



Váza z období Ming – účel - potěšení oka a ne přenášet mechanické napětí.

Většina výrobků ze skelné keramiky a porcelánu ve svých užitných vlastnostech nezahrnují přímý přenos mechanického napětí, spíše je zde požadavek snášení tepelných šoků (rychlé ohřátí a ochlazení), odolnosti proti korozi a opotřebení při normálním používání.

Druhá skupina – stavební materiály, které jsou určeny pro přenos zatížení. Pevnostní vlastnosti hrají dominantní úlohu – těžké konstrukce.

V současné době probíhá intenzivní vývoj konstrukční keramiky a také abraziv. Dobré antikorozní vlastnosti.

Lehké konstrukce – biokeramika, lopatky čerpadel, sedla ventilů.

Modul pružnosti

Víme, že keramiky stejně jako kovy (není to pravda u polymerů) mají dobře definovaný Yongův modul; hodnoty E nejsou významně závislé na čase (což se nejlépe pozná při cyklickém zatěžování). Moduly keramiky jsou obecně větší než u kovů – což obráží velkou tuhost jednak iontové vazby jednoduchých oxidů a kovalentní vazby silikátů. A protože keramiky jsou složeny z lehkých atomů (kyslík, uhlík, křemík, hliník) a protože jejich struktura zpravidla neodpovídá mřížce s nízkou hustotou. To je důvodem, že jejich specifický modul (E/ρ) je poměrně vysoký

Materiál	Modul E (GPa)	Hustota ρ (Mg.m ⁻³)	spec. modul E/ρ (GPa/Mg.m ⁻³)
Oceli	210	7,8	27
Al – slitiny	70	2,7	26
Korund (Al ₂ O ₃)	390	3,9	100
Skla (SiO ₂)	69	2,6	27

Tabulka ukazuje, že korund má specifický modul 100 (ocel 27). To je jedna z příčin, že keramická nebo skleněná vlákna se používají v kompozitech.

Pevnost a tvrdost

Keramiky jsou jedny z nejtvrdších materiálů. Korund (Al₂O₃), karbid křemíku (SiC) a ovšem diamant (C) se používají jako abraziva – je možné s nimi řezat, brousit nebo leštit prakticky všechno. Porovnejme poměr tvrdosti k modulu pružnosti různých materiálů. Ukázali jsme si, že tato veličina (H/E) – $H \approx 3 R_e$ – čím bude vyšší, tak pevnost bude blíže ideální pevnosti.

Čistý kov	H/E	Slitiny	H/E	Keramiky	H/E
Měď	$1,2 \cdot 10^{-3}$	Mosaz	$9 \cdot 10^{-3}$	Diamant	$1,5 \cdot 10^{-1}$
Hliník	$1,5 \cdot 10^{-3}$	Dural	$8,5 \cdot 10^{-3}$	Korund	$4 \cdot 10^{-2}$
Níkl	$9 \cdot 10^{-4}$	Nerez ocel	$6 \cdot 10^{-2}$	Zirkoniová ker.	$6 \cdot 10^{-2}$
Železo	$9 \cdot 10^{-4}$	Nízkoleg. ocel	$1,5 \cdot 10^{-2}$	SiC	$6 \cdot 10^{-2}$
STŘEDNÍ HOD.	10^{-3}	STŘEDNÍ HOD.	10^{-2}	STŘEDNÍ HOD.	$8 \cdot 10^{-2}$

První sloupec jsou čisté kovy (dislokace kazi pevnost), druhý sloupec ukazuje, že jsme blíž k ideální pevnosti (ve slitinách jsou dislokace částečně zablokované), třetí sloupec ukazuje, že čisté keramiky mají tento poměr největší a tedy mají pevnost nejbližší ideální pevnosti (nepohyblivé dislokace, nebo strašně málo kluzových systémů).

Iontová, kovalentní keramika – inherentně tvrdá

Kovy – inherentně měkké

Lomové napětí keramiky.

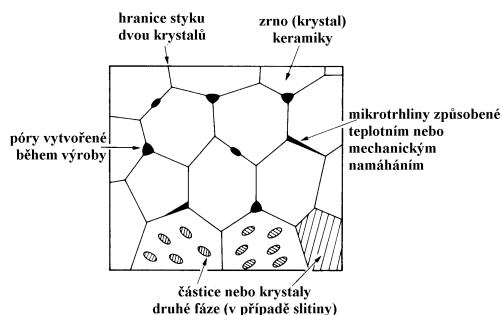
Pokuta, kterou musíme platit, když vybereme materiál inherentně tvrdý – materiál s vysokým odporem proti pohybu dislokací v mřížce – je křehkost – jinak řečeno, lomová houževnatost je nízká. I když v kořeni trhliny, kde je napětí intenzifikováno

$$\sigma_{lok} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} .$$

Plastická deformace ve špičce trhliny, která se vyskytuje u kovů, odbourává onu špičku napětí zaoblením špičky trhliny; energie absorbovaná v plastické zóně způsobí obtížnější šíření trhliny. V kořeni trhliny v keramice je plastická deformace velice omezená - špička napětí je odbourávána síťovým trhlinek – absorbovaná energie je malá a tedy lomová houževnatost nízká. Výsledkem je, že keramika má hodnoty K_{IC} , které jsou přibližně 15x menší než houževnatost kovových materiálů.



materiál	K_{IC} (MPam ^{1/2})	materiál	K_{IC} (MPam ^{1/2})	materiál	K_{IC} (MPam ^{1/2})
sklo – obecně	0,6 – 1	keramika – obecně	1 – 12	konstrukční oceli	
- křemenné	0,74 – 0,81	Al ₂ O ₃		nízká - vysoká	20 – 200
- sodnovápenné	0,72 – 0,82	reakčně slinovaný	1,0 – 3,5	teplota	
		tlaťově slinovaný	2,5 – 3,5	šedá litina	10 – 25
		speciální (se ZrO ₂)	5 – 10		
		SiC			
		reakčně slinovaný	2,5 – 3,5		
		tlaťově slinovaný	2,5 – 4		
		ZrO ₂ /stabilizovaný	2 – 3		
		ZrO ₂ /částečně stab.	6 – 12		



Keramika – a nakonec každý materiál – obsahuje určité vnitřní vady. Polykrytalická keramika se dělá z jemných prášků slinováním (sintrováním, spékáním) za vysokých teplot a tlaků nebo lisováním za studena prášků s pojivem a následným vypálením. Struktura je podobná kovu.

Každé zrníčko je více, či méně dokonalý krystal, jednotlivé krystaly se dotýkají na hranicích zrn.

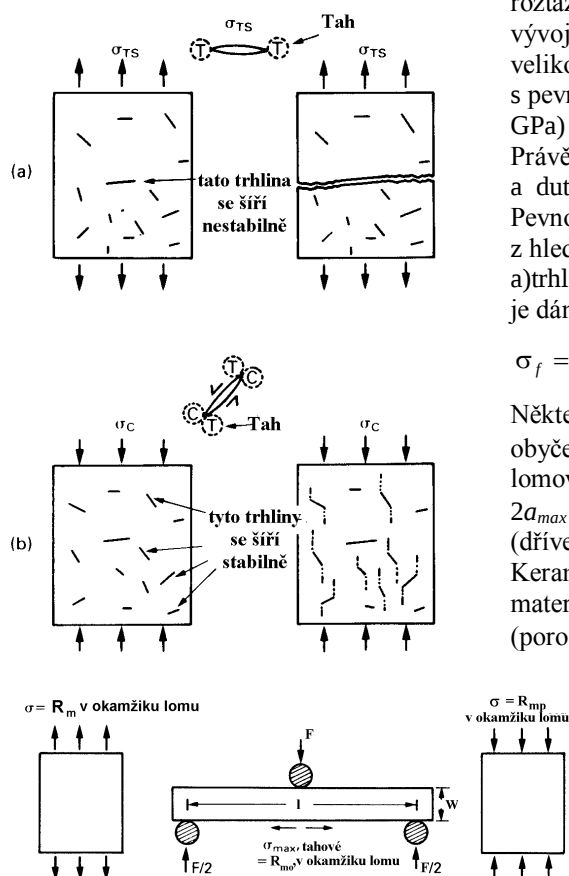
Dále si musíme uvědomit, že mnohé keramiky nejsou zcela hutné. Poróznost může být vysoká ~ 20 %. Póry oslabují materiál, ale jsou – li ideálně kulaté, vytváří se kolem nich poměrně malá koncentrace napětí. Mnohem nebezpečnější jsou trhlinky, které mohou vznikat v důsledku různé tepelné roztažnosti nebo isotropie v modulech mezi zrnky. Současný vývoj ve výrobě konstrukční keramiky je zaměřen na redukci velikosti a počtu pórů, což by mělo umožnit vývoj keramiky s pevností vyšší, než je pevnost vysocepevných ocelí (řádově GPa)

Právě díky nízké lomové houževnatosti K_{IC} a přítomnosti trhlin a dutin ve struktuře je pevnost keramických součástí nízká. Pevnost keramické součásti je dána velikostí nejdelší, z hlediska působícího napětí vhodně orientované (← obr. 2 a) trhliny. Je-li délka trhliny v součásti $2a$, pak tahová pevnost je dána vztahem:

$$\sigma_f = R_m = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi a}}$$

Některé keramiky mají tahovou pevnost asi poloviční než obyčejná ocel ≈ 200 MPa. Řekněme, že typická hodnota lomové houževnatosti $K_{IC} = 2$ MPa.m^{1/2}, pak největší trhlina $2a_{max} = 60$ μ m – což přibližně odpovídá velikosti průměru zrna (dříve dělaných hutných keramik).

Keramika, cihla a kámen mají pevnost asi 20 MPa. Tyto materiály jsou plné trhlinek a pórů vzniklých během výroby (porozita 5 až 20%). Pevnost je jednoznačně dána velikostí



trhlinek obsažených ve struktuře.

Tedy existují dva způsoby jak vyrábět pevnější keramiku :

- zmenšením a_m – příslušnou technologií výroby, precizností výroby, čistota a pod.
- zvýšením K_{IC} – jemnější prášky optimum (1 až 0,4) μ m, využití fázové transformace, vytváření kompozitů.

Jak se měří pevnost keramiky – viz obrázek 3

- tahová zkouška; jak jsme si pověděli, tahová pevnost je určena nejdelší, kolmo na napětí orientovanou trhlinou v objemu zkušebního tělesa. Dělat tahové zkoušky je obtížné a zpravidla se tahové zkoušky na čisté keramice nedělají, na kompozitech ano.



- b) mnohem snadnější a podle norem se doporučuje měřit pevnost v ohybu. Pevnost v ohybu – umíme z pružnosti – odpovídá maximálnímu napětí v krajním vlákně

$$\sigma_{max} = R_{om} = \frac{M_{max}}{W} \left(\frac{\text{maximální ohybový moment}}{\text{modul průřezu}} \right), \text{ modul průřezu je pro obdélníkový průřez}$$

$$W = \frac{B \cdot W^2}{6} \text{ a pro kruhový průřez } W = \frac{\pi D^3}{32}; \text{ Ohybový moment } M = \frac{F \cdot l}{4} \text{ pro třibodový ohyb (l je}$$

vzdálenost opor), $M = \frac{F \cdot l_1}{2}$ pro čtyřbodový ohyb, (l_1 – je polovina rozdílu mezi vnějšími a vnitřními oporami).

Co myslíte, jsou pevnosti v tahu a ohybu u keramiky stejné?

Ohybová pevnost má hodnotu větší než pevnost tahová – pro keramiky platí přibližně $R_{mo} = 1,7 R_m$. Příčina je ve stochastickém procesu při lomu keramiky – opak je deterministický přístup.

Třetí zkouška je zkouška tlakem. Pro kovy, jak jsme si pověděli, je mez kluzu měřená v tlaku a tahu prakticky stejná. Vhodným přepočtem dostaneme stejné závislosti napětí – deformace v okolí meze kluzu. U křehkých materiálů – tedy i u keramiky – toto neplatí, velice hrubý odhad je, že tlaková pevnost je asi 15 krát větší než pevnost v tahu $R_{mp} = 15R_m$.

Příčina je schematicky znázorněna na obr. 2b. Trhliny v tlaku se šíří stabilně a stáčí se ze směru své původní orientace do směru rovnoběžného s tlakovou osou. Lom není způsoben rychlým nestabilním šířením trhliny, ale pomalým šířením mnoha trhlín ve směru kolmém na tahové napětí. V tomto případě není pro pevnost rozhodující největší rozměr trhliny (a_m), ale střední velikost trhlínek v materiálu ($\bar{a}$). Pevnost v tlaku je dána vztahem

$$R_{mc} = C \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi \bar{a}}}, \text{ kde konstanta } C \text{ je rovna asi 15.}$$

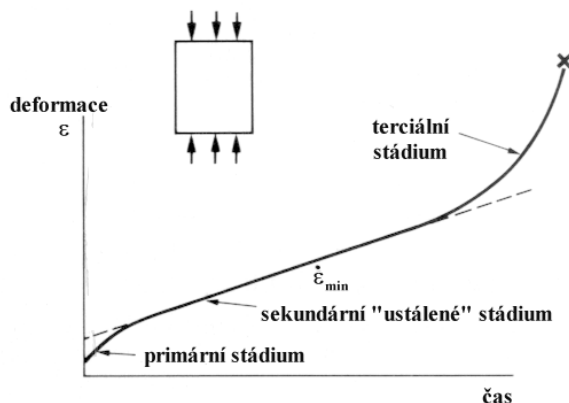
Odolnost proti tepelným šokům (vlastnost vyvolaná malou tepelnou vodivostí)

Nalijeme vařící vodu do studené pивní láhve – dno upadne s výrazným prasknutím – objevili jsme zkoušku odolnosti materiálu vůči tepelným šokům. Některé keramiky a skla snesou teplotní šok $\Delta T = 80^\circ\text{C}$ než prasknou (např. pивní láhev), jiné vydrží změnu teploty až 500°C , což je dostatečné k tomu, aby tato keramika mohla být použita jako vnitřek spalovacího motoru (třeba nitrid křemíku).

Jeden ze způsobů měření teplotních napětí, tedy odolnosti vůči tepelným šokům, je hození kousku keramiky ohřáté na určitou teplotu do studené vody. Maximální teplotní rozdíl ΔT , který přežije kousek keramiky jako celek, vyjadřuje odpor keramiky proti teplotnímu šoku.

Je-li koeficient tepelné roztažnosti α , pak rychle ochlazená povrchová vrstva se stáhne – deformaci vyvolanou stažením můžeme vyjádřit vztahem $\alpha \cdot \Delta T$. Značná část materiálu zůstává v okamžiku hození do vody teplá a smrštění povrchové vrstvy způsobí elastické pnutí velikosti $E \alpha \Delta T$. Jestliže toto napětí dosáhne hodnoty pevnosti R_m , objeví se na povrchu součásti trhlina (jedná se o tahová pnutí). Tedy maximální změna teploty ΔT je dána vztahem: $R_m = \alpha \Delta T E$. Hodnota ΔT u skel, která mají velké α , je asi 80°C . Mnohé keramiky mají ΔT několik stovek stupňů, což je dáno malou hodnotou α – diamant -1000°C , SiC – 600°C .

Creep keramiky



Podobně jako kovy i u keramiky dochází ke creepu za vysokých teplot. Creepová křivka je velice podobná křivce kovů. Opět zde je nejdůležitější sekundární – ustálený

(stacionární) creep $\dot{\epsilon}_{ss} = A \sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$,

kde σ je napětí, T teplota, A a n Q materiálové charakteristiky.

Většina konstrukčních návrhů, kde se počítá s creepem, vychází z této rovnice – obr. 4. V případě konstrukční keramiky dochází ke creepu při vyšších teplotách než u kovů. Creep se stává problémem, když je teplota vyšší než $1/3 T_m$. Bod tání technických keramik je přes 2000°C .

Naproti tomu za keramiku je možné považovat i led, který má vysokou teplotu tání a tedy



pohyb ledovců se také řídí výše uvedenou rovnicí.

Statistická povaha křehkého lomu – konstrukční návrh z keramiky.

Úvod.

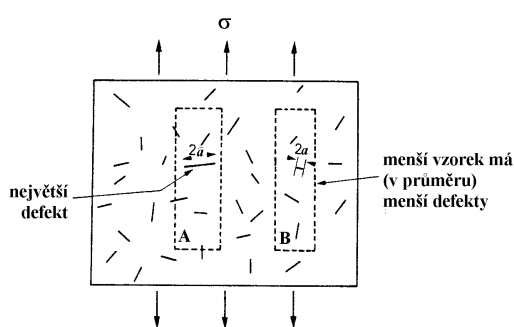
Křída, kterou píšete na tabuli je křehká keramika. Některé kousky křídly jsou křehčí než jiné. V průběhu své praxe na škole jsem zjistil, že asi 3 z 10 kříd se zlomí hned jak začnu psát na tabuli, 7 jich přežije. Pravděpodobnost lomu, P_f , pro tuto křidu která je zatížena ohybem je 3/10 tj. $P_f = 0,3$.

Při psaní křidou po tabuli není nijak na závalu, když se zlomí 3 kousky z deseti, ale kdyby se lámala jedna ze dvou kříd, pak bychom museli hledat jiný zdroj křídly.

Je-li komponentou z keramiky řezný nástroj, pak je přijatelná pravděpodobnost porušení $P_f = 10^{-2}$ (1 ze 100 nástrojů) – nástroj lze snadno vyměnit. Jedná-li se o okénko ve vakuovém systému, jehož lom způsobí závažnou poruchu jak náplně, tak i vakuového systému, pak je nutná $P_f = 10^{-6}$; keramický díl kosmické rakety, kde lom kteréhokoliv z 10 000 dílů je katastrofou pro celé zařízení musíme zajistit $P_f = 10^{-8}$.

Při použití křehkého materiálu pod zatížením je nemožné předpokládat, že nedojde k porušení dílu. Jestliže připustíme přijatelné riziko (pravděpodobnost) lomu během provozu součásti, pak je možné keramiku použít jako konstrukční materiál.

Statistická povaha pevnosti a Weibullovo rozdělení

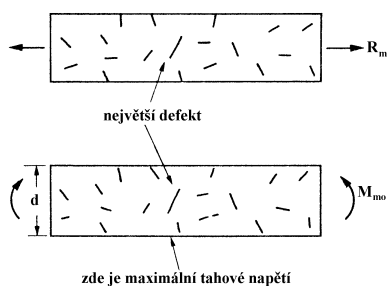


Křída je porézní materiál. Má $K_{IC} = 0,9 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ a je plná děr a trhlinek. Střední tahová pevnost je asi 15 MPa $\Rightarrow$ dá se tedy říci, že střední délka nejdelších trhlinek je asi 1 mm

(odhad podle $R_m = K_{IC} / \sqrt{\pi a}$). Křída obsahuje jistou

distribuci různých délek trhlin. Dva nominálně stejné kousky křídly mohou mít (Obr.5) tahovou pevnost velice rozdílnou – rozdíl může být až trojnásobný. Velký blok má pevnost určenou největší trhlinou. Je-li blok rozřezán na kousky, kousek A bude méně pevný než kousek B, protože obsahuje největší trhlinu. Tato skutečnost je vlastní pevnosti keramiky, to znamená, že pevnost má stochastickou

povahu. Neexistuje jedna – určitá tahová pevnost dané keramiky, ale pouze pravděpodobnost, že daný vzorek, součást, má danou pevnost.



Rozdělení délek trhlin má i další důsledek. Velký vzorek se poruší při menším napětí, než malý vzorek – v průměru – ovšem je jistá pravděpodobnost, že vybereme právě vzorek s nejdelší trhlinou. Tedy je zde závislost pevnosti na velikosti zatíženého objemu. To je také příčina, proč keramický nosník je pevnější při ohybu, než při zatížení tahovým napětím. V tahu celý objem vzorku nese tahové napětí, při ohybu pouze tenká vrstva na povrchu (což je malý objem) nese (Obr.6) špičku napětí. Proto $R_{mo} = 1,7 R_m$.

Švédský inženýr Weibull zpracoval problém statistické pevnosti.

➡ Obr. 7

Definoval pravděpodobnost přežití (neporušení) $P_s(V_o)$ jako poměr identických vzorků, každý o objemu V_o , který přežije zatížení napětím σ k celkovému počtu vzorků. Pravděpodobnost přežití (nezlomení)

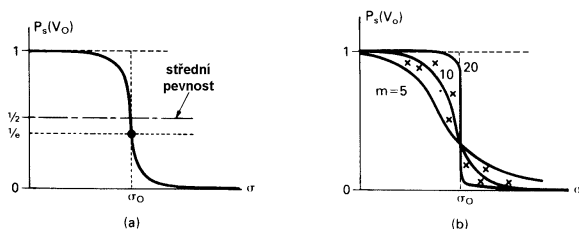
$$P_s(V_o) = \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^m \right\} \quad (1)$$

m – Weibullův modul, σ_o – parametr měřítka.

V literatuře se někdy používá i termín pravděpodobnost porušení $P_f(V_o) = 1 - P_s(V_o)$ (2)

$P_f(V_o) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^m \right\}$, když $\sigma = 0$, všechny vzorky jsou celé a tedy $P_s(V_o) = 1$, když σ roste, pak $P_s(V_o)$

klesá (Obr. 6a). Dosadíme-li do rovnice (1) za $\sigma = \sigma_o$ zjistíme, že $P_s(V_o) = 1/e = 0,37$. Znamená to, že při napětí



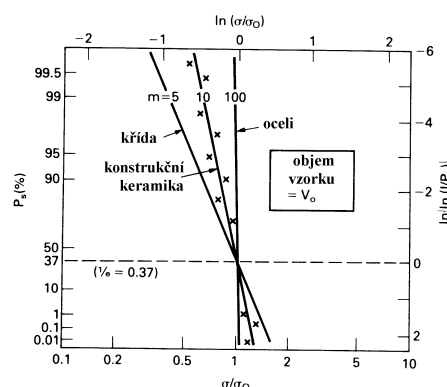


$\sigma = \sigma_0$ zůstane 37% vzorků neporušených a pravděpodobnost porušení je 63 %. Konstanta m charakterizuje rozptyl – jak moc se mění pevnost v okolí σ_0 – říkáme jí Weibullův modul. Menší m , větší variabilita pevnosti a obráceně. V případě křídý m je asi 5 a tedy variabilita pevnosti je velká, takovouto hodnotu m naměříme při studiu pevnosti cihly a kamene (Obr.7 b). Konstrukční keramika – SiC, Al₂O₃ – je-li dobře udělaná, má hodnotu m asi 10, to znamená, že napětí (pevnost) se mění mnohem méně. V případě měření pevnosti kovů je m přibližně 100.

Charakteristiky rozdělení m a σ_0 se určují experimentálně. V souvislosti s měřením pevnosti speciální keramiky (konstrukční keramika, advanced technical ceramics – monolithic ceramics, mechanical test at room temperature) uveďme evropskou normu EN 843, která má pět částí. Prvá část je již vydána i jako ČSN EN 843, část 1; (727541) a týká se postupu měření ohybové pevnosti technické keramiky. Ostatní části normy mají označení ENV a jsou tedy ve fázi připomínkovacího řízení členů CEN/technické komise 184, která se jmenuje; část 2 – určení modulu pružnosti, část 3 – určení charakteristik subkritického růstu trhliny; část 4 – zkoušky tvrdosti podle Vickerse, Knoop a Rockwella; část 5 – statistická analýza.

Postup odhadu parametrů m a σ_0 je následující. Doporučený počet měření N je nejméně 30. Naměřené hodnoty pevnosti seřadíme podle velikosti od nejmenší hodnoty do hodnoty největší a každé hodnotě i přiřadíme pravděpodobnost porušení P_{fi} , (příp. pravděpodobnost přežití P_{si} Obr. 8).

pořadové číslo	naměřené hodnoty pevnosti seřazené podle velikosti	P_f	P_s
1	σ_{f1}	$0,5/N$	$(N-0,5)/N$
.	.	.	.
i	σ_{fi}	$\frac{i-0,5}{N}$	$\frac{N+0,5-i}{N}$
.	.	.	.
N	σ_{fN}	$(N-0,5)/N$	$0,5/N$



Vztah pro výpočet pravděpodobnosti uvedený v tabulce je převzat z návrhu ENV 843-5. V případě, že rovnici (1) nebo (2) dvakrát logaritmujeme dostáváme prakticky rovnici přímky v souřadnicích

$\log\left\{\log\left[\frac{1}{1-P_f(V_0)}\right]\right\}$ versus $\log(\sigma)$ v případě pravděpodobnosti porušení, nebo

$\log\left\{\log\left[\frac{1}{P_s}\right]\right\}$ versus $\log(\sigma)$ v případě pravděpodobnosti přežití – viz obr. 8

Vliv zatíženého objemu

V praxi se často liší rozměry součásti a zkušebního tělesa. Uvažujme nejjednodušší případ – napjatost ve vzorku i v součásti je stejná, ale rozdíl je ve velikosti těles (malá a velká tyč zatížená tahem).

Mějme malý vzorek o objemu V_0 , který je zatížen rovnoměrně napětím σ a tedy pravděpodobnost, že nedojde k lomu je $P_s(V_0)$. Nyní máme těleso stejně zatížené stejným napětím σ , ale o objemu $V = 2V_0$, potom pravděpodobnost, že k lomu nedojde, (tzn. že ani ve dvakrát větším objemu se nenajde vada kritické velikosti) je $P_s(V_0)P_s(V_0) = [P_s(V_0)]^2$ a platí $V/V_0 = 2$. Máme-li vzorek o objemu $V = nV_0$ zatížený napětím σ pak pravděpodobnost že nedojde k lomu je

$P_s(V) = [P_s(V_0)]^2 = [P_s(V_0)]^{V/V_0}$ po zlogaritmování dostáváme

$\ln[P_s(V)] = \frac{V}{V_0} \ln[P_s(V_0)]$ a po úpravě dostaneme $P_s(V) = \exp\left\{\frac{V}{V_0} \ln[P_s(V_0)]\right\}$, z rovnice udávající

pravděpodobnost přežití, rov. (1) $P_s(V_0) = \exp\left\{-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right\}$ a na základě porovnání těchto dvou rovnic zjistíme,

že $\ln[P_s(V_0)] = -\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m$.

Pravděpodobnost neporušení (přežití) součásti o objemu V zatížené napětím σ je dána vztahem



$$P_s(V) = \exp \left\{ - \frac{V}{V_o} \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^m \right\} \quad (3)$$

Pravděpodobnost porušení

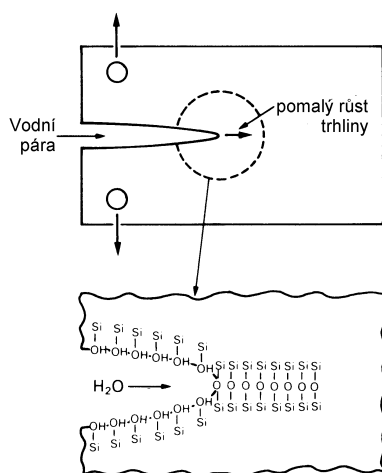
$$P_f(V) = 1 - \exp \left\{ - \frac{V}{V_o} \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^m \right\} \quad (3a)$$

V případě, že napětí není rovnoměrně rozděleno, ale mění se v závislosti na místě v tělese (např. u ohybového namáhání), pak in rov. (3) resp. (3a) bude vystupovat integrál

$$P_f = 1 - \exp \left[- \frac{1}{V_o} \int_V \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^m dV \right], \text{ kde } \sigma = \sigma(x,y,z) \text{ vyjadřuje napětí závislé na místě v tělese.}$$

Dříve, než se budeme zabývat problémem návrhu součásti ze skla, zmíníme se o problému, který se u skel a keramik vyskytuje, a to je:

Závislost pevnosti keramiky na čase (statická únava) – subkritický růst trhliny – poltergeist



Vycházíme z poznatku, že skleněná tyč se při pokojové teplotě poruší při napětí σ v krátkém čase t ; tatáž tyč zatížená napětím $0,75\sigma$ se poruší za čas asi desetkrát delší $10t$. Většina oxidické keramiky se takto chová a při návrhu konstrukce je nutné s tímto jevem počítat. Karbidy a nitridy (SiC , Si_3N_4) tento jev nevykazují za normální teploty, ovšem za zvýšených teplot ano.

Příčina tohoto chování skel a keramiky je v pomalém růstu trhliny – jedná se vždy o povrchové trhliny – který je vyvolán chemickou reakcí mezi keramikou a vodou v okolním prostředí. Voda, resp. vodní páry, reagují s molekulami a vytváří hydroxid. Součást praskne náhle, ale až za dlouhý čas. Teoretické úvahy i experimentální měření vychází z analogie s únavou; někdy se používá termín „statická únava“ $v = da/dt = AK_I^N$. My si ukážeme konečný výraz. Jestliže standardní zkouškou určíme pevnost σ_{test} a doba trvání zkoušky je t_{test} , pak napětí σ bude

vzorek snášet po dobu t : $\left(\frac{\sigma}{\sigma_{test}} \right)^N = \frac{t_{test}}{t}$, kde N je exponent

růstu trhliny. Jeho hodnota je mezi 10 až 20 za normální teploty. V případě, že $N = 10$, pak prodloužení doby do lomu na 10 násobek vede ke snížení pevnosti o 20 %; karbidy, nitridy, u nichž je hodnota $N = 100$ za pokojové teploty zvýšení doby do lomu 10 krát, vede k poklesu pevnosti jen o 2 %.

Příklad designu skleněného okénka vakuové komůrky.

