

11. ročník, úloha V. E ... pevnost nitě (8 bodů; průměr ?; řešilo 38 studentů)

Změřte mez pevnosti nitě v tahu. S řešením nám pošlete 1 m dlouhý vzorek vaší nitě.

Teorie

Pro izotropní materiál je mez pevnosti v tahu definována coby kritické napětí σ_K , při kterém dochází k trvalé deformaci materiálu tahem. Existuje celá složitá teorie, popisující chování látky při působení vnější síly — někteří řešitelé rozvedli na toto téma široké úvahy, což jsem ocenil, zvláště pokud to mělo také co do činění s nitěmi. Nit bohužel není izotropní, ba dokonce ani příliš homogenní (tím míním „stejná“ ve všech bodech měřeného úseku). Mezi pevnosti nitě budeme definovat normálové napětí σ_N , které se v niti nachází v okamžiku, kdy dochází k trvalé deformaci — praskání nitě, porušení vláken. Toto napětí lze určit jako podíl

$$\sigma_N = \frac{F_K}{S},$$

kde F_K je velikost kritické síly, která ve zmíněném okamžiku nit napíná v normálovém směru, S je obsah průřezu nitě v téže okamžiku. σ_N nelze chápat jako mez pevnosti materiálu, z něhož je nit vyrobena. Nit totiž může mít složitou vnitřní strukturu — zpravidla je vyrobena z více paralelních vláken, v lepším případě rovnoběžných a přibližně stejných (v horším případě různých a různě zašmodrchaných — existují i nitě pletené, kde vlákna nejsou rovnocenná a při napínání nitě působí na různá vlákna různé síly).

Metody

K měření σ_N je třeba změřit kritickou sílu F_K a průřez nitě S . Předpokládejme, že nit má na měřeném úseku konstantní průřez. Na nit budeme působit silou, jejíž velikost budeme pomalu zvyšovat. Změříme tak mez pevnosti nejméně odolného úseku nitě měřeného nitě.

Nit lze napínat různými silami. Můžeme nit přivázat ke stropu, na její dolní konec upevnit siloměr a za siloměr ručně tahat ve vhodném směru. Špatným nápadem není ani použití nitě coby závesu matematického kyvadla; při průchodu rovnovážnou polohou působí na nit největší síla (součet tíhové síly závaží a reakční síly na sílu dostředivou). Osobně jsem se přidržel klasičtějšího řešení — na nit jsem zavěsil láhev, do níž jsem velmi pomalu přiléval vodu. Působící síla byla tedy pouze tíhová.

Dále je třeba změřit průřez nitě S . To se dá udělat s poměrně velkou odchylkou pravítkem nebo mikrometrem. Nebo lze užít následující postup: do kapaliny v odměrném válci ponoříme větší množství nitě známé délky. Změříme tak objem nitě a z předpokladu konstantního průřezu máme

$$S = \frac{V}{d}, \quad (1)$$

d je délka nitě, V je objem nitě. Oběma postupy se však měří průřez nitě v nenapjatém stavu. Abychom se vyhnuli problematickému měření napnuté nitě, stanovíme relativní prodloužení ε nitě mezi nenapnutým a napnutým (praskajícím) stavem. Ve vztahu (1) pak použijeme délku $d' = \varepsilon d > d$ místo d .

Vlastní měření

Použil jsem nit, která nebyla pletená. Na nit jsem zavěsil láhev a do lahve jsem pomalu přiléval vodu. Po překročení kritické síly nit praskla. Láhev s vodou jsem následně zvážil na kuchyňské váze. Deset měření je v tabulce 1

Tabulka 1

č. m.	m [kg]	F_k [N]	ΔF_k [N]	$(\Delta F_k)^2$ [N ²]
1	1,71	16,8	+2,8	7,84
2	2,08	20,4	-0,8	0,64
3	2,12	20,8	-1,2	1,44
4	2,20	21,6	-2,0	4,00
5	1,84	18,1	+1,5	2,25
6	1,90	18,6	+1,0	1,00
7	2,16	21,2	-1,6	2,56
8	1,78	17,5	+2,1	4,41
9	2,13	20,9	-1,3	1,69
10	2,01	19,7	-0,1	0,01

Systematická chyba měření bude vyžadovat diskusi. Nejprve chyba použitého zařízení — kuchyňské váhy — ta činí 10 g (jeden dílek měřidla je sice 10 g, avšak jistou toleranci vyžaduje též nepřesné vyvažování). Do systematické chyby se započítávají i chyby metody. Metoda má následující chyby: dodávání vody se děje po jistých dávkách, aby byla láhev naplněna v konečném čase. Tyto dávky jsou přibližně 50 g. Měření může ovlivnit setrvačná síla pomalu přilévané vody. Nit si dále „pamatuje“, pokud byla již jednou namáhána, a praská dřív. Celkově tudíž systematickou chybu odhaduji na 0,8 N. Pro výpočet celkové chyby užijeme přibližný vzorec $s_{\text{celk}} = 3s_{\text{stat}} + s_{\text{syst}}$. Odtud $s_{\text{celk}} = 2$ N.

Měření průřezu

Průřez nitě jsem měřil ponořením do vody. Odměrný válec měl 1 dílek 0,5 ml. Naměřené objemy a jim odpovídající délky nití jsou v tabulce. Relativní prodloužení jsem změřil $1/\varepsilon = (0,90 \pm 0,03)$.

Tabulka 2

č. m.	d [m]	d' [m]	V [cm ³]	S [cm ²]	ΔS [m ²]
1	11,4	12,7	$1,50 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$0,0 \cdot 10^{-7}$
2	9,5	10,5	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$0,0 \cdot 10^{-7}$
3	10,4	11,5	$1,50 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$-0,1 \cdot 10^{-7}$
4	9,0	10,0	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$-0,1 \cdot 10^{-7}$
5	10,0	11,1	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$0,1 \cdot 10^{-7}$

Systematická chyba je značná — je to způsobeno nepatrným objemem nitě i při značné délce. Museli bychom nořit kilometry nití, aby byly výsledky přesnější. Chyba měřidla (válece) je 0,25 ml. Chyba při měření délky nitě byla 5 cm (měřeno metrem). Při měření objemu byl navíc problém zbavit se všech vzduchových bublin, které se v nitě vytrvale držely. Odtud plyne systematická chyba cca 20 %, tj. $s_{\text{syst}} = 0,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ a celková chyba $s_{\text{celk}} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$.

Průměr nitě jsem zkoušel též měřit přímo — namotáním více nití těsně vedle sebe na pravítko. Dospěl jsem k hodnotě poloměru $r = 0,2$ mm, což odpovídá průřezu $S = 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$, přičemž statistická chyba činí 5 % a systematická chyba není známa (nelze určit, do jaké míry jsou nitě těsně u sebe).

Závěr

Mez pevnosti určíme jako $\sigma_N = F_K/S$, po dosazení naměřených hodnot

$$\sigma_N = (160 \pm 80) \text{ MPa}.$$

Diskuse

Přestože mnoho z vás neměřilo lépe, vycházely vám odchylky optimističtější. Zpravidla jste si dost věřili, co se týče systematické chyby. Největší chyba vznikla jistě měřením průřezu nitě. Mohli bychom ji snížit např. tak, že vezmeme větší a užší odměrný válec a do něj nacpeme několik kilogramů nitě. Pak ale budeme mít nejspíš problémy s bublinami vzduchu. Při měření se potvrdily obavy z nehomogenity nitě, je tedy otázkou, do jaké míry má smysl počítat statistické odchylky při měření kritické síly. Nit se trhá v různých místech při jiné zátěži, navíc lze pozorovat, že při delším zatížení nit praskne, aniž by bylo dosaženo síly, při které praskla, když jsme přilévali vodu rychleji. Pokus o vysvětlení: nit je složena z více vláken zamotaných okolo sebe. Po zavěšení závaží se některá vlákna napínají, vnitřní struktura se mění (pozorujeme např. rotaci nitě) a mění se i rozložení tíhové síly mezi jednotlivá vlákna. Při těchto změnách se může stát, že nosných nití je málo. Měření vadí i jiné věci, např. vlhkost apod., pokud však nit nepolijeme sami, nepovažují tyto jevy za majorantní.

Filosofický závěr

Přesností naše měření neoplývá. Zjistili jsme však, že kolem chování nití lze nadělat spoustu teorie, která rozhodně nebude jednoduchá. Nicméně teprve s dobrým fyzikálním modelem budeme znát správnou interpretaci výsledků měření.

Matouš Jiráček