



**METODA EXPRESNÍ DIAGNOSTIKY
PRUŽNOPEVNOSTNÍCH PARAMETRŮ A OKAMŽITÉHO
NAPĚTODEFORMAČNÍHO STAVU MATERIÁLU
ULTRAZVUKEM
A NEW METHOD FOR RAPID NON-DESTRUCTIVE
DIAGNOSIS OF ELASTIC-STRENGTH PARAMETERS AND
FOR DETERMINATION OF AN INSTANTANEOUS STRESS-
STRAIN STATE OF A MATERIAL BASED ON ULTRASOUND
MEASUREMENTS**

Jan VALÍČEK*, Dalibor SOLNAŘ, Marta HARNIČÁROVÁ*****

*HGF, VŠB-TU v Ostravě, **PTS Josef Solnař, s.r.o.,

***CNT, VŠB-TU v Ostravě

jan.valicek@vsb.cz

Abstrakt

Metoda expresní a nedestruktivní diagnostiky pružnopevnostních parametrů a okamžitého napětodeformačního stavu, včetně konstrukce zatěžovacího diagramu σ - ϵ , využívá nového analytického přístupu k hodnocení vlastností materiálu v procesu jeho přetváření vlivem vnějších destruktivních sil ultrazvukem. Navrhouvanou metodou na nové teoretické bázi stanovujeme ekvivalenty fyzikálně-mechanických parametrů, tj. ekvivalenty tabulkových parametrů materiálu a navíc také jejich průběhové změny v čase vlivem strukturně deformační alterace materiálu během přetvárného procesu. Jde o i-té hodnoty parametrů, které jsou funkcí zatěžujícího napětí σ_{zat} , intenzity deformace a času t . Metodou expresně a nedestruktivně stanovujeme ekvivalenty všech nejdůležitějších pružně-pevnostních charakteristik materiálů, které jsou potřebné pro projektanty, konstruktéry, pro defektoskopii a pro další výzkum v oblasti fyzikálně-mechanických vlastností technických materiálů.

Klíčová slova: *mechanické ekvivalenty materiálu, ultrazvuk, nedestruktivní diagnostika, zatěžovací diagram σ - ϵ*

Abstract

A new method for rapid non-destructive diagnosis of elastic-strength and defectoscopic parameters and for determination of an instantaneous stress-strain state of a material including theoretical construction of a load diagram σ - ϵ presents a new analytic approach to evaluation of material properties in the process of its deformation due to external destructive forces using ultrasound. The proposed theoretical framework of this method enables to

determine equivalent physical-mechanical parameters, i.e. equivalent tabulated values of material parameters and also their changes over time due to structural alteration leading to the material deformation during the deformation process. It shall in particular be parameters, which are a function of a loading stress σ_{zat} , intensity of deformation and time t . With this rapid and non-destructive method can be determined the equivalents of the most important elastic-strength characteristics of materials, which are necessary for designers, engineers, for defectoscopy and for future research in the field of physical-mechanical properties of engineering materials.

Key words: mechanical equivalents of materials, ultrasound, non-destructive diagnosis, load diagram σ - ε

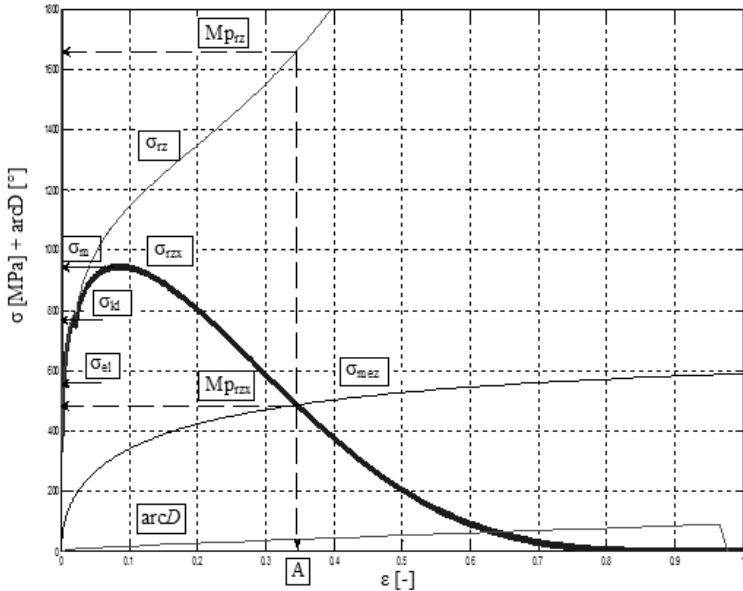
1. Úvod

Na základě dlouholeté spolupráce firmy PTS Josef Solnař, s.r.o. s Institutem fyziky, HGF, VŠB-TUO vzniklo v tomto roce rozšíření ve firmě o vědecko-výzkumné a inovační aktivity. V současné době máme společný projekt za podpory MSK. V předmětném projektu řešíme vytvoření nového způsobu stanovení statických a dynamických hodnot mechanických ekvivalentů z měření ultrazvukových vln. Cílem nové metody stanovení mechanických ekvivalentů materiálů na základě měření ultrazvukových vln bude vývoj nového přístroje pro expresní nedestruktivní diagnostiku pružnopevnostních a defektoskopických parametrů a okamžitého napětíodeformačního stavu materiálu včetně teoretické konstrukce zatěžovacího diagramu σ - ε a dalších analýz na základě ultrazvukového měření. Za tímto účelem bude vyvinut nový typ snadno přenosného ultrazvukového přístroje použitelného jak v laboratorních podmínkách, tak i v podmínkách in-situ. Přístroj bude mít jako software implementován algoritmus nového způsobu operativního výpočtu okamžitých pružnopevnostních a defektoskopických parametrů materiálů. Navrhovaný způsob se bude vyznačovat novou teoretickou bází stanovení ekvivalentů fyzikálně-mechanických a defektoskopických charakteristik, tj. ekvivalentů tzv. tabulkových hodnot materiálů a navíc bude expresně vyhodnocovat také jejich průběhové změny v čase vlivem strukturně deformační alterace materiálu během přetvárného procesu při technologickém a funkčním namáhání

2. Metoda nedestruktivní diagnostiky mechanických parametrů

Vyvíjená metoda nedestruktivní diagnostiky pružnopevnostních parametrů využívá nového analytického přístupu k hodnocení interakce ultrazvuku s materiálem v procesu jeho přetváření vlivem vnějších destruktivních sil. Navrhovanou metodou na nové teoretické bázi stanovujeme ekvivalenty fyzikálně-mechanické charakteristiky, tj. ekvivalenty tabulkových hodnot materiálů. Jde o nejdůležitější parametry, které jsou potřebné pro projektanty a konstruktéry, jako jsou: pevnost v tahu smluvní (σ_{Tm}), pevnost v tlaku smluvní (σ_{Dm}), pevnost v tahu skutečná (σ_{TSK}), pevnost v tlaku skutečná (σ_{DSK}), modul pružnosti (E_{mat}), modul pružnosti průběhový ($E_{(i)}$), napětí na mezi pružnosti (R_e), dolní mez kluzu (σ_{Pd} 0,2), horní mez kluzu (σ_{Ph} 0,2), meze únavy, vývoj napětí a deformace v pružné i v plastické přetvárné oblastí, hustota materiálu (ρ), modul pružnosti ve smyku (G_{mat}), Poissonova konstanta (μ), relativní podélné prodloužení (ε), smykové napětí (τ), tažnost (A), případně také z lomových charakteristik houževnatost (K_{IC}) a Griffithovu funkci (G_{IC}), aj. včetně analytických výsledků chování materiálu při různých způsobech zatěžování

s umožněním interaktivního matematického modelování. V rámci předmětného vývoje budou prováděny konstrukce diagramu σ - ε pro konstrukční materiály, a to i takové jejichž vstupní parametry E_{mat} , σ_m , ρ jsou extrémně odlišné, tj. pro celé spektrum kovových (oceli, kovy a jejich slitiny) a nekovových (elastomery, polymery, dřevo, horniny, stavební materiály, umělé hmoty, sklo, keramika, plasty) technických materiálů. Postup řešení bude spočívat v tvorbě pracovního algoritmu pro komplexní diagnostiku materiálu na základě vstupních hodnot, kterými bude rychlost šíření podélných a příčných ultrazvukových vln materiálem. Tvorba algoritmu bude realizována podle výsledků vlastních analytických a laboratorních prací. Pracovní algoritmus bude implementován do přenosného ultrazvukového přístroje vlastní prototypové konstrukce. Na základě tabulkových hodnot, materiálových listů, kontrolních laboratorních zkoušek a údajů podávaných výrobcí budou naměřené hodnoty prokazatelně verifikovány. Nutno také kriticky zdůraznit, že zkoušky v různých laboratořích probíhají při různých subjektivních a objektivních podmínkách, proto jsou výsledky na jednom materiálu často nesrovnatelné a taktéž to, že tabulkové hodnoty udávané vždy s velkým rozptylem lze brát pouze jako orientační, a proto nemohou být pro konkrétně využívaný materiál prokazatelné. Přetvárný charakter každého materiálu má pro potřebu projektanta základní význam a má být co nejpřesněji vyjádřen také zatěžovacím diagramem σ - ε a prokazatelně platnými fyzikálně-mechanickými parametry materiálu [1-7]. Ze současných laboratorních zkoušek vychází nikoliv skutečné, nýbrž tzv. smluvní parametry diagramu σ - ε a tyto jsou následně také uváděny v materiálových tabulkách. Problematika pružnoplastické a plastické oblasti přetváření je teoreticky nedostatečně dořešena. To platí také pro vyhodnocení a predikci mechanických a strukturních únavových změn probíhajících v konstrukčních materiálech v čase vlivem druhu a způsobu funkčního namáhání. Způsob a zařízení pro expresní zjišťování potřebného komplexu hodnot pro posouzení okamžitého mechanického a strukturního stavu materiálu dosud nebyly pro potřeby praxe na národní i mezinárodní úrovni uspokojivě vyvinuty. Žádané materiálové hodnoty mohou tak být operativně a expresně podle potřeby naměřeny nově vyvíjeným ultrazvukovým přístrojem přímo v provozech, poloprovozech, ve výzkumných a projektových laboratořích a mohou být ihned k dispozici projektantům na stejné úrovni jako tzv. hodnoty tabulkové. Mohou vstupovat do výpočtových rovnic týkajících se dimenzování, stabilitních a konstrukčních výpočtů a umožňovat matematické modelování. Operativně a expresně mohou sloužit jako defektoskopická měření nebo pro zjišťování a kontrolu okamžitého stavu materiálu namáhaných hotových konstrukcí a staveb v terénu a také pro výstupní kontrolu jakosti polotovarových a hotových výrobků. Naměřené výstupy budou ve formě numerické a grafické bezprostředně ukládány v paměti přístroje a zobrazovány na displeji přístroje nebo napojeného počítače. Zatěžovací diagram σ - ε pro daný materiál určený z naměřených hodnot přímým dosazením rychlosti podélných ultrazvukových vln v materiálu $v_{UZ,L}$ jako vstupní hodnoty do algoritmu je na obr. 1.



Obr. 1 Ekvivalent zatěžovacího diagramu σ - ε oceli ČSN 16 343, $E_{mat} = 171200$ MPa; $Mp_{sml}(\sigma_m) = 930$ MPa, $Mkl(\sigma_{kl}) = 760$ MPa expresně zkonstruovaný na základě měření podélného ultrazvukového vlnění. Zde je: Mp_{rz} – napětí na mezi pevnosti skutečné [MPa], σ_{rz} – napětí v materiálu skutečné [MPa], σ_{rzx} – napětí v materiálu měřené [MPa], Mp_{rzx} – napětí na mezi pevnosti měřené [MPa], $Mp_{sml}(\sigma_m)$ – mez pevnosti smluvní [MPa], $Mkl(\sigma_{kl})$ – mez kluzu [MPa], Mel – mez pružnosti [MPa], σ_{mez} – napětí v materiálu mezní [MPa], $arcD$ – úhel vnitřního tření [°], A – tažnost [-].

Fig. 1 Equivalent of the load diagram σ - ε with $E_{mat} = 171200$ MPa, $Mp_{sml}(\sigma_m) = 930$ MPa, $Mkl(\sigma_{kl}) = 760$ MPa being fast created on the basis of longitudinal ultrasound measurement (for steel ČSN 16 343). Where: Mp_{rz} – true stress at the ultimate strength [MPa], σ_{rz} – true stress in a material [MPa], σ_{rzx} – measured stress in a material [MPa], Mp_{rzx} – stress at the measured ultimate strength [MPa], $Mp_{sml}(\sigma_m)$ – proof stress [MPa], $Mkl(\sigma_{kl})$ – yield point [MPa], Mel – limit of elasticity [MPa], σ_{mez} – ultimate stress in a material [MPa], $arcD$ – angle of internal friction [°], A – elongation [-].

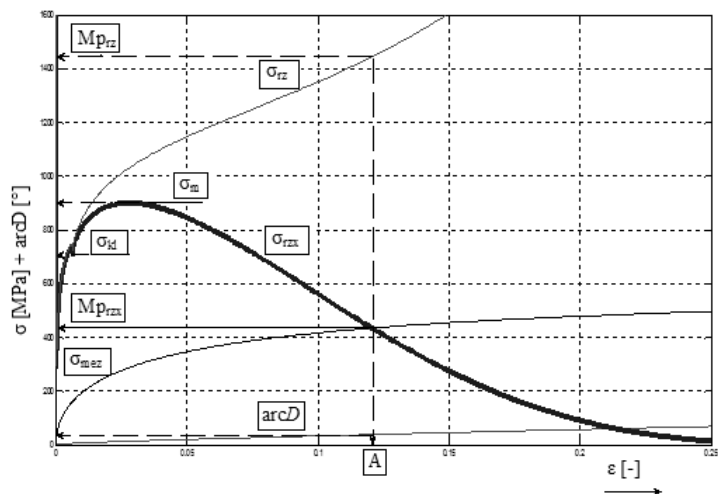
S velkou mírou citlivosti reaguje prezentovaná metoda mechanické diagnostiky materiálů na změnu hustoty materiálu ρ . Známa hodnota ρ může být totiž vstupním parametrem do výpočtu diagramu σ - ε stejně dobře jako parametr drsnosti povrchu Ra , nebo tabulková či naměřená hodnota modulu pružnosti E_{mat} , resp. tabulková, či expresně naměřená hodnota $v_{UZ,L}$. Podle potřeby lze doplnit závislosti vstupních parametrů dalšími technologickými parametry, které jsou se vstupními ve fyzikálně-mechanické korelaci a to i průběhově. Tak lze vytvořit klasifikaci materiálových skupin podle různých technologických potřeb, týkajících se pružnostní, pevnostní,

deformační charakteristiky, vrtatelnosti, řezatelnosti apod. Velmi dobrá citlivost metody na změnu objemové hustoty ρ (g/cm^3 , změny řádově 10^{-3}) má také velký význam zejména pro defektoskopickou praxi, nebo pro řešení vlivu koroze na změnu strukturně-mechanického stavu materiálu. V tab. 1 je uvedena změna vybraných parametrů nízkolegované ocele ČSN 14 220 podle expoziční doby koroze pro stavy a, b, c, d podle expoziční doby v silně korozivním prostředí a ilustrativně příslušné σ - ε diagramy pro stav a s expoziční dobou 0,5 roku (obr. 2) a pro stav d s expoziční dobou 3 roky (obr. 3). V tab. 1 jsou

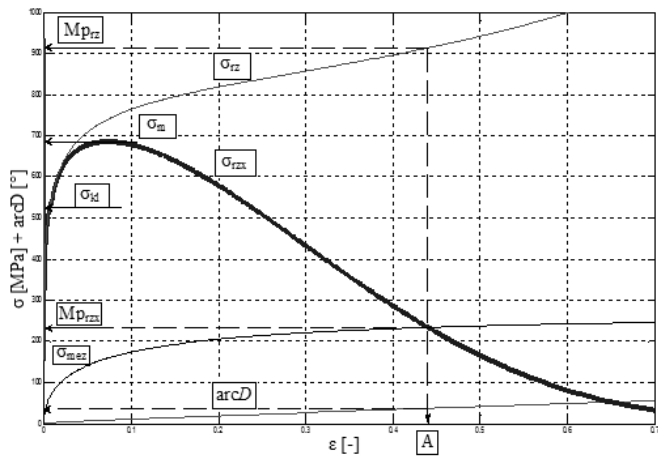
Tab. 1 Podle metody, tj. ze změny rychlosti podélné ultrazvukové vlny, teoreticky určená změna vybraných materiálových parametrů ocele ČSN 14 220 podle expoziční doby koroze. Zde je: K_{plmat} – koeficient plasticity materiálu [μm], E_{mat} – Youngův modul pružnosti [MPa], ρ_{sur} – hustota povrchové vrstvy [g.cm^{-3}], $v_{UZ,L}$ – rychlost podélných ultrazvukových vln [m.s^{-1}].

Tab. 1 According to the method, i.e. if the velocity of longitudinal ultrasonic waves changes, it is theoretically determined a change of the selected material parameters of steel ČSN 14 220 according to corrosion exposure time. Where: K_{plmat} – plasticity coefficient [μm], E_{mat} – Young's modulus of elasticity [MPa], ρ_{sur} – density of surface layer [g.cm^{-3}], $v_{UZ,L}$ – velocity of longitudinal ultrasonic waves [m.s^{-1}].

Expoziční doba[rok]	Materiál ocele ČSN 14 220	σ_m [MPa]	K_{plmat} [μm]	E_{mat} [MPa]	σ_{kl} [MPa]	ρ_{sur} [g.cm^{-3}]	$v_{UZ,L}$ [MPa]
0.5	Stav a	900	39,681	158 756	700	6,299	5414,2
1	Stav b	800	63,489	125 500	620	5,601	5 006.2
2	Stav c	750	68,880	120 580	580	5,490	4 939.9
3	Stav d	685	87,297	107 703	525	5,189	4 757.4



Obr. 2 Zatěžovací diagram σ - ϵ ocele ČSN 14 220 pro stav a; korozivní expozice 0,5 roku.
 Fig. 2 Load diagram σ - ϵ of steel ČSN 14 220 for the state a; 0.5 years of corrosion exposure



Obr. 3 Zatěžovací diagram σ - ϵ ocele ČSN 14 220 pro stav d; korozivní expozice 3 roky.
 Fig. 3 Load diagram σ - ϵ of steel ČSN 14 220 for the state d; 3 years of corrosion exposure.

Průběhy závislosti σ - ε ocele ČSN 14 220 v zatěžovacích diagramech na obr. 2 a obr. 3 a odečtené numerické hodnoty sledovaných parametrů potvrzují výrazné snížení materiálových charakteristik pevnosti, zvýšení plasticity a tažnosti v závislosti na expoziční době v silně korozivním prostředí. Zatímco strukturně-mechanické změny materiálových parametrů vlivem koroze probíhají v čase plynule, vlivy defektoskopického charakteru by se v naměřených diagramech projevil skokem. Vyšetřením časové funkce $\varepsilon = f(t)$ lze stanovit životnost a stupeň stability staveb a konstrukcí podle druhu provozního zatěžování, expozice v korozivním prostředí nebo podle naměřené intenzity defektoskopických změn a navrhnout tak účinná preventivní opatření.

3. Využití v technice a bezpečnosti

Předkládaný způsob nedestruktivní diagnostiky bude umožňovat:

- expresní stanovení ekvivalentů základních materiálových parametrů a konstant,
- konstrukci zatěžovacího diagramu σ - ε , resp. F - Δl a identifikaci okamžitého napětově-deformačního stavu a dalších přetvárných vlastností materiálů,
- sledování, kontrolu a predikci změn parametrů důležitých pro napětově-deformační diagnostiku a monitorování materiálů při provozním zatěžování,
- exaktní kvantifikaci průběhu funkčních závislostí napětově-deformačního stavu až do porušení struktury materiálu podle vnějšího provozního namáhání,
- stanovení změn mechanických parametrů materiálů vlivem koroze, defektů nebo výrobních vad,
- expresní diagnostiku stavu materiálů ultrazvukem s přímou konstrukcí zatěžovacího diagramu σ - ε a okamžitého napětově-deformačního stavu materiálu,
- stanovení stupně stability, okamžitého stupně bezpečnosti a prognózu životnosti staveb a konstrukcí z hlediska únavových změn jádra materiálů vlivem funkčního zatěžování,
- aplikaci teorie pružnosti a pevnosti, v pružné, pružně-plastické a plastické fázi deformace,
- matematické modelování okamžitých napětově-deformačních stavů materiálů v čase podle druhu provozního namáhání,
- diagnostiku mechanického chování v projekci nově vyvíjených materiálů,
- využití doplněných informací o materiálech při projektování strojů, staveb a technických zařízení,
- tržní uplatnění.

4. Závěr

Účelem předmětného projektu je vyvinout ultrazvukový přístroj, v němž bude implementován nový způsob nedestruktivní diagnostiky pružnopevnostních a defektoskopických parametrů a okamžitého napětově-deformačního stavu materiálu včetně konstrukce zatěžovacího diagramu σ - ε a dalších analýz přetvárnosti funkčně namáhaných materiálů, jakož i interaktivního modelování okamžitých napětově-deformačních stavů materiálu na základě měření podélných a příčných ultrazvukových vln. Předpokládáme také okamžité zavedení do praxe a tržního tuzemského a zahraničního prostředí. Nový přístroj bude snadno přenosný a bude

umožňovat expresní měření v provozech, poloprovozech, ve výzkumných a projektových laboratořích na hotových konstrukcích a stavbách v terénu. Předpokládaná technická charakteristika vyvíjeného přístroje by měla dosáhnout, vzhledem k nedostatkům současného stavu měřické techniky v dané oblasti, velkého aplikačního využití téměř ve všech hlavních oblastech současné technické praxe, v projektových a výzkumných ústavech a v bezpečnosti provozovaných staveb, konstrukcí nebo v důležité operativní kontrole stability, stupně bezpečnosti a funkční životnosti nosných konstrukčních prvků. V komerční sféře předpokládáme zájem odborníků a tržní uplatnění nového originálního přístroje jak na tuzemské, tak i na zahraniční úrovni, rozšíření stávající výroby a tvorbu nových pracovních míst.

Poděkování

Příspěvek byl podpořen projekty GA ČR 101/09/0650, MSK reg. č. RRC/04/2010/34, RMTVC reg. č. CZ.1.05/2.1.00/01.0040, IT4Innovations reg. č. CZ.1.05/1.1.00/02.0070, MŠMT reg. č. MSM6198910016, a MEB051021.

Literatura:

- [1] Strnadel, B.: Řešené příklady a technické úlohy z materiálového inženýrství. Ostravské tiskárny a.s., Ostrava, 1998
- [2] Kříž, R., Vávra, P.: Strojírenská příručka, svazek 3. Nakladatelství SCIENTIA, spol. s.r.o., Praha, 1993
- [3] Leinveber, J., Vávra, P.: Strojnické tabulky, Albra-pedagogické nakladatelství, Úvaly, 2005-10-24
- [4] Obraz, J.: Zkoušení materiálu ultrazvukem. SNTL, Praha, 1989
- [5] Trebuňa, F., Šimčák, F., Jurica, V.: Pružnosť a pevnosť I, II. Viena, Košice, 2000
- [6] Green, R.: Nondestructive characterization of materials VIII, Plenum Press, New York, 1998
- [7] Valíček, J.; Borovička, A.; Hloch, S.; Hlaváček, P.: Způsob navrhování technologie hydroabrazivního dělení materiálů PV2010-571; Z 7626; Česká republika, 2011.