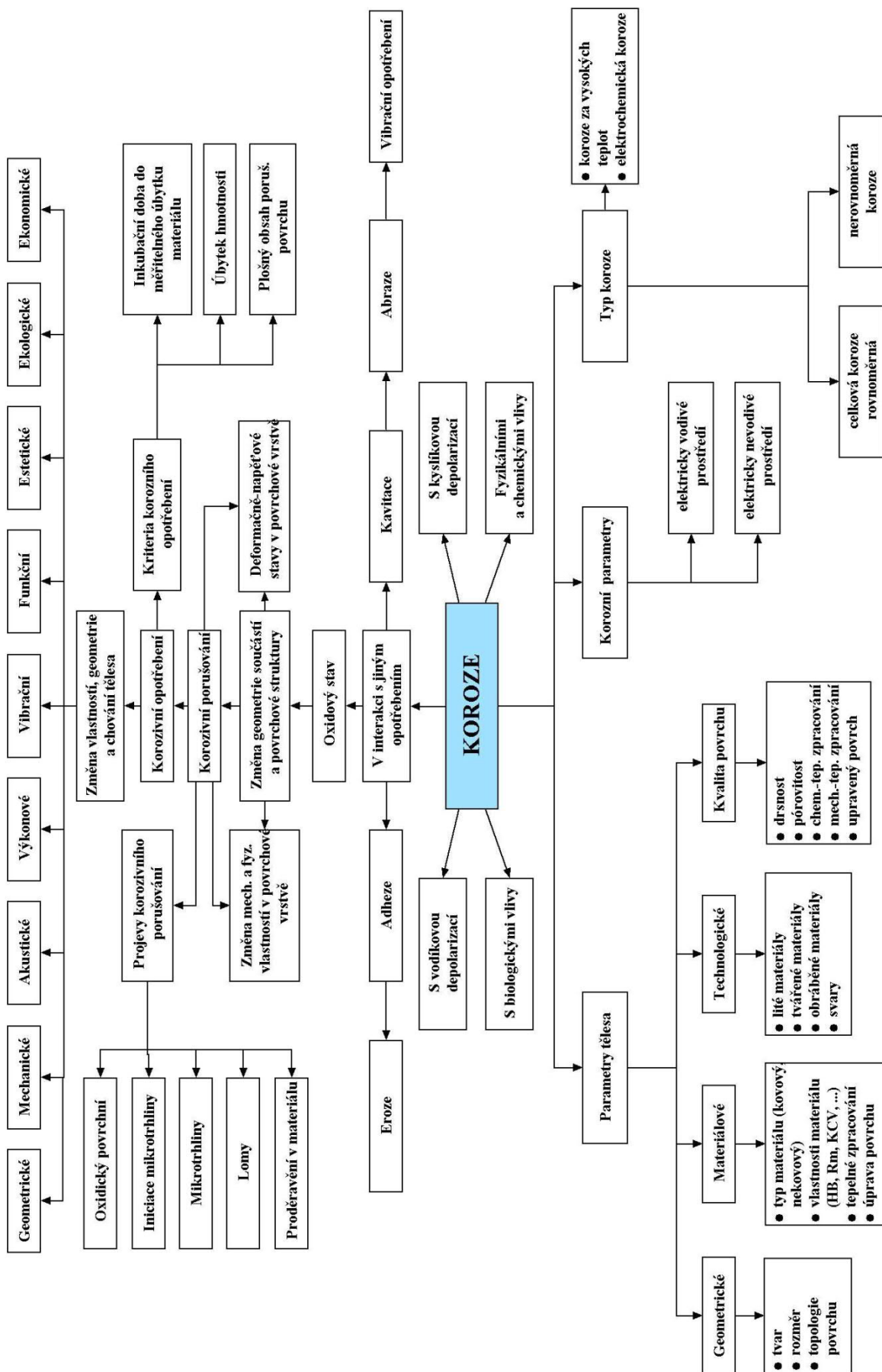
- [1] Stodola, J.-Pešlová, F.-Rosická, Z.-Špiříková, A.: *Analýza, diagnostika a redukce opotřebení strojních součástí*. Výsledky řešení grantového projektu GAČR č. 101/06/0957. Brno, 2008.
- [2] Stodola, J.: *Model adhezního opotřebení strojních součástí*. Mezinárodní konference OPOTŘEBENÍ SPOLEHLIVOST DIAGNOSTIKA '2008. Brno, 2008. ISBN 978-80-7231-558-1 (str. 174-187).
- [3] Stodola, J.-Pešlová, F.: *Opotřebení strojních součástí*. Univerzita obrany Brno, 2007. ISBN 978-80-7231-233-5 (120 stran).
- [4] Stodola, J.: *Model adhezního opotřebení kovových povrchů*. Konference s mezinárodní účastí TechMat '08. Svitavy, 2008. ISBN 978-80-7395-136-8.
- [5] Stodola, J.-Pešlová, F.-Špiříková, A.: *Řízení a redukce opotřebení speciální techniky*. Projekt obranného výzkumu MO č. 030111433. Praha, 2005.
- [6] Stodola, J.-Stodola, P.: *Operation Reliability and Diagnostics of Mechanical Systems via RDIS Application*. International Conference on probabilistic Safety Assessment and Management PSAM 9. Hong Kong, 2008. ISBN 978-988-99791-5-7.
- [7] Stodola, J.: *Engine Failure and its Avoidance – Tribology's Contribution of Efficient Maintenance*. Advances in Automotive Engineering. Vol. 1, 1st edition. Tribun EU. (Editor P. Novotný). ISSN 978-80-7399-496-9 (str. 176-185).
- [8] Janíček, P.: *Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky-Hledání souvislostí*, díl I. Akademické nakladatelství CERM, VUTIUM, Brno, 2007. ISBN 978-80-7204-554-9.
- [9] Pešlová, F.-Janíček, P.: *Degradační procesy v povrchových vrstvách tělesa jako důsledek jejich interakce s okolím*. Proc. of Internat. conf. „The VIth National Seminar with Intenational Interaction of Dynamic Systems with Surroundings and Systems with Feedbacks“. Praha, 2000 (str. 177).
- [10] Pešlová, F.-Beneš, L.-Schmidová, E.: *Laboratorní ověření a posouzení bainitické oceli Lo8CrNiMo v návaznosti na výsledky zkoušek lomového chování a mechanických vlastností*. Závěrečná zpráva výzkumného úkolu č. ASI 25/00, Česká Třebová, 2000.
- [11] Krmela, J.-Hajduchová, E.-Pešlová, F.-Janíček, P.: *Composite Structures Used in Tyre*. 22nd International Colloquium (Advanced manufacturing and repair technologies in vehicle industry). Czestochowa – Orle Gniazdo Hucisko, Polská republika, 2005., ISBN 80-8070-393-0 (str. 15-16).
- [12] Krmela, J.-Stodola, J.-Pešlová, F.: *Degradační proces opotřebení pneumatik*. Mezinárodní konference OPOTŘEBENÍ SPOLEHLIVOST DIAGNOSTIKA '2005. Brno, 2005, ISBN 80-7231-026-7 (str. 105-111).
- [13] Hajduchová, E.-Krmela, J.-Pešlová, F.: *Odliatok – Cage Cote Palatre – ako teleso s primárnou trhlinou*. TechMat 05. Svitavy, 2005. ISBN 80-7194-803-9 (s. 83-86).
- [14] Schmidová, E.-Pešlová, F.: *Teplotní a kontaktně-únavová degradace pojezdových ploch kol elektrických vozů*. Materiálové inžinierstvo, roč. 12, 3, 2005. ISSN 1335-0803 (str. 65-69).
- [15] Janíček, P.-Skalka, P.-Burša, J.-Pešlová, F.-Gerpt, M.: *Computational modeling of operational reliability of resistor sheets of electric engines*. Proceedings of the 3rd International Conference on Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering. Žilina, 2005. ISSN 80-7194-803-9 (str. 136-140).

- [16] Liptáková, T. a kol.: *Sledovanie degradácie organických povlakov*. Acta Mechanica Slovaca, 4-B, 2008. ISSN 1335-2393 (str. 181-187).
- [17] Liptáková, T.-Šestina, I.: *Základy korózie a ochrany kovov v plynárenství*. Edičné stredisko ŽU, Žilina, 1997.
- [18] Liptáková, T. a kol.: *Ochrana kovových objektov proti atmosférickým vplyvom*. Edičné stredisko ŽU, Žilina, 2001.
- [19] Liptáková, T.-Suchý, P.-Škorík, V.-Šimko, P.: *Degradation on polymer coatings in real work conditions*. Materiálové inžinierstvo, roč. 15, 1, 2008. ISSN 1335-0803 (str. 36-39).
- [20] Liptáková, T.-Šimko, P.-Hadzima, B.: *Effect of cathodic protection on quality of pipes coatings*. Quality and production management in practice. Saint Petersburg, 2008. ISBN 978-5-91155-011-0.
- [21] Hadzima, B.-Liptáková, T.: *Základy elektrochemickej korózie kovov*. Vyd. ŽU EDIS, 2008. ISBN 978-80-8070-876-4.
- [22] Krmela, J.-Pešlová, F.: *Dlouhovláknové elastomerové kompozity s kovovou a textilní výztuží*. Mezinárodní vědecká konference – sekce č. 9 Výpočtová a experimentální analýza napětí. Ostrava, 2005. ISBN 80-248-0896-X (str. 63-64).
- [23] Krmela, J.: *Systémový přístup k výpočtovému modelování pneumatik I*. Tribun EU, Brno, 2008. ISBN 978-80-7399-365-8 (102 stran).
- [24] Krmela, J.-Tomanová, V.-Pešlová, F.: *Tire safety requirements to computational modelling*. Proceedings of the 3rd international conference Reliability, Safety and Diagnostics of Transport Structures and Means 2008. Pardubice-Lázně Bohdaneč, 2008. ISBN 978-80-7395-096-5 (str. 161-165).
- [25] Stachoviak, W.G.-Batchelor, W.A.: *Energies Tribology*, 3rd edition. Elsevier Inc. 2005. ISBN 0-7506-7836-4 (str. 501-572).
- [26] Bowden, P.F.-Tabor, D.: *The Friction and Lubrication of Solids*. Part 2. Oxford University Press, 1964.
- [27] Bowden, P.F.-Young, E.J.: *Friction of Clean Metals and the Influence of Adsorbed Films*. Proc.Roy.Soc., London, Series A, Vol. 208, 1951 (str. 311-325).
- [28] Kayaba, T.-Kato, K.: *The Analysis of Adhesive Wear Mechanism by Successive Observations of the Wear Process in SEM*. Proc. Int. Conf. on Wear of Materials, Dearborn, Michigan, New York, 1979 (str. 45-56).
- [29] Vingsbo, O.: *Wear and Wear Mechanisms*. Proc. Int. Conf. on Wear of Materials, Dearborn, Michigan, New York, 1979 (str. 620-635).
- [30] Rigney, A.D.-Chen, H.L.-Naylor, G.M.-Rosenfeld, R.A.: *Wear Process in Sliding Systems*. Wear, Vol. 100, 1984 (str. 195-219).
- [31] Krmela, J.: *Pláště pneumatik a jejich materiálové charakteristiky pro výpočtové modelování* : Vědecká monografie. Zborov, Česká republika. 2017. ISBN 978-80-270-2893-1.

Příloha 1. Faktory abrazivního opotřebení



Příloha 2. Faktory korozního opotřebení



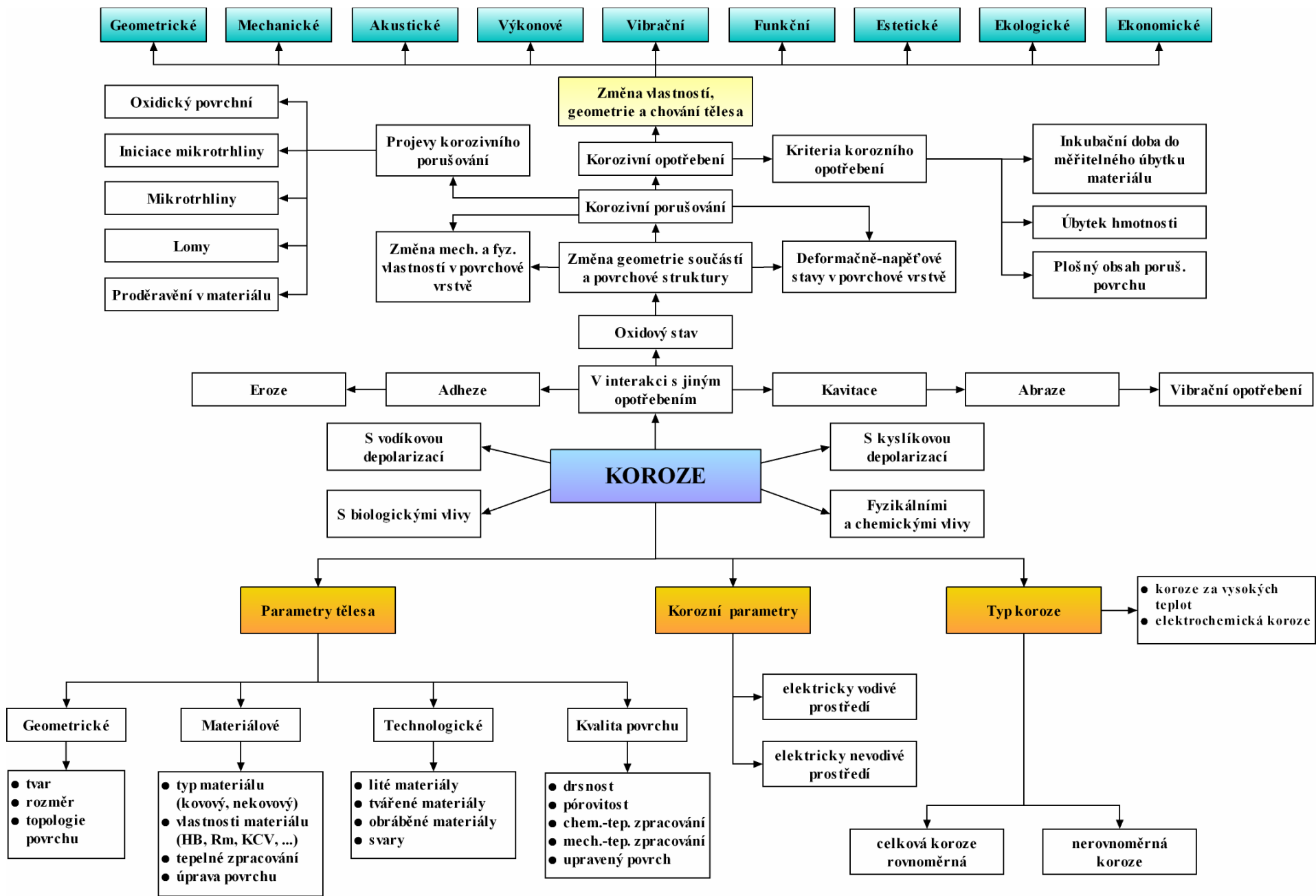


Příloha 3.
KOROZNÍ VLIV NA TUHOSTNÍ
CHARAKTERISTIKY
POLYKOMPONENTNÍCH
MATERIÁLŮ

Jeden z degračních procesů vedoucí ke
↓ BEZPEČNOSTI dopravního prostředku je

KOROZNÍ OPOTŘEBENÍ

- **VIBRACE** některých částí dopravního prostředku
- **OPOTŘEBENÍ JINÝCH** součástí související s korozně napadenou součástí
- **KOROZNÍ ZPLODINY** vedou ke znehodnocení i nenapadnutého materiálu korozí
- **⇓ ŽIVOTNOSTI** celého dopr. prostředku pro nemožnost renovace.



Komplexní vazby související s korozním procesem

Koroze u automobilových PNEUMATIK ⇒ **změna**
kvality pneumatiky bude nepřímo působit i na jiné části
automobilu ⇒ **vibrace podvozkové části**
výkonové ztráty
doprovázené zvýšenou hladinou zvuku aj.

Co ovlivňuje?

vstupní suroviny – kvalita materiálů (ocelové
a textilní kordy pro výztuž, elastomery...míchání
směsí, uskladnění a „stárnutí“ směsí)

výroba – vulkanizace (teplota, tlak, čas)

pórovitost a stárnutí pryže

provozování pneumatiky a klimatické podmínky, ...

OCELOVÉ KORDY v koruně pláště pneumatiky

během výrobního procesu ovlivňovány

vulkanizačním procesem

předpoklad vzniku chemických reakcí prvků, které se nacházejí v povrchu kordů a v pryžové matrici.

DEGRADAČNÍ PROCES

Porušení vláken korozí v matrici způsobuje následné chování pneumatiky:

- dochází k **vývoji mezifázového smykového napětí vyvolávající mezifázové porušení (delaminace)**, pokračující podél drátů s důsledkem redukce účinnosti vlákna na delší vzdálenost ⇒ musí být dostatečná mezifázová soudržnost
- při nedostatečné homogenitě matrice dochází k **rozvoji trhliny v matrici** – porušení pryže
- při snížení lomové houževnatosti pryžové matrice dochází k **rozvoji trhlin v celé pneumatice**.

Volba ochranné vrstvy kordů

Na povrchovou úpravu kordů musí být kladen velký důraz, protože se může stát:

- ⇒ vrstva není celistvá a nemá ochrannou schopnost**
- ⇒ vrstva je celistvá a nemá ochranné vlastnosti z důvodu chemického složení**
- ⇒ vrstva má ochranné vlastnosti, ale vznikají velké napjatosti povrchové vrstvy (několikavrstvá, větší tloušťka).**

Podmínky KOROZNÍCH ZKOUŠEK

Korozní diagnostický přístroj Gebr. Liebisch S 400 M TR

s parametry: **objem zkušební komory – 0,4 m³**
rozsah teploty zkušební komory – do 50°C
rozsah teploty rozprašování roztoku – do 70°C
spotřeba zkušebního roztoku – 0,4 až 0,8 l/h
elektrický příkon – 1600 W.



KOROZNÍ ZKOUŠKY

Vzorky byly v korozní komoře exponovány 500 hodin při teplotě 70°C v rozprášené 5% solné lázni.

Průběžně byl vizuálně sledovaný průběh koroze na ocelových kordech na hranách vyřezaných vzorků.

Po korozním napadení povrchu kordů došlo k ukončení korozních zkoušek a vzorky byly vystaveny statické zkoušce v tahu.

Zkušební vzorky před a po korozním působením



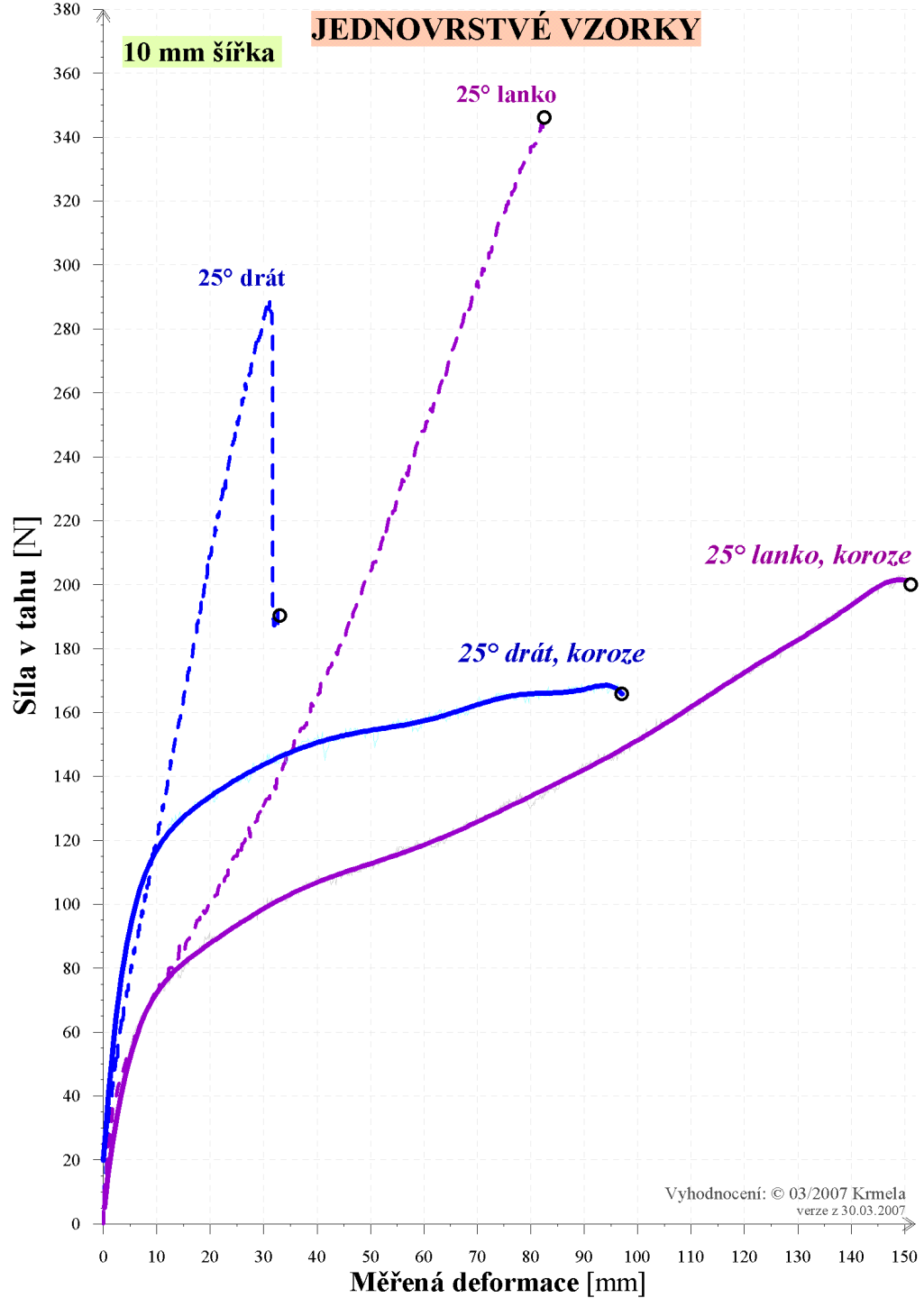


Statická zkouška v tahu



JEDNOVRSTVÉ VZORKY

10 mm šířka



ZÁVĚR

Z grafického průběhu:

⇒ je výrazný rozdíl deformačně-napět'ových stavů mezi kompozitním materiálem bez korozního ovlivnění a s korozním ovlivnění

⇒ celkově se mechanické vlastnosti korozním působením snížily, ale docházelo k větší deformaci, což u lanka bylo průkaznější.

DOPORUČENÍ

Pro snížení korozních vlivů a tedy vzniku degradace je třeba:

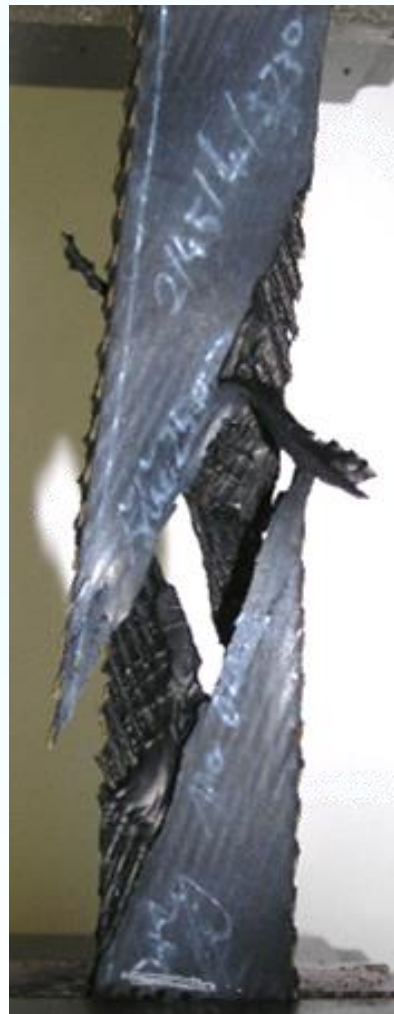
- ***správná VOLBA MATERIÁLŮ kordů i pryže***
- ***kontrolovaná VÝROBA***
- ***dodržet teplotu, tlak a čas VULKANIZACE***
- ***správný VÝBĚR PNEUMATIKY k automobilu a podmínkám provozu***
- ***průběžná KONTROLA PNEUMATIKY pro identifikaci prvotních porušení.***

Korozní proces způsobuje degradaci automobilových pneumatik, které mohou vést ke vzniku:

- ***MS porušování***
- ***MS deformace***
- ***MS vibrace***
- ***MS opotřebení***
- ***a jiným specifických MS.***

Kordy jsou POKOVOVÁNY za účelem zlepšení adhezní vazby výztuž-matrice a zvýšení korozní odolnosti celé kovové kostry a tím celé pneumatiky.

Statická zkouška v tahu na dvouvrstvých vzorcích



Pod'akovanie

Vydanie tejto učebnice bolo podporené Kultúrnou a edukačnou grantovou agentúrou MŠVVaŠ Slovenskej republiky (KEGA), grantom **KEGA002TnUAD-4/2019**.

Názov: Technické problémy strojních součástí – opotřebení
Autori: Jan Krmela, Jiří Stodola, Františka Pešlová
Druh diela: vysokoškolská učebnica
Vydanie: prvé, jún 2021
Vydavateľ: Trenčianska univerzita Alexandra Dubčeka v Trenčíne,
Trenčín, Slovenská republika
Strán: 224

Publikácia neprešla jazykovou úpravou.

© Jan Krmela, Jiří Stodola, Františka Pešlová, 2021

