

Únava materiálu – tichá, náhlá, zhoubná

White Paper

Únava materiálu – tichá, náhlá, zhoubná

od Ivan Gubán

Assembly Technology Expert
Bossard Czech Republic

www.bossard.com

Všechna práva vyhrazena © 2020 Bossard

Uvedená doporučení a rady musí být čtenářem v praxi náležitě zkontrolována a pro konkrétní aplikaci musí být schválena jako vhodná. Změny vyhrazeny.



ASSEMBLY
TECHNOLOGY
EXPERT

ÚNAVA MATERIÁLU – TICHÁ, NÁHLÁ, ZHOUBNÁ

Historie

Únava materiálu nás doprovázela již od začátku doby bronzové. Hodně nástrojů a jednoduchých zařízení bylo poškozeno nebo zničeno zatížením pod bodem kluzu, aniž byla tomuto jevu věnována patřičná pozornost. Důvod? Kovář nebude hledat příčinu rozbití svého kladiva. Jednoduše jej vymění za nové. Nikoho to netrápí.

Situace se začíná měnit s vývojem průmyslu a technologie během revoluce zahájené vynálezem parního stroje Jamese Watta. Jednoduché nástroje a mechanismy jsou nahrazovány těžkými stroji v prvních továrnách postavených po celé západní Evropě. Je zavedena veřejná doprava, např. vlaky, a toto je přesně okamžik, kde to začalo.

Vše se stalo během klidného nedělního odpoledne, 8. května 1842. Oslavy krále Louis Philippe ve Versailles právě skončily a asi 700 lidí se těšilo domů do Paříže. Krátce po tom, co jejich vlak opustil stanici ve Versailles a zrychlil na 40 km/h, začal sjíždět z kopce, což vedlo k mírnému zvýšení jeho rychlosti. Přímo za kopcem byla zatáčka, která způsobila prudký tlak na obě strany kolejí, což vedlo k ulomení nápravy na první lokomotivě. První lokomotiva vykolejila okamžitě a druhá, která byla

stále ještě nastavena na plný výkon, přejela lehce přes první lokomotivu, jakoby to byla hračka a táhla přes ni zbytek vlaku. Kromě toho se rozbil druhý motor na tisíce kousků a rychle začalo hořet.

Dříve nebyly detekovány žádné technické problémy, strojuvůdce neudělal žádnou chybu a žádné vnější vlivy nebyly pozorovány. Takže co způsobilo smrt 200 lidí a stovek zraněných?

V té době byl problém únavy materiálu známý velmi chabě. Nedostatek odpovědí donutil akademickou elitu prozkoumat tuto havárii a zjistit co skutečně způsobilo nejhorší železniční nehodu v této době. A skutečně to netrvalo dlouho. Rankine vyřešil problém únavy pro nápravy a o několik let později německý matematik August Wöhler vytvořil systematický popis únavového chování. Je autorem tzv. Wöhlerovy křivky, která se stále ještě používá.

Přes vývoj našich znalostí a technologie se únava materiálu vyskytla ještě mnohokrát jako příčina katastrof. Ve většině případů je porucha způsobena nesprávnou konstrukcí nebo údržbou. Konstruktor by měl vždy vědět, kdy očekávat výskyt dynamického zatížení. A to platí také pro upevňovací prvky.



Obrázek 1: Obraz katastrofy na železnici mezi Versailles a Bellevue, 8. května 1842 - A. Provost

ÚNAVA MATERIÁLU – TICHÁ, NÁHLÁ, ZHOUBNÁ

Úvod

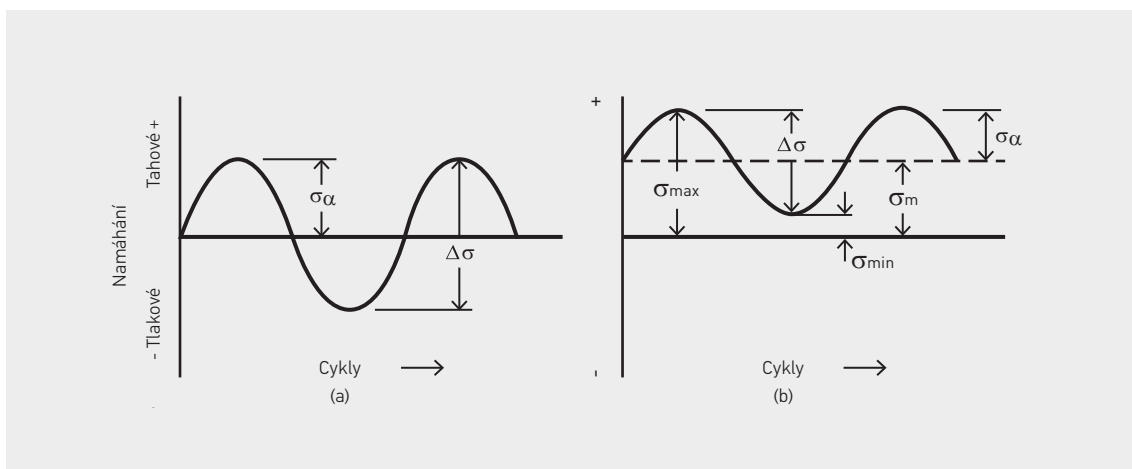
Únava materiálu je definována jako narůstající poškození materiálu způsobované dynamickým namáháním s amplitudou pod limitem pevnosti v tahu. Z praktického hlediska lze únavu rozdělit do dvou skupin:

- nízkocyklová únava s počtem cyklů až 10^4 a amplitudou namáhání nad mezí kluzu, kde převládá plastická deformace
- vysokocyklová únava s počtem cyklů vyšším než 10^4 a amplitudou namáhání obvykle pod mezí kluzu, kde převládá elastická deformace

Nízkocyklová únava není důležitá pro konstrukci spoje. Během procesu nízkocyklové únavy obvykle amplitudy namáhání překračují mez kluzu. Upevňovací prvky by neměly ani dosáhnout tuto hodnotu namáhání. Na druhé straně bychom měli věnovat pozornost vysokocyklové únavě! Konstrukteři upevňovaných spojů musí vždy zvážit vliv vysokocyklové únavy, když jsou očekávány dynamické síly!

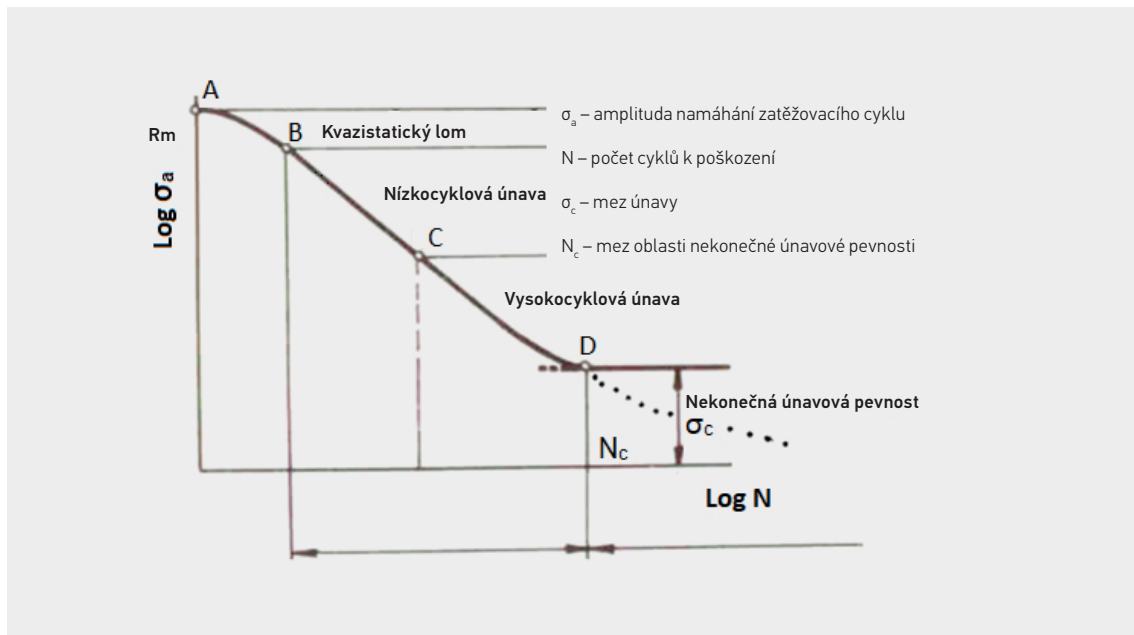
Obrázek 2 znázorňuje typický příklad dynamického zatěžovacího cyklu. Nejdůležitější proměnnou hodnotou není maximální hodnota namáhání (σ_{max}), ale amplituda působícího namáhání σ_a . Je to důležitý parametr určující únavové chování materiálu.

V oboru upevňovacích prvků existuje velmi specifické nebezpečí. Když nižší amplituda zatěžovacího cyklu překročí nulovou osu, veškeré předpětí v upevňovaném spoji je ztraceno a šroub se otočně uvolňuje nebo dokonce po nějakém čase může prasknout. Konstrukce spoje musí této situaci zabránit.



Obrázek 2: Příklady dynamického zatížení: a) symetrické b) pulsní – typický cyklus utaženého upevňovacího prvku

Wöhlerova křivka se rozsáhle používá pro výpočet vlivu únavy déle než jedno století. Je to graf znázorňující závislost mezi amplitudou zatížení jednoho cyklu a počtem cyklů bez lomů. Křivka je uvedena na obr. 3. Graf má čtyři oblasti, které zobrazují čtyři periody únavové životnosti.



Obrázek 3: Wöhlerova křivka – závislost mezi amplitudou jednoho zatěžovacího cyklu a počtem cyklů. Souřadnice mohou být buď lineární nebo logaritmické. V obou případech je tvar křivky zachován.

Jak je vidět na obr. 3 napravo od bodu D, v amplitudové závislosti nedochází k žádnému dalšímu poklesu. Po poklesu amplitudy namáhání pod určitou hodnotu se již nevyskytuje žádné únavové poškození. Oblast napravo od bodu D pod Wöhlerovou křivkou se nazývá oblast nekonečné únavové pevnosti. Když konstruktér navrhuje šroubový spoj, musí udělat vše pro to, aby pracovní oblast byla v této oblasti nekonečné únavové pevnosti. Ale samozřejmě, že hodnoty N_c a σ_c jsou teoretické. V ideálním případě jsou funkcí materiálu. Ale realita je docela jiná. Když počítáme únavovou odolnost upevňovacího prvku, musí být uvažovány takové aspekty jako geometrie, povrchové podmínky, teplota, čistota materiálu, zatěžovací podmínky a okolní prostředí. Pro účely všeobecného strojírenství je hodnota N_c standardizovaná. Například ocelové slitiny mají $N_c = 10^8$ cyklů a norma VDI 2230:2015 uvádí $N_c = 2 \cdot 10^6$ cyklů pro upevňovací prvky.

ÚNAVA MATERIÁLU – TICHÁ, NÁHLÁ, ZHOUBNÁ

Mechanismus

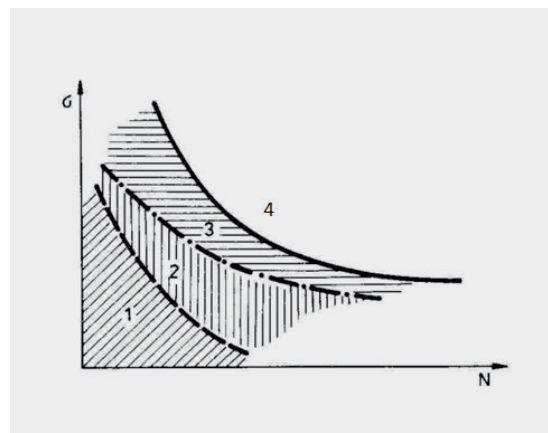
Únavová životnost mohla být rozdělena do čtyř stupňů znázorněných níže na obrázku.

1. stupeň změny mechanických vlastností – není důležitý pro navrhování upevňovacích prvků
2. stupeň zahájení únavové trhliny
3. stupeň šíření únavové trhliny/trhlin
4. konečné prasknutí zmenšeného průřezu upevňovacího prvku

První stupeň je spojený se změnou mechanických vlastností. V důsledku vlivu cyklického zatížení se může materiál stát mírně tvrdším nebo měkčím a vyskytuje se hystereze. Změna mechanických vlastností je zřídka větší o více než 1 % a pro konstruktéry není důležitá, když spoj navrhují.

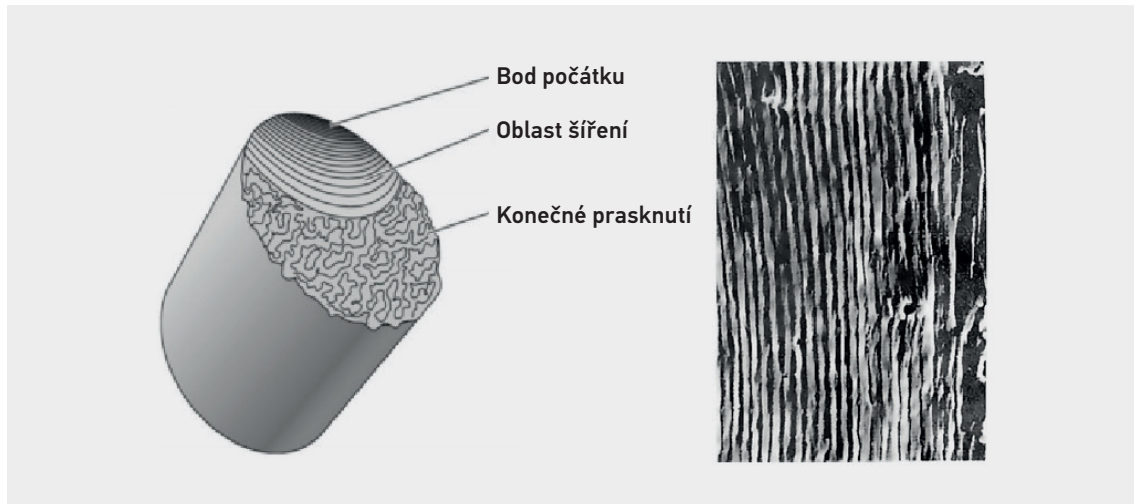
Únavová trhlina se objevuje během druhého stupně, ještě mikrometrická. Je způsobena extrémní místní akumulací plastické deformace v oblasti povrchu s nerovnostmi a nesouvislostmi. Amplituda namáhání může být větší než mez kluzu materiálu v těchto oblastech. V průběhu času se zde plastická deformace koncentruje a může mít za následek zahájení únavové trhliny. Únavová trhlina vždy začíná z povrchu.

Třetí stupeň je stupeň šíření. Čerstvě vytvořená trhlina roste v důsledku trvalého dynamického zatížení. Dochází k spojování malých trhlin vedoucím k vytvoření jedné dominantní trhliny s velkým potenciálem způsobujícím konečný únavový lom. Tento stupeň je odpovědný za vytváření rýh – ekvidistantních křivek viditelných na povrchu lomu.



Obrázek 4: Schématické zobrazení stupňů únavy

Konečné prasknutí, způsobené přetížením zmenšeného průřezu, je považováno za čtvrtý stupeň. Charakter konečného prasknutí závisí na materiálu a zatěžovacích podmínkách. Viz níže uvedený obrázek.

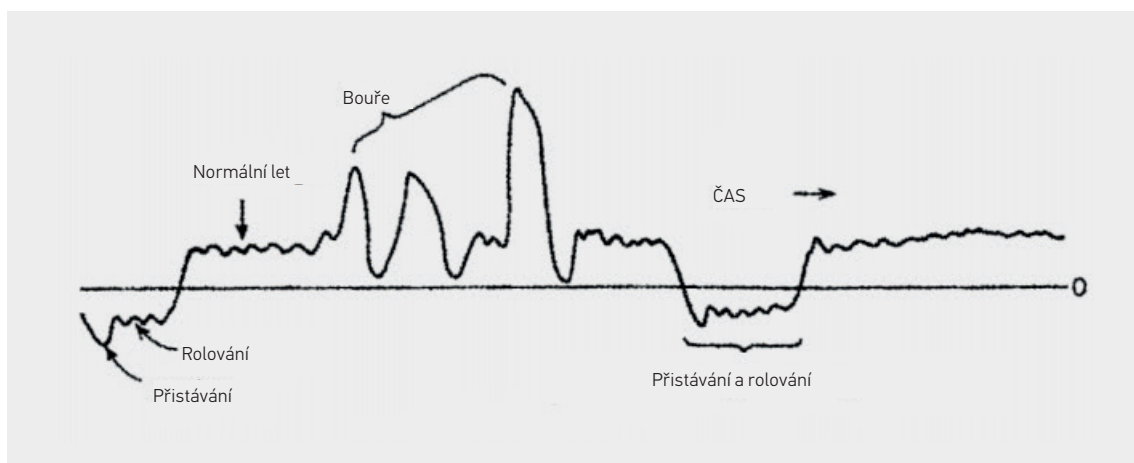


Obrázek 5: Únavový lom – rýhy v oblasti postupného růstu únavové trhliny a na pravé straně detail rýh

Rýhy jsou nejlepším indikátorem únavy materiálu. V mnoha případech jsou viditelné pouhým okem, takže jsou velmi rychlým a snadným způsobem detekování únavy. Nicméně je nutné vzít na vědomí, že absence rýh neznamená absenci únavy materiálu.

Ve skutečnosti lze stěží dosáhnout situace, kdy je materiál namáhán cyklem konstantních amplitud. To znamená, že musí být vyhodnoceny změny amplitudy

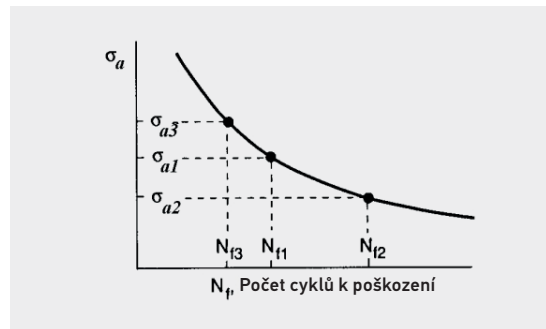
namáhání v průběhu času. Pro tento účel můžeme použít křídlo dopravního letadla. V leteckém průmyslu, údržbě a dopravě je věnováno hodně pozornosti bezpečnosti. To znamená hodně výpočtů únavové odolnosti a únavové životnosti. Typický příklad záznamu namáhání působícího a křídlo během letu je znázorněn na obrázku 6.



Obrázek 6: Záznam namáhání působícího na závěs křídla letadla

Jak můžeme vidět na obr. 6, amplituda namáhání je jiná při rolování, jiná při vzletání, mnohem odlišnější je během letu skrze bouřku a při přistávání. Kromě toho mohou být velmi proměnné podmínky různých letů. Vždy je nutné pamatovat na rozmanitost podmínek letů.

Když konstruktér navrhuje šroubový spoj, musí znát změny amplitudy namáhání. I upevňovací prvky trpí změnami amplitudy, když jsou vystaveny účinkům dynamického zatížení. Pro poskytnutí základního porozumění výpočtu únavové životnosti upevňovacích prvků vystavených účinkům proměnného dynamického zatížení popisuje následující oddíl nejjednodušší předpovědní model.



Obrázek 7: Různý počet cyklů k poškození při různých amplitudách namáhání

Jakékoli poškození (i mikroskopické) v důsledku dynamického zatížení má kumulativní charakter. A toto je velmi důležitá informace, na kterou musí konstruktéři neustále pamatovat. Pro vysvětlující účely si představme lopatku větrné turbíny. Tato turbína je navržena pro 5 000 000 cyklů při amplitudě namáhání 150 MPa. Ale kvůli procházejícímu hurikánu byla turbína vystavena účinkům 100 000 cyklů a amplitudy namáhání 250 MPa. Kolik cyklů zbývá? Jak dlouho bude turbína pracovat bezpečně? Můžeme snížit zatížení na 100 MPa a věřit, že je to bezpečné?

Nejstarší a nejjednodušší model umožňující předpověď únavové životnosti se nazývá Palmgren-Minerovo pravidlo. Je to relativně jednoduchá rovnice, která je v praxi stále rozsáhle používaná, viz obr. 8.

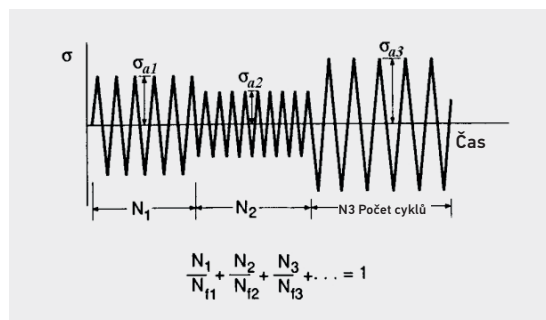
N_i – počet cyklů při amplitudě σ_{ai}

N_{fi} – počet cyklů k poškození při amplitudě σ_{ai}

Když hodnota na pravé straně rovnice dosáhne 1, upevňovací prvek bude nejpravděpodobněji poškozen v důsledku únavy materiálu. Pokud potřebujeme určit zbývající životnost upevňovacího prvku, musíme velmi pečlivě zakalkulovat veškerý vliv předchozího zatížení. Hodnota všech poměrů N_i/N_{fi} musí být menší než 1.

Lom nastává, když:

$$\frac{n_1}{N_f^1} + \frac{n_2}{N_f^2} + \dots = \sum_{j=1}^k \frac{n_j}{N_f^j} = 1$$


















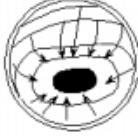
ÚNAVA MATERIÁLU – TICHÁ, NÁHLÁ, ZHOUBNÁ

Detekce

Detekce únavy materiálu před prasknutím upevňovacího prvku je velmi obtížný úkol. Díky vývoji defektoskopie jsme schopni detekovat trhliny ve velkém množství materiálu pomocí ultrazukových, infračervených, kapilárních zkoušek nebo dokonce tomografií. Výsledek těchto analýz nám může říct, zda materiál skutečně obsahuje trhlinu, ale neexistuje žádný nástroj, který by mohl jasně potvrdit počátek jeho únavy. To může být dosaženo pouze metalografickou analýzou po prasknutí

upevňovacího prvku (nebo poškozením dílu pro účely analýzy).

Nejvýznamnějším symptomem únavy materiálu je přítomnost rýh viditelných na obr. 5. S určitou dávkou zjednodušení lze říct, že každá jedna rýha představuje jeden cyklus během stupně šíření.

Vysoké nominální namáhání		Nízké nominální namáhání	
Hladký povrch	Vrubový povrch	Hladký povrch	Vrubový povrch
Tahové a tahově-tlakové			
			
Jednoduché deformační ohýbání			
			
Střídavé ohýbání			
			
Rotační ohýbání			
			

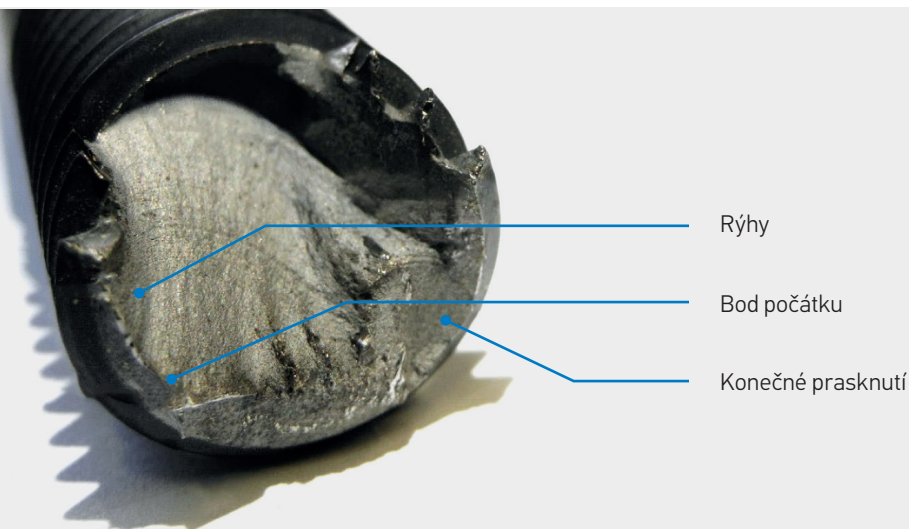
Obrázek 9: Schématické zobrazení povrchu únavového lomu za různých zatěžovacích podmínek

Obecně řečeno, čím větší oblast konečného prasknutí, tím vyšší byla dynamická zatížení způsobující poškození upevňovacího prvku v důsledku únavy materiálu. Na povrchu lomu upevňovacího prvku se vyskytují velké zbytkové praskliny (na levé straně na obr. 9), které indikují počáteční stupeň únavových trhlin dobře utaženého vysokopevnostního upevňovacího prvku. K této situaci dochází převážně v důsledku konstrukční chyby nebo vysoké úrovně neočekávaného dynamického přetížení. Na pravé straně na obr. 9 jsou vidět malé povrchy zbytkového lomu spojené s pozdním stupněm únavového lomu s malým dynamickým přetížením. Tyto šrouby pravděpodobně nebyly nikdy dostatečně utaženy nebo ztratily své předpětí v důsledku uvolnění nebo uložení.

Obrázek 10 uvádí fotografii skutečného upevňovacího prvku prasklého v důsledku únavy materiálu. Velká část oblasti s rýhami indikuje relativně malé dynamické přetížení. Rýhy převládají na povrchu lomu, což signalizuje, že stupeň šíření byl docela dlouhý. Trhlina lomu začala v 7 hodin a stále rostla do dřívku upevňovacího prvku pod úhlem přibližně 30°, což ukazuje na jednostranné ohýbání. Bod počátku nacházející se mimo střed průřezu indikuje přítomnost vrubu, nejpravděpodobněji vměstku na malém průměru závitů šroubu. Pokud to shrneme, šroub praskl v důsledku únavy materiálu způsobené malým přetížením při dynamickém jednos-

tranném ohýbání spojeným s vrubovým účinkem nečistoty materiálu blízko malého průměru závitů šroubu.

Vždy je nutné pamatovat na to, že situace by mohla být mnohem komplikovanější. Spojeno by mohlo být hodně typů zatížení a poškození dílu, což by velmi ztížilo konečnou analýzu. K dalšímu poškození únavového lomu nesmí nikdy dojít. Poškrábání nebo znečištění povrchu lomu by mohlo způsobit, že by konečná analýza byla velmi matoucí nebo dokonce nemožná. To je hlavním důvodem proč konstruktéři ve společnosti Bossard musí pracovat velmi přesně při zkoumání prasklých upevňovacích prvků a zákazník by měl být instruován, aby se nedotýkal poškozených nebo prasklých dílů a nechal je na místě, kde došlo k jejich poškození, bez jakékoli další manipulace s nimi. Musí být zajištěno, aby nedošlo k žádnému dalšímu poškození lomu nebo vývoji koroze na povrchu upevňovacího prvku. Znalost příčiny poškození upevňovacích prvků je nezbytná pro zabránění budoucím poškozením a pro udržení životaschopného vztahu se zákazníkem.



Obrázek 10: Příklad upevňovacího prvku prasklého v důsledku únavy materiálu

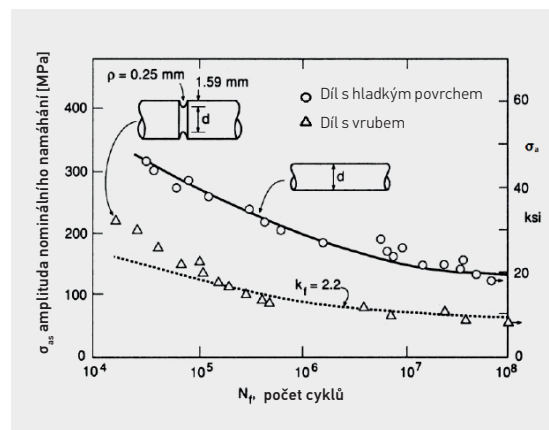
ÚNAVA MATERIÁLU – TICHÁ, NÁHLÁ, ZHOUBNÁ

Prevence

Předchozí oddíly popisovaly charakter únavy materiálu. Ale jak by měl konstruktér rozhodnout, když jsou dynamická zatížení předpokládána? Jaká kritéria musí upevňovací prvek nebo jakýkoli jiný díl splňovat? Následující oddíl poskytuje základní znalosti týkající se prevence únavy materiálu.

Existuje mnoho faktorů ovlivňující únavové chování. Nejdůležitějším aspektem je geometrie. Společnost Bossard doporučené řešení pro šrouby odolné proti značným dynamickým zatížením je použití šroubů s podříznutým dříkem. Podříznutý dřík má přibližně 90 % malého průměru závitů, což způsobuje pohyb kritické oblasti od závitů k hladkému podříznutému dříku. Přítomnost závitů v kritické oblasti představuje výskyt zdroje vrubového účinku přímo na povrchu. Jak bylo uvedeno výše, únavová trhlinka má počátek vždy na povrchu mechanického dílu (jedinou výjimkou jsou kompozitní materiály). Kromě toho se podříznutý dřík stává pružnějším, což vytváří možnost kompenzovat vysoká dynamická zatížení pružným prodloužením nebo ohýbáním. Odolnost proti poškození materiálu únavou se zvýší o 42 % při použití šroubů s podříznutým dříkem místo normálního dříku. Ale tyto typy šroubů s podříznutým dříkem mají sníženou mezní únosnost ve srovnání s normálními.

Zákazník musí být vždy informován o tom, že ostré hrany a jiné typy vrubů mohou vést k vývoji únavové trhliny. Grafické znázornění tohoto principu je uvedeno níže na obr. 11.



Obrázek 11: Vliv geometrie na polohu Wöhlerovy křivky

Předchozí oddíl popisoval vliv makrogeometrie upevňovacího prvku (nebo jakékoli jiného mechanického dílu) na únavové chování. Ale svůj důležitý podíl má také vliv mikrogeometrie. Mikrogeometrie znamená drsnost povrchu. Na obr. 12 je znázorněna křivka profilu. Nejnebezpečnější jsou oblasti místních minim (jeden příklad je označen červeným kruhem).

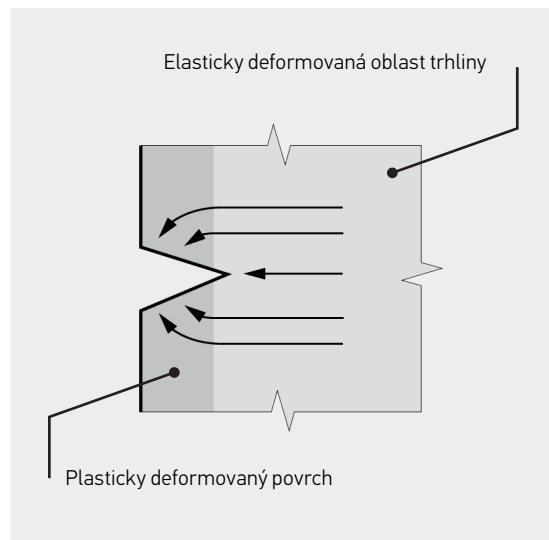
Jak již bylo výše mnohokrát uvedeno, únavové trhliny mají počátek vždy na povrchu. Tyto oblasti místních minim představují místa s velmi vysokou koncentrací namáhání s ohromným potenciálem pro počátek únavové trhliny a nacházejí se přímo na povrchu. Když jsou předpokládána dynamická zatížení, konstruktér musí použít co možná nejhladší povrch. Ale pečlivě! Ne všechny typy obrábění mají pozitivní účinek na odolnost proti únavě. Jediná operace s pozitivním účinkem na únavové chování je leštění. Leštění účinně odstraňuje místa s vysokými koncentracemi bez zanechání zbytkových napětí v povrchové vrstvě. Všechny ostatní obráběcí operace zanechávají zbytková tahová napětí v povrchové vrstvě, a tudíž mají negativní účinek na únavové chování.

Tlaková napětí v povrchové vrstvě fungují přesně opačným způsobem, například po tváření za studena. Během tváření upevňovacího prvku za studena dochází v povrchové vrstvě k rozsáhlé plastické deformaci v důsledku vysoké úrovně napětí. Ale když přejdeme z povrchové vrstvy hlouběji do materiálu, úroveň napětí poklesne a plastická deformace je nahrazena elastickou deformací. Po dokončení operace tváření zmizí pracovní zatížení a zanechá povrch deformovaný plasticky a oblast pod povrchem deformovanou elasticky. Elastická deformace má tendenci uvolňovat, což znamená tlačit povrch nahoru a vytvářet relativně vysoké tlakové napětí v povrchové vrstvě. Tato potenciální energie tlakového napětí představuje překážku, kterou únavová trhlinka velmi obtížně překonává. Mechanismus uzavření únavové trhliny je znázorněn na obr. 13. Šipky představují tlakové síly.

To je nutné vzít v úvahu při navrhování spoje. Norma VDI 2230:2015 upozorňuje, že šrouby se závity válcovanými před tepelnou úpravou mají značně nižší odolnost proti únavě než šrouby se závity válcovanými po tepelné úpravě. Důvod je docela jednoduchý, operace tepelné úpravy způsobuje rekrystalizaci struktury materiálu a pozitivní účinek deformované povrchové vrstvy mizí.



Obrázek 12: Drsnost povrchu na v mikrometrickém měřítku



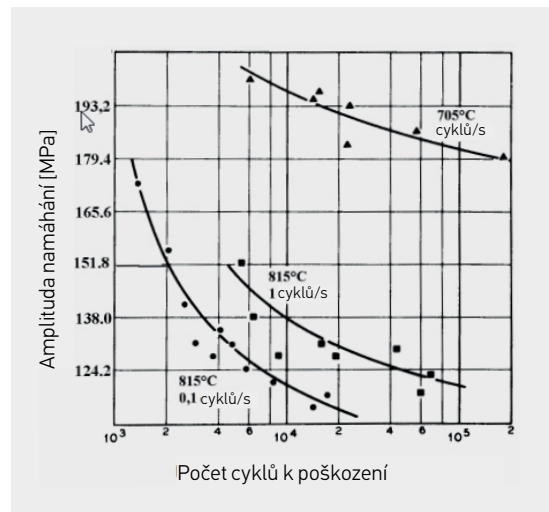
Obrázek 13: Mechanismus uzavření únavové trhliny v důsledku tlakových uvolňovacích sil

Předchozí obrázek nás vede k následujícímu závěru. Čím rozsáhlejší je povrch tváření za studena, tím je zajištěna vyšší odolnost proti únavě.

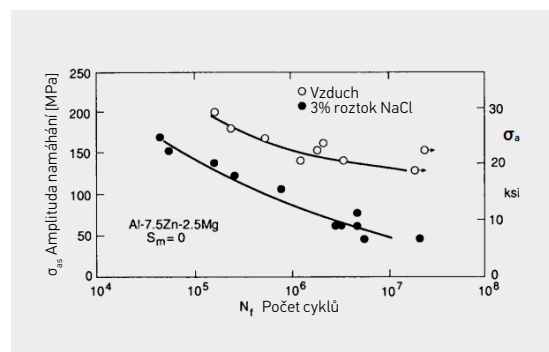
Geometrie upevňovacího prvku není jediným důležitým aspektem, který ovlivňuje odolnost proti únavě. Nanášení kovových vrstev na povrch upevňovacího prvku vždy vytváří tahová napětí v povrchu, která snižují odolnost proti únavě. Hladké upevňovací prvky budou mít vždy lepší odolnost proti únavě než pokovované. Žárově zinkované upevňovací prvky představují speciální případ. Tahová napětí vyskytující se v důsledku pozinkování v kombinaci s velmi drsným povrchem způsobují dramatické snížení odolnosti proti únavě. Podle normy VDI 2230:2015 může toto snížení dosáhnout až 20 %!

Kombinace dynamických zatížení a vysokých teplot má synergický účinek. Vady vytvořené v důsledku vlivu vysokých teplot usnadňují a zrychlují šíření únavové trhliny. Tento účinek má svou největší intenzitu, když se vyskytuje nízká frekvence dynamických zatížení. Tento účinek je znázorněn na obr. 14.

Předchozí oddíl se zabývaly vlivem geometrie dílu, zatěžovacími podmínkami a strukturou materiálu. Ale také nesmí být ignorován vliv chemikálií a chemických reakcí. Existují dva způsoby, jak chemikálie ovlivňují únavové chování. Prvním negativním vlivem je koroze, zvláště její místní forma. Bodová koroze může vytvářet dutiny, které mohou dosahovat několik průměrů vady hluboko v materiálu. Taková vada vytváří kolem sebe vysokou koncentraci napětí, což vytváří vynikající podmínky pro vznik únavové trhliny. Druhým způsobem vlivu je samotná chemická reakce. Když se vyskytne v blízkosti kořene trhliny, mohou být produkty této reakce absorbovány do materiálu, mohou oslabovat jeho strukturu a trhlina se šíří snadněji a rychleji. Srovnání různých prostředí je znázorněno na obr. 15.



Obrázek 14: Vliv teploty a frekvence na únavovou životnost upevňovacího prvku



Obrázek 15: Vliv okolního prostředí

ÚNAVA MATERIÁLU – TICHÁ, NÁHLÁ, ZHOUBNÁ

Výpočet

Poslední oddíl poskytne základní metody výpočtu meze únavy ocelí. Veškerá data pocházejí z rozsáhlého statistického průzkumu, takže lze očekávat určitou odchylku od uvedených hodnot. Při používání těchto vztahů musí být konstruktér obeznámen s rizikem a pracovat s vyšším součinitelem bezpečnosti.

Obecně řečeno, čím vyšší pevnost materiálu, tím nižší odolnost proti únavě. Tvrdé a křehké fáze v mikrostruktuře ocele mají nižší odolnost proti únavě v důsledku jejich chabé schopnosti uvolňovat rozsáhlé dynamické amplitudy realizováním plastické deformace.

Tabulka 1 uvádí průměrné hodnoty poměru R_m/σ_0 pro různé fáze mikrostruktury ocele.

	Ferit	Perlit	Martensit
Poměr R_m/δ_0	0.6	0.4	0.25

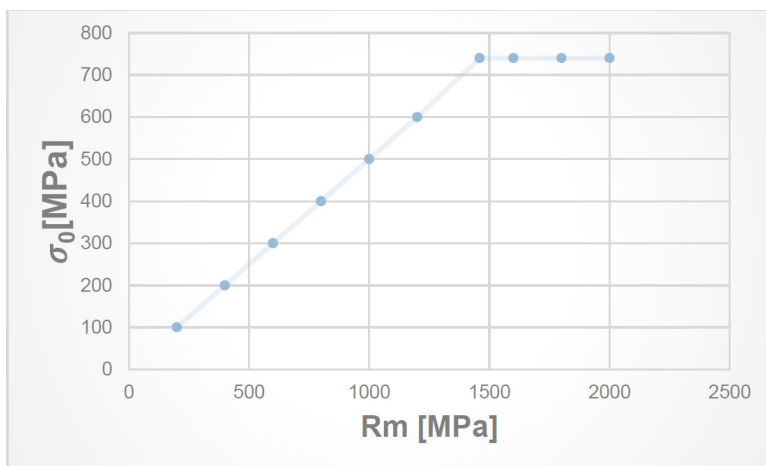
Tabulka 1: Průměrné hodnoty poměru R_m/σ_0 pro nelegované oceli

Informace uvedené v tab. 1 nás vedou k následujícímu závěru: čím vyšší je koncentrace tvrdých a křehkých fází v mikrostruktuře materiálu, tím nižší je odolnost materiálu proti únavě. Mischke a Shigley vypracovali statistickou závislost popsanou níže uvedenými rovnicemi 1 a 2.

$$\sigma_0 = 0,504 * R_m \quad \text{platí pro} \quad R_m \leq 1460 \text{ MPa} \quad (1)$$

$$\sigma_0 = 740 \text{ MPa} \quad \text{platí pro} \quad R_m > 1460 \text{ MPa} \quad (2)$$

Grafické znázornění rovnice 1 a rovnice 2 je uvedeno níže na obr. 16.



Obrázek 16: Závislost mezi pevností v tahu a mezí únavy (ocelí)

Co zahrnuje změna chování při 1460 MPa ještě není jasné. Nejpravděpodobněji křehkost fázi vyskytující se v mikrostruktuře převládá nad vysokou hodnotou její pevnosti v tahu. K dosažení úplného porozumění by měl být proveden další průzkum těchto statistických dat.

Záležitost únavy materiálu je velmi složitá. Některá doporučení jdou proti sobě, což práci konstruktérů komplikuje. Při zvážení možného nebezpečí, které únava materiálu představuje, musí konstruktéři věnovat hodně pozornosti každému jednotlivému aspektu popsanému výše, pokud jsou předpokládána dynamická zatížení.



Pokud potřebujete více informací, navštivte prosím naše stránky www.bossard.com/cs a kontaktujte vaši nejbližší obchodní jednotku.