



## Měření modulu pružnosti pomocí tloušťkoměrů a defektoskopů

Tato poznámka k oblasti použití vysvětluje postup měření modulu pružnosti pomocí tloušťkoměrů a defektoskopů. Zjistěte, jak stanovit Youngův modul pružnosti, modul pružnosti ve smyku a Poissonovo číslo u nedisperzních izotropních průmyslových materiálů.



## Jak porozumět modulu pružnosti

**Youngův modul pružnosti** je definován jako poměr napětí (síly na jednotku plochy) a jím vyvolaného namáhání (deformace) v materiálu při napínání nebo stlačení.

**Modul pružnosti ve smyku** je obdobně poměr napětí a namáhání, avšak v materiálu vystaveném smykovému zatížení.

**Poissonovo číslo** je poměr příčného zatížení a odpovídajícího osového zatížení materiálu při namáhání v jedné ose.

Tyto základní vlastnosti materiálu, které se využívají v mnoha výrobních a výzkumných oblastech, lze zjistit výpočtem na základě změřené rychlosti šíření zvuku a hustotě materiálu. Rychlost šíření zvuku lze snadno změřit pomocí ultrazvukových technik založených na odrazu signálu (technika impulz-echo) za použití vhodného přístroje.

Obecný níže načrtnutý postup platí pro všechny homogenní, izotropní a nedisperzní materiály (ve kterých se rychlost šíření zvuku s frekvencí nemění). Do této skupiny patří většina běžných materiálů, průmyslových keramických materiálů a skel, pokud nejsou rozměry příčného průřezu příliš blízko vlnové délce zkušební frekvence. Tuhé plasty, jako např. polystyren a akrylové materiály, je také možné změřit, ačkoliv jsou tato měření z důvodu vyššího útlumu zvuku náročnější.

Charakteristiky pryžových materiálů nelze pomocí ultrazvuku určit z důvodu jejich vysoké disperze a nelineárních elastických vlastností. Stejně tak i měkké plasty vykazují velmi vysoký útlum modulu pružnosti ve smyku, a proto je nelze tímto způsobem testovat. U anizotropních materiálů se elastické vlastnosti liší podle směru, a stejně se chová i rychlost šíření podélné nebo příčné zvukové vlny. Vytvoření úplné matice modulů pružnosti v anizotropních vzorcích typicky vyžaduje šest různých ultrazvukových měření. Pórovitost nebo hrubá granularita materiálu může přesnost ultrazvukových měření modulu ovlivnit, neboť tyto vlastnosti mohou způsobit odchylky v rychlosti šíření zvuku v závislosti na velikosti zrna a jeho orientaci nebo na rozložení a velikosti pórovitosti, a to nezávisle na pružnosti materiálu.

## Zkušební přístroje a vybavení potřebné pro výpočet modulu

Měření rychlosti pro výpočet modulu se často provádí precizními tloušťkoměry, např. přístrojem **38DL PLUS™** nebo přístrojem **45MG se softwarem Single Element**, nebo defektoskopem, který je vybaven možností měření rychlosti, jako je např. přístroj **EPOCH™ 650** nebo **EPOCH 6LT**. Tloušťkoměr **72DL PLUS™** nabízí měření času doby průchodu (TOF) s vysokým rozlišením, díky kterému lze získat přesnější měření rychlosti.

Tato zkouška také vyžaduje dva snímače vhodné pro zkoušený materiál, kterými se měří rychlost šíření odraženého zvukového signálu v podélném a příčném režimu. Mezi běžně používané snímače patří širokopásmový snímač podélných vln M112 nebo V112 (10 MHz) a snímač s kolmým dopadem příčné vlny V156 (5 MHz). Tyto snímače

fungují u většiny běžných kovových vzorků a vzorků z vypalované keramiky. Pro hodně silné, hodně tenké nebo vzorky s velkým útlumem je potřeba používat různé snímače. V některých oblastech použití může být nutné použít průchodovou techniku s párem snímačů umístěných na protilehlých stranách dílu. obraťte se na nás, doporučíme vám vhodný snímač pro vaše konkrétní potřeby a pomůžeme vám s nastavením přístroje.

Zkušební vzorek může mít jakýkoliv tvar, který umožňuje čisté měření doby průchodu zvuku impulzovou odrazovou technikou v daném úseku tloušťky. Ideálně by tloušťka vzorku měla být nejméně 12,5 mm (0,5 palce), s hladkými rovnoběžnými povrchy a šířkou nebo průměrem větším než je průměr používaného snímače. Při zkoušení úzkých vzorků je třeba dávat pozor, protože naměřenou dobu průchodu impulzu může ovlivnit možný okrajový efekt. Při použití tenkých vzorků je omezeno rozlišení, a to z důvodu malých změn v době průchodu impulzu při šíření zvuku po krátké dráze. Proto doporučujeme, aby tloušťka vzorků byla nejméně 5 mm (0,2 palce.), pokud možno více. Ve všech případech však musí být tloušťka zkušební vzorku přesně známa.

## Postup výpočtu modulu pomocí tloušťkoměrů a defektoskopů

Pomocí vhodných snímačů a příslušného nastavení přístroje změřte rychlost zvuku podélné a příčné vlny ve zkušebním kusu. K měření příčné vlny je zapotřebí speciální, vysoce viskózní vazební prostředek, jako např. naše SWC-2. Ultrazvukový tloušťkoměr 38DL PLUS nebo tloušťkoměr 45MG se softwarem Single Element poskytuje přímý odečet rychlosti šíření zvuku v materiálu na základě zadané tloušťky. Defektoskopy řady EPOCH měří rychlost prostřednictvím postupu kalibrace rychlosti. V obou případech dodržujte doporučený postup pro měření rychlosti, který je uveden v návodu k obsluze přístroje. Jednoduše zaznamenejte celkovou dobu průchodu oblasti známé tloušťky snímačem podélné vlny a snímačem příčné vlny a poté vypočtete:

$$\text{Velocity} = \frac{\text{Thickness}}{\text{Round trip transit time} / 2}$$

Pro velmi precizní měření rychlosti je doporučen ultrazvukový tloušťkoměr 72DL PLUS (+ nebo - 10 pikosekund). Podle potřeby převedte jednotky, abyste získali rychlost vyjádřenou v palcích za sekundu nebo centimetrech za sekundu (čas se obvykle měří v mikrosekundách, hodnotu v jednotkách palce/us nebo cm/us vynásobte 106, tím získáte rychlost v jednotkách palce/s nebo cm/s). Získané hodnoty rychlosti se pak zadají do následujících rovnic:

$$\text{Poisson's Ratio } (\nu) = \frac{1 - 2 (V_T / V_L)^2}{2 - 2 (V_T / V_L)^2}$$

Where:

$V_T$  = Shear (transverse) velocity

$V_L$  = Longitudinal velocity

$$\text{Young's Modulus } (E) = \frac{V_L^2 \rho (1 + \nu) (1 - 2\nu)}{1 - \nu}$$

Where:

$V_L$  = Longitudinal velocity

$\rho$  = Density

$\nu$  = Poisson's Ratio

Poznámka k jednotkám: Pokud je rychlost šíření zvuku vyjádřena v cm/s a hustota v g/cm<sup>3</sup>, bude Youngův modul vyjádřen v dynech/cm<sup>2</sup>. Pokud pro výpočet modulu v librách na čtvereční palec (PSI) používáte anglické jednotky in/s a lbs/in<sup>3</sup>, nezapomeňte rozlišit mezi librou jako jednotkou síly a librou jako jednotkou hmotnosti. Protože modul je vyjádřen jako síla na jednotku plochy, je při výpočtu v anglických jednotkách třeba vynásobit řešení výše uvedené rovnice konstantou převodu hmotnosti/síly (1/gravitační zrychlení), abyste modul získali v PSI. Nebo,

pokud je prvotní výpočet proveden v metrických jednotkách, použijte převodní faktor  
1 PSI = 6,89 × 10<sup>4</sup> dynů/cm<sup>2</sup>. Jako další možnost se nabízí zadat rychlost v palcích/s, hustotu v g/cm<sup>3</sup> a vydělit  
převodní konstantou 1,07 × 10<sup>4</sup>, tím získáte modul v PSI.

$$\text{Shear Modulus} = \frac{\text{Thickness}}{\text{Round trip transit time} / 2}$$

Modul pružnosti ve smyku získáte jednoduše tak, že vynásobíte druhou mocninu rychlosti příčné vlny hustotou.  
Stejně jako předtím použijte jednotky cm/s a g/cm<sup>3</sup>, abyste modul získali v dynech/cm<sup>2</sup> nebo anglických  
jednotkách palce/s a lbs/in<sup>3</sup>. Výsledek vynásobte konstantou převodu hmotnosti a síly.

---

## Použité zdroje

Více informací o ultrazvukovém měření modulu pružnosti najdete v těchto zdrojích:

1. Moore, P. (ed.), Nondestructive Testing Handbook, roč. 7, American Society for Nondestructive Testing, 2007, s. 319–321.
2. Krautkramer, J., H. Krautkramer, Ultrasonic Testing of Materials, Berlin, Heidelberg, New York 1990 (4. vydání), s. 13–14, 533–534.

## Související produkty



### 38DL PLUS

Všestranné měřidlo 38DL PLUS™ lze použít s dvouměničovými sondami pro měření zkorodovaných trubek a s jednoměničovými sondami pro velice přesná měření tloušťky tenkých nebo vícevrstvých materiálů.

Zjistěte více ► [https://www.olympus-ims.com/\\$lang/38dl-plus/](https://www.olympus-ims.com/$lang/38dl-plus/)



### 45MG

Pokročilý ultrazvukový tloušťkoměr 45MG je vybaven standardními měřicími funkcemi a softwarem. Tento unikátní nástroj pro měření tloušťky je kompatibilní s naší úplnou řadou jednoměničových a dvouměničových sond pro měření tloušťky.

Zjistěte více ► <https://www.olympus-ims.com/cs/45mg/>



### 72DL PLUS

Pokročilý ultrazvukový tloušťkoměr 72DL PLUS™ poskytuje přesné měření tloušťky při vysoké rychlosti v přenosném a snadno použitelném zařízení. Tento inovativní přístroj, kompatibilní s jednoměničovými sondami až do 125 MHz, je ideální pro měření tloušťky ultratenkých materiálů, včetně vícevrstvých nátěrů, povlaků a plastů. Přístroj může současně zobrazit tloušťku až 6 vrstev.

Zjistěte více ► <https://www.olympus-ims.com/72dl-plus/>