

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava



Úvod do expertizní činnosti

učební text

Vlastimil Vodárek

Ostrava 2013

Recenze: Doc. Ing. Miroslav Greger, CSc.

Název: Úvod do expertizní činnosti
Autor: Vlastimil Vodárek
Vydání: první, 2013
Počet stran: 68
Náklad:

Studijní materiály pro studijní program Materiálové inženýrství fakulty Metalurgie a materiálového inženýrství.

Jazyková korektura: nebyla provedena.

© Vlastimil Vodárek
© VŠB – Technická univerzita Ostrava

POKYNY KE STUDIU

Úvod do expertizní činnosti

Studijní balík obsahující integrované skriptum pro kombinované studium, zahrnující i pokyny ke studiu, je určen pro předmět 4. semestru oboru Progresivní technické materiály.

1. Prerekvizity

Pro studium tohoto předmětu se předpokládá absolvování předmětů Nauka o materiálu, Degradací procesy materiálů a Strukturně fázová analýza.

2. Cíl předmětu a výstupy z učení

Cílem předmětu je seznámit studenty se základními cíli a postupy při expertizním posuzování porušených součástí, včetně návrhu možných nápravných opatření. Na praktických příkladech jsou demonstrovány základní typy porušení součástí, ke kterým nejčastěji dochází v praxi.

Po prostudování opory by měl student být schopen:

- navrhnout postup provádění a zpracování výsledků expertizní činnosti,
- rozeznat základní mechanismy degradace a porušení součástí,
- mít přehled o experimentálních metodách používaných při expertizách,
- prezentovat výsledky expertizní činnosti.

Pro koho je předmět určen:

Předmět je zařazen do magisterského studia oboru Progresivní technické materiály studijního programu Materiálové inženýrství, ale může jej studovat i zájemce z kteréhokoliv jiného oboru, pokud splňuje požadované prerekvizity.

Při studiu každé kapitoly doporučujeme následující postup:

Postupně přečtěte textovou část a řešené příklady. Pokuste se zodpovědět otázky uvedené na konci každé kapitoly. Pro detailnější studium dané problematiky doporučuji literaturní odkaz [1], doplňující řešené příklady z oboru materiálového inženýrství lze nalézt v publikaci [2] - viz seznam literatury na konci učebního textu.

Způsob komunikace s vyučujícími:

Jakékoliv problémy je možné řešit osobními konzultacemi na základě individuální dohody s vyučujícím. Součástí předmětu je vypracování semestrálního projektu a absolvování zápočtového testu. S tématy projektů a s podrobnými pokyny pro jejich vypracování budou studenti seznámeni na počátku přímé kontaktní výuky. Semestrální projekt bude vyučujícím vyhodnocen do 14 dnů od odevzdání.

Telefon: +596 994 432 (prof. Ing. Vlastimil Vodárek, CSc., garant předmětu)

e-mail: vlastimil.vodarek@vsb.cz

OBSAH

1. Úvod	1
2. Přístupy k expertizní činnosti	2
2.1 Obecné metody řešení problémů	2
2.2 Primární fyzikální příčiny porušení	7
3. Postup při expertizní činnosti	12
3.1 Faktory ovlivňující porušení	12
3.2 Postupné kroky při expertizní činnosti	13
3.2.1 Sběr důkazního materiálu	15
3.2.2 Vizuální analýza lomové plochy	16
3.2.3 Makrolepty	16
3.2.4 Mikrostukturní rozbor	17
3.2.5 Mechanické zkoušky	17
3.2.6 Simulace a modelování	18
3.2.7 Kritická analýza získaných poznatků	19
3.2.8 Písemná zpráva o výsledcích analýzy	20
3.3 Shrnutí základních pravidel	22
4. Materiálové procesy vyvolané výrobními procesy	24
4.1 Obrábění materiálu	24
4.2 Procesy metalurgického tváření materiálu	24
4.3 Tepelné zpracování materiálu	25
4.4 Svařování	25
4.5 Dokončovací operace	25
4.6 Montáž zařízení	25
4.7 Inspekční technika	26
5. Základní kategorie porušení	29
6. Porušení vyvolané přetížením	33
6.1 Makroskopická fraktografická analýza	36
6.2 Mikroskopická fraktografická analýza	42
7. Poškození a porušení vyvolané korozí	52
7.1 Obecné zásady při analýze zkorodovaných součástí	52
7.2 Obecné charakteristiky jevu korozního praskání pod napětím (SCC)	53
7.3 Korozní únava	55

8. Poškození nebo porušení vyvolané opotřebením	61
8.1 Obecné schéma analýzy součástí poškozených opotřebením	62
8.2 „Fretting“	63
9. Shrnutí problematiky	68

1. Úvod

Expertizní činnost představuje významný inženýrský nástroj pro kontinuální zlepšování kvality výrobků. Velký přínos pro rozvoj této disciplíny představovalo její rozšíření o problematiku prevence opakovaného porušení součástí. Její cíle byly dále postupně rozšířeny o vymezení odpovědnosti za škody spojené s haváriemi. Tato činnost rovněž představuje efektivní nástroj vzdělávání nových inženýrských pracovníků.

Analýza porušených součástí je prováděna s cílem stanovení příčin nebo faktorů, které vedly k nežádoucí ztrátě jejich funkčnosti. V této studijní opoře je diskutován přístup k expertizní činnosti typický pro odborníky v oboru materiálového inženýrství. Řada lidí zjednodušeně definuje příčiny porušení binárním způsobem: *byla součást defektní nebo byla nesprávně používána?* Existuje velké množství typů defektů, včetně těch, které pocházejí z nesprávného designu, nekvalitního materiálu nebo výrobních chyb. O přítomnosti apriorních defektů v porušené součásti může často věrohodně rozhodnout pouze odborník s dostatečnými znalostmi v oblasti materiálového inženýrství. Bouřlivý rozvoj různých technik mikroskopie a metod hodnocení vlastností materiálů ve druhé polovině dvacátého století vytvořil předpoklady pro získání mnohem detailnějších podkladů umožňujících spolehlivější definování možných příčin porušení hodnocené součásti a snížení spekulativnosti závěrů expertíz. Zkušenosti získané při analýzách řady provozních nehod vedly k poznání, že obvykle neexistuje pouze jediná příčina porušení nebo jediná následnost jevů, které vedou k porušení součástí. Obvykle se uplatňuje kombinace řady faktorů, které vedou k lomu součástí. V některých případech absence jednoho z těchto faktorů může zabránit vzniku havárie.

Pokud má být materiálová expertíza provedena profesionálně, materiálový inženýr se musí oprostit zjednodušeného přístupu, a pokud je to žádoucí, měl by požádat o profesionální pomoc odborníky jiných specializací. Porušení součástí by mělo být posuzováno komplexně. Fyzické porušení (lom, poškození korozí nebo únavou) je nejsnáze definovatelné. Nicméně obvykle existují skryté faktory, které umožnily vznik daného porušení. Například, i jednoduchý lom součásti, jehož přímou příčinou byla neadekvátní tvrdost materiálu, má lidské příčiny, které souvisí s aplikací nesprávně tepelně zpracovaného materiálu. Profesionálně provedená expertíza je víceúrovňový proces, který zahrnuje mnohem více než vlastní posouzení porušené součásti. Expertízy jsou často zaměřeny na získání poznatků, které umožní zabránit opakování obdobných případů porušení v budoucnosti.

2. Přístupy k expertizní činnosti



Čas ke studiu: 3 hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- definovat dílčí kroky při řešení problému,
- popsat princip metody hlavních (kořenových) příčin,
- definovat čtyři základní příčiny porušení,
- používat diagramy provozní podmínky versus životnost součástí.



VÝKLAD

2.1 Obecné modely řešení problémů

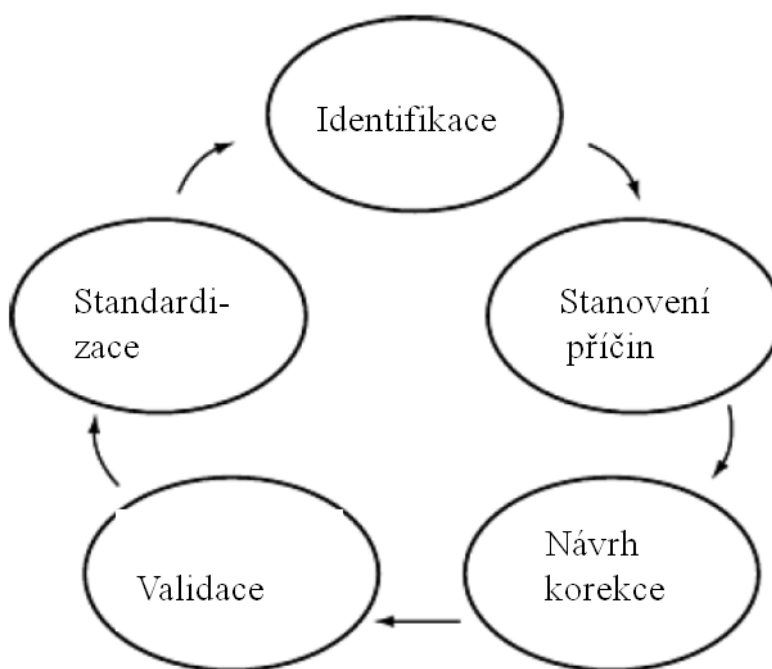
Obecně se pojem *vysoká kvalita* vztahuje k výrobkům, které byly vyrobeny podle sofistikovaných standardů na základě rostoucích požadavků zákazníků. Tyto požadavky zahrnují následující faktory:

- větší bezpečnost,
- vyšší spolehlivost,
- vyšší výkonnost,
- snadnější údržba,
- nižší náklady v průběhu životnosti výrobku,
- redukce vlivu výrobků na životní prostředí.

V literatuře je popsána řada metod řešení problémů. Základní schéma postupu při řešení problémů lze popsat následovně:

1. definice problému,
2. návrh hypotézy,
3. sběr dat,
4. testování hypotézy,
5. vypracování závěrů.

Zjednodušené schéma řešení problémů je uvedeno na obr. 1. Tento cyklický diagram znázorňuje, že se proces obnovuje s objevením se nového problému během předchozího řešení problému.



Obr. 2.1 Obecné schéma postupu při řešení problémů

Základní kroky v obecném modelu řešení problémů lze charakterizovat následovně:

1. **Identifikace**: popis současné situace. Definuje problém pomocí symptomů. Určuje vliv problému na výrobek, systém a zákazníka. Stanovuje cíl řešení. Sběr dat v rámci charakterizace problému.
2. **Stanovení příčin**: analyzuje problém s cílem identifikovat příčiny jeho vzniku.
3. **Návrh korekčních opatření**: seznam možných řešení pro úplné zamezení nebo opožděné znovuoobjevení se řešeného problému. Generuje alternativy. Vyvíjí plán implementace.
4. **Validace a verifikace korekční akce**: testuje nápravná opatření v pilotní studii. Vyhodnocuje efektivnost změny. Ověřuje, zda je problém odstraněn a zlepšuje spokojenost zákazníka.
5. **Standardizace**: začleňuje nápravné akce do systémových standardů společnosti, s cílem zamezení znovuoobjevení se daného problému v podobných výrobcích. Monitoruje změny s cílem zajistit efektivnost.

Druhý krok modelu zavádí velmi důležitý proces. Řešení zaměřené na potlačení znovuoobjevení se problému prakticky nemůže být vyvinuto bez identifikace příčin vzniku problému. V obecné rovině je slovo porušení definováno jako nežádoucí jev nebo stav. Je to stav, kdy zařízení není schopno adekvátně plnit svou funkci. Funkce součásti a tedy i definice porušení může být velmi proměnlivá. Například, změna barvy architektonického prvku představuje porušení jeho zamýšlené estetické funkce. Porušení může být definováno na

několika různých úrovních. Nejjednodušší formu porušení představuje situace, kdy je součást funkční, ale není schopna plnit zamýšlenou činnost. To je považováno za ztrátu funkčnosti. Jako příklad lze uvést tryskový motor, který běží, ale nemůže vyvinout tahovou sílu potřebnou pro start letadla. Další úroveň porušení představuje součást, která plní svou funkci, ale je nespolehlivá. U této formy součást ztratila provozní životnost. Jako příklad lze uvést integrovaný obvod, který není schopen fungovat spolehlivě. Jako vyšší formu porušení lze označit stav, kdy je součást neschopna činnosti. Jako příklad lze uvést lom hřídele čerpadla, který zcela znemožňuje přenášet rotační pohyb v systému.

Logický přístup k analýze porušení v první řadě předpokládá jasné porozumění rozdílů mezi indikátory, příčinami, lomovým mechanismem a následky. Jasné porozumění každé situace spojené s porušením významně zvyšuje schopnost porozumět příčinám a specifikaci přiměřených nápravných opatření. Jako příklad lze uvést porušení ventilu v chladicím vodním okruhu výrobní jednotky, viz tab. 1. Rozeznání indikátorů, příčin, mechanismů a následků napomáhá ke koncentraci akcí:

Indikátory: jevy, které předcházely porušení.

Příčiny: seznam možných příčin porušení.

Mechanismus porušení: jak došlo k porušení součásti v souladu s definicemi v odborných knihách. Jestliže je analýza správná, mechanismus bude ve shodě s příčinou, příp. příčinami. Jestliže nebyl mechanismus porušení správně pochopen, všechny příčiny nebyly identifikovány a korekční akce pravděpodobně nebudou plně efektivní.

Následky: to jsou jevy způsobené porušením součástí.

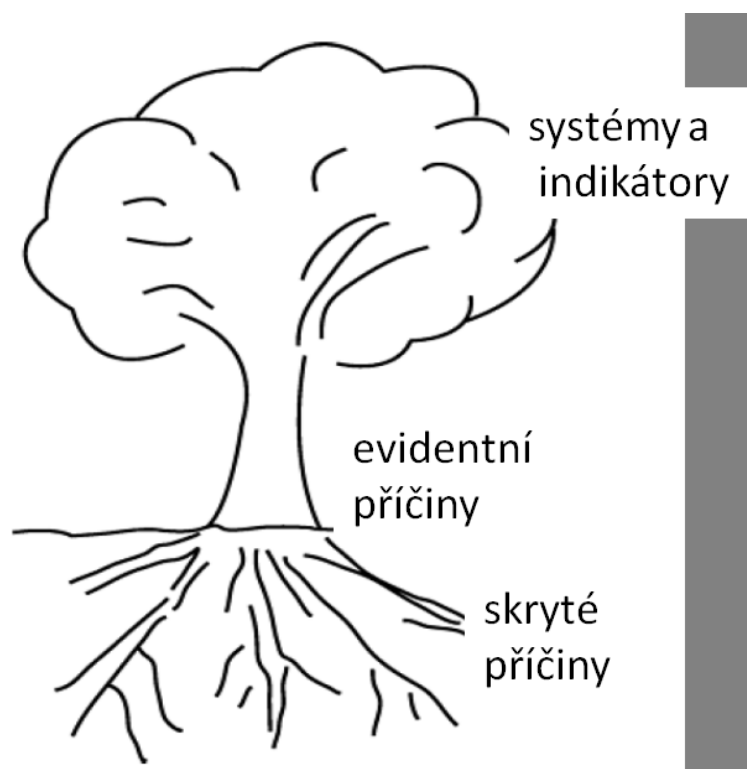
Tabulka 2.1 Porušení vodovodního ventilu ve výrobním závodě

Položka	Popis	Indikátory
příčina	přiškrcení ventilu obsluhou mimo předepsaný rozsah	záznamy průtoku
	ke konstrukci byla použita Cu – Ni slitina s nízkou pevností	materiálové listy
	kavitace indukovaná průtokem vody	vibrace systému, hluk
mechanismus porušení	erozně únavové porušení	laboratorní rozbor ventilu, ztenčení stěny
následky	omezení výrobního procesu	

Expertizní činnost spočívá ve zkoumání charakteru porušení a stanovení příčin poškození součástí nebo zařízení. Ve většině případů se vychází z fyzikálních důkazů, které jsou studovány s využitím inženýrských nebo vědeckých přístupů a nástrojů. Obvyklým cílem provádění expertizy je pochopení příčin porušení s objektivním záměrem zabránění

opakovaného vzniku obdobných havárií nebo alespoň s posunutím porušení součástí k delším časům. Nicméně samotný rozbor porušených součástí nemusí být dostatečný pro dosažení tohoto cíle. V mnoha případech expertiza nesprávně končí po identifikaci mechanismu porušení a možných příčinných souvislostí. Pro zajištění, že hlavní příčina nebo příčiny jsou známy a mohou být definována přiměřená nápravná opatření, může být aplikován koncept analýzy hlavních (kořenových) příčin (*root-cause analysis - RCA*).

Koncept RCA není aplikován pouze na samotné porušení součástí, ale je využíván i v reakci na nežádoucí jev nebo stav. Cílem RCA analýzy je identifikovat fundamentální příčiny, po jejichž odstranění dojde k zabránění nových případů porušení.



Obr. 2.2 Přírodní analogie základních (kořenových) příčin

Základní tři úrovně RCA analýzy jsou následující: **fyzikální příčiny**, **lidské příčiny** a **latentní příčiny**. Hodně expertiz se zabývá pouze fyzikálními příčinami. Tyto příčiny vyplývají z laboratorních rozborů nebo inženýrských analýz a obvykle se jedná o nálezy na úrovni materiálu nebo součástí. Lidské příčiny zahrnují lidské faktory, které způsobily porušení, např. chyba v lidském úsudku. Latentní příčiny nás vedou k příčinám lidských chyb a zahrnují příčiny, které jsou organizační nebo procedurální povahy, příp. se jedná o jiné příčiny, které se vymykají reálné kontrole. Jednotlivé příčiny jsou definovány na příkladech v tab. 2 a 3.

Tabulka 2.2 Příklady příčin porušení tlakové nádoby a šroubu

Příčina	Porušení tlakové nádoby	Porušení šroubu
fyzikální	korozní poškození, ztenčení stěny	únavová trhлина, vibrace zařízení, izolace
lidská	neadekvátní inspekce	nesprávná instalace
latentní	nepřiměřené školení inspektora	nepřiměřená specifikace verifikačního procesu

Tabulka 2.3 Příklad rozboru základních příčin porušení strojní součásti

Příčiny	Příklad	Možné důsledky
fyzikální příčiny nebo faktory	Tvrdost součásti je nevyhovující.	Opakované tepelné zpracování součásti. Frekvence kontrolní činnosti může být zvýšena.
lidské příčiny	Zaměstnanec oddělení tepelného zpracování nezná důležitost tvrdosti a nezkontroloval součást.	Zaměstnanci oddělení tepelného zpracování jsou zasláni na kurzy materiálového inženýrství a zkoušení materiálu.
latentní příčiny	Nikdo nevysvětlil pecnímu technikovi důležitost zkoušky tvrdosti. Porucha pyrometru vedla k nesprávné teplotě austenitizace.	Kontroloři budou proškoleni kompetentním materiálovým inženýrem jak vystavit protokol o tvrdosti. Je možné provést ověření rovnoměrnosti teplotního pole v peci.
kulturní specifika	Tvrdost se pohybuje v blízkosti spodní povolené hodnoty tvrdosti po řadu let, ale nikdy to nevadilo - až do doby krize, kdy někdo rozhodl o prodloužení používání součásti až za původně předpokládanou životnost.	Lidé z marketingu jsou poučeni, že nesmějí poskytovat nerealistické informace o výkonnosti a životnosti součástí. Obdrží adekvátní zdroje pro jednání problémů se zákazníky.

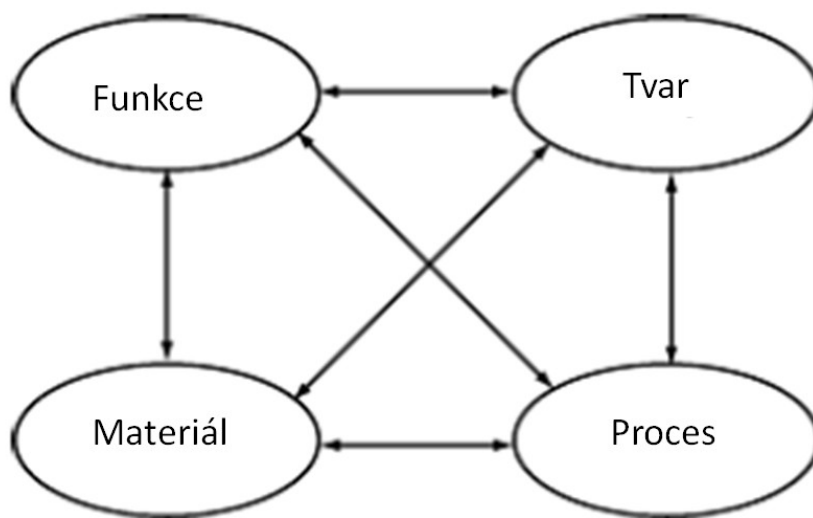
Jak podrobně analyzujeme příčiny porušení, to záleží na cílech expertízy. Tyto cíle vycházejí ze závažnosti situace, ekonomické významnosti a z rizika spojeného s dalšími haváriemi. Ve většině případů si samozřejmě přejeme identifikovat příčiny, které jsou snadno odstranitelné.

2.2 Primární fyzikální příčiny porušení

Kategorizace fyzikálních příčin porušení do pouze několika základních skupin je výhodná a přehledná, poněvadž definuje, které aspekty výrobku nebo zařízení vyžadují korekční akce a preventivní strategie. Systematická analýza havárií součástí odkrývá fyzikální příčiny, které lze zařadit do čtyř základních kategorií:

- nedostatky designu,
- materiálové defekty,
- výrobní nebo instalační defekty,
- anomálie v provozní životnosti.

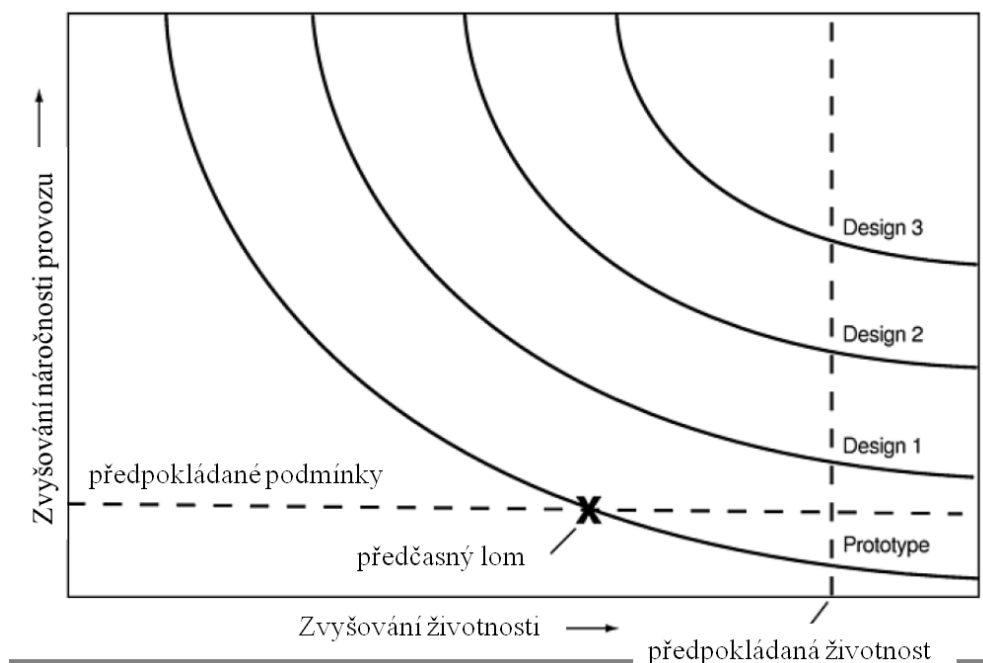
Důležitou inženýrskou činností při designu součástí je návrh vhodného konstrukčního materiálu. Jedná se o část procesu, který může zahrnovat komplexní soubor parametrů zohledňujících funkci výrobku, tvar výrobku, materiál a výrobní proces, obr. 2.3. V minulosti byl inženýrský design prováděn sekvenčně, rozhodnutí o materiálu bylo obvykle prováděno zcela nakonec. Poté co byly na základě rozměrů součásti definovány požadované vlastnosti materiálu, byl obvykle zvolen nejlevnější materiál splňující tyto požadavky. Nicméně se zvyšujícími se nároky na efektivitu designu, optimální výkon, ekonomickou soutěž, environmentální aspekty, bezpečnostní faktory a právní zodpovědnost současné metody návrhu materiálu jsou stále více simultánní a integrální částí celého procesu designu.



Obr. 2.3 Vzájemné vztahy mezi faktory ovlivňujícími proces designu

Přehledné grafické znázornění vlivu materiálových defektů na životnost součástí poskytuje diagram použití (např. náročnost provozních podmínek) versus životnost. Diagram je zkonstruován vynesáním životnosti součástí, pro které jsou společně určité specifické charakteristiky v designu, v závislosti na náročnosti provozních podmínek, které jsou

předpokládány během jejich provozování. Typické charakteristiky zahrnují pevnost, korozní odolnost, podmínky tepelného zpracování, velikost trhlin, kvalitu povrchu, objemový podíl pórů, stupeň zcitlivění, apod. Příklady provozních podmínek zahrnují velikost napětí (statického nebo cyklického), teplotu expozice, agresivitu prostředí, radiační expozici, apod.



Obr. 2.4 Diagram závislosti pracovních podmínek na životnosti součástí s rozdílnými charakteristikami (prototyp a tři úpravy designu)

Změnou charakteristik výrobku (nový design) je generována skupina křivek, která umožňuje posoudit vliv provozních podmínek na předpokládanou životnost součástí. Porušení součástí může být zabráněno, pokud křivka pro konkrétní design leží nad linií reprezentující předpokládané provozní podmínky a zároveň nalevo od svislé linie reprezentující předpokládanou životnost součástí. Pokud se náročnost provozních podmínek zvyšuje, náchylnost k porušení součástí se zvyšuje, poněvadž jednotlivé křivky protínají linii provozních podmínek při kratší provozní životnosti.

Hluboké porozumění faktorů, které vedly ke vzniku porušení, může vést k poznání, co je nezbytné pro prodloužení životnosti výrobků, konstrukcí a zařízení. Porozumění leží za hranicí pouhé znalosti faktů. Porozumění vyžaduje integraci faktů do znalostní základny jednotlivce. Expertizní činnost obecně vyžaduje aktivní zapojení odborníků z mnoha oblastí lidské činnosti. Jednoduché lomy mohou být analyzovány specialisty se základními znalostmi v oblasti vizuálního hodnocení inženýrských produktů. Pokud však chceme vylepšovat výrobky, budeme muset při expertizní činnosti využívat znalosti z řady oborů lidské činnosti.

Lidé, kteří provádějí expertizní činnost jako součást svého zaměstnání, by si měli být také vědomi, jak je definována jejich právní zodpovědnost. Správný přístup k expertizní činnosti vyžaduje plánování a definování cílů. Kompetentní odborník musí znát více než proces analýzy porušení a nástroje, které může při expertize využívat. Musí rozumět funkci analyzované součásti nebo zařízení a musí znát charakteristiky materiálů a procesů použitých při výrobě analyzovaných součástí. Musí vědět, jak byl výrobek skutečně používán. Dobré komunikační schopnosti jsou při této činnosti nezbytné.

Zadavatelé expertiz porušených velkých zařízení nebo konstrukcí se někdy snaží obejít bez materiálových inženýrů. Věrohodnost takových expertíz může být snadno zpochybněna, poněvadž každý výrobek je vyroben z nějakého materiálu. Nelze vyloučit záměnu materiálu při výrobě zařízení, vlastnosti materiálů mohou průběhu provozování zařízení významně degradovat. Věrohodné porozumění tomu, co se stalo a proč se to stalo, v naprosté většině případů vyžaduje i vyjádření kompetentního materiálového inženýra.

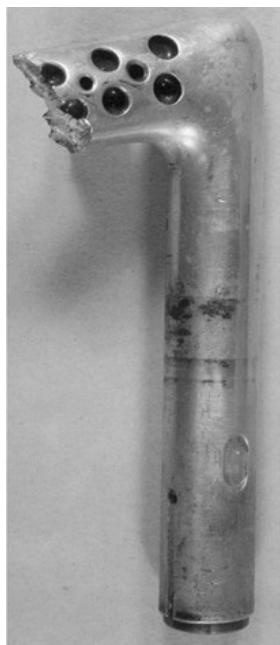
Jedním z klíčových principů expertizní činnosti je uchovat důkazy – analytik musí zajistit všechny nezbytné informace o subjektu ve výchozím stavu. To může být popsáno následovně:

- zajistit důkazy,
- provést testy v pořadí od méně destruktivních směrem k více destruktivním,
- vědět, jak a koho požádat o pomoc,
- odmítnout destruktivní zkoušky, pokud nebyla ukončena dokumentace a selekce vzorků.

Destruktivní zkoušky zahrnují všechny aktivity, které vyžadují dělení fragmentů součástí. Rovněž čištění fragmentů může být problematické: bez očištění může povrch součástí korodovat, naopak v některých případech může čištění odstranit látky, které přispěly k porušení součástí. Postup analýzy může být přizpůsoben v závislosti na očekávané hloubce a rozsahu expertizy. Dalším klíčovým principem analýzy je definovat rozsah hodnocení v pravý čas, tak aby výsledky měly vysokou šanci odpovědět na definované otázky.

Běžný postup při expertní činnosti je založen na plnění seznamu úkolů, které obecně zahrnují plánování experimentů, provádění testů, vypracování zprávy o zkouškách. Expertizní činnost je iterativní a kreativní proces, obdobně jako design, ale s reverzními rolemi syntézy a analýzy. Vzhledem k tomu, že lidé obecně mají tendenci vidět pouze to, co očekávají, je důležité věnovat velkou pozornost výsledkům všech provedených experimentů, poněvadž užitečná data mohou být snadno přehlédnuta. Velmi důležitou roli může rovněž hrát intuice a instinkt.

Doba životnosti součástí nebo zařízení je velmi závislá na podmínkách, za kterých je součást provozně exponována. Během provozování součástí se provádí údržba, inspekční prohlídky, opravy, příp. modifikace. Anomálie v jakékoliv z těchto činností mohou vést k porušení součástí.



a)



b)

Obr. 2.5 Únavový lom držáku řídítek jízdního kola, který byl způsoben neodbornou modifikací této součásti, spočívající ve vyvrtání řady neprůchozích otvorů, a) charakter porušení držáku řídítek, b) multičetná iniciace únavového porušení na povrchu otvorů, postupové čáry únavového porušení.

Jako příklad anomálie v provozní životnosti lze uvést lom řídítek jízdního kola, který byl způsoben neodborným zásahem do integrity držáku řídítek. Na obr. 2.5 je dokumentován porušený držák řídítek, jehož integrita byla vlastníkem kola narušena navrtáním řady neprůchozích otvorů. V průběhu provozování kola došlo na povrchu těchto otvorů

k multičetné iniciaci únavových trhlin, jejich postupnému růstu a následně ke katastrofickému porušení držáku.



Shrnutí pojmů kapitoly

Identifikace problému: popis současné situace, definuje problém pomocí symptomů.

Stanovení příčin problému: analýza problému s cílem identifikovat příčiny jeho vzniku.

Návrh korekčních opatření: seznam možných řešení pro úplné zamezení nebo opožděné znovuoobjevení se řešeného problému.

Validace a verifikace korekčních opatření: testuje nápravná opatření v pilotní studii.

Standardizace: začleňuje nápravné akce do systémových standardů společnosti, s cílem zamezení znovuoobjevení se daného problému v podobných výrobcích.

Indikátory: jevy, které předcházely porušení.

Mechanismus porušení: identifikace mechanismu porušení součásti v souladu s definicemi mechanismů porušení v odborných publikacích.

Následky: jevy vzniklé v důsledku porušení součástí.

Analýza hlavních (kořenových) příčin: identifikace fundamentálních příčin problému, po jejichž odstranění dojde k eliminaci nových případů porušení.

Fyzikální příčiny: inženýrské důkazy o vlastnostech materiálu a mechanismech poškození součástí.

Lidské příčiny: chybné lidské rozhodnutí, které způsobilo porušení, např. v důsledku chybného úsudku.

Latentní příčiny: jevy, které jsou organizační nebo procedurální povahy, příp. se jedná o jiné příčiny, které se vymykají reálné kontrole.



Otázky k probranému učivu

1. Proč je součástí expertizní činnosti i prevence?
2. Jaký význam má analýza hlavních příčin porušení?
3. Jaké jsou základní tři úrovně analýzy hlavních příčin?
4. Jaké znáte primární fyzikální příčiny porušení?
5. Jak se projeví změna charakteristik výrobku v diagramu použití versus životnost?

3. Postup při expertizní činnosti



Čas ke studiu: 5 hodin



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- definovat postupné kroky při komplexní expertizní činnosti,
- organizovat sběr důkazního materiálu,
- navrhnout jaké zkoušky by měly být provedeny v rámci expertizy,
- navrhnout pořadí provádění jednotlivých testů a zkoušek,
- navrhnout strukturu písemné zprávy o výsledcích expertizní činnosti.



VÝKLAD

3.1 Faktory ovlivňující porušení

Porušení součástí může být způsobeno jedním z následujících faktorů, příp. jejich kombinací:

- nedostatky v designu,
- vady materiálu v důsledku jeho špatného technologického zpracování,
- přetížení součástí nebo jiné provozní nedostatky,
- nesprávná údržba a opravy zařízení,
- degradace vlastností materiálu v důsledku interakce s prostředím.

Ne všechny případy porušení součástí mají katastrofický charakter. V řadě případů dochází k postupné degradaci vlastností, nepřijatelné deformaci nebo opotřebení až dojde ke ztrátě funkčnosti součásti před dosažením návrhové životnosti. Porušení způsobená opotřebením nebo obecným korozním napadením jsou obvykle doprovázena postupnými ztrátami materiálu během dlouhodobého provozování součástí. **Největší pozornost je však oprávněně věnována katastrofickým lomům.** Nicméně analyzovány by měly být všechny typy porušení, poněvadž redukuje výrobní efektivitu, způsobují plýtvání materiálovými zdroji a zvyšují náklady. V některých případech jsou materiálové škody rovněž spojeny s poškozením zdraví lidí nebo dokonce se ztrátami na lidských životech. Porušení součástí může mít za následek finančně velmi náročné právní důsledky. Je v obecném společenském zájmu neustále zvyšovat kvalitu expertizní činnosti a umožnit širokému okruhu odborníků seznámit se s výsledky jednotlivých analýz. To je však mnohdy komplikováno skutečností, že zadavatelé expertiz si nepřejí veřejné sdílení výsledků. V některých případech nejsou výsledky rozborů

poskytnuty dokonce ani konstruktérům, kteří by mohli změnami designu vylepšit výrobek nebo obsluhujícímu personálu, který by mohl eliminovat problémy související s údržbou a zlepšit kontrolní činnost. Vzdělání a komunikace jsou podstatné přívlastky expertizní činnosti a prevence porušení, poněvadž v některých případech je těžké získat informace o procesech designu a výrobní technologii součástí. Ne všechny případy porušení součástí vyžadují rozsáhlé zkoumání – postup může být jednoduchý, ale přesto efektivní. Typ vzdělání a profesní specializace mají významný vliv na způsob realizace expertizy. Například stavební inženýr může provést velmi pečlivý rozbor napětového stavu a způsobu zatěžování, ale nemusí věnovat dostatečnou pozornost metalurgickým faktorům. Obdobně metalurg může pečlivě definovat materiálovou problematiku porušení, ale mechanickým aspektům může věnovat pouze okrajovou pozornost. K podobné nerovnováze může dojít, pokud expertizu provádí obsluhující personál, svářečí nebo korozní inženýři. Pouze malý počet odborných pracovníků je schopen posoudit všechny faktory, které mohly hrát roli v konkrétním studovaném případě, a proto je pro komplexní posouzení složitých havárií vhodný týmový přístup.

3.2 Postupné kroky při expertizní činnosti

Jednotlivé kroky při expertizní činnosti mohou být formulovány následovně:

1. Sběr dostupných poznatků, týkajících se vlastní havárie, historie součásti – výroba a údržba, informace o platných směrnících a standardech.
2. Provést vizuální posouzení oblasti lomu a přilehlých oblastí s cílem určit:
 - a) místo iniciace porušení,
 - b) přítomnost koncentrátorů napětí,
 - c) přítomnost náběhových barev nebo korozních produktů na povrchu lomu,
 - d) orientaci a přibližnou velikost napětí,
 - e) mechanismus lomu,
 - f) směr šíření trhliny a následnost lomových procesů,
 - g) přítomnost participujících vnitřních defektů,
 - h) rozměry a jiné údaje.
3. Fraktografický rozbor.
4. Provést chemické rozborů materiálu a srovnat výsledky s výrobní dokumentací nebo platnými standardy. Analyzovat složení povrchových korozních produktů nebo povlaků.
5. Stanovit mechanické vlastnosti materiálu a srovnat je s výrobní dokumentací nebo s platnými standardy.

6. Provést makroskopické posouzení homogenity, integrity a kvality materiálu.
7. Definovat mikrostrukturní stav materiálu pomocí metalografického rozboru. Stanovit směr deformace u tvářených výrobků a jeho orientaci k aplikovaným napětím.
8. Provést měření mikrotvrdosti s cílem stanovit tloušťku povrchových vrstev (např. cementované nebo oduhličené vrstvy), určit zpevnění vyvolané tvářením za studena, posoudit kvalitu svarových spojů a usnadnit identifikaci mikrostrukturních složek a fází.
9. Doplnit metalografický rozbor elektronomikroskopickým studiem umožňujícím identifikovat jemné fáze nerozlišitelné světelnou mikroskopií.
10. Použít rtg mikroanalytický rozbor v řádkovacím elektronovém mikroskopu ke stanovení lokálního chemického složení nekovových vměstků nebo segregovaných oblastí v materiálu.
11. Aplikovat techniky rtg difrakční analýzy ke stanovení:
 - a) úrovně zbytkových napětí,
 - b) fázového složení materiálu (určit objemové podíly koexistujících fází).
12. Provést simulační zkoušky s cílem stanovit kritické charakteristiky materiálu (např. tendenci ke koroznímu praskání pod napětím v určitém prostředí), stanovit stupeň zkřehnutí nebo potvrdit aplikovaný režim tepelného zpracování, prokalitelnost materiálu.
13. Shrnout a analyzovat všechny získané informace. V případě potřeby konzultovat výsledky s experty v příslušných oborech.
14. Vypracovat písemnou zprávu. Zpráva by měla obsahovat doporučení ke snížení rizika výskytu obdobných problémů v budoucnosti nebo problémů na podobných zařízeních.
15. Uchovat důkazní materiál.

Výše uvedený seznam postupných kroků při expertizní činnosti se samozřejmě nemusí aplikovat při každé expertize, může se modifikovat v závislosti na povaze a důležitosti konkrétních případů porušení součástí. Dobře organizovaná expertizní činnost by měla respektovat následující postup:

- a) pochopit a vyjednat cíle prováděné expertizy,
- b) jasné porozumění hodnocené havárie,
- c) objektivní a jasná identifikace všech možných základních (kořenových) příčin,
- d) objektivní vyhodnocení pravděpodobnosti každé možné základní příčiny,
- e) směřovat k nejpravděpodobnější základní příčině,
- f) objektivně a jasně identifikovat všechny možné korekční akce,
- g) objektivně vyhodnotit každé nápravné opatření,

- h) vybrat optimální nápravné opatření,
- i) vyhodnotit účinnost vybraného nápravného opatření.

3.2.1 Sběr důkazního materiálu

Při sběru vstupních dat je třeba získat co nejkomplexnější informace o historii porušené součásti, které umožní zvolit takové zkoušky, jejichž výsledky mohou významně přispět k objasnění příčin havárie. Mezi důležité informace o porušené součásti náleží:

- lokalita, název součásti, identifikační číslo, vlastník, uživatel, výrobce,
- funkce součásti nebo zařízení,
- doba provozování do porušení,
- kvalita provozování, normální a abnormální zatížení, frekvence zatěžování, pracovní prostředí,
- použité materiály,
- aplikované výrobní technologie, včetně směrnic upřesňujících výrobu, inspekci a provozování součásti,
- orientace normálových napětí, rozmezí provozních teplot, tlaků a rychlostí,
- pevnost a houževnatost materiálu,
- aplikované tepelné zpracování, včetně žíhání na snížení vnitřních pnutí,
- výrobní technologie, např. svařování, pájení, šroubové spoje, nýtování, atd.,
- zprávy o kontrole kvality během výroby, záznamy o údržbě a opravách zařízení.

Velkou důležitost při sběru dat na začátku expertizy mají kromě fyzických důkazů (porušené součásti) i interview, která zahrnují:

- informace z první ruky (svědci, účastníci),
- pozadí a podrobná data (historické zkušenosti, podobné případy, pochopení situace),
- informace expertů (získání technických znalostí).

Mezi důležité aspekty při provádění interview náleží:

- vysvětlit, proč jsou pohovory prováděny a zachovat důvěrnost,
- pohovory provádět individuálně nebo jen s malými skupinami lidí; nikdy neprovádět interview se zaměstnanci za přítomnosti jejich nadřízených,
- vytvořit co nejpříjemnější prostředí pro pohovory,
- klást otázky s otevřeným koncem a neusměrňovat odpovědi,
- rozlišovat mezi vlastními znalostmi a zprostředkovanými znalostmi,
- získat reference od lidí, kteří mohou mít relevantní informace a jiné zdroje

- kvalitativních a kvantitativních dat,
- rozeznat souvislosti a paradigmaty při interpretaci odpovědí.

3.2.2 Vizuální analýza lomové plochy

Jestliže má být provedena detailní identifikace příčin porušení součásti, je třeba na počátku expertizy věnovat velkou pozornost co nejdetailnějšímu popisu lomové plochy. Obvyklý postup je možné popsat následovně:

1. vizuální posouzení celé součásti:
 - datum a čas havárie, teplota a prostředí,
 - rozsah porušení, zranění obsluhy,
 - operační status v okamžiku havárie,
 - fotografie nebo schematické náčrty místa havárie a přilehlého okolí,
 - jakékoliv servisní odchylky, které by mohly přispět k porušení součásti.
2. klasifikace typu porušení z makroskopického hlediska – tvárný, křehký, únavový, creepový, atd.,
3. stanovení místa iniciace lomu,
4. na základě charakteristik lomové plochy a konfigurace součásti stanovit způsob zatížení (tah, tlak, krut, atd.), relativní úroveň napětí (vysoká, střední nebo nízká) a orientaci napětí,
5. fraktografické studium porušené součásti v řádkovacím elektronovém mikroskopu, které umožňuje potvrdit lomový mechanismus: jamky, fazety, striace, kavity, atd.

3.2.3 Makrolepty

Velmi užitečné může být makrostrukturní studium výbrusů odebraných v blízkosti místa iniciace porušení. Studium makroleptů v souladu se standardem ASTM E 381 může poskytnout následující informace o vnitřní jakosti materiálu:

- výskyt vodíkových vloček,
- makrosegregace,
- přítomnost povrchové vrstvy zpevněné chemicko-tepelným zpracováním nebo defekty v podpovrchové vrstvě,
- výskyt oblastí s výrazně odlišnou tvrdostí,
- přítomnost linií vyvolaných tečením materiálu během tváření za tepla,
- makrostrukturní charakteristiky svarových spojů.

Pokud jsou známa napětí aplikovaná na porušenou součást, je třeba vyhodnotit vlastnosti materiálu součásti a stanovit, zda byl materiál schopen tato napětí přenášet. Správně vedená

provozní dokumentace umožňuje zjistit, zda provozní zatížení ležela v intervalu zatížení povolených v materiálových listech a návrhovém kritériím.

3.2.4 Mikrostrukturní rozbor

Metalografické hodnocení je rovněž velmi důležité pro správné stanovení příčin porušení. Přispívající faktory jsou často odhalitelné jen díky výsledkům metalografického studia, a proto by metalografická analýza mikrostruktury měla být vždy provedena. Mezi mikrostrukturou a vlastnostmi materiálů existuje úzká vazba. Výsledky metalografického studia mohou odhalit chybný postup při tepelném zpracování materiálu, povrchových úpravách materiálu nebo svařování. Mikrostrukturní stav je velmi užitečný při posuzování, zda bylo předepsané zpracování materiálu skutečně provedeno nebo zda byl plánovaný krok zpracování vynechán, příp. proveden nesprávně. Rovněž výsledky měření mikrotvrdosti mohou být velmi užitečné např. při identifikaci mikrostrukturních složek/ fází nebo při hodnocení kvality svarových spojů. Moderní metody elektronové mikroskopie umožňují studovat mnohem jemnější detaily struktury než světelná mikroskopie. Lze studovat například precipitační reakce, hustotu dislokací, jevy zotavení a rekrytalizace v deformované matici. Velmi důležitou roli v elektronové mikroskopii v současné době zastává rtg spektrální mikroanalýza, která umožňuje stanovit lokální chemické složení materiálu. V kombinaci s technikami elektronové difrakce umožňuje elektronová mikroskopie komplexně charakterizovat strukturu materiálů: morfologii, velikost i podíly jednotlivých fází a zároveň i chemické složení a krystalografická data přítomných fází.

3.2.5 Mechanické zkoušky

V rámci expertizní činnosti se v případech, kdy je k dispozici dostatek experimentálního materiálu, obvykle provádějí i základní mechanické zkoušky. Jedná se především o zkoušky tvrdosti, tahové zkoušky a zkoušky vrubové houževnatosti. Cílem těchto testů je prokázat úroveň mechanických vlastností materiálu v okamžiku porušení součástí. Zjištěné hodnoty vlastností jsou porovnávány s předepsanou úrovní vlastností ve výrobní dokumentaci nebo v materiálových listech. Pomocí mechanických zkoušek je možné prokázat adekvátnost použitého materiálu nebo degradační procesy probíhající za daných podmínek exploatace součástí. Pomocí mechanických zkoušek je možné odhalit abnormality, které by mohly souviset s nesprávným zpracováním materiálu nebo s mechanismy jeho zkrěhnutí. Základní mechanismy zkrěhnutí ocelí jsou shrnuty v tab. 3.1.

Tabulka 3.1 Mechanismy zkřehnutí ocelí

Typ zkřehnutí	Náchylné oceli	Příčiny	Výsledek
deformační stárnutí	nízkouhlíkové oceli	precipitace po deformaci	zvýšení pevnosti, pokles plasticity
stárnutí po kalení	nízkouhlíkové oceli	kalení následované precipitací	zvýšení pevnosti, pokles plasticity
modrá křehkost	uhlíkové a legované oceli	expozice na 230 – 370°C	zvýšení pevnosti, pokles plasticity
žihání na snížení pnutí	uhlíkové a nerezavějící oceli	žihání po svaření	pokles houževnatosti
popouštěcí zkřehnutí	uhlíkové oceli legované oceli	200 – 575°C	zvýšení tranzitní teploty, pokles houževnatosti
zkřehnutí při 400 – 500°C	chromové oceli	expozice při teplotách 400 – 500°C	zvýšení pevnosti, pokles plasticity
zkřehnutí σ - fází	feritické a austenitické oceli	expozice v rozmezí 560 – 980°C	pokles houževnatosti
grafitizace	uhlíkové a legované oceli	expozice nad 425°C	pokles houževnatosti
intermetalika	všechny oceli	expozice v kovu tvořícím s ocelí intermetalika	křehkost
neutronové zkřehnutí	všechny oceli	ozařování neutrony	zvýšení tranzitní teploty
vodíkové zkřehnutí	za studena deformované nebo kalené oceli	výroba, provozování, galvanické pokovení, koroze	pokles plasticity, praskání
zkřehnutí indukované tekutým kovem	všechny oceli	expozice v kovu s nízkou teplotou tavení	pokles plasticity
zkřehnutí indukované tuhým kovem	všechny oceli	expozice v nízkotavitelném kovu v blízkosti jeho teploty natavení	pokles plasticity

3.2.6 Simulace a modelování

V některých případech je vhodné simulovat vliv okolního prostředí na degradaci vlastností materiálu. Je možné studovat vliv tepelného nebo jiného zpracování na provozní chování materiálu v konkrétním prostředí. Nesprávné zpracování může zvýšit náchylnost materiálu k určitým typům napadení. Určité typy simulací vyžadují zrychlené testy, které umožňují získat požadované informace v přijatelném časovém intervalu. Nicméně interpretace zrychlených testů musí být prováděna s velkou opatrností – čím více se podmínky zrychleného testu odlišují od reálných podmínek, tím více mohou být výsledky simulací zavádějící.

Model je fyzikální, matematické nebo logické znázornění fyzikálního systému nebo procesu. Použití modelování může být velmi užitečný nástroj pro rekonstrukci havárií. Technika modelování nám může pomoci v porozumění příčin porušení součástí. Modelování může být

použito jak před, tak i po formulaci hypotézy. Mezi nejběžnější metody používané v inženýrském designu patří **metoda konečných prvků**. Nachází uplatnění při predikci napětí a deformací v konstrukcích při různých typech zatížení. Rovněž se využívá při řešení úloh spojených s přenosem tepla. Jedná se o analytickou techniku, která umožňuje numerické řešení složitých matematických a inženýrských problémů. Je založena na vytvoření geometrického modelu konstrukce, skládajícího se z konečného počtu elementárních uzlů. Jakmile je model vytvořen, matematické postupy umožňují získat soubor rovnovážných rovnic pro každý prvek a celý model. Aplikací různých okrajových podmínek a zatížení, řešení soustavy rovnic poskytuje výsledné posunutí kdekoli v modelu při zachování kontinuity a rovnováhy. Při uvažování různých konstitučních vztahů výsledky výpočtů mohou být transformovány na deformaci nebo napětí.

3.2.7 Kritická analýza získaných výsledků

Studium lomových ploch, mikrostruktury, mechanických vlastností a parametrů souvisejících s designem, podmínkami provozování a pracovním prostředím porušených součástí vede k řadě otázek, které by se měl odborník provádějící expertizní činnost pokusit zodpovědět:

- Jaká byla následnost procesů vedoucích k porušení? Rychlost? Cesta?
- Došlo k iniciaci v jednom místě nebo se jednalo o vícečetnou iniciaci?
- Nastala iniciace porušení na povrchu nebo pod povrchem?
- Souvisela oblast iniciace porušení s přítomností koncentrátoru napětí?
- Jak dlouhá byla přítomná trhлина?
- Jaká byla intenzita zatížení?
- Bylo zatížení statické nebo cyklické?
- Jak byla orientována napětí?
- Jaký byl lomový mechanismus?
- Jaká byla přibližná teplota v okamžiku porušení?
- Hrála teplota důležitou roli z hlediska porušení součástí?
- Uplatnil se při porušení součásti mechanismus opotřebení?
- Uplatnil se při porušení součásti korozní mechanismus? Jaký druh napadení?
- Byl použit vhodný materiál? Je požadován lepší materiál?
- Byl příčný průřez součásti dostatečný?
- Odpovídala kvalita použitého materiálu předepsané specifikaci?
- Byla součást správně tepelně zpracována?
- Byla součást správně vyrobena?

- Byla součást/ zařízení správně smontována, seříděna, atd.?
- Byla součást během provozování opravována? Byla oprava provedena správně?
- Byly údržbářské práce prováděny správně? Byla součást dostatečně mazána?
- Došlo k havárii v důsledku nesprávného používání součásti?
- Může být zlepšen design součásti tak, aby se dalo předejít podobným haváriím?
- Jaká je pravděpodobnost havárií v jiných podobných součástech/ zařízeních?
- Co může být uděláno, aby se zabránilo dalším haváriím?

Výše diskutované různé typy zkoušek obvykle umožňují metalurgům odpovědět na většinu těchto otázek. Vzhledem k tomu, že příčiny havárií nemohou být mnohdy s jistotou určeny bez ohledu na množství a kvalitu provedených experimentů, odborník provádějící expertizu by se měl vyjádřit, jaké příčiny považuje za nejpravděpodobnější a rovněž uvést další možné příčiny. V každém případě by měl uvést, které závěry jsou založeny na dokázaných faktech, a které jsou více spekulativní.

3.2.8 Písemná zpráva o výsledcích expertizy

Písemná zpráva shrnující výsledky technické expertizy by měla být jasná, stručná a logicky uspořádaná. Struktura zprávy by měla zahrnovat:

- popis analyzované součásti,
- podmínky v okamžiku porušení součásti,
- důležité informace o historii součásti,
- výsledky metalografického studia a provedených zkoušek mechanických vlastností,
- vyhodnocení kvality použitého materiálu,
- diskusi k jakýmkoliv zjištěným anomáliím,
- uvedení mechanismu nebo mechanismů, které pravděpodobně způsobily porušení součásti,
- doporučení pro zabránění dalších havárií nebo pro zlepšení funkčnosti součásti.

V tabulce 3.2 je uveden chronologický postup aktivit, které jsou obvykle realizovány při řešení havárií malého ekonomického významu a výsledky získané při těchto činnostech jsou předmětem písemné zprávy.

Tabulka 3.2 Seznam kroků obvykle prováděných při havárii malého ekonomického významu

Aktivita	Účel a cíl	Časová posloupnost
vizuální prohlídka a fotodokumentace součásti a okolí	zjistit, zda ke vzniku porušení došlo během jednoho nebo více zatěžovacích cyklů, nalézt iniciaci trhliny, hledat důkazy korozního nebo tepelného poškození, definovat prostředí a podmínky práce zařízení	co nejdříve po vzniku události
uskladnit součást v zabezpečeném místě	zabránit destrukci důkazů	co nejdříve po výchozí inspekci
bližší ohledání součásti, výběr míst pro zkoušení	potvrdit důkazy o iniciaci, o korozním nebo tepelném poškození, dodatečná dokumentace	před dalšími destruktivními testy
ultrazvuková zkouška	dokumentace přítomnosti, velikosti a orientace vad	před destruktivními zkouškami
příprava vzorků	odběr vzorků pro destruktivní zkoušky	po nedestruktivních zkouškách
řádkovací elektronová mikroskopie	fraktografická analýza, hledání výrobních chyb nebo provozního poškození	před světelnou mikroskopií
světelná mikroskopie	ověřit mikrostrukturní stav součásti, mechanismus šíření trhliny	po řádkovací elektronové mikroskopii
měření tvrdosti	ověřit úroveň tvrdosti materiálu	po světelné mikroskopii
ověření chemického složení	potvrdit značku použitého materiálu	kdykoliv po nedestruktivním zkoušení
tahová zkouška	prokázat úroveň mechanických vlastností materiálu	kdykoliv po nedestruktivním zkoušení

Ne každá zpráva musí obsahovat všechny výše uvedené body, v závislosti na povaze řešeného problému. V některých případech je zpráva určena pro obchodníky nebo jiné profese, které nemají technické vzdělání. V těchto případech by zpráva měla být napsána tak, aby byla pro tyto profese jazykově a odborně srozumitelná. Pro řídicí pracovníky s rozhodovací pravomocí

je někdy dobré připravit doprovodný dopis shrnující nejdůležitější výsledky a navrhovaná opatření.

Je velmi snadné dospět k chybným závěrům, pokud nesestavíme komplexní obraz problému z celé řady úhlů pohledu. To znamená, že expertizní činnost musí zahrnovat hodnocení shody výsledků získaných pomocí různých testů a metod. Výsledek jedné zkoušky neposkytuje dostatečné podklady pro analýzu porušení součástí. Další obecné nedostatky při expertizní činnosti zahrnují:

- rychlý přechod k závěrům,
- špatné porozumění problému,
- nepochopení, jak měl porušený systém pracovat,
- neuvažování všech možných příčin porušení,
- roztrhání problému na kusy před vytvořením komplexního plánu,
- neschopnost proniknout do problému,
- nepožádání o pomoc,
- chybná domněnka, že se jedná o snadný problém,
- zničení důkazů v důsledku nedostatku plánování.

3.3 Shrnutí základních pravidel

Základní pravidla při provádění expertizní činnosti lze shrnout následovně:

1. primární důležitost při provádění důkladné expertizní činnosti má kompilace informací o výrobě, zpracování a provozní historii porušené součásti/ zařízení. Pokud je to možné, je třeba získat originální specifikaci a výkresovou dokumentaci.
2. je důležité uchovat písemnou a obrazovou dokumentaci o prováděných experimentech,
3. důležitým prvním krokem při provádění jakékoliv expertizy je důkladná vizuální prohlídka, včetně zbytků tekutin, pudy, korozních produktů na povrchu porušené součásti,
4. metody nedestruktivního zkoušení a rovněž mechanické zkoušky mohou být užitečné při analýze příčin porušení součástí,
5. vlivu chemického prostředí a teplotní expozice musí být věnována patřičná pozornost při provádění jakékoliv expertizy. Změny vlastností a korozní procesy mohou hrát při expertize kritickou roli.
6. makroskopické studium lomových ploch může být považováno za jednu z nejdůležitějších částí expertizní činnosti.

7. studium makrostruktury a mikrostruktury poskytuje důležité informace o strukturním stavu materiálu porušené součásti, křehké lomy jsou obecně těžší pro analýzu vzhledem k velkému množství možných lomových mechanismů a malé makroskopické deformaci,
8. při expertizní činnosti musí být věnována pozornost všem detailům, aby závěry expertízy byly dobře dokumentovány a aby byly co možná nejobjektivnější.



Shrnutí pojmů kapitoly

Sběr důkazního materiálu: sběr poznatků týkajících se vlastní havárie, technologie výroby součásti, historie provozování, údržby a oprav, provozní deník a směrnice, informace o platných standardech. Velmi důležité informace mohou být získány pomocí osobních pohovorů s technickými pracovníky, obsluhou zařízení, konstruktéry, atd.

Vizuální analýza lomové plochy: jedna z nejdůležitějších aktivit při expertizní činnosti, může být zdrojem velmi důležitých informací o kvalitě materiálu, způsobu provozování, vlivu okolního prostředí, atd.

Nedestruktivní zkoušky: zkoušky, které umožňují posoudit vnitřní kvalitu materiálu bez destrukce důkazního materiálu. Mezi nejdůležitější metody náleží zkouška ultrazvukem, penetrační zkouška, metoda magnetického prášku, zkouška rtg zářením a zkouška vířivými proudy.

Fraktografická analýza: rozbor mikromechanismů iniciace a šíření trhlin, zpravidla za použití řádkovací elektronové mikroskopie.

Simulace: mohou se využívat k laboratornímu ověření vlivu prostředí na degradaci struktury a vlastností materiálů. Zrychlené testy umožňují získat požadované informace ve zkráceném čase, ale interpretace těchto testů musí být prováděna s velkou opatrností.



Otázky k probranému učivu

1. Jaké informace je možné získat při vizuální analýze lomové plochy?
2. Jaké základní otázky by si měl inženýr při provádění expertizní činnosti klást?
3. Jaké mechanismy zkřehnutí ocelí znáte?
4. K čemu slouží simulace a modelování při expertizní činnosti?
5. Jaké informace by měla obsahovat písemná zpráva o výsledcích expertízy?
6. Jaké jsou nejběžnější nedostatky při provádění expertíz?
7. Proč je doporučeno provádět fraktografický rozbor před metalografickou analýzou?

4. Materiálové defekty vyvolané výrobními procesy



Čas ke studiu: 3 hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- popsat nejběžnější příčiny materiálových defektů vzniklých během výroby materiálů nebo během jejich následného zpracování,
- definovat typy defektů, které mohou vzniknout během montáže zařízení nebo při inspekční kontrolách,
- zadat experimentální práce, které mohou odhalit příčinu výskytu defektů na lomových plochách



VÝKLAD

Existuje velké množství možných defektů spojených s výrobou součástí nebo s chybami při montáži a instalaci zařízení. S možnými defekty při různých technologiích metalurgické výroby a následného zpracování materiálů jste se seznámili v řadě odborných předmětů, které jste již absolvovali v průběhu Vaše studia. Vybrané příklady defektů, které jsou spojeny s nejdůležitějšími výrobními procesy, inspekci nebo montáží, jsou uvedeny níže.

4.1 Obrábění materiálů

- trhliny způsobené neadekvátním obráběním,
- poškození mikrostruktury tupým nástrojem,
- spálení povrchu vyvolané broušením,
- praskání materiálu vyvolané vysokými zbytkovými napětími v důsledku přehřátí,
- interkrystalické napadení materiálu po elektrochemickém opracování.

4.2 Procesy metalurgického tváření materiálu

- vznik trhlin, lokálního ztenčení v důsledku tváření, hlubokého tažení,
- přeložky způsobené válcováním závitů,
- stopy po nástroji nebo škrábance v důsledku operací tváření,
- praskání v důsledku zbytkových napětí po tváření,
- vznik Lüdersových linií v důsledku deformační rychlosti při tváření,
- mikrostrukturní defekty vyvolané děrováním nebo stříháním,

- poškození vyvolané přehřátím při navinování pružin,
- trhliny nebo přeložky vzniklé při balotínování (shot peening),
- praskání koroze pod napětím v důsledku použití nesprávného mazání v zápustce.

4.3 Tepelné zpracování materiálu

- velké zhrubnutí zrna,
- neúplný průběh fázových transformací,
- kalící trhliny,
- oduhličení,
- nepopuštěný martenzit,
- popouštěcí křehkost nebo jiný typ zkřehnutí,
- nežádoucí precipitace,
- zcitlivění mikrostruktury,
- mikrostrukturní heterogenity,
- ztráta vlastností vlivem přehřátí během tepelného zpracování po galvanickém pokovení.

4.4 Svařování

- studený spoj,
- křehké trhliny v tepelně ovlivněné zóně,
- zcitlivěná tepelně ovlivněná zóna,
- praskání vyvolané zbytkovými napětími,
- struskové vměstky,
- horké trhliny,
- krátery v zóně promíšení v místě konce svaru,
- praskání při nízkých teplotách expozice,
- vodíkové zkřehnutí v důsledku kontaminace přídavného materiálu vlhkostí.

4.5 Dokončovací operace

- koroze v důsledku neadekvátního čištění před nanášením nátěrových hmot,
- interkrystalické napadení nebo vodíkové zkřehnutí v důsledku čištění v kyselinách,
- vodíkové zkřehnutí vyvolané galvanickým pokovením.

4.6 Montáž zařízení

- špatné sestavení dílů,
- chybné nebo chybějící díly,
- nesprávné nástroje,
- nesprávné dotažení šroubových spojů, nedodržení předepsaného krouticího momentu..

4.7 Inspekční technika

- intergranulární napadení nebo zkřehnutí způsobené zkouškou makrostruktury,
- únavové nebo kalící trhliny způsobené ocelovým razidlem inspekčních značek.

Výše uvedené příklady defektů spojených s různými technologiemi výroby a dalšího zpracování materiálů nebo s montážními pracemi nelze v žádném případě považovat za vyčerpávající. Detailní klasifikaci a dokumentaci vad, které mohou vzniknout při různých procesech výroby a dalšího zpracování materiálů, je věnována řada atlasů a odborných knih. Mezi nejčastější příčiny porušení součástí v důsledku výrobních defektů patří chybně provedené tepelné zpracování.

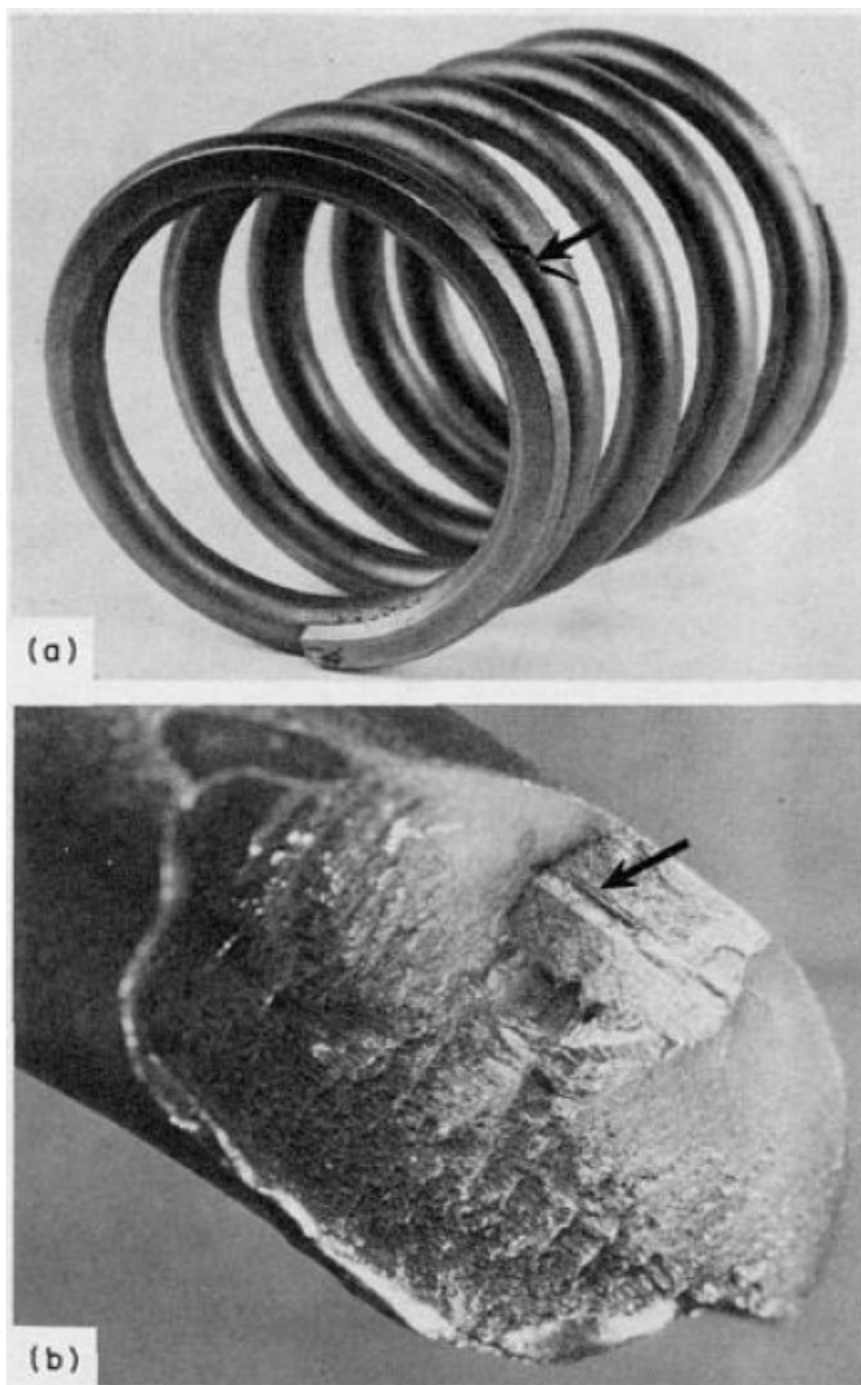


Řešené příklady

Příklad 1: Prasklá ventilová pružina

Tento příklad dokumentuje vliv metalurgických defektů v pružinové oceli na porušení ventilové pružiny. Na obr. 4.1 je dokumentována prasklá ventilová pružina, která byla vyrobena z drátu legované oceli o průměru 5,5 mm. Vnější průměr pružiny byl 50 mm, volná délka pružiny byla 64 mm. K porušení pružiny došlo ve vzdálenosti 1,5 závitu od konce pružiny – viz šipka. Vzhled lomové plochy nasvědčuje, že porušení bylo iniciováno na protáhlém podpovrchovém defektu v materiálu. NDT metoda magnetického prášku neodhalila u studované pružiny výskyt dalších trhlin nebo defektů. Mikroskopický rozbor vzorku, který představoval kolmý řez na lomovou plochu, prokázal, že k iniciaci porušení došlo na shluku nekovových částic. Jednalo se o hlinitanové a křemičitanové vměstky. V okolí shluku nekovových vměstků bylo patrné částečné oduhličení kovové matrice. Chemické složení vměstků a částečné oduhličení v jejich okolí nasvědčují, že se jedná o defekty pocházející z výchozího ingotu. Velikost defektu na lomové ploše činila 0,8 x 25 mm a defekt zasahoval do hloubky 1,3 mm pod lomovou plochu. Mikrostruktura oceli odpovídala dané aplikaci: jednalo se o popuštěný martenzit o tvrdosti 45 – 46 HRC, velikost původního austenitického zrna byla $G = 6 - 7$. Na lomové ploše byly pozorovány postupové únavové čáry, lomová plocha svírala s osou drátu úhel cca 45° , což nasvědčuje, že se jedná o krutový (torzní) lom.

Z provedeného rozboru vyplynulo, že únavové porušení pružiny bylo iniciováno na ocelářenském podpovrchovém defektu, který byl orientován rovnoběžně s osou drátu. Tento defekt představoval významný koncentrátor napětí.



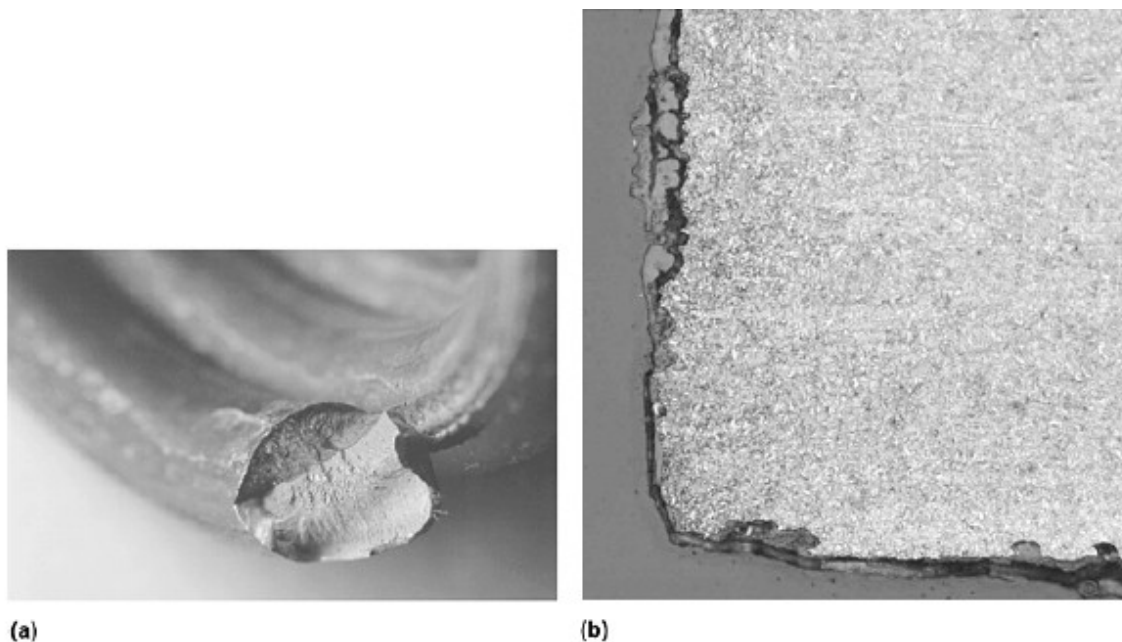
Obr. 4.1 Porušení ventilové pružiny iniciované metalurgickým defektem, a) snímek dokumentující lom pružiny (šipka), b) lomová plocha, místo iniciace je označeno šipkou

Příklad 2: Porušení pružinového drátu během navíjení pružiny

Pružinový drát z uhlíkové oceli byl tepelně zpracován kalením a popouštěním na nízkou teplotu. Během navíjení pružiny došlo k náhlému lomu drátu. Při vizuální kontrole lomové plochy bylo zjištěno, že část lomové plochy má odlišné zabarvení, obr. 4.2a. Z toho lze usuzovat, že ve výchozím drátu se před tepelným zpracováním na jakost mohl vyskytovat defekt charakteru trhliny. Pro potvrzení této domněnky byl připraven metalografický výbrus

kolmo na povrch lomové plochy. Lomová čára v části lomu s odlišným zabarvením byla pokryta nesouvislou vrstvou oxidů železa, obr. 4.2b. Lze předpokládat, že tyto oxidy vznikly během ohřevu drátu před kalením. Teplota následného popouštění byla příliš nízká pro vytvoření tak výrazné oxidické vrstvy.

Výsledky metalografického rozboru potvrdily, že příčinou lomu pružinového drátu byla trhлина, která byla v drátu přítomna již před zušlechťováním.



Obr. 4.2 Lomová plocha pružiny, a) zbarvená horní část lomové plochy odpovídá povrchovému defektu v pružině, b) příčný řez povrchovým defektem s výskytem tlusté vrstvy okuje (vertikální hrana)



Otázky k probranému učivu

1. Jaké jsou nejčastější typy vad, které vznikají během svařování?
2. Který technologický proces představuje jednu z nejběžnějších příčin nevyhovující kvality materiálů?
3. Jak lze omezit náchylnost galvanicky pokovených součástí ke zkřehnutí vodíkem?
4. V jakém případě lze předpokládat, že ocelové razidlo může iniciovat únavovou trhlinu?
5. Jaké experimentální metody jsou vhodné pro prokázání původu vad v kovových materiálech?
6. Jaké mikrostrukturní defekty mohou vzniknout při nevhodných parametrech třískového obrábění austenitických ocelí?

5. Základní kategorie porušení



Čas ke studiu: 3 hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- definovat rizikové faktory,
- definovat čtyři základní kategorie porušení,
- popsat možné vztahy mezi kategoriemi porušení a hlavními příčinami porušení,
- demonstrovat základní kategorie na příkladech.



VÝKLAD

5.1 Čtyři kategorie porušení

Při analýze příčin porušení součástí je nezbytné brát v úvahu aktivní rizikové faktory. Jedná se o externí faktory, které mohou přímo nebo nepřímo vyvolat porušení nebo poškození součástí. Porozumění těmto faktorům je důležité pro efektivní expertní činnost a stanovení příčin porušení. Minimalizace účinku těchto faktorů je často nejlogičtější řešením z hlediska snižování pravděpodobnosti porušení součástí. Mezi tato rizika náleží:

- **mechanické:** aplikované statické, dynamické nebo cyklické zatížení, rázy, zbytková napětí generovaná při výrobě součástí,
- **chemické:** neúmyslná akutní nebo chronická expozice v agresivním chemickém prostředí, záležitosti materiálové kompatibility,
- **elektrochemické:** kovy v korozním vodním prostředí,
- **tepelné:** degradace vlastností materiálu během expozice při zvýšených teplotách,
- **radiační:** ultrafialové nebo sluneční záření, ionizační záření z jaderných elektráren,
- **elektrické:** přítomnost elektrického pole.

Fyzické porušení materiálu může být zařazeno do jedné z mnoha kategorií v závislosti na klasifikačním systému. Následující čtyři kategorie představují vhodný způsob popisného zařazení porušení s cílem porozumět příčinám porušení a zabránit jejich opakování:

- *distorze nebo nežádoucí deformace,*
- *lom,*
- *korozie,*
- *opotřebení.*

Tyto čtyři kategorie představují obecné typy porušení a každý z těchto typů porušení může mít řadu podpůrných mechanismů (např. šíření únavové trhliny v důsledku galvanických korozních jevů). Je třeba zdůraznit, že u některých případů porušení se mohou současně uplatnit dva nebo více mechanismů. Každá pozorovaná kategorie porušení může být ztotožněna s jakoukoliv ze čtyř hlavních příčin porušení (nedostatky designu, materiálové defekty, výrobní nebo instalační defekty, anomálie v provozní životnosti), viz tab. 5.1.

Tabulka 5.1 Příklady hlavních příčin porušení, které vedou ke čtyřem kategoriím porušení

Kategorie porušení	Špatný design	Materiálový defekt	Výrobní defekt	Anomální životnost
distorze	nedostatečný příčný průřez způsobuje vyboulení za normálního zatížení	řediny ve vysoce namáhaném odlitku v parní turbíně vyvolávají trvalou deformaci a následně může dojít k dotyku rotoru a statoru	válcování závitu vyvolalo vznik výrazných skluzových pásů v titanovém šroubu, během utahování došlo k lokálnímu natažení šroubu.	expozice hliníkové součásti příliš vysoké teplotě vyvolává trvalou creepovou deformaci a následně vyboulení
lom	za studena tvářený a galvanizovaný plech z uhlíkové oceli se za normálního zatížení poruší v důsledku deformačního stárnutí	přeložka ve výkovku při cyklickém provozním zatížení roste a následně dojde k únavovému lomu	svařování slitinové oceli nedostatečně vysušenou elektrodou vyvolává vodíkové zkřehnutí a následně křehký lom	nevhodné vrtání děr do hliníkové součásti bicyklu vlastníkem vyvolalo iniciaci únavového porušení a katastrofický lom
koroze	podzemní potrubí z šedé litiny určené pro transport nebezpečných látek se poruší v důsledku odlegování nebo „grafitizace“ ^{*,*}	znečištění hliníkové slitiny železem vyvolává náchylnost k bodové korozi	žíhání svaru z oceli AISI 304L na teplotě 650°C vyvolalo mezikrystalovou korozi a následné	zvýšené používání soli na cestách v zimním období zvyšuje četnost defektů v elektroinstalaci automobilů

			porušení	
opotřebení	v zařízení jsou použity nekompatibilní materiály z hlediska odolnosti vůči opotřebení	nesprávné parametry tavení a tváření za tepla vedly k nevhodné distribuci karbidů v nástrojové oceli, což vedlo k poklesu životnosti.	špatně opracovaný povrch součásti vedl ke zrychlenému procesu jejího opotřebení	nedostatečné mazání ložiska vyvolalo jeho předčasné opotřebení

* tato forma koroze je obvykle spojena s odlitky z šedé litiny s grafitem ve formě lupínků. Grafit je elektrochemicky ušlechtilejší než železo. Expozice v elektrolytech způsobuje rozpouštění železa a zanechává pouze pórovitou hmotu grafitu. Jedná se o dlouhodobý mechanismus, který se uplatňuje při korozi litinového potrubí v půdách. Při velké ztrátě tloušťky stěny může dojít k porušení potrubí.

Pro jakoukoliv z výše uvedených kategorií porušení hraje kritickou roli chování materiálu. Například korozní lomy kovových součástí, kde jsou ve fyzickém kontaktu dva kovy, jsou v agresivním prostředí spojeny s rozdíly v jejich elektrochemickém chování. Interakce chemického složení, technologie zpracování, strukturních parametrů a vlastností (mechanických, fyzikálních nebo technologických) determinuje, zda bude chování materiálu v konkrétních aplikacích uspokojivé nebo ne.



Shrnutí pojmů kapitoly

Rizikové faktory: externí faktory, které mohou přímo nebo nepřímo vyvolat porušení nebo poškození součástí.

Distorze: nepřípustná trvalá změna tvaru součásti, která svědčí o překročení meze kluzu materiálu během provozování součásti,

Lom: je nehomogenní proces deformace materiálu doprovázený tvorbou nových povrchů v součásti, jehož důsledkem je ztráta základní funkce materiálu, přenosu napětí.

Koroze: znehodnocení povrchu materiálů nebo i vnitřní struktury materiálů v důsledku chemické interakce materiálu a okolního prostředí. V řadě případů vede ke ztrátě funkčnosti součástí.

Opotřebení: nežádoucí změna kvality povrchu nebo rozměrů tuhých těles způsobená buď vzájemnou mechanickou interakcí funkčních povrchů nebo funkčního povrchu a média, které opotřebení vyvolává.

Degradační procesy: procesy, které vedou k postupné ztrátě vlastností a poškození mikrostruktury technických materiálů v důsledku vzájemných interakcí mezi pracovním prostředím a materiálem.



Otázky k probranému učivu

1. Jaké znáte rizikové faktory porušení?
2. Charakterizujte jednotlivé obecné typy porušení.
3. Uveďte příklad porušení součásti, kde se mohou simultánně uplatnit dva nebo více mechanismů porušení.

6. Porušení vyvolané přetížením



Čas ke studiu: 5 hodin



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- definovat rozdíly mezi náhlým a pozvolným lomovým procesem,
- identifikovat typ lomu na základě charakteristik lomové plochy,
- pojmenovat makroskopické znaky lomové plochy,
- pojmenovat mikroskopické znaky na lomové ploše,
- určit místo iniciace a mikromechanismus šíření lomu.



VÝKLAD

Porušení z přetížení jsou z pohledu materiálového inženýra definovány jako křehké nebo tvárné lomy materiálu, které vznikají při překročení zátěžové kapacity materiálu buď v důsledku nadměrného aplikovaného zatížení nebo v důsledku degradace zátěžové kapacity materiálu vyvolané poškozením, zkřehnutím nebo jinými faktory. Nicméně neexistuje shoda o obecné klasifikaci porušení způsobeného přetížením. Řada inženýrů limituje definici lomů z přetížení na případy, kdy aplikovaná napětí byla větší než napětí předpokládaná při návrhu součástí. Tato nesprávná interpretace předpokládá poddimenzování jako příčinu lomů z přetížení, poněvadž nebere v úvahu případy, kdy degradační procesy vyvolají lom za normálního zatížení.

K porušení součástí může dojít buď náhlým lomovým procesem, který může být buď tvárný nebo křehký, případně lomový proces probíhá postupně. Mezi dva základní mechanismy postupného lomového mechanismu patří únava a creep. Základní charakteristiky lomových procesů, tak jak jsou shrnuty v tab. 6.1, umožňují identifikovat typ lomu.

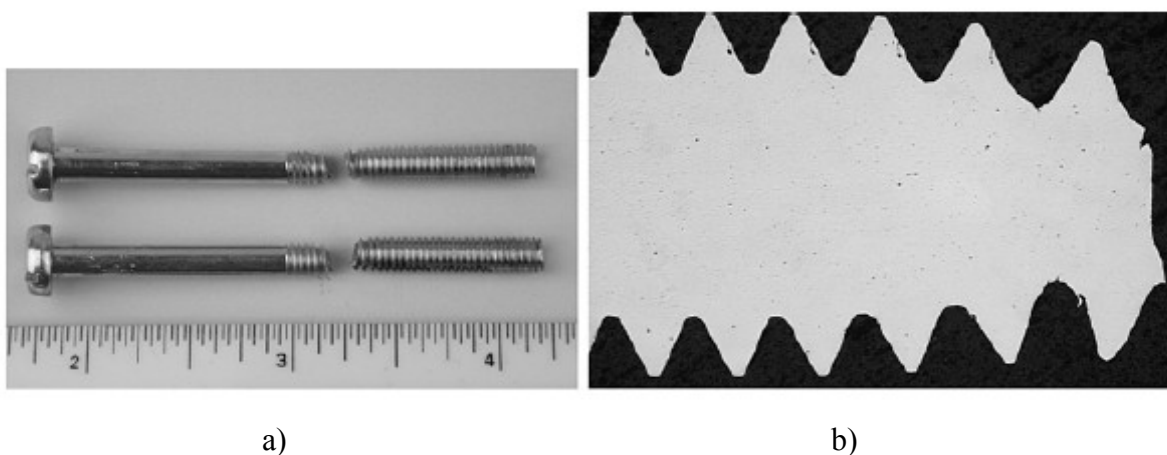
Tab.6.1 Identifikace typu lomu

Metoda	Náhlý lomový proces		Postupný lomový proces	
	tvárný	křehký	únava	creep
vizuální	zúžení nebo distorze ve směru zatížení, vláknitý lom,	malá distorze, rovný lom, lesklý, zrnitý lom,	zóna s postupovými čarami,	četné křehké praskliny, praskliny

	smykové límce	paprsky směřující k iniciaci lomu	zóna dolomu konzistentní s aplikovaným směrem zatížení, stupně v oblasti iniciace	vyplněné okují, lom po limitované rozměrové změně
řádkovací elektronová mikroskopie	jamky protažené ve směru zatížení, jedna trhлина bez větvení, výskyt povrchových skluzových pásů	štěpný nebo intergranulární lom, oblast iniciace může obsahovat napěťové koncentrátoři	otlačená lomová plocha, možný výskyt striací, zóna dolomu může být tvárná nebo křehká	intergranulární trhliny vyplněné okují, kavity na hranicích zrn
světelná mikroskopie	distorze zrn v blízkosti lomu, nepravidelný, transgranulární lom	Pouze malá distorze, intergranulární nebo transgranulární lom, může se vztahovat k povrchovým vrubům nebo křehkým fázím	únavová část lomu je obvykle transgranulární s malou distorzí, zóna dolomu může být tvárná nebo křehká	četné intergranulární trhliny, tvorba klínových trhlin a kavit na hranicích zrn, precipitace, oxidace, tečení materiálu
přispívající faktory	zatížení převýšilo pevnost součásti, je vhodné zkontrolovat složení materiálu a jeho zpracování, tvrdost; krátkodobý, vysokoteplotní, vysokonapěťový lom má tvárný vzhled	zatížení převýšilo dynamickou pevnost součásti, je vhodné zkontrolovat složení materiálu a jeho zpracování, houževnatost, velikost zrna; nízké teploty	cyklické napětí převýšilo limit, je vhodné zkontrolovat složení materiálu a jeho zpracování, povrchovou úpravu, podmínky provozování, trhliny mohly být iniciovány předchozím mechanickým	mírné přehřátí nebo přetížení při zvýšených teplotách; mikrostrukturní nestabilita a malá velikost zrna zvyšují rychlost creepu, je vhodné zkontrolovat složení materiálu; k lomu dochází po

			nebo korozním poškozením; nízký počet cyklů, vysoké napětí: malá únavová část lomu	dlouhodobé expozici
--	--	--	---	------------------------

Na obr. 6.1 je uveden příklad porušení šroubů z důvodu překročení jejich zátěžové kapacity. K porušení došlo v závitové části šroubů. Na podélném řezu prasklým šroubem v oblasti lomu lze pozorovat, že k iniciaci a šíření lomu došlo v oblasti malého průměru závitu. Stoupání závitu je v oblasti lomu větší než mimo oblast lomu. To svědčí o výrazné plastické deformaci, ke které došlo v průběhu zatěžování šroubu. Mikromechanismus šíření lomu byl jamkový tvárný. Tato analýza by dále měla být dále doplněna o mikrostrukturní rozbor, příp. o tahovou zkoušku, která by prokázala, zda byl k výrobě šroubů použit materiál s předepsanými mechanickými vlastnostmi.



Obr. 6.1 Lomy vysokopevných šroubů z přetížení, a) šrouby prasklé při instalaci, b) zúžení a natažení v závitové části šroubu, vznik trhlin v patě závitů, lom v nejmenším průřezu

Na obr. 6.2 jsou dokumentovány zbrzděné lomy šroubů, které úzce souvisí s nesprávně provedenou povrchovou úpravou šroubů. K poškození šroubů v podhlavové oblasti došlo během provozování, kdy byly šrouby vystaveny předepsanému tahovému předpětí. Fraktografická analýza prokázala, že lomová plocha podél obvodu dříku je převážně interkrystalická, zatímco v osově oblasti lomové plochy převládal tvárný jamkový lom. Chemické složení šroubu odpovídalo směrnému složení předepsané oceli. Při tahové zkoušce byly zjištěny pevnostní vlastnosti, které převyšovaly minimální požadavky a lomové plochy byly tvárné. Při metalografickém rozboru mikrostruktury bylo zjištěno, že se jedná o

popuštěný martenzit, s malou velikostí původního austenitického zrna. To nasvědčuje, že předepsaný režim tepelného zpracování byl dodržen.



Obr. 6.2 Zbrzděné lomy pod hlavou šroubů, a) porušení šroubů zbrzděnými lomy, b) poškození šroubu pod hlavou, c) převážně intergranulární lom s úzkými tvárnými hřebeny.

Na základě získaných výsledků lze předpokládat, že mechanismus porušení v podhlavové části šroubů souvisí s vodíkovým zkrěhnutím. K porušení šroubů došlo v důsledku tahového předpětí a předchozího navodíkování materiálu během galvanického pokovení. Je možné, že po pokovení nebylo aplikováno nízkoteplotní žíhání šroubů, které se obvykle provádí jako preventivní opatření pro zabránění zkrěhnutí galvanicky pokovených součástí.

6.1 Makroskopická fraktografická analýza

Správná interpretace lomové plochy představuje kritický krok z hlediska stanovení základních technických příčin lomu. Naneštěstí pouze ve vzácných případech může být s konkrétním specifickým fraktografickým znakem spojena jediná příčina. Z tohoto důvodu by se měly při analýze porušení využívat všechny dostupné informace, aby formulace závěrů o příčinách porušení byla co nejobjektivnější. Makrofraktografické pozorování je často nedostatečné pro identifikaci jedinečných podmínek vedoucích k lomu, ale obdobně výsledky mikrofraktografického rozboru bez podpory výsledků detailního makrostrukturního nebo mikrostrukturního hodnocení mohou vést k nesprávným závěrům.

Jak makroskopické, tak i mikroskopické znaky na lomové ploše obsahují informace o tom, jak a někdy i proč došlo k lomu. Znaky, které jsou často spojovány s lomovou plochou jak v makroměřítku, tak i v mikroměřítku, jsou shrnuty v tab.6.1 a 6.2. Informace v těchto tabulkách ukazují, že analýza lomových ploch poskytuje informace o:

- lokalitě iniciace lomu a směru šíření trhliny,
- mechanismu porušení,
- podmínkách zatěžování (statické nebo cyklické),
- vlivu pracovního prostředí,
- geometrických omezení, které ovlivňují iniciaci a šíření trhliny,

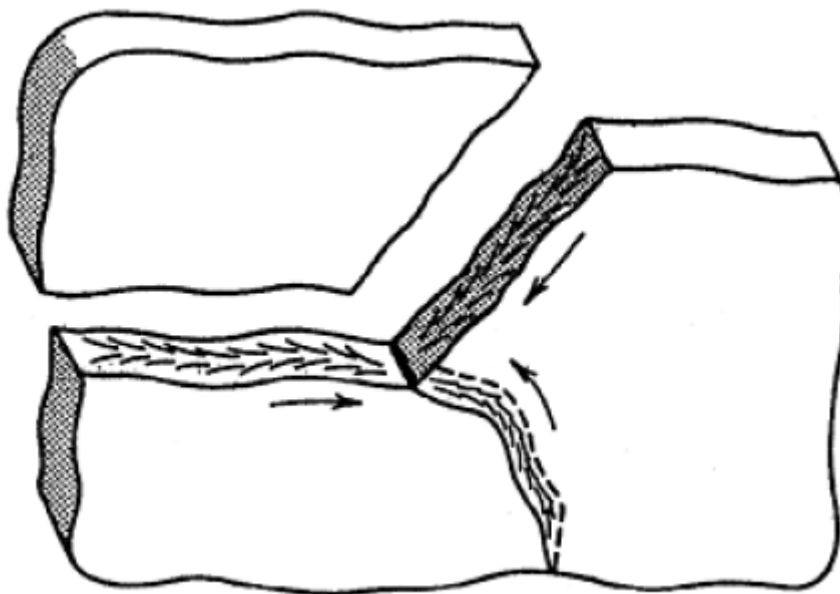
- výrobních defektech, které ovlivňují iniciaci a šíření trhliny.

Tabulka 6.1 Makroskopické znaky na lomové ploše

Indikace	Implikace
viditelná distorze	plastická deformace, může naznačovat nestabilitu (zúžení, vyboulení) nebo poškození po lomu
viditelné vruby, zářezy	možné místo iniciace trhliny
orientace lomové plochy vzhledem ke geometrii součásti a podmínkám zatěžování	identifikuje makroskopicky tvárný nebo křehký lom
na lomové ploše je přítomen rovný lom i smykové lince	směr šíření lomu je paralelní se smykovými línami, smíšený typ lomu
radiální znaky	ukazují směrem k místu iniciace trhliny, ukazují směr šíření trhliny
zabarvení lomové plochy	může indikovat korozní prostředí nebo zvýšenou teplotu expozice
viditelné rýhy a žlábků	potenciální místo iniciace trhliny
uzavřené trhliny na povrchu	možné cyklické zatížení, možné výrobní defekty (přeložky, kalící trhliny)
linie zastavení trhliny – cyklické zatížení (postupové čáry)	svědčí o cyklickém zatížení, šíří se ze středu poloměru zakřivení, zakřivení se může změnit na protilehlých plochách válcových těles
linie zastavení trhliny – monotónní zatížení	linie usměrněné ve směru šíření trhliny
rýhy ve tvaru rohatky	pravděpodobnější při cyklickém zatěžování, indikují místa iniciace
zoxidované plošky na lomové ploše	možné místo iniciace trhliny
reflexní charakteristiky lomu	matný lom: houževnatý nebo únavový lesklý lom: štěpný nebo intergranulární fazetovaný a lesklý lom: intergranulární, hrubé zrno
drsnost lomové plochy	drsnost lomové plochy se zvyšuje ve směru šíření trhliny, hladká oblast + drsná oblast ve směru šíření – cyklické zatěžování, drsné matné lomy jsou tvárné
otlačení (otírání) - obecně	může indikovat vibrace, může ukazovat finální směr separace, vířivé obrazce indikují torzní zatěžování

otlačení (otírání) - lokálně	může indikovat uzavírání trhliny při cyklickém zatěžování, může zahladit postupové čáry
deformované škrábance po válcování	v případě zkroucení, důsledek torzního zatěžování
stopy po obrábění (kolmé k ose součásti)	nejsou deformovány při torzním namáhání
proměnlivá drsnost lomové hrany	při ohybu křehkého materiálu, drsná strana - tah

Orientace lomové plochy, místo iniciace porušení a směr šíření trhliny by měly korespondovat s vnitřním stavem napjatosti vytvořeným externím zatížením a geometrií součásti. Pokud jsou na lomové ploše zřetelné „V“ značky (chevrons), při identifikaci místa iniciace trhliny může být použita analýza větvení trhlín, obr.6.3. Lom iniciuje v místě, kde lokální napětí (definované podmínkami externího zatížení, geometrií součásti a napětíovými koncentrátoři) převyšuje lokální pevnost materiálu. Změny pevnosti materiálu a defekty musí být uvažovány ve spojení se změnami lokálního napětí, které jsou determinovány aplikovaným zatížením a makroskopickými koncentratory napětí (např. změna příčného průřezu součásti).



Obr. 6.3 Schéma součásti, která se rozpadla na několik částí. Pokud jsou na lomové ploše zřetelné „V“ značky (chevrons), je možné lokalizovat místo iniciace, směr šíření a posloupnost tvorby trhlín.

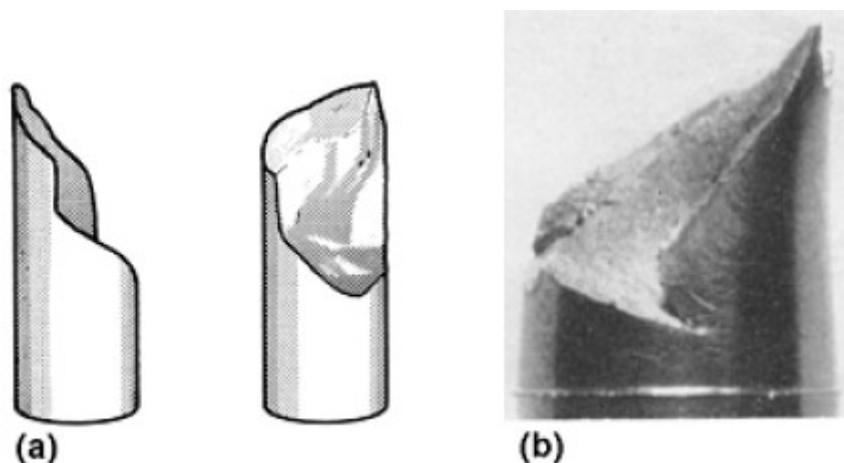
Radiální značky a značky ve tvaru písmene V (chevrons) jsou makroskopické znaky, které umožňují identifikovat místo iniciace a směr šíření trhliny. Jedná se o běžné a dominantní makroskopické znaky na lomových plochách tvářených kovových materiálů, ale v případě odlitků jsou často špatně rozeznatelné nebo vůbec nejsou přítomny. Vrchol písmene

V ukazuje směrem k místu iniciace a posloupnost značek ve tvaru V na lomové ploše označuje směr šíření trhliny. Radiální značky se obvykle rozevírají z místa iniciace trhliny.

Orientace lomové plochy vzhledem ke geometrii součásti může také vyloučit některé způsoby zatěžování. Např. iniciace trhliny není očekávána podél středové linie součásti zatížené v ohybu nebo v krutu, dokonce i v případech, kdy se v materiálu vyskytuje významný defekt v dané lokalitě, poněvadž ve středové linii nepůsobí žádné normálové napětí (v případě zatížení ohybem je v této oblasti smykové napětí, ale v homogenním materiálu je příliš malé pro iniciaci lomu). Křehký torzní lom je snadno makroskopicky identifikovatelný ve válcových vzorcích, kde má lomová plocha vzhled šroubovice, obr.6.4.



Obr. 6.3 Vějíř radiálních značek na lomové ploše ukazuje na místo, kde došlo k iniciaci porušení. Tento vějíř vzniká za podmínek rychlého šíření trhliny.



Obr. 6.4 Spirálovitý lom vyvolaný zatížením v krutu, a) schéma křehkého torzního lomu křídly, b) šroubovitý lom měděné tyče, která byla před tahovou zkouškou předdeformována krutem.

Drsnost povrchu a optická odrazivost lomové plochy také poskytují kvalitativní informace o šíření trhliny. Např. matný lom je typický pro tvárný jamkový lom, zatímco lesklá lomová plocha charakterizuje křehké lomy. Drsnost povrchu lomu odráží skutečnost, zda se jedná o vysokopevný materiál (hladší lom), o materiál s nízkou úrovní pevnosti (drsnější) a zda k lomu došlo při cyklickém zatěžování. Povrch únavové trhliny je obvykle hladší než oblast dolomu vzniklá statickým přetížením. Lom z přetížení při statickém zatěžování vysokopevné oceli je významně hladší než lom z přetížení u perlitické oceli.

Drsnost lomové plochy se zvyšuje během šíření trhliny, takže nejdrsnější oblast na lomové ploše obvykle odpovídá nejpozději porušené části průřezu součásti. Drsnost lomové plochy se zvětšuje s rychlostí šíření trhliny a sníženou pevnostní úrovní. Na obr. 6.5 je dokumentováno únavové porušení. K iniciaci trhliny došlo v povrchově zpevněné vrstvě – na horní straně obrázku. Trhlina se pak šířila po šroubovitě ploše krutem. Z obrázku je zřejmá změna drsnosti, jak se trhlina šíří z povrchově zpevněné vrstvy do jádra a nakonec do zpevněné vrstvy ve spodní části obrázku. Nejhrubší oblast lomové plochy odpovídá přetížené oblasti ve spodní části.



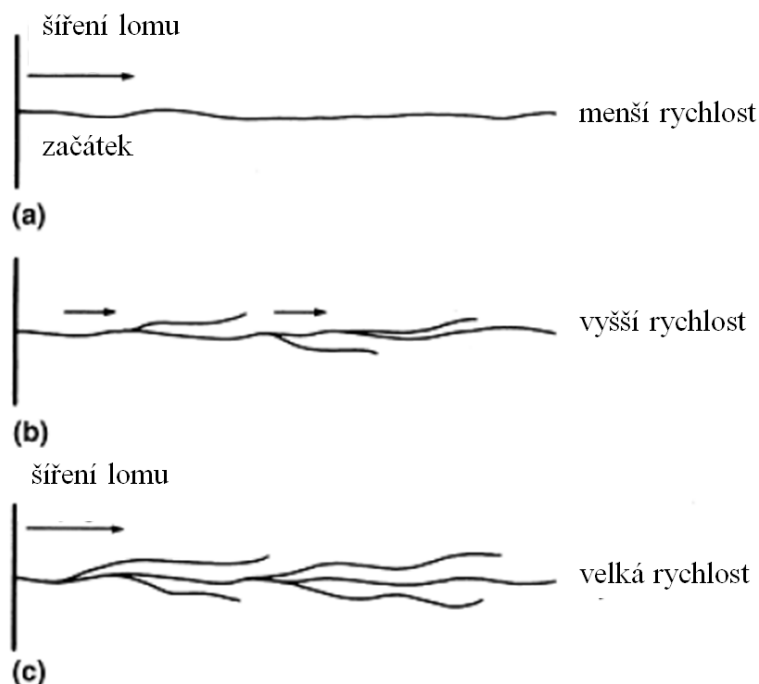
Obr. 6.5 Únavový lom, iniciace únavové trhliny v povrchové zpevněné vrstvě

Na obr. 6.6 je dokumentována lomová plocha indukčně kalené hřídele z uhlíkové oceli. Značky ve tvaru písmene V (chevrons) ukazují k místu iniciace porušení, které je označeno šipkou. Na lomové ploše je zřetelná eliptická oblast únavové trhliny šířící se z místa iniciace. Následné přetížení vedlo k rychlému dolomu. Značky ve tvaru V jsou patrné pouze v kalené povrchové vrstvě, ale nikoliv v houževnatějším jádru. Zvětšení drsnosti povrchu lomové plochy v oblasti jádra souvisí s převážně perlitickou mikrostrukturou v této oblasti.



Obr. 6.6 Únavový lom povrchově kalené hřídele z uhlíkové oceli, šipka = oblast iniciace

Drsnost lomové plochy a pravděpodobnost větvení trhliny se rovněž zvětšuje s velikostí aplikovaného zatížení a závisí na houževnatosti materiálu, obr. 6.7.



Obr. 6.7 Změny ve větvení trhliny s velikostí zatížení a rychlostí šíření trhliny, a) nízká rychlost (malé zatížení) a vysoká houževnatost, b) vyšší rychlost (větší zatížení) a vysoká houževnatost, c) vysoká rychlost (velké zatížení) a nízká houževnatost.

6.2 Mikroskopická fraktografická analýza

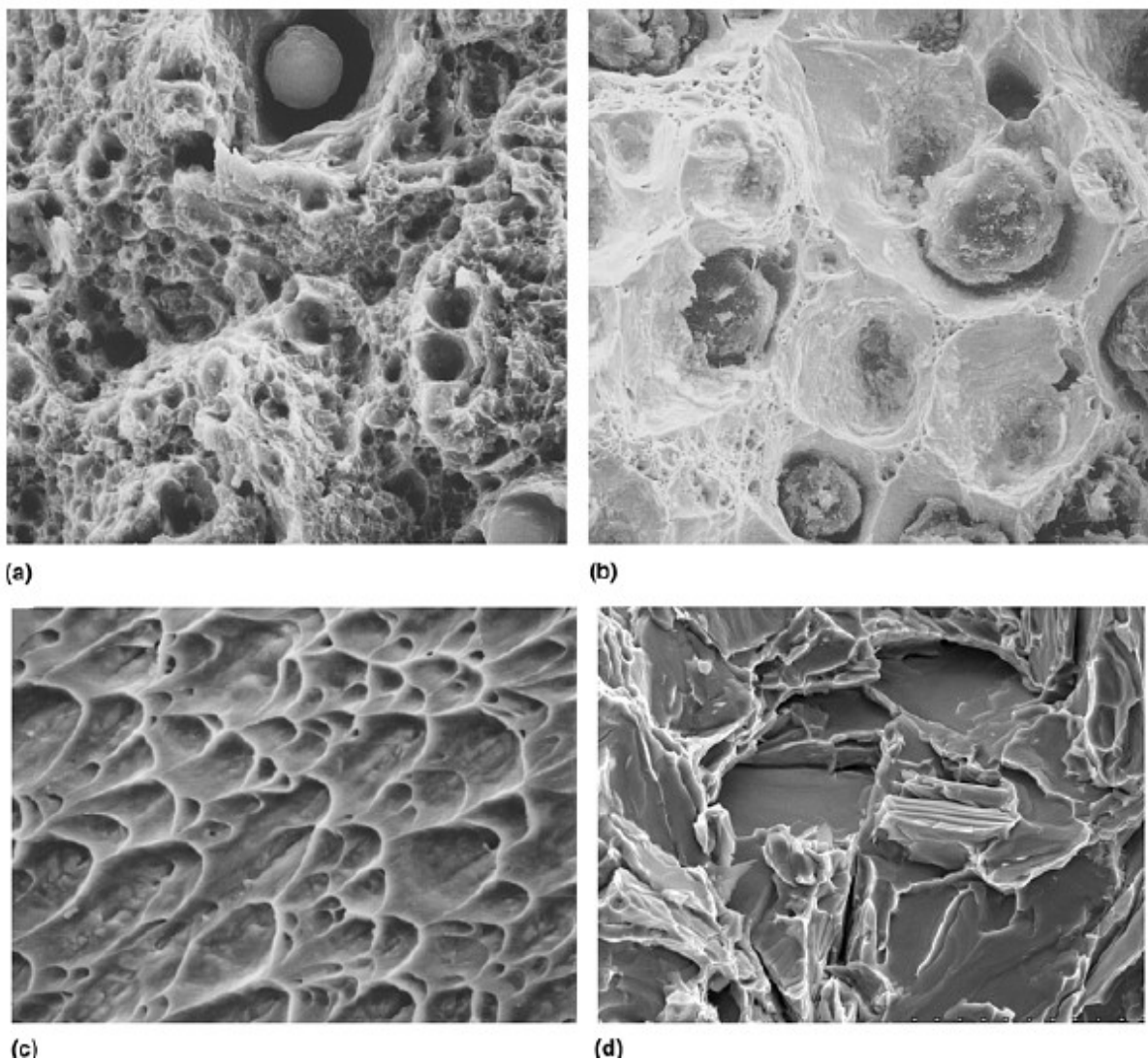
Tabulka 6.2 Mikroskopické znaky na lomové ploše

Indikace	Implikace
jamkový lom	tvárný lom z přetížení
lomová plocha s fazetami	křehký štěpný lom, možný mechanismus korozního praskání pod napětím, možný únavový lom pro malé ΔK
intergranulární lom s hladkými hranicemi zrn	bud' nesprávné tepelné zpracování nebo lom ovlivněný prostředím (korozní prostředí), méně často únavový lom pro malé ΔK
intergranulární lom s jamkami na fazetách	výrazná precipitace a ochuzené zóny podél hranic zrn, dekohezní lom v blízkosti teploty tavení
říčková kresba nebo vějířovitý vzor	štěpný lom, trhlina se šíří podél říček, paprsky vějíře se sbíhají v místě iniciace uvnitř zrna
jazýčky	deformace dvojčatěním během rychlého šíření

	trhliny
drážky na transgranulární lomové ploše	indikuje korozní prostředí a tvárný lom, trhlina se šíří rovnoběžně s drážkami
striace	únavové striace z cyklického zatěžování, konstantní vzdálenost – konstantní napěťová amplituda, striace na lomové ploše mohou být způsobeny sekundárními fázemi
žlábký nebo drážky	korozní praskání pod napětím,
artefakty (jako trhliny v blátě)	uschnutá tekutina na povrchu, špatné očištění povrchu, ve výchozím stavu může odpovídat provozním kapalinám nebo může indikovat korozní praskání pod napětím

Detailní analýza lomových ploch může pomoci při identifikaci defektů, které iniciovaly trhliny, umožňuje popsat šíření trhliny (transgranulární nebo intergranulární) a mikromechanismus porušení (koalescence dutin, štěpení, únava). V případě štěpného porušení může být z vějíře říčkových linií rovněž stanoven směr šíření trhlín. V případě jamkového tvárného porušení může být tvar jamek na lomové ploše korelován s podmínkami zatěžování (rovnoosé jamky odpovídají tahovému zatížení, eliptické jamky vznikají při smykovém nebo krutovém zatížení). Fraktografická analýza lomových ploch je obvykle prováděna za použití řádkovací elektronové mikroskopie (ŘEM). Pro tuto experimentální techniku je charakteristické vysoké prostorové rozlišení a zároveň velká hloubka ostrosti. Kontrast zobrazení v režimu sekundárních elektronů je velmi citlivý na změny orientace jednotlivých fazet, příp. jamek přítomných na lomových plochách. Interpretace ŘEM zobrazení vyžaduje určité zkušenosti. Obr. 6.8 dokumentuje velké rozdíly v morfologii lomové plochy při tvárném porušení v různých typech kovových materiálů.

Další výhodou řádkovací elektronové mikroskopie je možnost stanovit lokální chemické složení povrchové vrstvy vzorku za použití rtg mikroanalýzy. Například, lze stanovit chemické složení částic přítomných v oblasti iniciace lomu. Se základy fraktografické analýzy za použití ŘEM jste se již podrobně seznámili v rámci předmětu Strukturně fázová analýza.



Obr. 6.8 Rozdílné morfologie tvárných lomů v různých typech kovových materiálů, a) lomová plocha nízkolegované oceli se středním obsahem uhlíku, b) lomová plocha tvárné litiny, jamky jsou iniciované na grafitických částicích, c) smykový lom v Ti-6Al-4V slitině vyvolaný torzním zatížením, d) jamkový lom v lité hliníkové slitině.



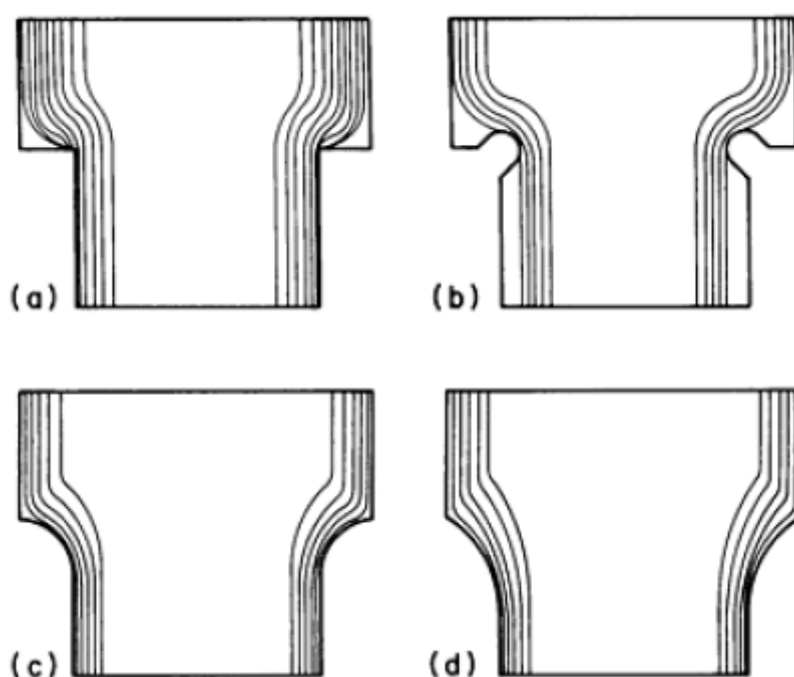
Řešené příklady

Lomy hřídelí

Hřídel je výrobek obvykle tvaru válce, plného průřezu nebo dutý, který přenáší rotační nebo axiální pohyb. Hřídele pracují v širokém spektru pracovních podmínek, včetně prašných nebo korozních atmosfér, a při teplotách od velmi nízkých (arktické podmínky) až do velmi vysokých (např. plynové turbíny). Kromě toho hřídele mohou být zatěžovány různými způsoby – tah, tlak, krut, ohyb nebo jejich kombinace. Nejdůležitějším mechanismem porušení hřídelí je únava. Porušení obvykle iniciuje v oblasti napěťového koncentrátoru, který může být buď metalurgické nebo mechanické povahy. Metalurgické faktory zahrnují kalící

trhliny, korozní důlky, velké nekovové vměstky nebo částice sekundárních fází, defekty ve svarech. Mechanické koncentrátoři zahrnují ostré přechody, drážky pro pera, apod. Hřídele se často porušují u hran dílů spojených nalisováním, kde existují vysoké koncentrace napětí, které výrazně redukuje odolnost vůči únavovému porušení.

Změna průměru hřídele koncentruje napětí do oblasti změny průměru a v části s menším průměrem. Účinky vlivu velikosti zaoblení v oblasti změny průměrů na koncentraci napětí jsou schematicky znázorněny na obr. 6.9. Ostrý přechod koncentruje napětí v oblasti přechodu z většího do menšího průměru. Velký rádius zaoblení umožňuje tok napětí s minimálním omezením. Poloměr zaoblení musí umožnit plynulý (tečný) přechod do menšího průměru hřídele.



Obr. 6.9 Vliv velikosti poloměru zaoblení na koncentraci napětí při změně průměru hřídele

Občas dochází ke křehkému porušení, zvláště v případě nízkých provozních teplot, v důsledku rázového nebo prudce aplikovaného zatížení. Křehký lom může souviset s nesprávnou volbou materiálu v důsledku nedostatečných znalostí provozních podmínek a prostředí nebo také může být důsledek nesprávného používání za podmínek, pro které nebyl navržen. Povrchové úpravy mohou zvýšit obsah vodíku v podpovrchových oblastech hřídelí vyrobených z vysokopevných ocelí, a to může způsobit zkřehnutí hřídelí dokonce při pokojové teplotě. Tvárné porušení hřídelí je obvykle způsobeno náhlým přetížením a je relativně vzácné při běžném provozování. Napětíové lomy hřídelí pracujících za zvýšených teplot mohou nastat creepovým mechanismem.

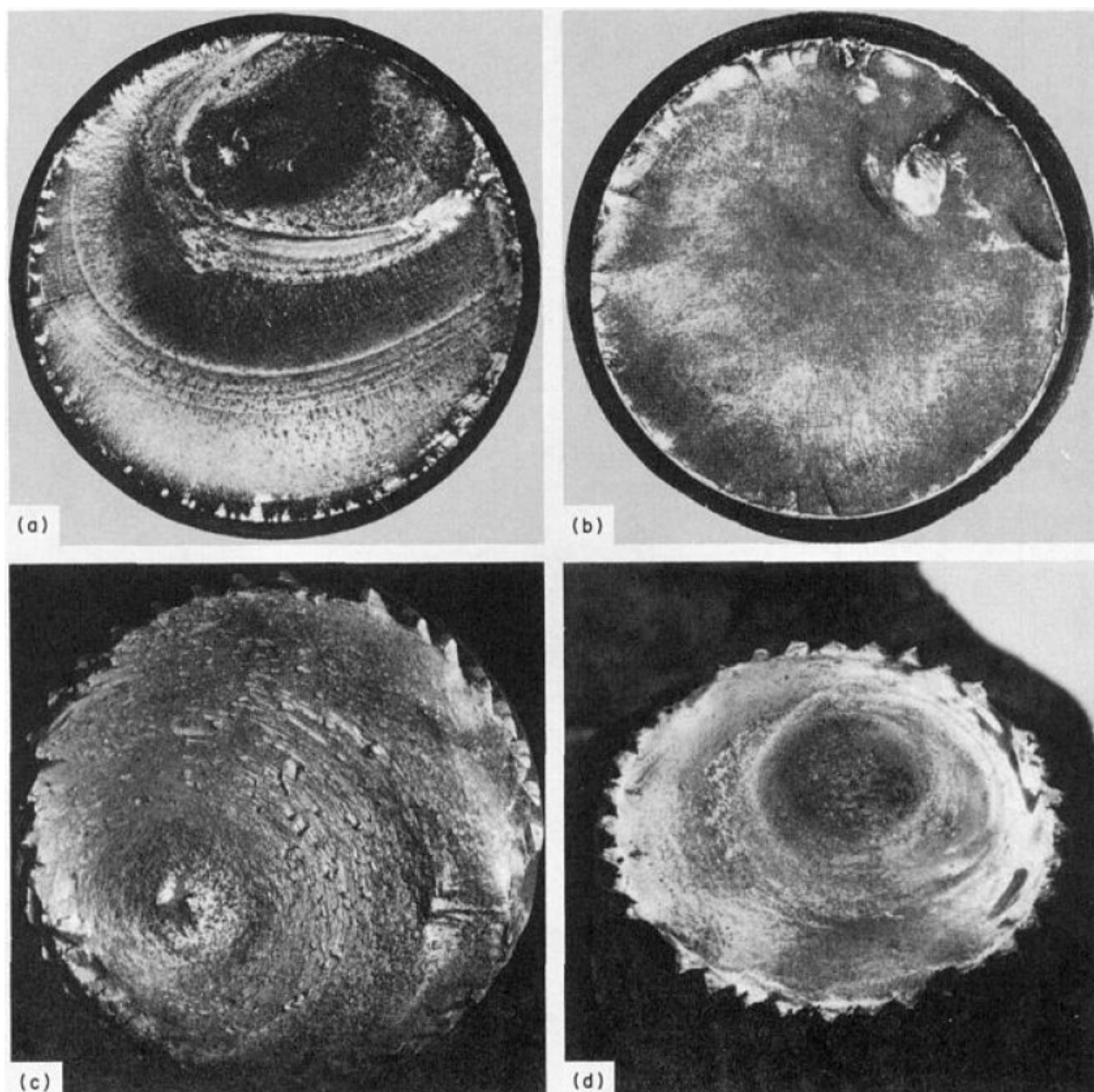
Většina provozních havárií hřídelí je spojena s podmínkami, které umožňují koncentraci napětí. V lokálních oblastech je hodnota napětí zvýšena nad úroveň, při které je materiál schopen vydržet počet zatěžovacích cyklů odpovídajících uspokojivé životnosti. Zdánlivě nevýznamná nedokonalost, např. malá povrchová vada, může významně redukovat únavovou pevnost hřídele, pokud je úroveň napětí v blízkosti vady vysoká. Nejvýznamnější oblastí je povrch hřídelí. Náhlá změna povrchové konfigurace může mít negativní efekt, závisející na orientaci vady a směru napětí. Většina koncentrátorů napětí může být zařazena do jedné z následujících skupin:

1. nedokonalosti tvaru hřídele, např. stupně v oblasti změn průměrů, díry, drážky s ostrými přechody, závity, nalisované součásti, atd.
2. povrchové nedokonalosti vznikající při výrobě nebo provozní poškození, např. vruby, stopy obráběcího nástroje, přeložky, identifikační značky, korozní poškození, atd.,
3. interní vady, např. porositá, velké nekovové vměstky, trhliny, atd.

Většina lomů je iniciována primárními koncentratory napětí (skupina 1), ale sekundární koncentratory napětí (skupiny 2 a 3) mohou k porušení významně přispívat.

Příklad 1 Lomy hřídelí vyvolané únavou nebo torzním smykem

Podobnosti v makroskopickém vzhledu lomů hřídelí z relativně tvárných kovů způsobených buď únavou při ohybu za rotace nebo jednorázovým přetížením torzním smykem často vedou k dezinterpretacím. Lomová plocha na obr. 6.10a je důsledek únavy, o čemž svědčí jednak multičetná iniciace podél obvodu hřídele, a jednak výrazné postupové čáry. Při malém zvětšení lomové plochy na obr. 6.10b postupové čáry nejsou zřetelné, což je důsledek mechanického otláčení. Přítomnost multičetné iniciace porušení podél povrchu (tvar rohatky) však svědčí o únavě ohybem za rotace. „Rozmazání“ kovu na povrchu lomu a rovněž krutová deformace na obr. 6.10c naznačují, že porušení hřídele nastalo torzním smykem. Lomová plocha na obr. 6.10d vykazuje zdánlivou podobnost s únavovými lomy. Nicméně tento lom byl způsoben torzním smykem, poněvadž na lomové ploše není patrná oblast finálního dolomu.



Obr. 6.10 Lomové plochy porušených hřídelí, a) a b) únavové lomy, c) a d) lomy vyvolané torzním smykem.

Pokud makroskopické studium nevede ke spolehlivým důkazům, použití řádkovací elektronové mikroskopie může na lomové ploše odhalit únavové striace nebo naopak protažené smykové dutiny. Rovněž metalografické rozborů výbrusů kolmých na povrch lomu mohou prokázat mikrodeformaci vyvolanou torzním smykem ve směru rotace, která by nebyla přítomná na únavovém lomu.

Trhliny vznikající z torzních napětí také vykazují postupové čáry. Koncentrátory podélných napětí jsou relativně neškodné při ohybovém namáhání, ale jsou stejně významné jako koncentrátory obvodových napětí v případě torzního zatížení. Tato citlivost hřídelí

zatěžovaných krutem k podélným koncentrátorům napětí má velký praktický význam, poněvadž vměstky v hřídelích jsou téměř vždy usměrněny rovnoběžně s rotační osou. Není neobvyklé, že torzní trhliny iniciují na podélném vměstku nebo na povrchovém vrubu a pak se větví pod 45°.

Příklad 2 Únavový lom hřídele iniciovaný podélnou drážkou pro pero

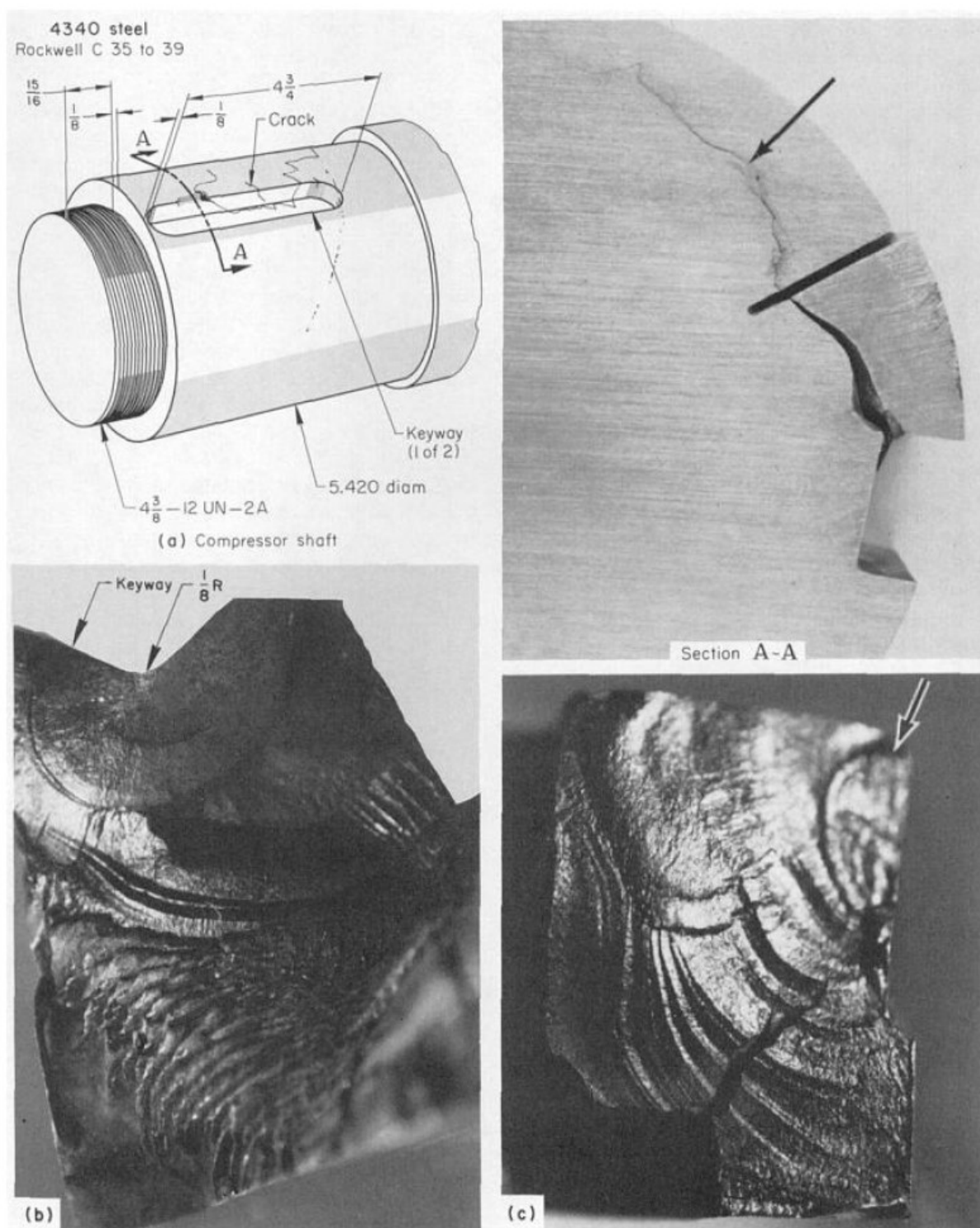
Příčinou mnoha provozních havárií hřídelí namáhaných krutem jsou podélné drážky v hřídelích. Většina těchto havárií je důsledek únavového lomu, kdy k iniciaci únavových trhlin dochází v ostrých rozích drážky v důsledku koncentrace napětí. Ostré rohy v drážkách mohou mít za následek, že lokální napětí dosahují až deseti násobek průměrného nominálního napětí.

Lomy tohoto typu mohou být minimalizovány použitím vhodných poloměrů zaoblení v drážkách. V zařízeních s nevhodně navrženými drážkami krutové zatížení vyvolává vznik trhlin šířících se ze spodní hrany drážky vyvolávajících typ lomu, který se nazývá „odlupování“. Příklad tohoto typu porušení hřídele je dokumentován na obr. 6.11. Při tomto porušení může dojít k odloupení povrchové vrstvy hřídele podél významné části obvodu hřídele.

Nejrůznější povrchové defekty pocházející z výroby, oprav nebo montáže hřídelí mohou představovat koncentrátory napětí přispívající k porušení hřídelí. Procesy, které zahrnují tento typ koncentrátorů napětí, zahrnují:

- procesy mechanického obrábění, které mohou vést ke vzniku škrábanců nebo otlaků nástroje na povrchu součásti,
- výrobní procesy, které zanechávají v povrchové vrstvě vysoká tahová napětí, např. nesprávné broušení, opravy svařováním, atd.,
- procesy, které způsobují oslabení povrchu součástí, např. vodíkové zkřehnutí vyvolané galvanickým pokovením, oduhličení povrchu při tepelném zpracování, atd.

Únavová pevnost může být zvýšena tlakovými zbytkovými napětími zavedenými do povrchové vrstvy hřídelí, např. kuličkováním (shot peening) nebo indukčním povrchovým kalením.

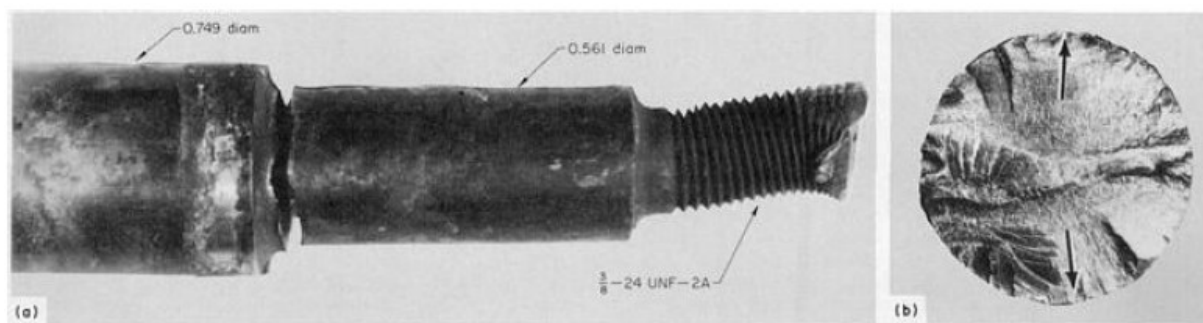


Obr. 6.11 Hřídel kompresoru porušený únavovým lomem, a) konfigurace a rozměry, b) a c) dokumentace iniciace porušení a postupových čar charakterizujících šíření únavové trhliny

Příklad 3 Únavový lom hřídele kompresoru

Na obr. 6.12 je dokumentován prasklý hřídel ventilátoru. Vizuální inspekcí hřídele bylo zjištěno, že porušení bylo iniciováno v blízkosti náhlé změny průřezu hřídele. Únavové trhliny byly iniciovány ve dvou lokalitách na povrchu hřídele, které byly vůči sobě pootočený

přibližně o 180° a šířily se směrem do středu průřezu hřídele. K finálnímu dolomu došlo v blízkosti středu hřídele. Lomová plocha tedy vykazovala charakteristiky typické pro únavu při reverzním ohybu.



Obr. 6.12 Hřídel ventilátoru, který se porušil únavovým mechanismem spojeným s reverzním ohybem, a) celkový pohled na hřídel, b) lomová plocha s protilehlými místy iniciace.

Chemická analýza materiálu potvrdila, že byla použita předepsaná jakostní značka oceli. Tahovou zkouškou byly zjištěny následující vlastnosti oceli: $R_m = 631 \text{ MPa}$, $R_e = 369 \text{ MPa}$, $A = 27\%$. Mez kluzu byla mnohem nižší, než bylo předepsáno ve výrobní dokumentaci. Tvrdost materiálu odpovídala 179 HB. Metalografický rozbor prokázal, že mikrostruktura hřídele je převážně feriticko – perlitická, což nasvědčuje, že byl použit materiál ve stavu po tváření za tepla nebo po normalizačním žihání. Lomová plocha hřídele byla silně zkorodována, k čemuž pravděpodobně došlo až po lomu součásti. Lze předpokládat, že použití materiálu v zušlechtném stavu (kalení + popouštění) by vedlo ke zvýšení únavové pevnosti hřídele. Přibližně 40% zvýšení únavového limitu by bylo možné dosáhnout zvýšením tvrdosti materiálu na úroveň 286 až 344 HB. Kuličkování povrchu po obrábění by umožnilo vytvořit zbytková tlaková napětí v povrchové vrstvě, která by dále zvýšila únavový limit.



Shrnutí pojmů kapitoly

Postupný lomový proces: k rozvoji porušení dochází postupně, proces růstu defektů může zahrnovat dlouhý časový úsek a je následován finálním dolomem.

Únavový lom: nejčastější mechanismus porušení strojních součástí. Je spojen s cyklickým zatěžováním součástí. K iniciaci trhliny většinou dochází na povrchu součástí, postupné šíření únavové trhliny probíhá transgranulárně a po dostatečném zeslabení příčného průřezu dochází k finálnímu dolomu.

Creepový lom: postupný rozvoj porušení součástí dlouhodobě zatížených malými napětími při zvýšených teplotách. Mechanismus creepu záleží na podmínkách provozování součástí. Typický creepový lom představuje interkrystalické porušení

Fraktografický rozbor: jedna z nejdůležitějších metod při analýze příčin porušení součástí. Na základě studia makroskopických a mikroskopických charakteristik lomové plochy je možné charakterizovat především místo iniciace lomu, směr šíření trhliny, mechanismu porušení, případný výskyt apriorních materiálových defektů, vliv pracovního prostředí.

Koncentrátory napětí: oblasti součástí, kde dochází k výraznému zvýšení napětí. Může se jednat o výrobní defekty, např. shluky vměstků, v materiálech nebo nevhodná konstrukční řešení (ostré přechody). Koncentrátory napětí představují přednostní lokality iniciace únavových trhlin.

Mikromechanismus porušení: rozbořem mikroskopických znaků lomových ploch je možné získat poznatky o mechanismech vzniku a šíření trhlin: vznik a koalescence dutin, šíření trhlin podél atomových rovin - štěpení, dekoheze podél hranic zrn, atd.



Otázky k probranému učivu

1. Jaký je rozdíl mezi náhlým a postupným lomovým procesem?
2. Jaké jsou základní rozdíly mezi tvárným a křehkým porušením?
3. Popište rozdíly v morfologii únavového lomu při jednosměrném a reverzním ohybovém namáhání.
4. Za jaké podmínky dochází k dolomu při únavovém porušení a o čem vypovídá podíl dolomu na lomové ploše?
5. Jaká jsou základní stadia creepového lomu?
6. Jaké znáte koncentrátory napětí na povrchu součástí?
7. Co je úkolem makroskopické a mikroskopické fraktografické analýzy?
8. Jaké informace je možné získat při analýze lomových ploch za použití ŘEM?
9. Jaké dodatečné informace je možné získat při studiu lomové linie za použití světelné mikroskopie?
10. Jaké znáte mikromechanismy porušení?
11. Jak lze zjistit degradační vliv pracovního prostředí na porušení součástí při fraktografické analýze?

7. Poškození a porušení vyvolané korozí



Čas ke studiu: 3 hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- popsat obecné zásady při analýze zkorodovaných součástí,
- definovat možná nemediální opatření pro omezení korozního napadení,
- identifikovat znaky korozního praskání pod napětím,
- popsat symptomy korozní únavy.



VÝKLAD

Koroze představuje znehodnocení povrchu nebo i vnitřní struktury materiálů v důsledku chemické interakce materiálu a okolního prostředí. V řadě případů vede ke ztrátě funkčnosti součástí. Se dvěma základními typy koroze – chemickou a elektrochemickou korozí - jste se již detailně seznámili v rámci studia předmětu Degradací procesy. V této souvislosti je v této kapitole věnována pozornost pouze obecným zásadám při analýze zkorodovaných součástí a popisu dvou významných mechanismů prostředím indukované degradace materiálů.

7.1 Obecné zásady při analýze zkorodovaných součástí

Obecný postup při analýze korozně poškozených nebo porušených součástí lze shrnout následovně:

- dokumentace vzorků v dodaném stavu, včetně stereomikroskopické techniky, všechny vzorky musí být řádně označeny, jejich původ a zpracování musí být dobře definováno.
- provedení nedestruktivních zkoušek. Při zkouškách nesmí dojít k poškození nebo odstranění korozních úsad na vzorcích. V této souvislosti není přípustné použití tekutin, např. penetrační metody.
- odstranění korozních produktů. K odstranění úsad by měly být použity nástroje, které nemohou kontaminovat úsady, např. nástroje z nerezavějící oceli. Odebrané vzorky musí být uskladněny ve vhodných schránkách.
- nejběžnější metodu chemické analýzy korozních produktů představuje energiově disperzní mikroanalýza v řádkovacím elektronovém mikroskopu.

- na základě vizuálního posouzení, může být provedena mikrobiologická analýza korozních produktů.

Na základě výsledků korozního poškození výrobků lze doporučit nápravná opatření, která umožní zabránit nebo oddálit opakovaný výskyt poškození nebo porušení součástí. Základní přístupy k preventivním a nápravným opatřením zahrnují:

- změnu provozního prostředí,
- změnu chemického složení materiálu nebo režimu tepelného zpracování,
- modifikaci designu součástí,
- použití galvanické ochrany,
- použití inhibitorů,
- aplikaci povlaků a nástřiků,
- korozní monitoring a preventivní údržbu.

Environmentální efekty mohou velmi akcelarovat porušení materiálů při jejich mechanickém zatěžování. V této souvislosti je třeba věnovat komplexní pozornost především dvěma komplexním jevům: koroznímu praskání pod napětím a korozní únavě.

7.2 Obecné charakteristiky jevu korozního praskání pod napětím (SCC)

Na základě extenzivních empirických sledování byly kategorizovány následující speciální charakteristiky jevu SCC:

- je nezbytné působení tahových napětí. Původ tohoto napětí může být různorodý: provozní zatížení, zpevnění deformací za studena, tepelné zpracování nebo účinek korozních produktů,
- k tomuto jevu jsou náchylné pouze slitiny (nikoliv čisté kovy),
- obecně pouze několik chemických látek v prostředí je efektivních pro vyvolání jevu SCC v konkrétní slitině,
- látky zodpovědné za SCC nemusí být v prostředí přítomny ve velkém množství či ve vysokých koncentracích,
- pro určité kombinace slitin a korozního prostředí mohou být nezbytné zvýšené teploty pro aktivaci procesů podstatných pro SCC,
- trhliny vzniklé při korozním praskání pod napětím vykazují vždy makroskopicky křehký vzhled, dokonce i v případě slitin, které jsou obecně velmi houževnaté,
- lomový mechanismus je v případě SCC obvykle odlišný od lomového mechanismu pro podmínky rovinné deformace ve stejné slitině,
- přinejmenším v některých systémech se zdá, že existuje prahové napětí, pod kterým se SCC nevyskytuje.

Tyto poznatky byly postupem času doplněny o následující tři charakteristiky:

- katodická ochrana byla v některých případech v omezeném rozsahu úspěšná při zabránění iniciace trhliny a v zastavení šířící se trhliny,
- přísada rozpustných solí obsahujících specifické anionty může inhibovat efekt tvorby trhlín v daném prostředí a dané slitině,
- jisté strukturní parametry slitin (velikost zrna, fázové složení, atd.) mají vliv na náchylnost dané slitiny k SCC v daném prostředí.

Pro šíření subkritické trhliny při SCC bylo navrženo několik mechanismů:

- pokud je „čerstvý“ kovový povrch vystaven plastické deformaci na špici trhliny, probíhá soutěž mezi rozpouštěním, které by otupilo trhlínu a pasivací, která by zabránila styku prostředí s kovem. Mezi těmito extrémy existuje rozmezí, kde je „čerstvý“ kov na špici trhliny napaden, ale stěny trhliny jsou pasivovány.
- špice trhliny se repasivuje, ale pasivní vrstva nakonec praská a „čerstvý“ kov je atakován anodickým rozpouštěním a poté dochází k opětovné repasivaci povrchu. Tento proces je spojen s diskontinuálním růstem, který by mohl vést ke vzniku striací, které jsou v některých systémech pozorovány.
- trhlina se šíří repasivací a praskáním pasivní vrstvy bez napadení základního kovu.
- přednostní rozpouštění jedné mikrostrukturní komponenty (hranice zrna), která je anodou ve vztahu k objemu kovu,
- adsorpce iontů oslabuje atomové vazby na špici trhliny, umožňuje jejich přetržení při nižším než normálním aplikovaném napětí.
- adsorpce iontů podporuje zvýšenou, vysoce lokalizovanou plasticitu, která podporuje skluz na špici trhliny, vedoucí k růstu trhliny. Tato teorie se nazývá *adsorpcí zvýšená plasticita*.
- na lokálních katodách je generován vodík, který vstupuje do kovu, difunduje do oblasti špice trhliny a způsobuje šíření trhliny. Tento mechanismus je spojen s environmentálním zkrěhnutím vysokopevných uhlíkových ocelí a nerezavějících ocelí.

Rozvoj SCC často závisí na detailech složení prostředí, na struktuře a složení slitiny. Často malé změny ve složení prostředí nebo slitiny mohou zcela potlačit korozní praskání. Existuje řada parametrů prostředí, které jsou důležité z hlediska SCC: teplota, tlak, koncentrace, aktivita a druh rozpouštěných složek v roztocích, pH faktor, elektrochemický potenciál, viskozita roztoku, míchání roztoku, atd..

Při provádění metalografických rozborů korozně poškozených vzorků je třeba vzít v úvahu:

- jaký je průběh trhliny vzhledem k mikrostruktuře – intergranulární nebo transgranulární, větvení trhlín, apod.
- preferentní orientaci zrn, kdy směr maximálního napětí je kolmý k rozměrným stěnám zrn,
- možný výskyt vysoce zpevněných povrchů v důsledku nesprávného obrábění nebo opotřebení, který může vyvolat napětěvé praskání ve vysokopevných materiálech,
- možnost rozpuštění nečistot v povrchových vrstvách materiálu v důsledku vysoké aktivity uhlíku nebo síry v okolním prostředí,
- možnost transportu vodíku do kovu během jeho zpracování, který může vyvolat vodíkem indukované zbrzděné lomy,
- detailní analýzou oblastí hranic zrn (orientace, precipitace, segregace) stanovit, zda změny v těchto oblastech nevyvolaly náchylnost k napětěvé koroznímu napadení, např. zcitlivění austenitických ocelí,
- zda se ve slitině nevyskytuje nečistota (prvek), která není specifikována v předepsaném chemickém složení, ale její přítomnost výrazně zvyšuje náchylnost materiálu k SCC, např. arsen nebo antimon v ocelích.

7.3 Korozní únava

Tento mechanismus porušení je spojen s cyklickými nebo proměnlivými napětími působícími v korozním prostředí, kdy dochází ke zrychlené iniciaci a růstu trhlín za podmínek, kdy by samostatné působení buď korozního prostředí nebo cyklického napětí nebylo dostatečné ke vzniku trhlín. Korozní prostředí obvykle vytváří povrchové napětěvé koncentrátoři. Nerovný, korozně napadený povrch je nevýhodný z hlediska únavových charakteristik materiálu. Důležitou charakteristikou korozní únavy je, že rozsah napětí požadovaný k vyvolání lomu rychle klesá s rostoucím časem a počtem napětěvých cyklů. Je třeba podotknout, že by bylo nepraktické a neekonomické provádět návrh součástí odolných výhradně vůči korozní únavě. Například, únavový limit ve vodních prostředích je u středně uhlíkových ocelí eliminován v závislosti na elektrochemickém potenciálu. Důraz při zkouškách korozní únavy je kladen spíše na měření rychlosti šíření únavové trhliny v různých prostředích, než na celkovou dobu do lomu.



Řešené příklady

Příklad 1: Korozní poškození mosazných vodoměrů

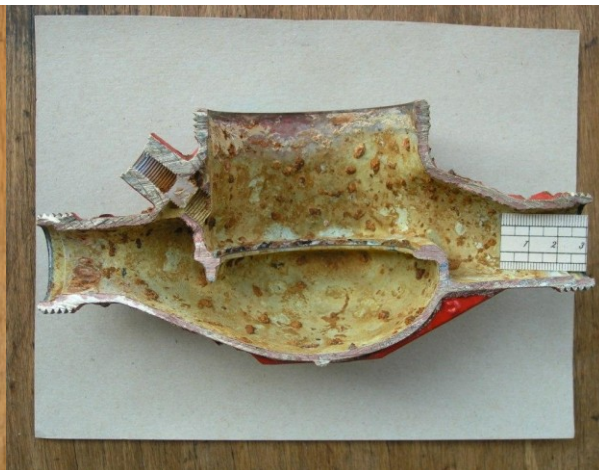
Po několika letech po zavedení úpravy pitné vody dávkováním ClO_2 došlo k porušení těsnosti mosazných vodoměrů v rozvodech teplé užitkové vody. Poškození mělo charakter náhodně

rozmístěných korozních důlků, lokálně byla narušena celá tloušťka stěny vodoměrů. Odlitky vodoměrů byly vyrobeny ze slitiny obsahující (hm.%): 60% Cu a 35% Zn.

Obr. 7.1 dokumentuje poškozený vodoměr s průsaky na vnějším povrchu. Na obr. 7.2 je uveden podélný řez tělesem vodoměru.

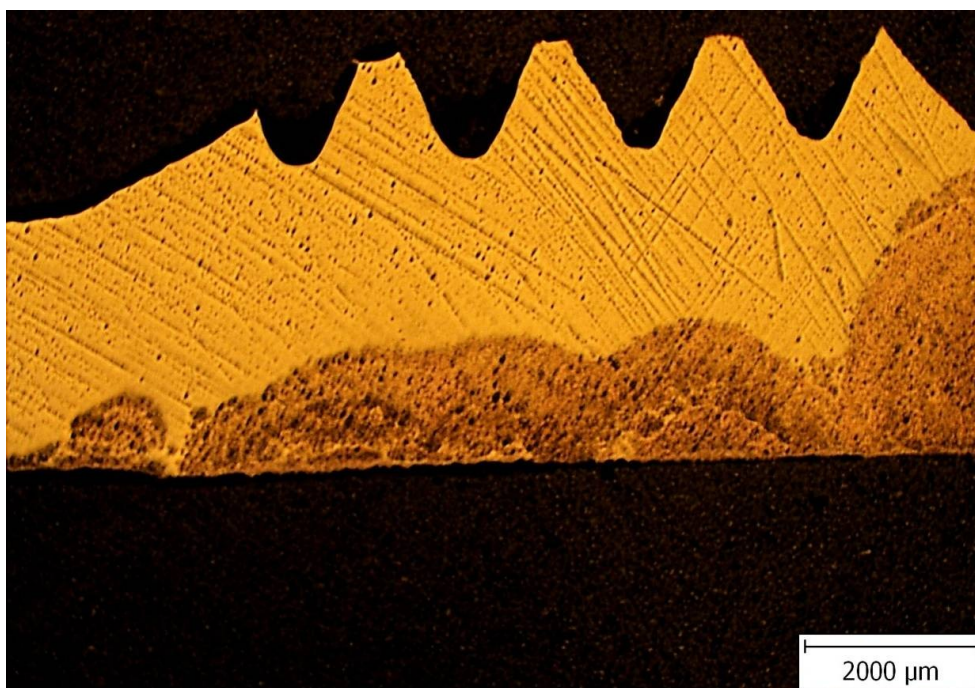


Obr. 7.1 Vodoměr s průsaky



Obr. 7.2 Podélný řez tělesem vodoměru

Z míst výskytu charakteristických vad byly odebrány vzorky pro metalografickou analýzu. Při studiu vyleštěných vzorků byly pozorovány dvě barevně odlišné oblasti: zlaté a růžové. Růžové oblasti vykazovaly znaky selektivního korozního mezikrystalového napadení.

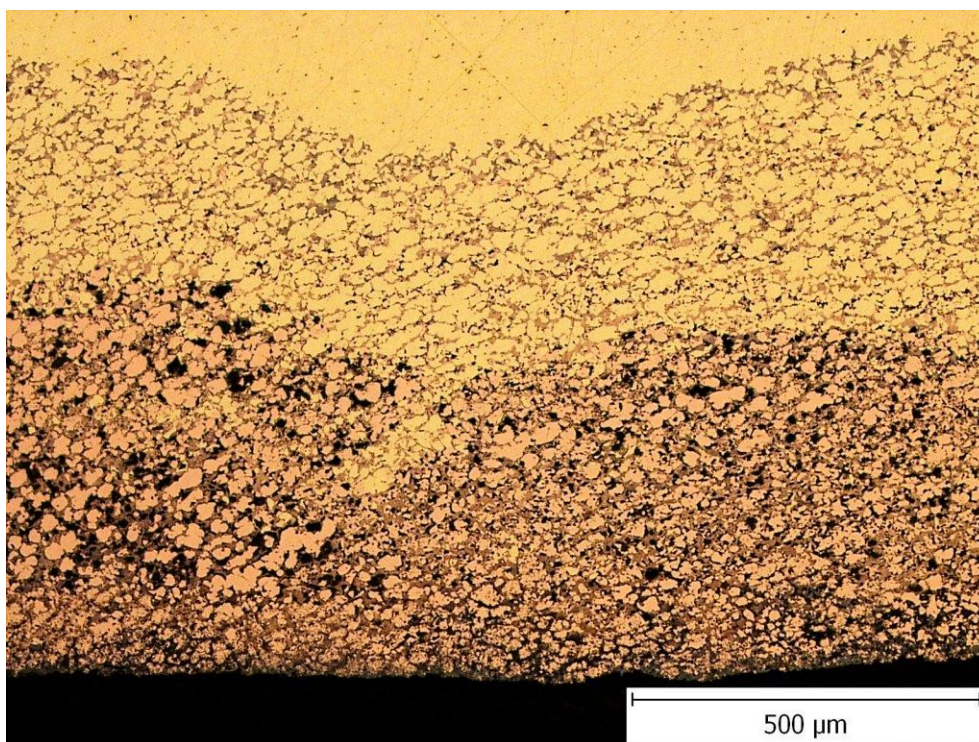


Obr. 7.3 Korozní napadení u vnitřní stěny vodoměru

Kovová matrice v růžových oblastech byla porézní. Růžové oblasti vždy vycházely z vnitřního povrchu vodoměru, postupně se šířily do stěny vodoměru a v místech průsaků zasahovaly růžové oblasti až na vnější povrch vodoměru. Mikrotvrdost zlatých oblastí

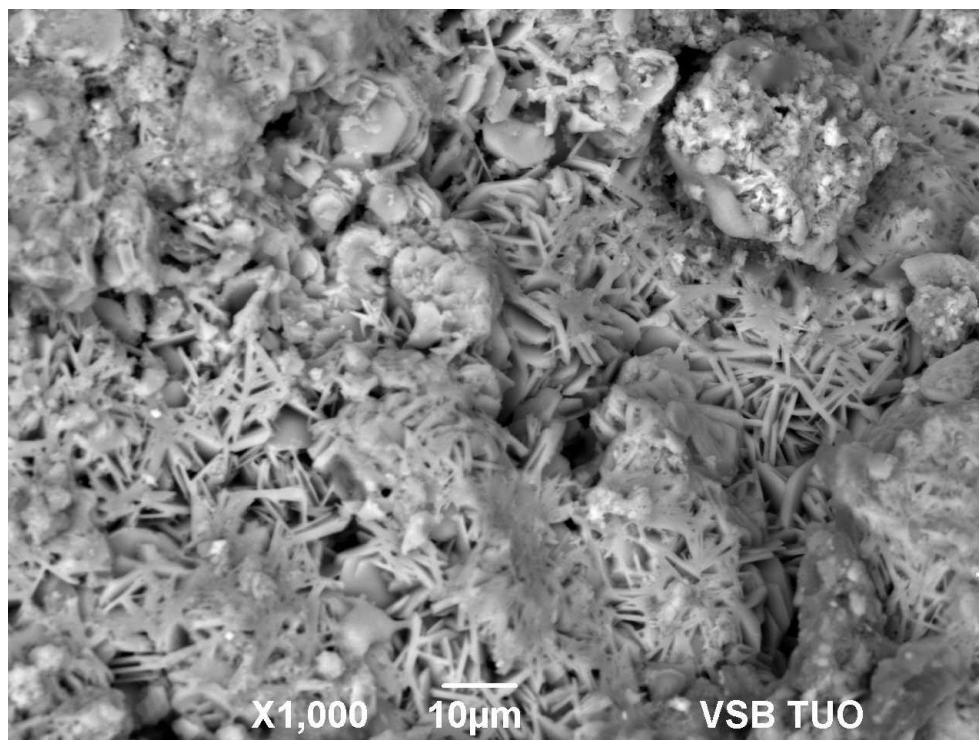
odpovídala hodnotám cca 140 HV0,01, zatímco v růžových oblastech činila pouze 60 jednotek HV0,01. Na obr. 7.4 je dokumentována defektní mikrostruktura v blízkosti vnitřní stěny vodoměru. U vnitřní stěny se nacházejí růžové částice a četné póry.

Za použití rtg spektrální mikroanalýzy ve spojení s řádkovací elektronovou mikroskopií bylo potvrzeno, že růžové oblasti jsou tvořeny čistou mědí. Poškození tedy vykazovalo všechny znaky selektivní koroze, tzv. **odzinkování**, které je typické pro mosazi s obsahem zinku větším než 15hm.% v prostředí s výskytem chloridů. To potvrdily i rozborů chemického složení korozních puchýřů, které obsahovaly vysoké podíly zinku, kyslíku a chloru (cca 50 hm.%Zn, 30 hm.%O a 15 hm.%Cl). Morfologie korozního puchýře (inkrustace) na vnějším povrchu vodoměru je dokumentována na obr. 7.5.

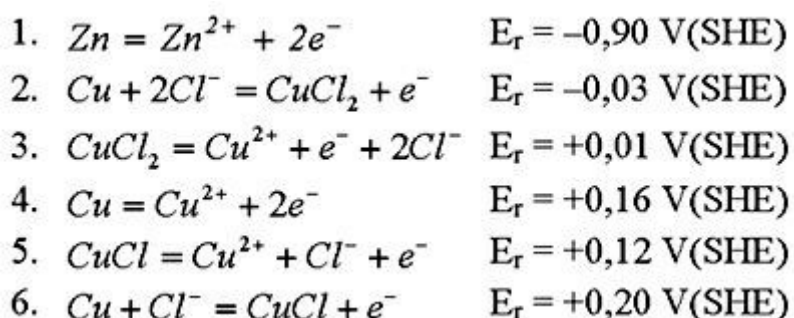


Obr. 7.5 Poškození mikrostruktury u vnitřní stěny vodoměru odzinkováním, růžové částice jsou tvořeny kovovou mědí, tmavé útvary představují póry.

Odzinkování mosazí je typickým představitelem selektivní koroze, kdy část původního materiálu slitiny mědi a zinku se přemění na houbovitou měď. Dochází k tomu buď v celé vrstvě u povrchu, nebo lokálně. Houbovitá měď má velmi malou pevnost a postupně dojde k perforaci stěny. K odzinkování jsou náchylné všechny mosazi s obsahem zinku větším než 15 hm.%. Mechanismus odzinkování spočívá v tom, že se měď a zinek se rozpustí a následně se měď opět vyloučí. To umožňuje chloridový mechanismus – v korozním prostředí tedy musí být přítomny chloridy.



Obr. 7.6 Puchýřovitá inkrustace (utuhlý průsak) na vnější stěně vodoměru
 Odzinkování probíhá s kyslíkovou depolarizací. Princip odzinkování lze odvodit z rozdílů rovnovážných potenciálů pro některé reakce, které mohou probíhat při odzinkování:

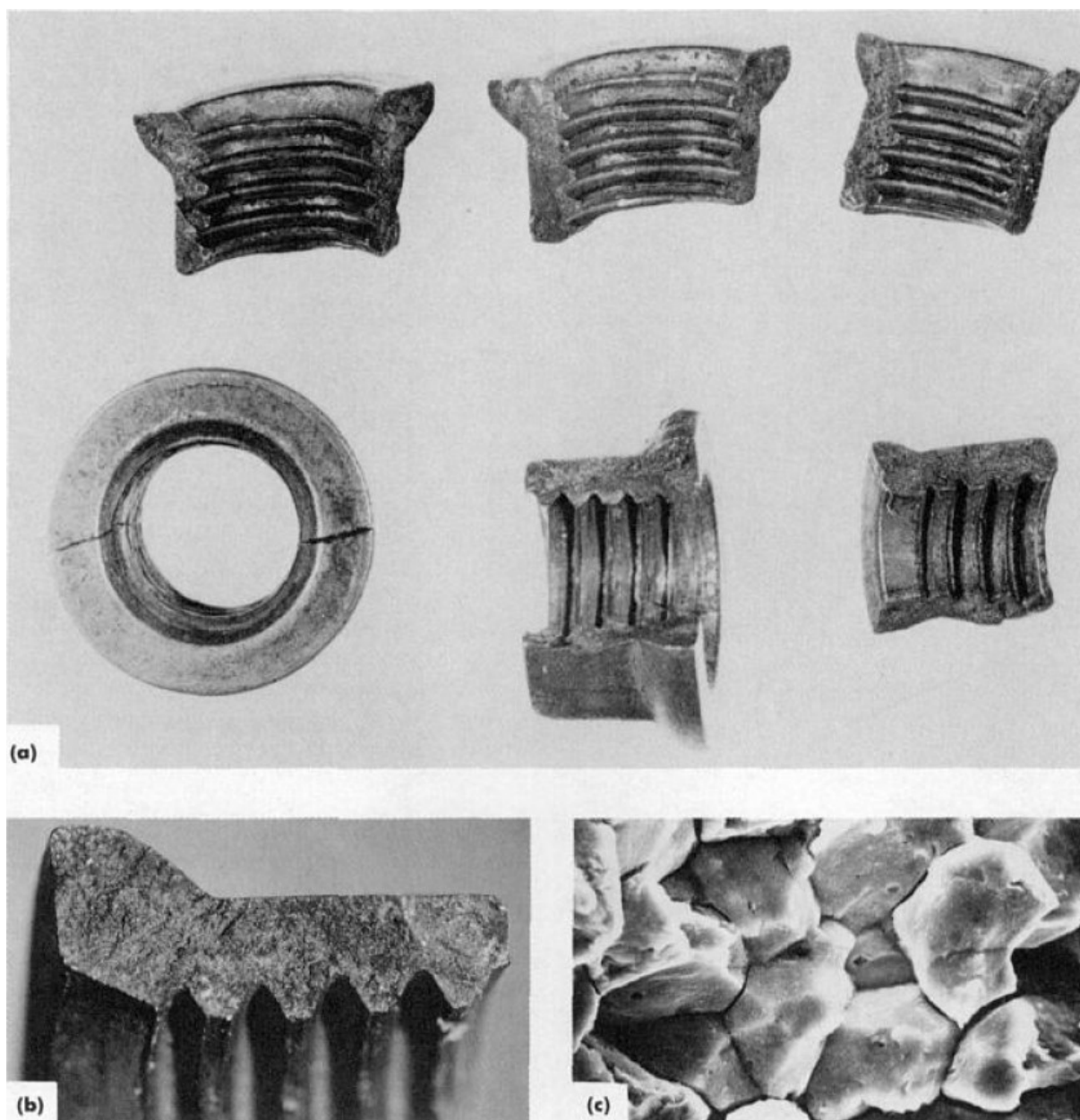


V oblasti do -0,03 V může docházet pouze k pomalému odzinkování na povrchu, měď se nerozpouští. V oblasti od -0,03 do 0,2 V se může měď chloridovým mechanismem oxidovat dle reakcí 2, 3, 5, 6 spolu se zinkem (reakce 1) a zároveň na povrchu (kde je lokálně nižší koncentrace chloridů) redukovat dle reakce 4 resp. 6. Reakce 2 a 3 převedou měď do iontové formy při nižším potenciálu, než by bylo možno očekávat podle rovnovážného potenciálu mědi podle rovnice 4. V silněji oxidačních prostředích, při potenciálech nad 0,2 V (SHE) dochází již k anodické oxidaci jak mědi, tak zinku a k odzinkování nedochází, ale rovnoměrná koroze je již vysoká.

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že materiál vodoměrů je zcela nevhodný pro dané prostředí (voda upravená dávkováním ClO_2). Pro zvýšení životnosti vodoměrů je nezbytná

záměna mosazi jiným materiálem s vyšší korozní odolností v daném prostředí, případně by bylo možné aplikovat katodickou ochranu.

Příklad 2: Zkřehnutí tekutým kovem



Obr. 7.7 Kadmiovaná matice z tryskového motoru, která se porušila mechanismem zkřehnutí tekutým kovem, a) dokumentace prasklé matice, b) typická lomová plocha, c) intergranulární křehký lom

Tento typ zkřehnutí se může vyskytnout u obvykle tvárných kovů při jejich pokrytí tenkým filmem tekutého kovu a následném vystavení tahovému napětí. Zkřehnutí se projevuje redukcí buď lomového napětí nebo lomové deformace, případně poklesem obou hodnot. K porušení dochází pod mezi kluzu základního materiálu. Dokonce malá množství tekutého

kovu mohou vyvolat katastrofický lom součástí. Lomové plochy jsou obvykle intergranulární, s malým větvením trhlin nebo striacemi, které indikují pomalé šíření trhliny.

Na obr. 7.7 jsou dokumentovány kadmiované matice ze zušlechtěné oceli, které v průběhu nevhodného použití v tryskovém motoru popraskaly, případně došlo až k jejich porušení. Matice byly použity ve šroubových spojích tryskových motorů, kde pracovní teplota dosahovala hodnoty cca 500°C. Lomová plocha matic byla zoxidovaná a mikromechanismus porušení byl interkrystalický křehký, obr.7.7b a 7.7c. Lom byl vyvolán roztavením tenké vrstvy kadmia (teplota tavení 321°C) horkým vzduchem z kompresoru v tryskovém motoru. Rztavený kov napenetroval na hranice zrn a dramaticky snížil jejich kohezni pevnost.



Shrnutí pojmů kapitoly

Korozní praskání pod napětím: tvorba korozních trhlin v kovových slitinách vystavených určité hodnotě tahového předpětí během expozice v korozním prostředí.

Korozní únava: zrychlená iniciace a šíření únavových trhlin při cyklickém zatěžování materiálů v korozním prostředí. K tvorbě trhlin dochází za podmínek, kdy samostatné působení buď korozního prostředí nebo cyklického napětí by bylo nedostatečné.

Inkrustace: puchýře tvořené tuhými usazeninami korozních produktů.

Odlegování: při provozování slitiny v určitém prostředí dochází k postupnému odstraňování jednoho z prvků ze slitiny. Jedna z teorií předpokládá, že během expozice dochází k rozpouštění dvou prvků přítomných ve slitině a jeden z nich se znovu vylučuje na povrchu materiálu. Jiná teorie předpokládá, že jeden z prvků ve slitině se selektivně rozpouští, a ušlechtlejší kov zůstává ve slitině v pórovité formě. Specifické názvy procesu jsou odvozeny od prvků, které jsou z matrice odstraňovány, např. odzinkování.



Otázky k probranému učivu

1. Jaké znáte typy selektivní koroze?
2. Co je to inkrustace?
3. Co je nezbytnou podmínkou projevení se korozního praskání pod napětím?
4. Jaký jsou základní rozdíly mezi chemickou a elektrochemickou korozi?
5. Jaké experimentální metody se obvykle používají při charakterizaci prvkového a fázového složení korozních produktů?
6. Uveďte základní charakteristiky procesu korozní únavy.
7. Jaká preventivní opatření se provádějí pro omezení korozního napadení materiálů?

8. Poškození nebo porušení vyvolané opotřebením



Čas ke studiu: 3 hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- definovat základní mechanismy mechanického poškození povrchu,
- navrhnout postup analýzy součástí poškozených opotřebením,
- definovat mechanismus opotřebení nazývaný „fretting“,
- navrhnout seznam sledovaných parametrů při laboratorním sledování opotřebení povrchu součástí.



VÝKLAD

Opotřebení, tření a mazání jsou navzájem se ovlivňující procesy, které mohou modifikovat tendenci součástí k porušení nebo narušují funkčnost součástí. Systematický přístup k opotřebení je nezbytný pro pochopení vzájemných interakcí mezi:

- objemovými a povrchovými vlastnostmi opotřebovávaných součástí,
- provozními proměnnými,
- součástmi systému,
- provozním prostředím.

Porušení vyvolané opotřebením je poměrně těžké popsat, analyzovat nebo zabránit jeho vzniku. Neexistuje obecná shoda o různých typech nebo formách opotřebení, poněvadž tyto mohou být popsány několika různými způsoby. Jedním z jednoduchých způsobů, jak definovat mechanické poškození povrchu způsobené opotřebením, je vycházet ze seznamu osmi základních mechanismů:

- abrazivní opotřebení,
- erozivní opotřebení,
- adhezivní opotřebení,
- „fretting“,
- kavitace,
- účinek dopadajících kapek kapaliny,
- kontaktní únava,
- korozní opotřebení.

Přibližně polovina všech případů opotřebení je způsobena abrazivním opotřebením, 15% adhezivním opotřebením a přibližně 8% připadá jednak na erozi a jednak na „fretting“.

8.1 Obecné schéma analýzy součástí poškozených opotřebením

Obecně doporučené schéma postupu provádění expertizního rozboru součástí porušených či poškozených mechanizmy opotřebení lze formulovat následovně:

- definovat konfiguraci opotřebeného i originálního povrchu,
- definovat relativní pohyby uskutečňující se v systému, včetně směru a rychlosti,
- určit tlakovou sílu působící mezi dotýkajícími se povrchy nebo mezi opotřebeným povrchem a agresivním prostředím, sledování provést jak v makroskopickém, tak i v mikroskopickém měřítku,
- identifikovat materiál opotřebené součásti, definovat abrazivní prostředí, produkty opotřebení a zbytky mazadla,
- stanovit typ a účinnost použitého mazadla: olej, vazelína, povrchový film, přírodní oxidická vrstva, adsorbovaný film, atd.,
- určit rychlost opotřebení a koeficient tření,
- učinit závěr o mechanismu nebo kombinaci mechanismů opotřebení: abrazivní, adhezivní, kontaktní únava, atd.,
- navrhnout doporučení.

Pokud se podaří stanovit příčinu a mechanismus porušení, účinnost navržených opatření může být ověřena testováním. Tyto testy by měly co možná nejpřesněji simulovat mechanické a environmentální podmínky, kterým byla porušená nebo poškozená součást vystavena během provozu. Ideální by bylo provést testování navržených opatření v provozních podmínkách, ale z ekonomických i časových důvodů se zpravidla provádí v laboratořích. Při testování by měly být pečlivě monitorovány následující parametry:

- teplota (stabilní nebo proměnlivá),
- jednofázové nebo dvoufázové prostředí, může zahrnovat střídající se zvlhčení a uschnutí,
- složení prostředí, včetně koncentrací a časových změn minoritních složek, rozpuštěných plynů, pH faktor,
- elektrochemické podmínky, např. galvanické články nebo katodická ochrana,
- zatížení: statické nebo cyklické, musí být definován tvar napětěových vln, amplituda a perioda,
- povrchové poškození, které může být vyvoláno „frettingem“, abrazí, kavitací

nebo erozí vyvolanou dopadající kapalinou.

8.2 „Fretting“

Jev „fretting“ souvisí s opotřebením, ke kterému dochází mezi dvěma dotýkajícími se povrchy. Zpočátku je adhezivní povahy a důležitý faktor představují vibrace nebo oscilace s malou amplitudou, často je poškození doprovázeno korozí. „Fretting“ materiálů na bázi železa na vzduchu vytváří charakteristickou červeno-hnědou vrstvu oxidů železa a smícháním s olejem nebo vazelínou vzniká produkt, kterému se říká „krev“ nebo „červené bláto“. U součástí, které jsou mazány, běžná koroze není pravděpodobná a přítomnost červeno-hnědého produktu je indikátorem „frettingu“. Jestliže součást není mazána, přítomnost oxidických úlomků nemusí nezbytně odpovídat „frettingu“, ale spíše opotřebením. Běžné lokality výskytu „frettingu“ představují šroubové nebo nýtované spoje, oscilující ložiska, ortopedické implantáty. Obecně se „fretting“ vyskytuje u součástí, kde dochází ke krátkodobým vzájemným pohybům, obvykle spojených s vibracemi. Cyklické zatížení může vést k iniciaci únavových trhlin, což je označováno jako kontaktní únava. Další případ porušení iniciovaného „frettingem“ se označuje jako Brinelling – v tomto případě jsou krátery na ložiscích vyvolány vibracemi kuliček vůči ložiskovým kroužkům, krátery jsou sférické a připomínají Brinellovy vtisky. V některých případech je toto poškození označováno jako „frettingová“ koroze nebo frikční oxidace.



Řešené příklady

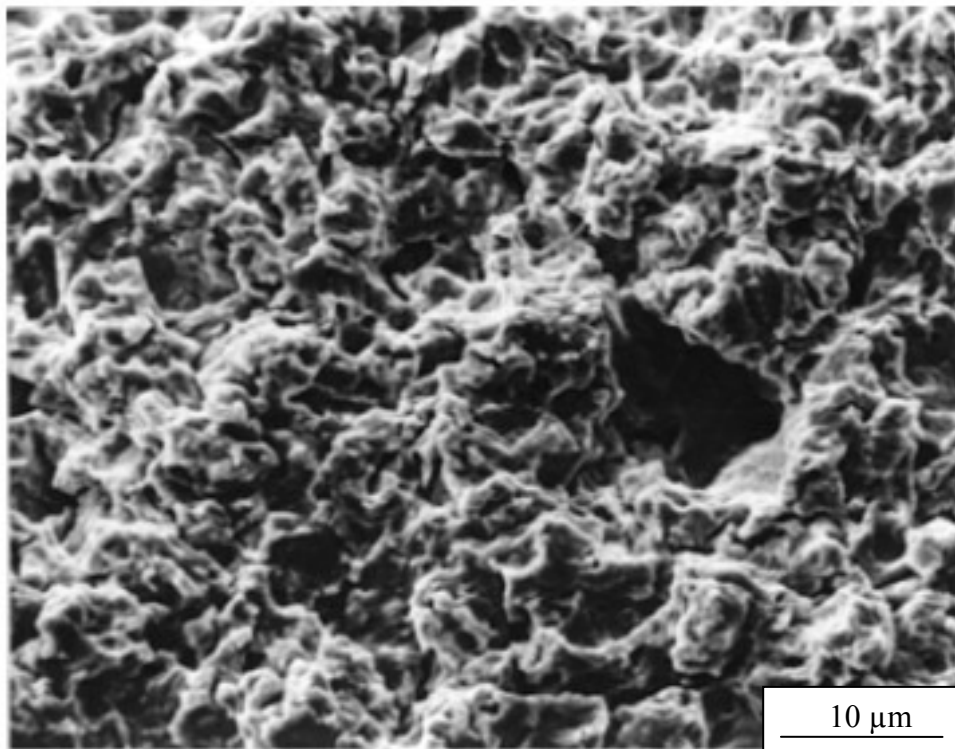
Erozní poškození materiálů

Eroze povrchů pevných látek kapalinami může být vyvolána dvěma způsoby:

- **kavitační eroze**: poškození indukované tvorbou a následným kolapsem dutin v kapičkách kapaliny,
- **eroze**: vysokorychlostními rázy při dopadu kapiček vody na povrch pevné látky.

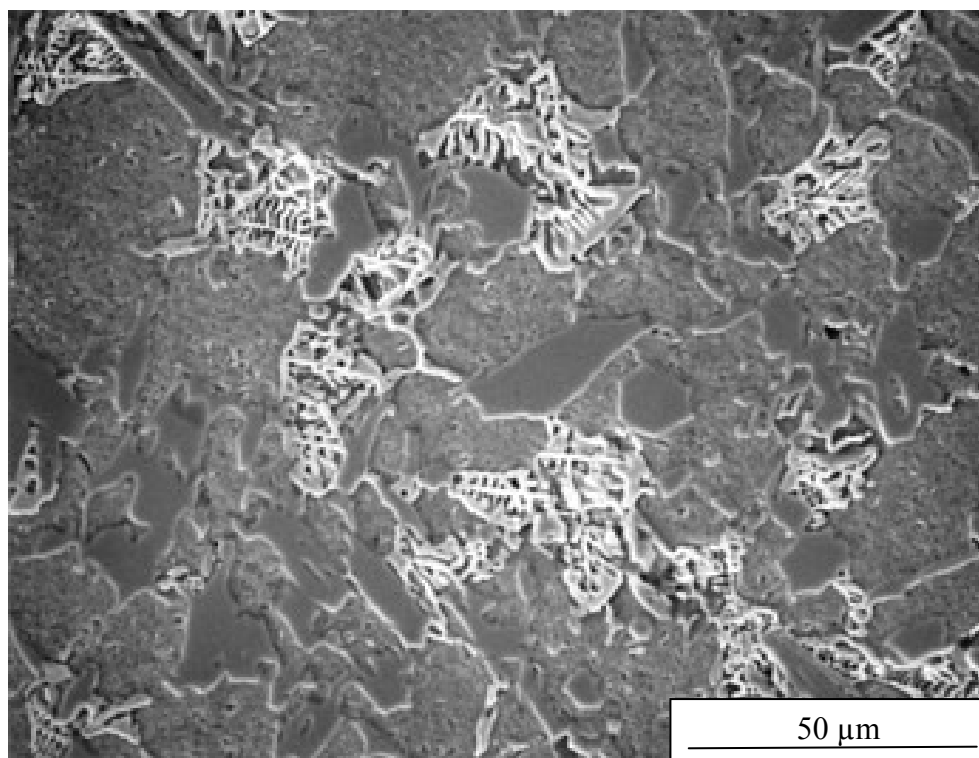
V proudících kapalinách může za určitých podmínek dojít k redukci tlaku na kritickou hodnotu, která odpovídá tlaku páry. V těchto oblastech mohou v kapalině vznikat dutiny, které mohou narůst do stabilní velikosti a mohou být strženy proudící kapalinou. Jakmile dutiny dosáhnou oblastí s vyšším tlakem, stanou se nestabilními a dochází k jejich kolapsu. Dutiny v těsné blízkosti povrchu pevné látky kolabují asymetricky, jedna část rozhraní dutiny zkolabuje dovnitř a vytvoří paprsek kapaliny usměrněný na povrch pevné látky. Dopad těchto paprsků kapaliny, možná ve spojení s rázovými vlnami, vyvolává erozi povrchu pevných látek. Kavitační eroze obvykle nejprve způsobuje zvlnění a deformační zpevnění povrchu,

často doprovázené zvýrazněním hranic zrn a fází. Poté dochází k úbytku materiálu především v oblastech povrchových nerovností a nakonec se poškození rozšíří na celou oblast zasaženou kolapsem dutin, což má za následek vznik extrémně nerovných povrchů s kompletně zamaskovanými mikrostrukturními znaky, obr. 8.1.

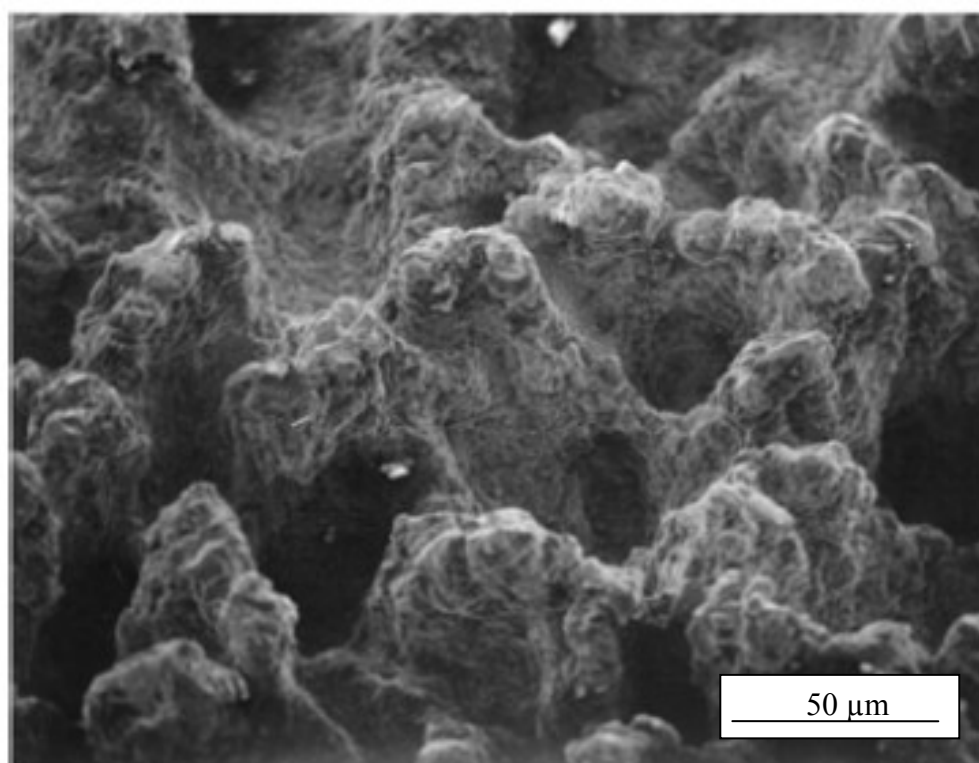


Obr. 8.1 Kavitačně erodovaný povrch austenitické oceli typu 18%Cr - 10%Ni

Obdobně jako v případě kavitační eroze, poškození vyvolané dopadajícími kapičkami kapaliny začíná deformačním zpevněním povrchu kovových součástí, doprovázeným zvlněním povrchu a zviditelněním hranic zrn a fází. Ke ztrátě materiálu dochází nejprve v měkkých oblastech. Obr. 8.2 dokumentuje počáteční erozní poškození povlaku tvrdokovu Stellite na povrchu lopatky turbíny. Po dlouhé expozici mají povrchy součástí erodované kapalnými kapičkami sloupkový charakter, obr.8.3.

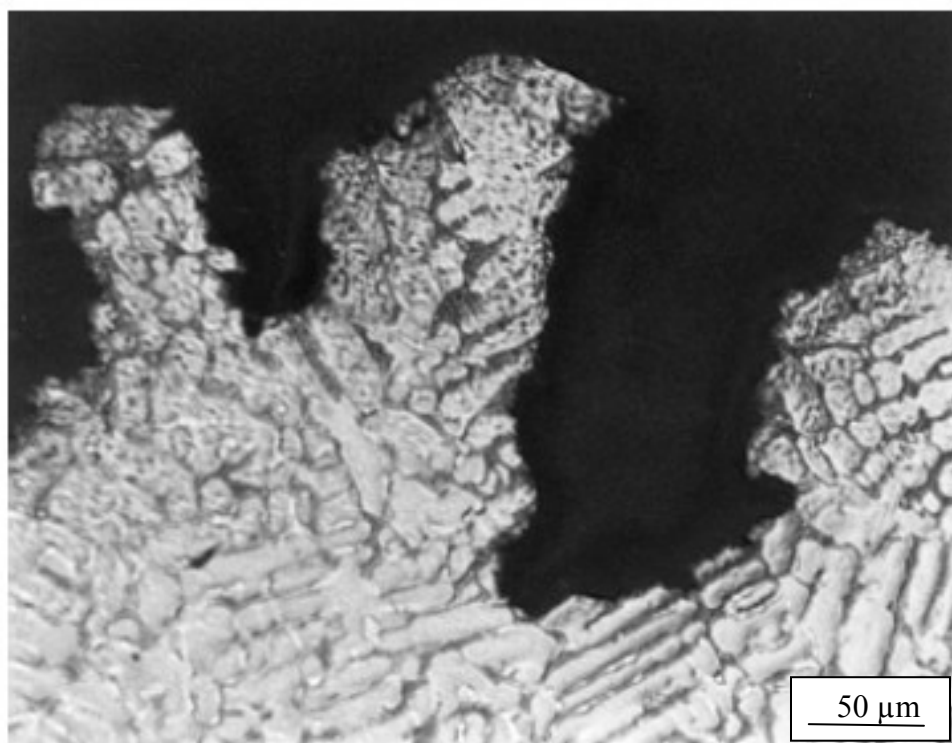


Obr. 8.2 Počáteční stádium eroze povlaku tvrdokovu Stellit kapičkami kapaliny



Obr. 8.3 Morfologie povlaku Stellitu na lopatce turbíny po dlouhodobé erozi vodními kapičkami

Příčný řez erodovanou vrstvou Stellitu je dokumentován na obr. 8.4. Charakteristická sloupkovitá topografie poškozených povrchů je pravděpodobně důsledek impulsních tlaků kapiček kapaliny usměrněných důlky, které vznikly v počátečním stadiu expozice.



Obr. 8.4 Příčný řez povlakem Stellitu po erozi vodními kapičkami



Shrnutí pojmů kapitoly

Kontaktní únava: bodové napadení povrchu součástí, které jsou vystaveny působení pulsujících kontaktních napětí. Ke vzniku trhlin dochází v podpovrchové oblasti maximálních smykových napětí.

„**Fretting**“: Opotřebení povrchu součástí, ke kterému dochází mezi dvěma dotýkajícími se povrchy. Důležitý faktor představují vibrace nebo oscilace s malou amplitudou, často je poškození doprovázeno korozí.

Kavitační eroze: poškození povrchu pevných látek indukované tvorbou a následným kolapsem dutin uvnitř kapiček kapaliny.

Eroze: vzniká jako důsledek vysokorychlostních rázů při dopadu kapiček vody na povrch pevné látky.



Otázky k probranému učivu

1. Jaké znáte základní mechanismy mechanického poškození povrchu součástí?

2. Jaké parametry by měly být monitorovány při testování opotřebení?
3. Jaké jsou základní charakteristiky mechanismu opotřebení nazývaného „fretting“?
4. Jaké termíny jsou používány pro popis erozního působení kapalin na povrch tuhých látek?
5. Jaké experimentální metody se využívají při charakterizaci povrchů pevných látek poškozených mechanismy opotřebení?

9. Shrnutí problematiky

Expertizní činnost představuje výjimečnou a vzrušující pracovní aktivitu. Ten, kdo provádí tuto činnost, by měl mít dobré znalosti v oblasti zkoušení materiálů a charakterizace mikrostruktury, a rovněž musí rozeznat, kdy je vhodné přizvat ke spolupráci specialisty z jiných oborů. Specialisté, kteří často provádějí expertizní činnost, se obvykle shodnou na několika závěrech:

- většině havárií by se dalo předejít, pokud by se včas provedla adekvátní opatření,
- velká část porušení součástí se realizuje únavovým mechanismem, přičemž důležitou roli obvykle hraje jeden z následujících faktorů: nedostatky v designu, nevhodný materiál, defekty vzniklé při obrábění nebo jiném technologickém zpracování, nesprávná údržba, nevhodně realizované opravy nebo degradační vlivy prostředí.
- významná část havárií souvisí s nesprávně realizovaným tepelným zpracováním použitého materiálu.



Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

- [1] ASM Handbook – Failure Analysis and Prevention, Volume 11, American Society for Metals International, 2003.
- [2] Strnadel, B. Řešené příklady a technické úlohy z materiálového inženýrství, Ostravské tiskárny, a.s., Ostrava, 1998.
- [3] Ashby, M.F., Jones, D.R.H.: Engineering Materials 2, Butterorth – Heinemann, Oxford, 1999.
- [4] Engineering Aspects of Failure Analysis and Failure Analysis, Failure Analysis and Prevention, Vol. 10, 8th Ed., Metals Handbook, American Society for Metals, 1975.