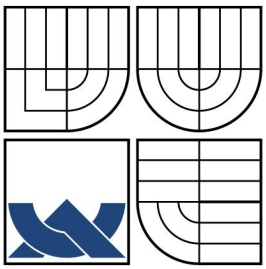
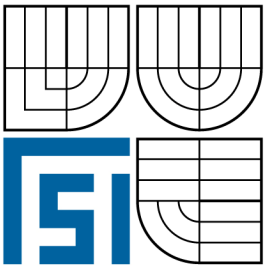


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

DYNAMICKÁ TAHOVÁ ZKOUŠKA – URČENÍ MATERIÁLOVÝCH PARAMETRŮ

DYNAMIC TENSILE TEST – MATERIAL PARAMETERS DETERMINATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR´S THESIS

AUTOR PRÁCE — VLADIMÍR SISMILICH
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — ING. MARTIN SEVERA
SUPERVISOR

BRNO 2008

ABSTRAKT

Cílem práce je shrnutí v současnosti existujících metod zkoušení materiálů při dynamickém zatěžování a postupů vyhodnocení získaných experimentálních dat. V práci jsou uvedeny nejdůležitější dynamické materiálové charakteristiky, kterými je možno popsat chování materiálu při vyšších rychlostech deformace. Na oceli typu Eurofer'97 byla provedena dynamická tahová zkouška při rychlosti zatěžování 1m/s. Následně byly získané experimentální data upraveny a vyhodnoceny. Při vyhodnocení byly stanoveny napěťové a deformační charakteristiky této oceli.

Klíčová slova

Dynamická tahová zkouška, materiálové charakteristiky, rychlost deformace

ABSTRACT

The purpose of the work is to summarise todays existing methods of testing materials at high strain rates and techniques of evaluation acquired experimental data. There are shown the most important dynamic materials characteristics, by which is able to describe material behaviour at high strain rates. Dynamic tensile test on Eurofer'97 steel at loading rate 1m/s was conducted experimental data were analysed and evaluated. In the evaluation The most important strain and stress properties of this steel were determined.

Key words

Dynamic tensile test, material properties, strain rate

Bibliografická citace

SISMILICH, Vladimír. *Dynamická tahová zkouška – určení materiálových charakteristik*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. s.33, 0, Ing. Martin Severa.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Dynamická tahová zkouška-určení materiálových parametrů vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

23.5.2008 …….

Poděkování

Děkuji tímto panu ing. Martinu Severovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

ABSTRAKT 4
Prohlášení 6
Poděkování 7
OBSAH 8
ÚVOD 9
1 MATEMATICKÝ POPIS CHOVÁNÍ MATERIÁLU 11
1.1 Empirické modely 11
1.2 Semiempirické modely 12
1.3 Fyzikální 13
2 METODY MĚŘENÍ MATERIÁLOVÝCH CHARAKTERISTIK 14
2.1 Hopkinsonův test s měrným děleným vzorkem-HMDT 15
2.2 Metoda jednoho vzorku (one bar method) 16
2.3 Dynamická tahová zkouška 17
3 MATERIÁL A METODIKA EXPERIMENTU 21
3.1 Získané závislosti měřených veličin při dynamické zkoušce 23
3.2 Mechanické charakteristiky 28
ZÁVĚR 32
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 33
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ 34

ÚVOD

Dynamické zkoušky nacházejí čím dál tím více své uplatnění v technické praxi. V automobilovém průmyslu se dynamické zkoušky stávají stále více důležitějšími hlavně vzhledem k posouzení bezpečnosti karoserií aut při provozu. Materiály karoserií se podrobují destrukčním testům, které simulují chování komponent nebo celých automobilů při nárazech (tzv. cash testy). Tyto zkoušky jsou navrženy tak, aby optimalizovaly vztah použitého materiálu vzhledem k požadovaným vlastnostem vozidla.

K získání materiálových charakteristik při dynamickém zatěžování jsou používány různé metody. Každá z nich je použitelná v určitém rozsahu rychlosti deformace a podává specifický druh informace.

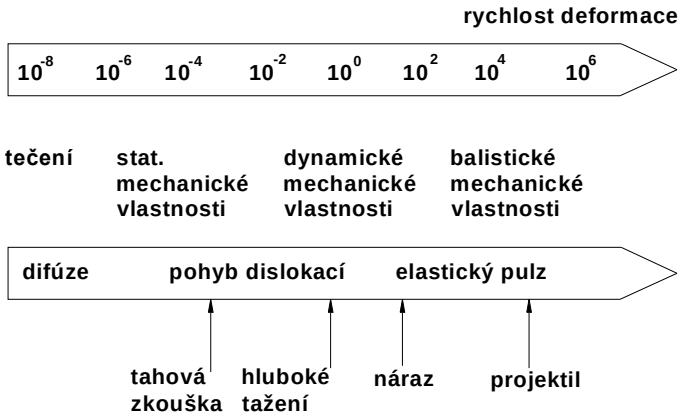
Přehled zkoušek k získání základních materiálových charakteristik v závislosti na aplikované rychlosti zatěžování je uveden na Obr. 1.

Pro rychlosti deformace, které jsou charakteristické pro tečení, tj. do $10^{-4}\,s^{-1}$ se bere v úvahu difůzní tok materiálu.

Vyšší rychlosti deformace až do $10^{-2}\,s^{-1}$ se používají pro stanovení mechanických vlastností při statických zkouškách. Deformační chování materiálu v tomto rozsahu zatěžovacích rychlostí je hlavně popsáno pohybem dislokací a jejich vzájemnými interakcemi.

Rychlosti deformace ležící v intervalu od $10^{-2}\,s^{-1}$ do $10^{4}\,s^{-1}$ charakterizují dynamické vlastnosti materiálu. Tento rozsah je typický pro automobilové aplikace.

Při dosažení vyšší rychlosti deformace mluvíme už o balistických zkouškách při nichž se uplatňují elastické napěťové pulzy.



Obr. 1 Rozsahy rychlostí deformace při mechanických zkouškách

Dynamická tahová zkouška na rychlých servohydraulických trhacích strojích, metoda jednoho vzorku (One bar method), Hopkinsonův test s měrným děleným vzorkem, to jsou některé z metod, které se v dnešní době používají.

Současná metodika dynamických zkoušek není ucelená a neexistuje žádná norma, která by tuto problematiku řešila. Je čistě na volbě daného pracoviště, který druh vzorku a měřícího zařízení použije. Důsledek absence ucelené metodiky zkoušek je zřejmý, výsledná experimentální data z různých laboratoří nejsou vzájemně srovnatelná. Obecně je kvalita získaných dat nedostačující. Jedině pro oblast zkoušení tenkostěnných ocelových konstrukcí byly z důvodu zvyšující se poptávky po dynamických zkouškách mezinárodní organizací pro železo a ocel vydány podklady na jejich zkoušení [1].

Výsledné materiálové charakteristiky z dynamické zkoušky je možné, jak již bylo uvedeno, získat několika metodami. Nejčastěji provedením samotné dynamické zkoušky. Abychom byli schopni experimentální data použít je nutné vhodně zpracovat výslednou křivku.

Pokud není k dispozici potřebné zkušební vybavení, pak lze odhadnout potřebné materiálové charakteristiky na základě získaných experimentálních dat při statické tahové zkoušce.

1 MATEMATICKÝ POPIS CHOVÁNÍ MATERIÁLU

Při statickém zatížení je deformační chování dostatečně popsáno např. tzv. Holomonovým vztahem 1.1, ve kterém vliv rychlosti není zahrnut.

$$\sigma = k \cdot \left(\varepsilon_{pl}\right)^{n} \tag{1.1}$$

Popis vlivu rychlosti deformace na deformační chování materiálu v oblasti za mezí kluzu je mnohem složitější. Změna rychlosti deformace způsobuje u materiálu s BCC mřížkou posun křivky napětí-deformace (nahoru nebo dolů).

U materiálu s FCC mřížkou dochází k výrazné změně deformačního zpevnění. Navíc se při plastické deformaci uvolňuje teplo, které způsobí tzv. teplotní změkčení. Tento jev se projevuje zejména při dynamickém nebo balistickém způsobu zatěžování. Při malých rychlostech probíhá izotermicky, při vysokých adiabaticky, protože není dostatek času pro odvod tepla, což vede ke vzniku lokalizované deformace a adiabatických smykových pásem. Chování materiálu se tak může v závislosti na podmínkách zatěžování výrazně měnit.

Tyto pochody nebyly doposud přesně definovány, avšak vznikla řada konstitutivních modelů, které se je snaží dostatečně přiblížit ke skutečnosti. Vznikly tři skupiny materiálových modelů.

- Empirické (Johnsonův- Cookův) modely
- Semiempirické (Zerilliův- Armstrongův model)
- Fyzikální modely

1.1 Empirické modely

Johnsonův-Cookův materiálový model

Mezi empirické modely patří zejména Johnson-Cookova rovnice (1985) [2] je vztah pro stanovení meze kluzu (R_e) :

$$R_e(\varepsilon_{pl}, \dot{\varepsilon}_{pl}, T) = [A + B(\varepsilon_{pl})^n][1 + C \cdot \ln(\dot{\varepsilon}_{pl}^{*})] \cdot [1 - (T^*)^m] \tag{1.2}$$

Poměrná rychlost plastické deformace $\dot{\varepsilon}_p^{*}$ a homologická teplota T^* v rovnici 1.2 jsou definované:

$$\dot{\varepsilon}_p^{*} = \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_{p0}} \tag{1.3}$$

$$T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \tag{1.4}$$

1.2 Semiempirické modely

Patří sem zejména modely následujících autorů: Klepeczko (1975) [3, 4, 5], Bodner-Parton [6] a Zerilliův-Armstrongův [7]. Nejpoužívanější je Zerriliův – Armstrongův model, který bude pospsán v následující odstavci.

Zerilliův-Armstrongův materiálový model

Zerilliův-Armstrongův model (Zerilli and Armstrong (1987, 1993); Zerilli (2004)) je založen na principech mechaniky dislokací. Základní forma rovnice pro mez kluzu R_e je

$$R_e(\varepsilon_{pl}, \dot{\varepsilon}_{pl}, T) = \sigma_a + B\exp(-\beta(\dot{\varepsilon}_{pl})T) + B_0\sqrt{\varepsilon_{pl}}\exp(-\alpha(\dot{\varepsilon}_{pl})T). \tag{1.5}$$

V rov. 1.5 σ_a představuje teplotně neovlivněnou složku meze kluzu, která je dána vztahem

$$\sigma_a = \sigma_g + \frac{k_h}{\sqrt{l}} + K\varepsilon_p^n, \tag{1.6}$$

kde K je konstanta, která je pro materiály s FCC mřížkou rovna 0.

V tepelně ovlivněných členech, jsou funkční vztahy členů α a β dány

$$\alpha = \alpha_1 - \alpha_0 \ln(\dot{\varepsilon}_p) \tag{1.7}$$

$$\beta = \beta_1 - \beta_0 \ln(\dot{\varepsilon}_p), \tag{1.8}$$

kde α_0, α_1, β_0, β_1 jsou parametry materiálu závisející na typu jeho krystalické mřížky (fcc, bcc, hcp). Z důvodu uvažování konstantního zpevnění není tento model vhodný pro popis materiálů, jejichž zpevňování je výrazně citlivé na teplotu a rychlost deformace.

1.3 Fyzikální

Do této skupiny patří modely založené na fyzikálním popisu vlivu hustoty dislokací na deformační proces. Mohou zahrnovat také jevy jako například buňková dislokační substruktura, efekt teploty a rychlosti deformace, vliv cyklického zatěžování. Mezi hlavní zástupce patří modely následujících autorů: Bergström a kol. (1970-1982) [8,9], Gottstein a kol. (1987-2001) [10], Estrin a kol. (1984-2001) [11].Významem těchto modelů je především přesnější popis deformačního zpevnění. Rozvoj hustoty dislokací bývá často popsán rovnicí

$$\frac{d\rho}{d\varepsilon} = U(\varepsilon) - \Omega(\dot{\varepsilon}, T), \tag{1.9}$$

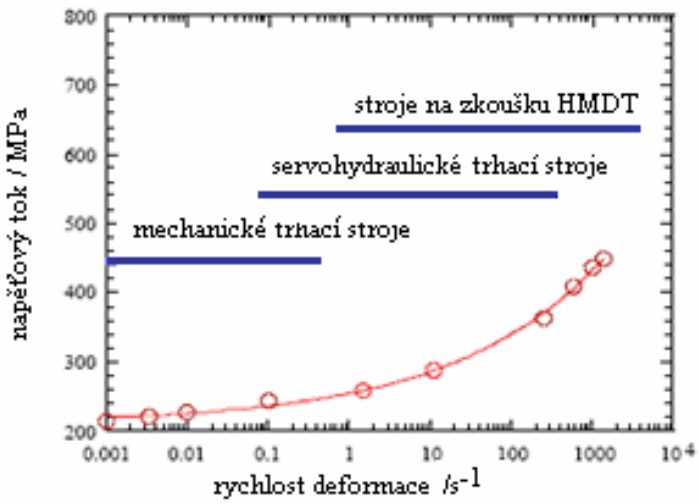
která zpravidla rozšiřuje Taylorovo vyjádření deformačního zpevnění,

Všechny uvedené modely se zabývají popisem vlivu teploty a rychlosti zatěžování. Chování materiálu při podmínkách, kdy plastická deformace je způsobena skluzem a interakcemi dislokací, tudíž je nelze použít při dominanci jiného mechanismu (např. při dvojčatění).

2 METODY MĚŘENÍ MATERIÁLOVÝCH CHARAKTERISTIK

V oblasti dynamického zatěžování se používají metody, kterými jsme schopni získat průběh chování materiálu při vyšších rychlostech deformace. U těchto metod je obtížná interpretace poskytnutých výsledků, což postupně vedlo k vývoji postupů, vycházejících ze sledování šíření napěťových vln tyčemi kruhového průřezu. Dle rychlosti deformace se také volí zkušební stroje, viz. Obr. 2.1.

- Metoda Hopkinsonovy s měrným děleným vzorkem (HMDT-split Hopkinson bar system)
- Metoda jednoho vzorku (One bar method)
- Dynamická tahová zkouška provedená na rychlém trhacím stroji (dynamic tensile test)



Obr. 2.1 Typické rozsahy rychlostí deformací pro různé typy strojů

Pokud zkušební trhací stroje, které se využívají na statické zkoušky jednoosým tahem, dokážou vyvinout požadovanou rychlost deformace, mohou být využity i pro dynamickou tahovou zkoušku.

Zkušební vzorek může jednak být zatěžován s konstantním přírůstkem působící síly (statické zkoušky) a nebo se může použít rázové zatížení při vzniku zátěžného

impulsu (dynamické zkoušky). Abychom byli schopni stanovit dynamické materiálové charakteristiky, musíme zkušební stroj a vzorek osadit snímači, kterými můžeme změřit důležité parametry během zkoušky tj. sílu a prodloužení.

2.1 Hopkinsonův test s měrným děleným vzorkem-HMDT

Praktický význam Hopkinsonova testu spočívá v získání materiálových charakteristik na převážně tvářených materiálech za vyšších rychlostí deformace (zápustkové kování). Tyto data jsou potřebná do výpočtových modelů simulujících problémy při rychlých tvářecích dějích.

Základní uspořádání této metody prvně realizoval Kolsky, resp. Davis [12]. Pro tahové namáhání je v současnosti používána Lindholmova úprava. U vysokých rychlostí zatěžování, při kterých je metoda Hopkinsonova testu s měrným děleným vzorkem využívána, mají důležitý vliv setrvačné síly, šíření napěťového pulzu a mechanická rezonance.

Hlavní části zařízení jsou měrné tyče mezi nimiž je vložen zkušební vzorek. Průměry tyčí jsou 15 mm a délka 800 mm. Razník (projektil) je vyroben ze shodného materiálu jako měrné tyče a je vystřelen pomocí expandujícího vzduchu ze zásobníku proti měrným tyčím. Aby při nárazu razníku došlo k plné přeměně kinetické energie v potenciální energii, je jeho čelo zakulacené.

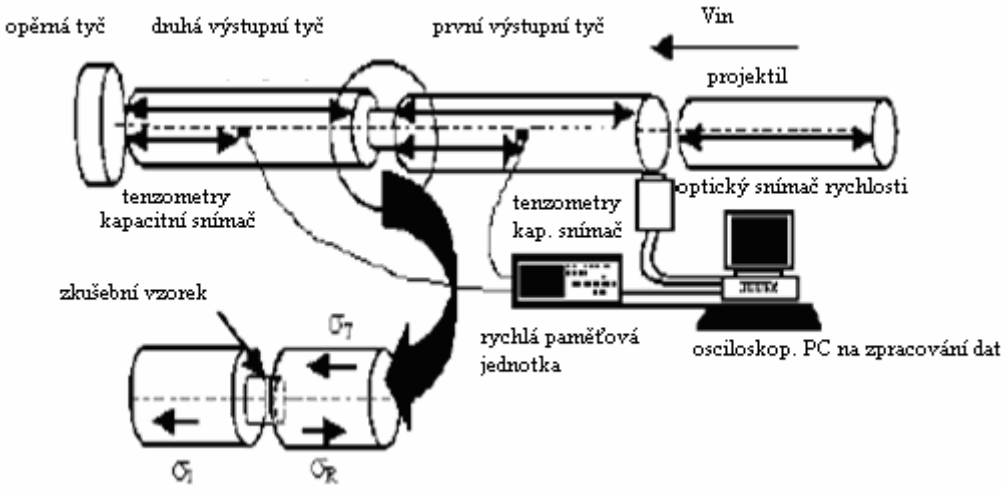
Při nárazu dochází tedy k osovému zatížení v jednom bodě na měrné tyči. Rychlost nárazu razníku je vypočtena z jeho rovnoměrné rychlosti pohybu mezi dvěmi fotodiodami vzdálenými od sebe 20mm. Razník vyvolá při dopadu elastickou tlakovou vlnu (tlakový napěťový pulz), která se šíří dopadovou tyčí rychlostí zvuku až na rozhraní tyče a vzorku. Tato deformace se měří připojenými snímači. Na tomto rozhraní je jedna část tlakové vlny odražena zpět do měrné tyče, druhá část je pohlcena zkušebním vzorkem a zbytková tlaková vlna prochází vzorkem do druhé měrné tyče.

Zaznamenávány jsou změny napěťových pulsů (výchylek). Uspořádání částí Hopkinsonova zkušebního zařízení je na Obr. 2.2.

Vyhodnocují se:

- Velikost deformace
    1. Způsobenou tahovou vlnou, která se šíří zpět dopadovou tyčí
    2. Vzniklou pohlcením tlakové vlny vzorkem

- Rychlosti deformace
- Napětí ve vzorku.

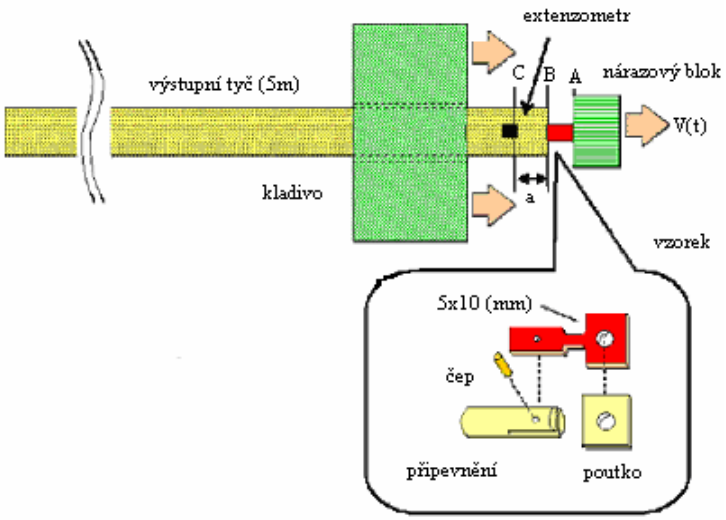


Obr. 2.2 schéma uspořádání u Hopkinsonova testu

2.2 Metoda jednoho vzorku (one bar method)

Tato metoda je založena na principu Hopkinsonova testu. Jak je ukázáno na Obr. 2.3, měřící stroj se skládá z kladiva, nárazového bloku, vzorku a výstupní tyče.

Jakmile kladivo narazí do nárazového bloku, tak se vzorek vyvolaným napětím zdeformuje. V okamžiku nárazu se začne šířit napěťový pulz výstupní tyčí. Jeho amplituda odpovídá amplitudě napětí ve vzorku. Tento pulz je zaznamenán extenzometrem, který je nalepen (ve vzdálenosti *a* od části B) na část C. Navíc je připojen elektro-optický extenzometr na odečtení rychlosti nárazového bloku.

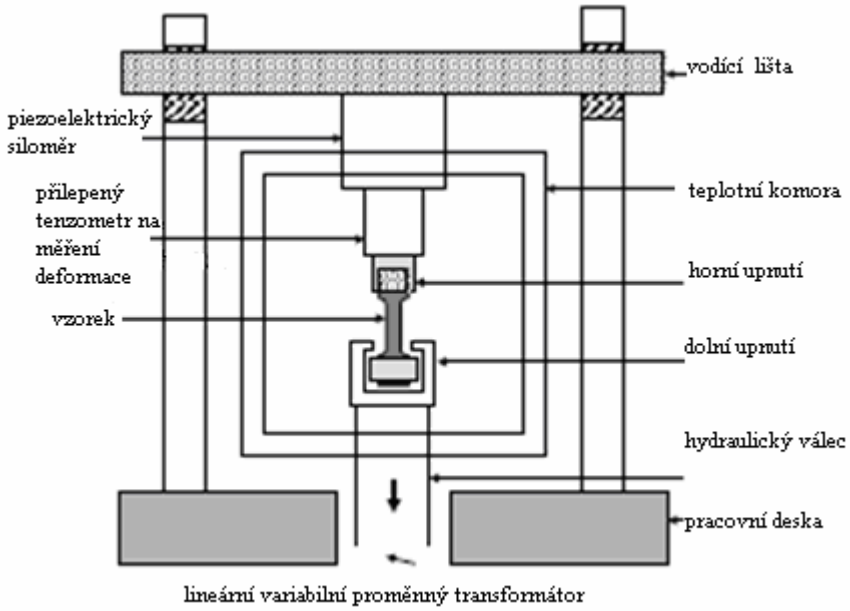


Obr. 2.3 Schéma měření metodou jednoho vzorku

2.3 Dynamická tahová zkouška

Provádí se na rychlých trhacích strojích (např. servohydraulický stroj), kde snímáme pomocí snímačů průběh zatěžovací síly a prodloužení. Touto metodou můžeme snadno získat dynamické materiálové charakteristiky ($R^d_{p0,2}, R^d_m, R^d_f, A^d, Z^d$).

Problematiku metodiky vyhodnocení experimentu této zkoušky, používané zkušební vzorky a trhací stroj (Obr. 2.4) budou podrobněji popsány v dalších kapitolách.



Obr. 2.4 Schéma pracovní části rychlého trhacího stroje

Zkušební vzorky

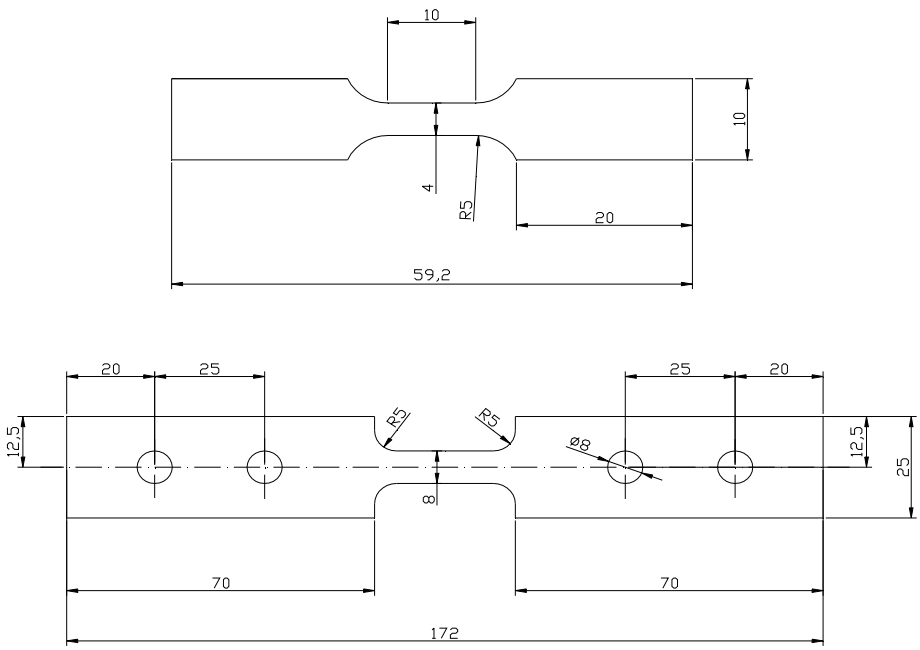
Vzorky na dynamickou tahovou zkoušku jsou prakticky totožné se vzorky na zkoušku statickou.

Tvar a rozměry zkušebních tyčí závisí na tvaru a rozměrech kovových výrobků, pro které jsou určovány mechanické vlastnosti. Zkušební tyč je obvykle odebrána obráběním vzorku z výrobku.

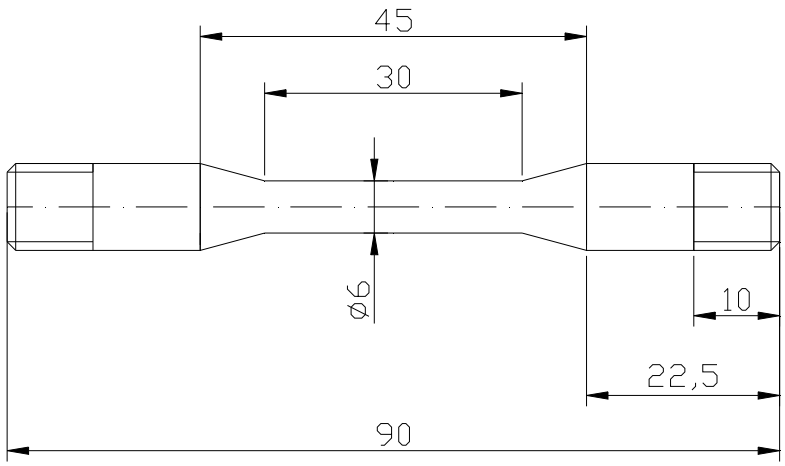
Zkušební tyče musí být do zkušebního stroje upnuty vhodným způsobem (pomocí klínů, závitových, osazených nebo hydraulických čelistí) tak, aby zatížení působilo pokud možno v ose zkušební tyče. Podle typu upínací hlavy, čelistí a nebo průměru závitu v upínací části vzorku se volí jeho konečná geometrie.

Vzorky mohou být

- Obdélníkového průřezu (ploché) Obr. 2.5
- Kruhového průřezu (válcové) Obr.2.6



Obr. 2.5 Různé geometrie plochých vzorků



Obr. 2.6 Válcové typy vzorků

Zařízení na měření sledovaných veličin

Na určení kompletní křivky napětí - deformace je potřeba změření dvou parametrů: síly F a prodloužení ΔL.

- Měření přenášené síly na vzorek
    1. Siloměrem s tenzometrickým můstkem – používá se při statických zkouškách
    2. Siloměrem s piezoelektrickými snímači – používá se při vyšších rychlostech deformace

- Měření prodloužení měrné délky
    1. Extenzometry – používají se při statických zkouškách
    2. Tenzometry – při vyšších rychlostech zatěžování (většinou jsou přilepeny na zkušebním vzorku, občas na akční části stroje, Obr. 2.4)

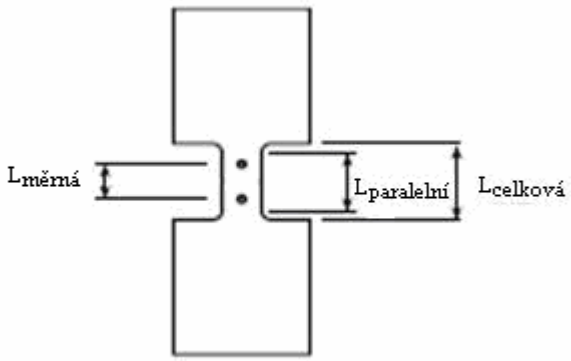
Predikce rychlosti deformace

Rychlost deformace může být zhruba vypočítána pomocí rychlosti akčního členu stroje a paralelní délky vzorku Obr 2.5:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{L} \tag{2.1}$$

Z rovnice 2.1 vyplývá, že maximální rychlost deformace dosažitelná daným strojem (omezuje oblast jeho použitelnosti) je rovna

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_{\max}}{L_{\min}} \tag{2.2}$$



Obr. 2.5 Měrná část zkušebního vzorku

Definice rozměrů v části s konstantním průřezem:

$L_{paralelní}$	paralelní délka, což je redukovaná část s konstantním průřezem
$L_{měrná}$	je měrná délka extenzometru
$L_{celková}$	je celková délka která zahrnuje paralelní délku a patní část

Dokonce ani za optimalizovaných testovacích podmínek nemůže být zaručena konstantní rychlost deformace během testu. Proto je skutečná rychlost deformace podél měřené délky určena derivací deformačního signálu v čase.

Všechny výstupní protokoly z provedených zkoušek by měly obsahovat postup měření a výpočtu rychlosti deformace.

3 MATERIÁL A METODIKA EXPERIMENTU

Pro experiment byla zvolena feriticko-martensitická ocel typu Eurofer'97 (9-12)Cr-1Mo(W-Ni-V), která byla vyvinutá v sedmdesátých letech pro vysokoteplotní aplikace v jaderné energetice. Přesné chemické složení je uvedeno v Tab.3.1 a mikrostruktura této oceli je patrná na Obr. 3.1.

Zkušební vzorek byl vyroben z válcovaného plechu této oceli o tloušťce 25mm. Plech byl po válcování podroben tepelnému zpracování sestávajícímu z austenitizace při teplotě 980 °C/21,6 min/vzduch z následného žíhání při teplotě 760°C/90min/vzduch.

Tab. 3.1 Chemické složení oceli Eurofer'97

Prvek	C	Cr	W	V	Ta	Mn	Si	Ni	P
Plech 25	0,11	8,8	1,09	0,23	0,14	0,56	0,03	0,03	0,003

Obr. 3.1 Mikrostruktura oceli Eurofer'97 (1000x)

Dynamická tahová zkouška byla realizována za použití válcového vzorku s průměrem 4mm a měrnou délkou 20mm, vyrobeného obráběním z dodaného plechu. Zkouška proběhla při dynamickém zatěžování s rychlostí posuvu pístu stroje 1m/s. Parametry zkoušky a počáteční hodnoty vzorku změřené před zkouškou jsou shrnuty v tab.3.2.

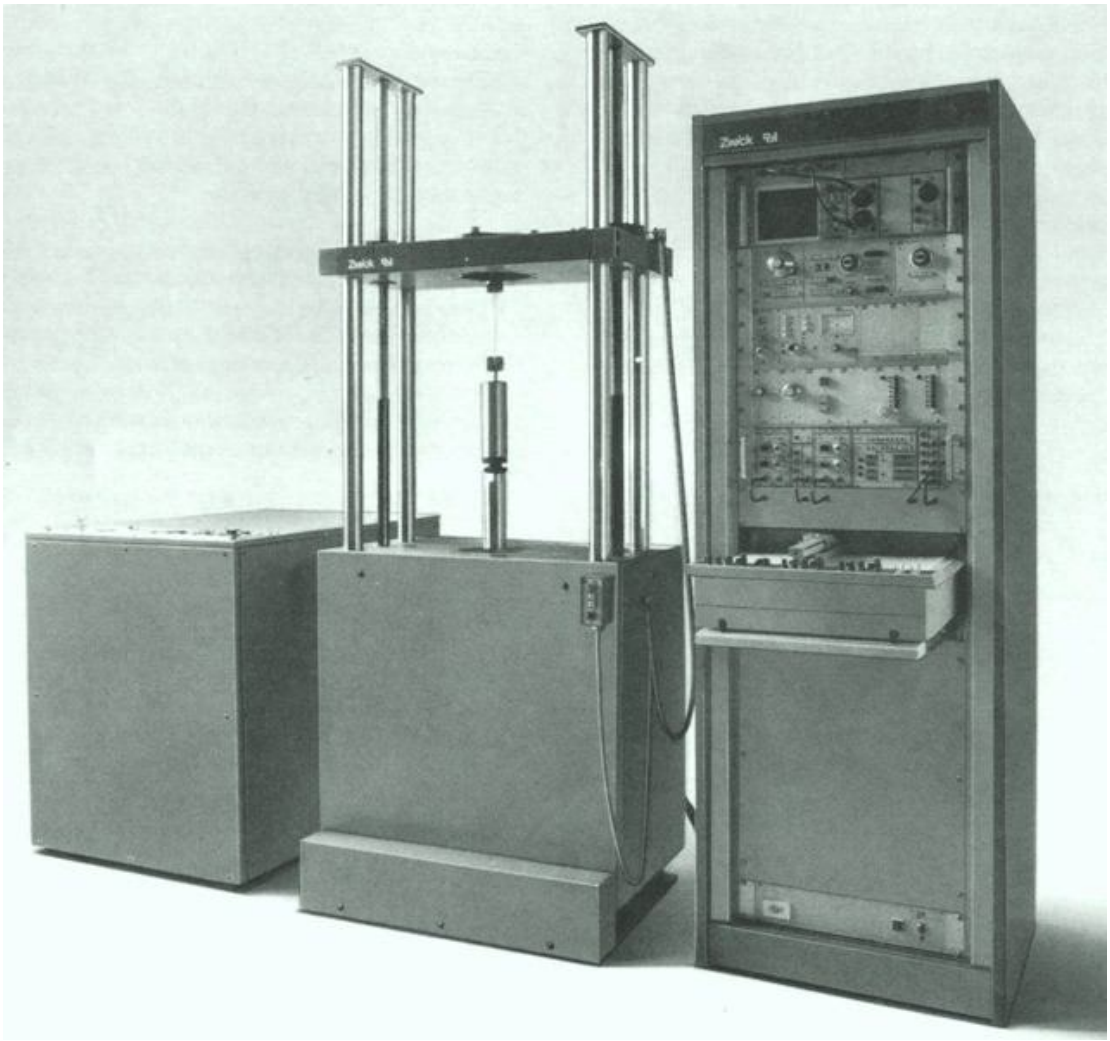
Tab.3.2 Parametry zkoušky a počáteční rozměry vzorku

T [°C]	Rychlost[m/s]	L_0 [mm]	d_0 [mm]	S_0 [mm^2]
-55	1	19,989	3,986	12,478

Provedená zkouška byla uskutečněna na servo-hydraulickém zkušebním stroji ZWICK Rel 1871 Obr. 3.2. Tento rychlý trhací stroj umožňuje zkoušet v intervalu rychlostí pístu od 0 - 6m/s. Pro zkoušky při různých teplotách může být tento zkušební stroj opatřen kryostatem, kde je zkušební vzorek ochlazován cirkulací par tekutého dusíku. Dovoluje nám to měřit materiálové charakteristiky v teplotním rozsahu od -70°C do +20 °C.

Technické parametry stroje ZWICK Rel 1871:

- Maximální působící síla : ±100 kN
- Maximální rychlost pístu : 6m/s
- Maximální zdvih příčníku : 800 mm



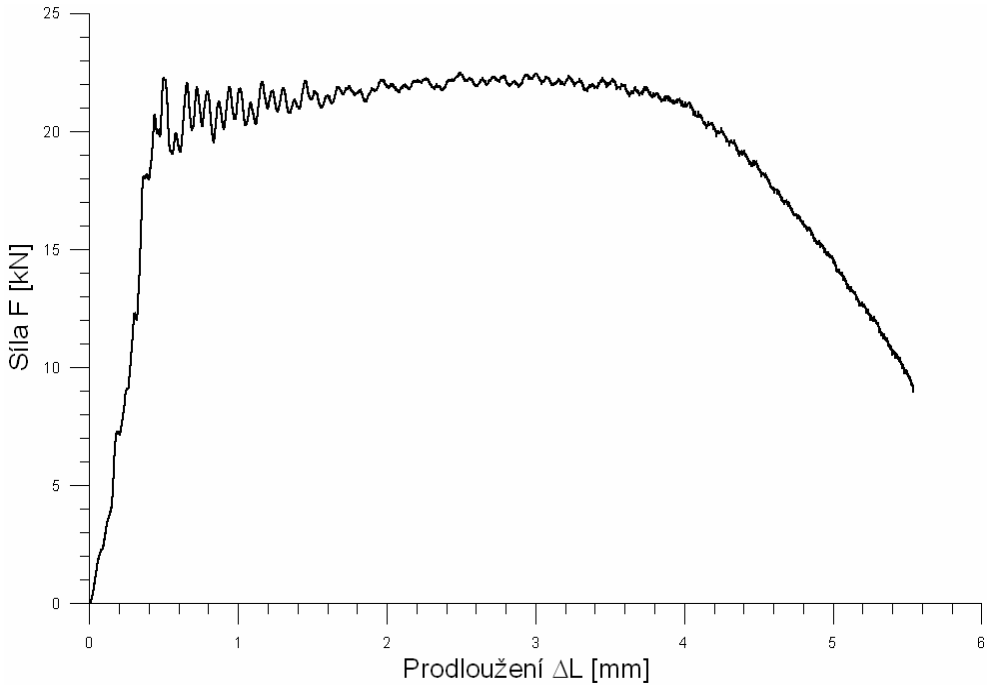
Obr. 3.2 Rychlý trhací stroj ZWICK Rel 1871

3.1 Získané závislosti měřených veličin při dynamické zkoušce

- Závislost síla-prodloužení ($F - \Delta L$)
- Smluvní diagram napětí-deformace ($R - \varepsilon$)
- Závislost skutečné napětí – skutečná deformace ($\sigma - \vec{\varepsilon}$)

Závislost síla *F* – prodloužení *ΔL*

Závislost síla *F*-prodloužení ΔL Obr. 3.3 je získána během mechanické zkoušky měřením okamžitých hodnot jmenovaných veličin. Z této závislosti se následně určuje závislost smluvní napětí *R*-poměrná deformace ε Obr. 3.4 , přičemž jak napětí, tak deformace jsou určeny z okamžitých hodnot síly a prodloužení, vztažených na původní průřez S_0 a na původní měrnou délku L_0 zkušebního tělesa.



Obr. 3.3 Změřená závislost Síla - prodloužení

Smluvní tahový diagram napětí - deformace (R - ε)

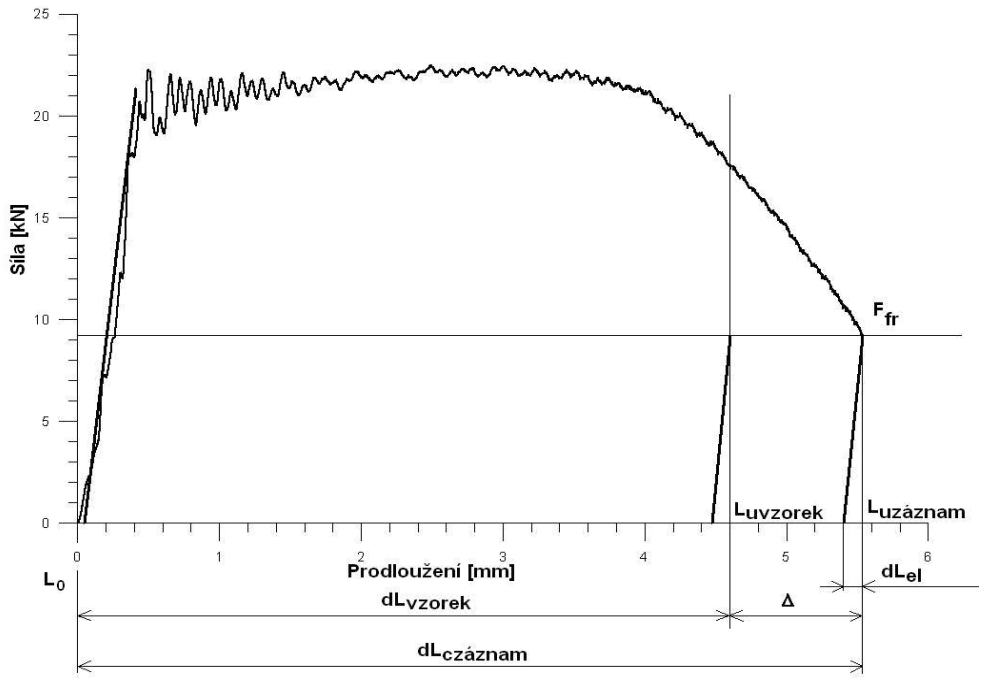
Při dynamickém zatěžování, jak bylo řečeno výše dochází ve zkušebním vzorku k napěťovým pulsům, proto získaná experimentální data nemají hladký průběh. Proto se pro následné vyhodnocení vyhlazují vhodnou funkcí, např. pomocí běžícího průměru.

Při dynamických zkouškách není výhodné připojovat na zkušební vzorek extenzometr, protože by při těchto vysokých rychlostech došlo k jeho zničení. Pak se předpokládá, že snímané posunutí pístu trhacího stroje odpovídá prodloužení zkušebního vzorku. Tato hodnota ale neodpovídá skutečnému prodloužení, proto se musí před vyhodnocením dynamických materiálových charakteristik získaný záznam (F-ΔL) zkorigovat.

Korekce smluvního tahového diagramu

Jak bylo řečeno (v úvodu kapitoly 3) při absenci extenzometru, který měří skutečné prodloužení na vzorku, dochází k rozkolu snímaných hodnot prodloužení (měří se přemístění pístu stroje) a skutečného prodloužení vzorku. Závislost síla-prodloužení z měřených dat se liší od skutečnosti Obr. 3.4, proto se hodnota poměrné deformace ve smluvním tahovém diagramu násobí tzv. korekčním koeficientem.

Tento korekční koeficient se určí z rozdílu skutečné konečné délky vzorku (změřené po zkoušce) a konečného prodloužení změřeného během zkoušky (tab. 3.3). Jednotlivé vypočtené úseky na ose prodloužení jsou na Obr. 3.6



Obr. 3.6 Odvození korelačního faktoru

Tab. 3.3 změřené hodnoty konečných rozměrů vzorku

L_u[mm] vzorek	L_u[mm] záznam	d_u[mm]
24,539	25,530	3,797

$$dL_{vzorek} = Lu_{vzorek} - L_0 \tag{3.1}$$
$$dL_{vzorek} = 24{,}539 - 19{,}989 = 4{,}55mm$$

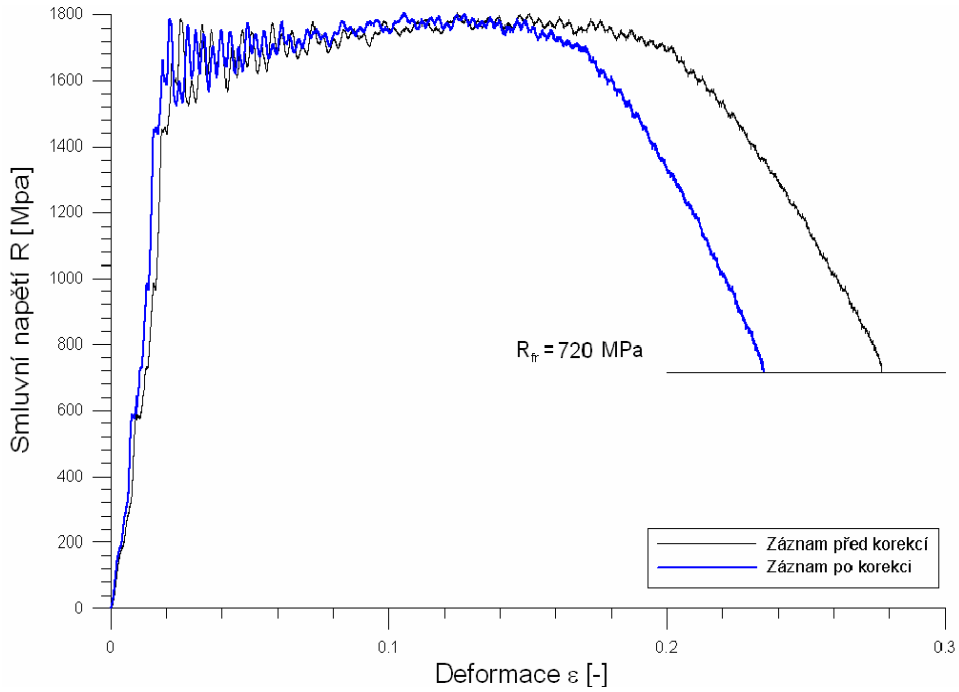
$$dL_{záznam} = (Lu_{záznam} - L_0) - \frac{R_f}{E} \cdot L_o \tag{3.2}$$
$$dL_{czáznam} = (25{,}53 - 19{,}989) - \frac{719{,}9544}{85800} \cdot 19{,}989 = 5{,}374mm$$

$$\Delta = dL_{czáznam} - dL_{vzorek} \tag{3.3}$$
$$\Delta = 5{,}374 - 4{,}55 = 0{,}824mm$$

Korekční koeficient:

$$k = \frac{dL_{vzorek}}{dL_{czáznam}} \tag{3.4}$$
$$k = \frac{4{,}55}{5{,}374} = 0{,}847$$

Po vyhlazení je možno smluvní diagram rozdělit na dvě části, tj. na lineární elastickou část a na plastickou část, ve které dochází k odklonu od přímkové závislosti v důsledku vzniku plastické deformace.



Obr. 3.4 Stanovené smluvené diagramy R - ε

Přepočet změřené síly a prodloužení na smluvní napětí a poměrnou deformaci se provádí podle rovnice 3.5 (pro napětí) a 3.6 (pro deformaci)

Smluvní napětí:

$$R^d = \frac{F}{S_0}[MPa] \tag{3.5}$$

Poměrná deformace:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}[-] \tag{3.6}$$

Závislost Skutečné napětí – skutečná deformace ($\sigma - \bar{\varepsilon}$)

Pro potřeby numerických simulací je vhodnější zavést tzv. skutečný tahový diagram. Je to závislost skutečného napětí a skutečné deformace. Tyto veličiny jsou oproti smluvním hodnotám vztaženy na okamžitý průřez vzorku během zkoušky. Závislost skutečného napětí na skutečné deformaci je na Obr. 3.5

Pro přepočet ze smluvních veličin na skutečné se používají vztahy 3.8, 3.10 (pro skutečné napětí) a 3.7, 3.9 (pro skutečnou deformaci).

Vztahy platné v oblasti před bodem plastické nestability:

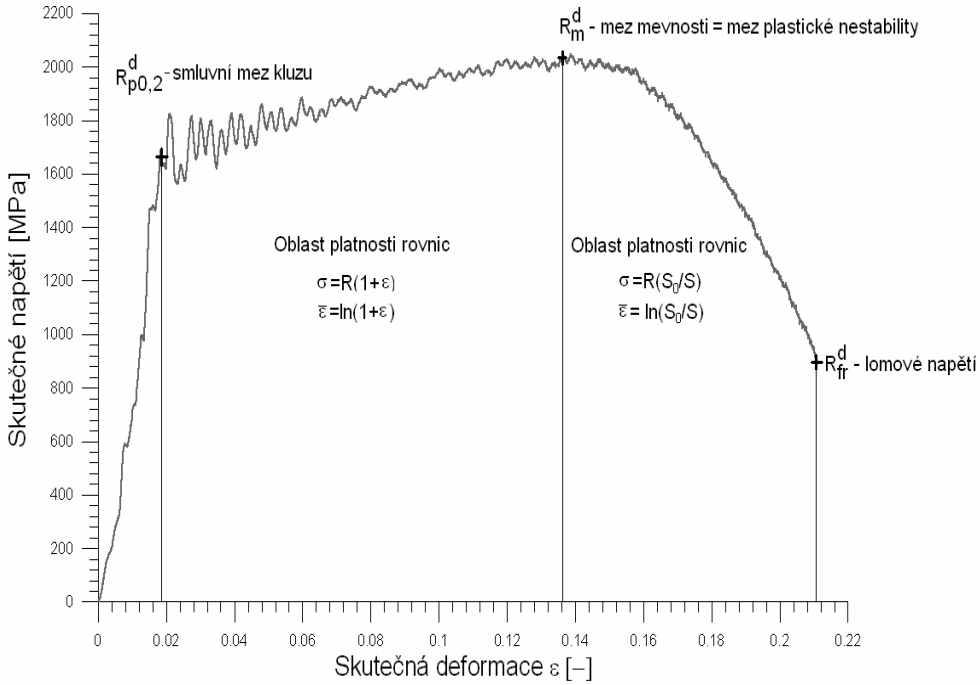
$$\bar{\varepsilon} = \ln(1+\varepsilon) \tag{3.7}$$

$$\sigma = R^d(1+\varepsilon) \tag{3.8}$$

Vztahy platné v oblasti za bodem plastické nestability:

$$\bar{\varepsilon} = \ln\left(\frac{S_0}{S}\right) \tag{3.9}$$

$$\sigma = R^d \frac{S_0}{S} \tag{3.10}$$



Obr. 3.5 Závislost skutečné napětí – skutečná deformace

3.2 Mechanické charakteristiky

Ze smluvního tahového diagramu se vyhodnocují tři napěťové materiálové charakteristiky a dvě deformační materiálové charakteristiky.

Napěťové charakteristiky:

- Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}^{d}$
- Smluvní mez pevnosti R_{m}^{d}
- Lomové napětí R_{fr}^{d}

Deformační charakteristiky:

- Tažnost A^{d}
- Zúžení Z^{d}

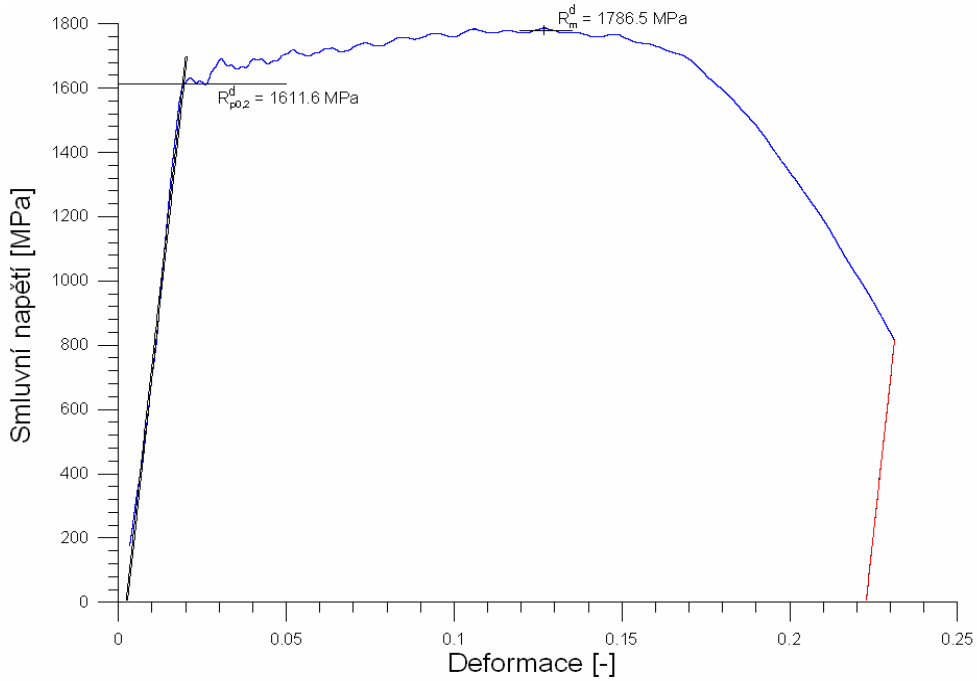
Smluvní mez kluzu

Mez kluzu je definována jako napětí, při kterém se zkoušený materiál začíná plasticky deformovat. Charakter přechodu mezi elastickou a plastickou deformací je dán typem materiálu.

Díky napěťovým pulsům se není jednoduché určit přesně výraznou mez kluzu a proto se vyhodnocuje smluvní mez kluzu $R_{p0,2}^{d}$. Je to napětí, při kterém se projeví 0,2% plastické deformace. Na ose poměrné deformace označíme bod s hodnotou 0,2% plastické deformace. Tímto bodem vedeme rovnoběžku s lineární náběžnou hranou záznamu. Smluvní mez kluzu odpovídá bodu, kde rovnoběžka protne diagram R-ε. Z diagramu F - ΔL dosazením odečtené síly $F_{p0,2}^{d}$ z průsečíku rovnobežky se záznamem do rov. 3.5 dostaneme smluvní mez kluzu rov. 3.11.

$$R_{p0,2}^{d} = \frac{F_{p0,2}^{d}}{S_0} \tag{3.11}$$

Z korigovaného záznamu Obr. 3.7 při dodržení výše uvedeného postupu jsme stanovili hodnotu smluvní meze kluzu $R^d_{p0,2}$ =1611,6 MPa.



Obr. 3.7 Stanovení smluvní meze kluzu a meze pevnosti ze záznamu

Smluvní mez pevnosti

Smluvní mez pevnosti je napětí, které odpovídá maximální zatížení v oblasti deformačního zpevnění původním průřezem měřené délky. Mez pevnosti představuje také bod nestability, u kterého byl poprvé zaznamenán pokles zatížení (tj. nastává dynamické odpevňování). Pro stanovení meze pevnosti se dosadí do rov. 3.12 maximální síla v záznamu F_m

$$R_m^d = \frac{F_m}{S_0} \tag{3.12}$$

Na Obr. 3.7 je určená hodnota meze pevnosti (maximální dosažené napětí) je rovna R_m^d =1786,5 MPa.

Lomové napětí

Lomové napětí odpovídá napětí při kterém došlo k přetržení vzorku.

$$R_{fr}^{d} = \frac{F_{fr}}{S_0} \tag{3.13}$$

Ze záznamu síla-prodloužení byla stanovena lomová síla F_{fr} =8983,6N a po dosazení do rovnice 3.13, bylo vypočtené lomové napětí R_{fr}^{d} =720 MPa.

Tažnost

Po přetržení zkušební tyče lze z poměrného prodloužení vypočítat tažnost materiálu. Tažnost je měřítkem tvárnosti.

$$\mathrm{A}^{\mathrm{d}} = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \ [\%] \tag{3.14}$$

$$\mathrm{A}^{\mathrm{d}} = \frac{24{,}539 - 19{,}989}{19{,}989} \cdot 100 = 22{,}8\%$$

Počáteční měrná délka vzorku je uvedena v tab. 3.2 a konečná délka v tab. 3.3. Po dosazení do rovnice 3.14 vychází, že ocel Eurofer'97 má tažnost při daných podmínkách zkoušky rovnu A^{d} = 22,8%.

Zúžení

Je to další charakteristika tvárnosti. Určuje změny průřezu zkušební tyče před zkouškou a po zkoušce:

$$Z^{d} = \frac{S_0 - S_u}{S_0}.100 \ [\%] \tag{3.15}$$

$$Z^d = \frac{12{,}478 - 11{,}323}{12{,}478}.100 = 9{,}26\%$$

Počáteční průměr vzorku je uveden v tab. 3.2 a konečný průměr v tab. 3.3. Po dosazení do rovnice 3.15 vychází, že zúžení oceli Eurofer'97 je Z = 9,3%.

V tab. 3.4 jsou souhrnně uvedeny výsledné materiálové charakteristiky z námi provedené dynamické tahové zkoušky.

Tab. 3.4 hodnoty výsledných materiálových charakteristik

$Rp^d_{p0,2}$ [MPa]	R^d_m [MPa]	R^d_{fr} [MPa]	A^d [%]	Z^d [%]
1611,6	1786,5	720	22,8	9,3

ZÁVĚR

Byly popsány základní typy zkoušek pro charakterizaci materiálu při dynamickém zatěžování. Dále byly shrnuty modely používané k odhadu dynamických charakteristik na základě znalosti některých parametrů. Byly uvedeny nejpoužívanější modely včetně popisu jejich omezení.

Získané poznatky byly využity při vyhodnocení experimentálního získání závislosti síly na prodloužení při dynamické zkoušce tahem oceli Eurofer'97. byly získány základní napěťové a deformační charakteristiky této oceli pro sníženou teplotu zkoušky -55°C a rychlost zatěžování 1m/s.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1 HIGH STRAIN RATE EXPERTS GROUP**,** Recommendations for Dynamic Tensile Testing of Sheet Steels, August 2005

2 JOHNSON, G.R.; COOK, W.: Engineering fracture mechanics, 21 (1985), 1, 33-48.

3 KLEPACZKO, J. R.: A general approach to rate sensitivity and constitutive modeling of FCC and BCC metals, In A.A Balkema (Ed.), Impact: Effect of fast transient Loadings, 1988, s.3.

4 KLEPACZKO, J.R.: Thermally activated flow and strain rate history effect for some polycrystalline FCC metals, Mater. Sci. Eng., 1975, Vol. 18, s. 121-135

5 RUSINEK, A.; KLEPACZKO, J.R.: Shear testing of sheet steel at wide range of strain rates and constitutive relation with strain-rate and temperature dependence of the flow stress, Int. J. Plast., 2001, Vol. 17, s. 87-115.

6 BODNER, S. R.; PARTOM, Y.: Constitutive equatins for elastic-viscoplactic strain-hardening materials, J. Appl. Mech.,1975, s. 385-389.

7 ZERRILI, F.J.; ARMSTRONG, R.W.: Dislocation-mechanics- based constitutive relation for material dynamics calculations, J. Appl. Phys., 1987, Vol. 61, s 1816-1825.

8 BERGSTRÖM, Y.: Dislocation model for the stress strain behaviour of polycrystalline alpha-iron with special emphasis on the variation of the densities mobile and immobile dislocations, Mat. Sci. Eng., 1970, Vol. 5, s. 193-200.

9 BERGSTRÖM, Y.; HALLEN, H.: An improved dislocation model for the stress-strain behaviour of polycrystalline alpha-iron, Mater. Sci. Eng., 1982, Vol. 55, s. 49-61.

10 GOTTSTEIN, G.; ARGON, A. S.: Dislocation theory of steady-state deformation and its approach in creep and dynamic tests, Acta Metall., 1987, Vol. 35, s. 1261-1271

11 ESTRIN, Y.: Dislocation theory based constitutive modeling: foundations and applications, J. Mater. Process. Techno., 1998, Vol. 80-81, s. 33-39

12 FOREJT, M.; HUMÁR, A.: Experimentální metody, sylabus, Brno, říjen 2003

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotky	Popis
σ	[MPa]	Skutečné napětí
σ_a	[MPa]	Teplotně neovlivněná složka meze kluzu
σ_g	[MPa]	Příspěvek napětí z výchozí dislokační hustoty
R^d	[MPa]	* Smluvní napětí
R_m^d	[MPa]	* Smluvní mez pevnosti
$R_{p0,2}^d$	[MPa]	* Smluvní mez kluzu
R_{fr}^d	[MPa]	* Lomové napětí
G	[MPa]	Modul pružnosti ve smyku
E	[MPa]	Youngův modul pružnosti
F_m	[N]	Maximální síla
F_{fr}	[N]	Lomová síla
$F_{p0,2}$	[N]	Síla při smluvní mezi kluzu
A^d	[%]	* Tažnost
Z^d	[%]	* Zúžení
ε_{pl}	[-]	Plastická deformace
$\bar{\varepsilon}$	[-]	Skutečná deformace
$\dot{\varepsilon}_{pl}^*$	[s^{-1}]	Poměrná rychlost deformace
v	[m/s]	Rychlost akčního členu
v_{max}	[m/s]	Maximální rychlost akčního členu
l	[mm]	Střední rozměr zrna
L_u	[mm]	Délka vzorku po zkoušce
ΔL	[mm]	Prodloužení
L_0	[mm]	Počáteční paralelní délka vzorku
S_u	[mm^2]	Průřez vzorku po zkoušce
S_0	[mm^2]	Počáteční průřez vzorku
T	[°C]	Teplota experimentu
T_0	[°C]	Referenční teplota
T_m	[°C]	Teplota tání daného kovu
A,B,C,m,n	[-]	Materiálové konstanty v JC rovnici
k	[-]	Napěťový koeficient
k_h	[MPa. $m^{1/2}$]	Lokální hodnota faktoru intenzity napětí
n	[-]	Exponent deformačního zpevnění
K	[-]	Konstanta udávají typ krystalické mřížky
$B,\ B_0$	[-]	Materiálové konstanty
α_0, α_1	[-]	Materiálové konstanty
β_0, β_1	[-]	Materiálové konstanty

f_g	[Hz]	Rychlost odezvy
$U(\varepsilon)$	[-]	Multiplikativní dislokační parametr
$\Omega(\dot{\varepsilon},T)$	[-]	Měřítko pravděpodobnosti dynamického zotavení
ρ	[-]	Hustota dislokací
α	[-]	Konstanta
HMDT		Hopkinsonův test měrného děleného vzorku

* Pozn.: Horní index *d* značí mechanické charakteristiky při dynamickém zatěžování