EAN '96

34th Conference of Experimental Stress Analysis
34. konference o experimentální analýze napětí
3. - 6.6. 1996, Plzeň, Czech Republic

VERIFICATION OF STEEL X-60 MATERIAL MODEL

VERIFIKACE MATERIÁLOVÉHO MODELU OCELI X-60

Jan Řezníček

This abstract contains expiriences with stress-strain data prepharing for practical use in experiental and numerical stress analysis. Whole research deals to the steel X-60, used in pipe-lines espetialy in Transgas lines. In this paper is described verification method of stress-strain diagram using the results comparison of experimental torsion analysis and numerical solution of the same problem. For experimental part of research is used modernised machine Amsler and numerical part is solved by using own and comertial FEM programms.

Úvod

Již řadu let se naše pracoviště - katedra pružnosti a pevnosti strojní fakulty Českého vysokého učení technického v Praze - zabývá problematikou bezpečnosti a spolehlivosti velkorozměrných potrubí zejména dálkových plynovodů. V rámci tohoto výzkumu probíhá řešení dvěma hlavními směry. Jedním je experimentální analýza napětí prováděná na konkrétních částech potrubí zejména pomocí odporové tenzometrie a druhým je numerická analýza, kdy na základě metody konečných prvků (MKP) jsou řešeny konkrétní tvary defektů nebo jsou řešeny modelové "umělé" defekty. Srovnání výsledků obou přístupů pak přináší důležité informace pro možnost správného formulování závěrů.

Protože však často vznikaly poměrně značné rozdíly ve výsledcích obou analýz, bylo třeba najít a opravit zdroj těchto zbytečných chyb. Záhy se jako podstatný zdroj chyb ukázal používaný materiálový model, a proto se na jeho přesnou konstrukci zaměřil další výzkum.

Předmětem zkoumání byl materiál označovaný jako X-60, což je ocel používaná k výrobě trub firmou Manessmann.

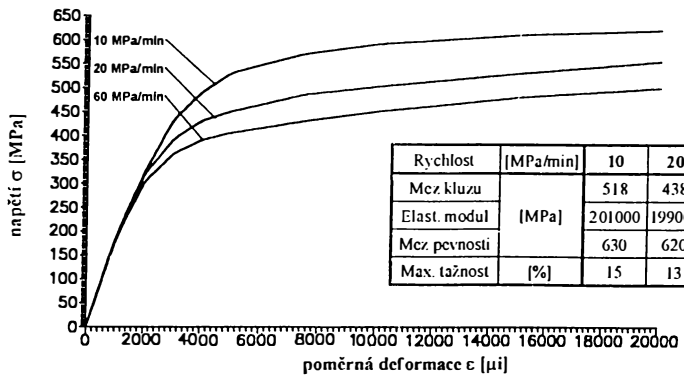
Stávající materiálový model

Základem materiálového modelu, který je používán jak při zpracování tenzometricky získaných dat tak i při numerické analýze pomocí MKP, je tahový diagram získaný při tahové zkoušce. Během poměrně dlouhé doby výzkumných prací v této oblasti vznikla na našem pracovišti vlastní metodika stanovení tahového diagramu, která prošla postupným vývojem.

V první fázi byly materiálové zkoušky prováděny přesně podle normy s využitím mechanických extenzometrů. Normalizovaná metodika byla postupem času doplněna o experimentální stanovení smluvní meze kluzu. Z tohoto důvodu byl vzorek při dosažení určité deformace odlehčen prakticky na nulu a byla měřena zbytková deformace. Tento postup se u jednotlivých vzorků opakoval i několikrát, než byla smluvní hodnota určena.

Později se smluvní hodnota z hlediska výpočtu ukázala jako nadbytečná a i několikanásobné "cyklování" v oblasti blízké vzniku trvalých deformací jen zkreslovalo získané výsledky. V další fázi se tedy sledoval pouze čistý tahový diagram a v něm pak byla zavedena "elastická" oblast, kde byl proložen sečný modul pružnosti a na ni pak již navazovala "plastická" oblast definovaná určitou křivkou vzniklou proložením diskrétními body. Stále však přežívala metodika podle normy, co se týká rychlosti zatěžování.

Následný výzkum se tedy zaměřil na tento parametr zkoušky. Zkušenosti totiž ukázaly, že vzhledem ke značnému zpožďování deformace za zatížením, které je charakteristické pro ocel X-60, vykazuje tento materiál jiné vlastnosti při pomalém a jiné při rychlém zatěžování. Vzhledem k možnostem tlakovacích zařízení při experimentech, kdy celá zkouška až do destrukce trvá několik hodin, byla přizpůsobena i rychlost zatěžování při tahové zkoušce (rychlost cca 10 MPa/min). Tato změna v metodice stanovení tahového diagramu a následně vytvoření materiálového modelu navzájem velmi přiblížila výsledky experimentů a výsledky numerické analýzy. Po provedení korekcí i některých předchozích výpočtech byla i v případech dřívějších velkých rozdílů (až 50%) shoda uspokojivější (rozdíly do 20%), a to zejména v oblasti rozvinutých plastických deformací. Počátek plastizace byl i nadále však zatížen poměrně značnými rozdíly experimentů a výpočtů. Vliv rychlosti zatěžování na tahový diagram je patrný z obrázku 1.



Rychlost	[MPa/min]	10	20	60
Mez kluzu	[MPa]	518	438	390
Elast. modul		201000	199000	195000
Mez pevnosti		630	620	610
Max. tažnost	[%]	15	13	11

Obrázek 1: Tahové diagramy oceli X-60 při různých rychlostech zatěžování

Dalším postupným krokem v úpravách materiálového modelu bylo využití moderní měřící techniky při jeho stanovování. Zatížení a deformace byly měřeny a zaznamenávány prakticky kontinuálně, a tak pracovní diagram již nebyl funkcí proloženou několika diskrétními body, ale byl spojnicí mnoha bodů s minimálními odstupy. Moderní technika umožnila měřit deformace nejen v podélném směru materiálového vzorku, ale i ve směrech příčných. Tímto způsobem bylo možno stanovit Poissonovo číslo a hlavně sledovat jeho chování v celém rozsahu zatěžování i při různých rychlostech. Toto sledování vyvrátilo prakticky všechny předchozí předpoklady:

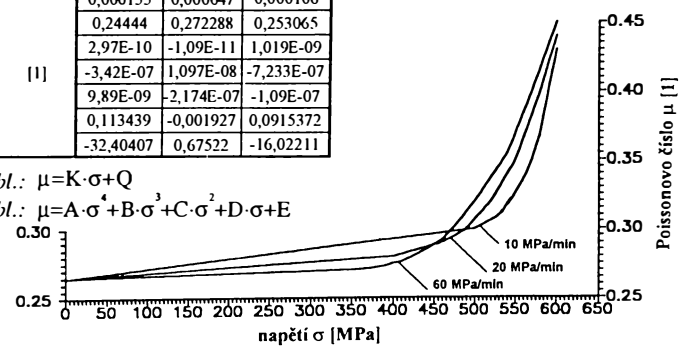
1. Hodnota Poissonova čísla není v elastickém stavu konstantní a rovna 0,3, ale je nižší a postupně se nepatrně zvětšuje (0,28 až 0,29).
2. K markantní změně hodnoty Poissonova čísla nedochází až po dosažení "meze kluzu" resp. počátku rozvoje plastických deformací, ale dochází k ní podstatně dříve a jedná se o postupný nárůst hodnoty.
3. Jediné co nebylo vyvráceno je fakt, že při plně rozvinutých plastických deformacích se hodnota Poissonova čísla blíží hodnotě 0,5. Nicméně v oblasti námi měřených hodnot velikosti 0,5 nebylo nikdy dosaženo.

Charakteristické závislosti Poissonova čísla na napětí a na rychlosti zatěžování vzorku jsou patrné z obrázku 2.

Rychlost	[MPa/min]	10	20	60
K		0,000155	0,000647	0,000106
Q		0,24444	0,272288	0,253065
A		2,97E-10	-1,09E-11	1,019E-09
B	[1]	-3,42E-07	1,097E-08	-7,233E-07
C		9,89E-09	-2,174E-07	-1,09E-07
D		0,113439	-0,001927	0,0915372
E		-32,40407	0,67522	-16,02211

Elast. obl.: $\mu = K \cdot \sigma + Q$

Plast. obl.: $\mu = A \cdot \sigma^4 + B \cdot \sigma^3 + C \cdot \sigma^2 + D \cdot \sigma + E$



Obrázek 2: Charakteristické závislosti Poissonova čísla oceli X-60

Tyto závěry dále zpřesnily zejména zpracování experimentálních dat, kdy byla závislost Poissonova čísla na zatížení použita jako vstupní parametr výpočtu napjatosti z poměrných deformací stanovených odporovými tenzometry. V této fázi se rozdíly snížily pod 15%. Stále však existovaly "nevysvětlitelné" rozdíly mezi experimentálně získanými výsledky a výsledky stanovenými numericky pomocí MKP v oblasti přechodu z elastického do elasticko-plastického stavu. Protože se však jednalo vesměs o úlohy se složitým stavem napjatosti v okolí defektů a i jednoznačné stanovení přesných okrajových podmínek bylo problematické, nešlo objektivně zhodnotit, které v výsledků jsou "správné". Proto bylo třeba zvolit určité srovnávací kritérium, které by bylo možno jednoznačně popsat jak matematickým modelem, tak i realizovat experimentálně.

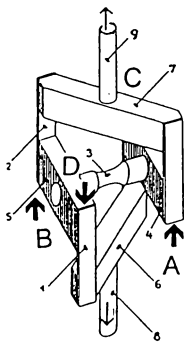
Vlastní verifikace modelu

Pro srovnání numerických a experimentálních výsledků byl zvolen poměrně jednoduchý stav napjatosti vznikající při krutu obdélníkového profilu vzhledem k jednoduché realizaci experimentu a snadnému modelování takovéhoto tělesa pro numerické řešení.

Těleso ve tvaru kvádru se poměrně snadno zasíťuje a při poměrně malém počtu uzlů je síť dostatečně hustá a pravidelná. Také okrajové podmínky jsou v tomto případě jednoduché a jednoduše modelovatelné pouhým natočením jednoho konce oproti druhému vetknutému.

V experimentální části bylo využito možností dynamického zkušebního stroje Amsler a jeho příslušenství. K zatěžování lze použít statický modul sloužící k nastavení předpětí. V příslušenství stroje je pak přípravek pro zkoušky střídavým krutem. Doplněním přípravku o jednoduché čelisti jej lze uzpůsobit i pro kroucení obdélníkového profilu. Tuhost čelistí vzhledem k tuhosti zkoušeného vzorku a jejich sevření pak dostatečně přesně modeluje ono předpokládané vetknutí. Nevýhodou je nezanedbatelná torzní tuhost volného přípravku, kterou bylo třeba samostatně změřit v celém rozsahu natáčení čelisti a od každého získaného výsledku odečíst. Tato mechanická část byla doplněna o tenzometrické sledování vzorku a o několikabodové elektronické měření natočení čelistí spolu se separací parazitních posuvů systému. Byly použity tenzometrické kříže HBM s rozsahem až do 5% deformací. Orientovány byly pod úhlem 45 stupňů, tedy ve směrech hlavních napětí resp. deformací.Nezávisle proměnnou pak mohl být jak zátěžný kroutící moment realizovaný dvojicí sil na definovaném rameni tak i úhel vzájemného natočení čelistí proti sobě - tedy zkroucení zkoušeného vzorku.

Schéma experimentální části verifikace materiálového modelu oceli X-60 je na obrázku 3.



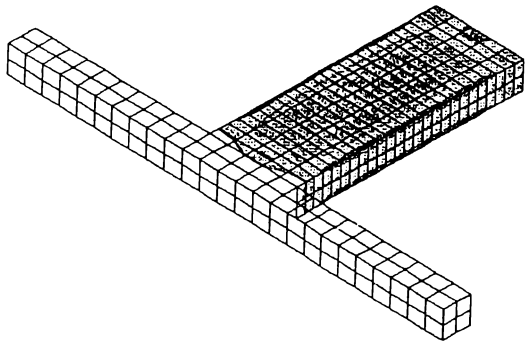
1, 2 ..... ohybové planžety
3 ..... zkušební vzorek
4, 5 ..... svěrné čelisti
6, 7 ..... vahadla
8, 9 ..... připojovací členy
A, B, C, D ... měření posuvů

Obrázek 3: Schéma měřícího přípravku a uspořádání měřících elementů

Numerická část řešení zároveň posloužila jako srovnání několika nelineárních modulů, používaných v programech MKP. Byl použit program ANSYS ve verzi pro workstation, program COSMOS M ve verzi pro PC a na katedře vytvořený řešič FEM211 implantovaný do prostředí programu TPS10 pro PC. Ve všech třech případech byl použit totožný model zkoušeného tělesa. Jednalo se o hranol, který měl na jednom konci uchyceny všechny body (reprezentuje vetknutí) a na druhém konci připojen trám o mnohonásobně vyšší tuhosti s možností

natáčení pouze kolem podélné osy bez možnosti posuvů v tomto směru (reprezentuje natáčející se čelist). Délka vlastního vzorku byla dostatečně velká, a tak v oblasti umístění tenzometrů se již vliv uložení prakticky nepromítl. Řešič FEM211 umožňuje přímo modelovat tenzometr včetně reálné délky jeho vinutí u ostatních dvou metod je třeba tento problém řešit poněkud jinak. ANSYS umožňuje řez v jakémkoliv směru a vynesení jakékoliv hodnoty v tomto směru, u COSMOS M bylo třeba provést přímý odečet v konkrétních uzlech a hodnotu přepočítat.

Model používaný v jednotlivých porgramech je patrný z obrázku 4.



Obrázek 4: Výpočtový model úlohy - síť pro MKP

Výsledky a jejich zpracování

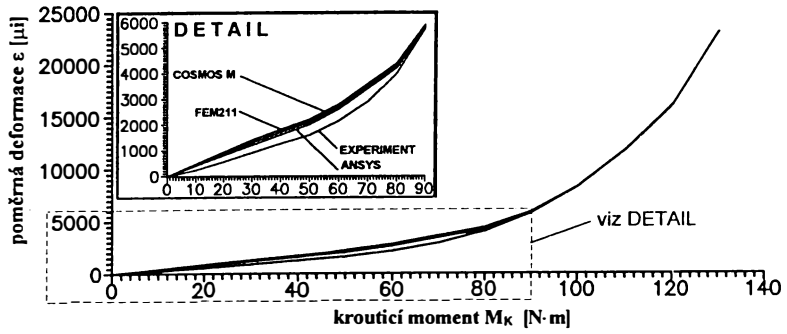
Zpracování experimentálních dat se uskutečnilo pomocí vlastního programu SIGMA, který počítá hlavní napětí jak v elastické tak i v plastické oblasti. Výsledky pak byly uspořádány do tabulky jednak v závislosti na zatěžujícím krouticím momentu a jednak na velikosti natočení čelistí proti sobě navzájem. Pro následné srovnání s numerickým výpočtem byly ze všech experimentálních výsledků stanoveny průměrné hodnoty.

Výsledky numerického řešení byly opět sestaveny do tabulky jako funkce momenty nebo natočení. Jak již bylo řečeno dříve u programu FEM211 byly stanoveny přímo hodnoty odpovídající použitému tenzometru resp. jeho délce. Program ANSYS umožňuje vynesení kterékoliv z veličin podél zvolené přímky a získanou závislost ještě dále matematicky zpracovat - např. integrovat. A to právě bylo třeba dělat s daty podél přímky pod úhlem 45 st. vzhledem k podélné ose zkušebního vzorku. Integrací po konkrétní délce použitého tenzometru byly získány hodnoty opět srovnatelné s experimentálními výsledky. Pouze u programu COSMOS M bylo třeba postup k získání hodnot podél tenzometru provádět v podstatě ručně, resp. odečítat hodnoty v daných uzlech a ty pak matematicky mimo program zpracovat. Ve všech třech programech bylo využito jejich post-procesingu k vykreslení všech vypočtených vrličin po celém tělese. Pro kontrolu byly vypočtené veličiny vykreslovány v jednotlivých řezech zkušebního hranolku mimo oblasti ovlivněné "tuhým" ramenem na jedné straně nebo "absolutním" vetknutím na straně druhé.

Kromě porovnání napětí, která byla vždy výsledkem výpočtu, byla přímo srovnávány deformace. Toto srovnání totiž není na straně experimentu zatíženo žádnou výpočtovou chybou, neboť se jedná o hodnoty skutečně naměřené tenzometry v daných místech.

Pro zpracování jak experimentálních dat tak i pro numerický výpočet byl použit stejný materiálový model, který byl zvolen podle možností zatěžovacího zařízení. Z výsledků pak byly patrné určité rozdíly v počátku zatěžování, což lze přičítat na vrub používanému sečnému modulu pružnosti při výpočtech. Markantnější rozdíl opět nastával při přechodu z elastické do plastické oblasti, který se projevoval pouze v napětích, zatímco deformace se uspokojivě shodovaly. Tato skutečnost je dalším důkazem "nedokonalosti" používaného materiálového modelu a je tedy třeba dalšího výzkumu k jeho zdokonalení. Srovnání jedné série měření s numerickými výpočty je na obrázku 5.

Za povšimnutí zde stojí i ten fakt, že při stejné síti, stejném materiálovém modelu, stejných okrajových podmínkách a stejném zatěžování dostáváme z jednotlivých programů poněkud odlišné výsledky.



Obrázek 5: Srovnání experimentálních výsledků s výsledky numerického řešení

Závěr

Závěrem můžeme konstatovat, že u materiálu X-60 a jemu podobných nelze sestavit jediný materiálový model, který by spolehlivě popisoval chování materiálu za všech okolností. Po zkušenostech z předchozích měření je vhodné sestavovat vždy materiálový model "na míru", a to i za cenu kombinace několika modelů (např. pro rychlejší tlakování v elastickém stavu, pomalejší na počátku plastického stavu a poté pro pomalé v plně plastickém stavu).

Ing. Jan Řezníček, CSc. (39) - odborný asistent na katedře pružnosti a pevnosti strojní fakulty Českého vysokého učení technického v Praze
Adresa: Technická 4, 166 07 Praha 6, Česká republika
Tel.: (02) 24352509, fax: (02) 24310292, e-mail: REZNICEK@FSID.CVUT.CZ

Praha, duben 1996