

Příčiny variability výsledků tahové zkoušky za okolní teploty

Ing. Jan Wozniak, CSc.

Doc. Ing. Miloslav Jakob, CSc.

Současné požadavky na přesnost a správnost výsledků mechanických zkoušek presentovaných zkušebními se neustále zpřísňují. Tento stav souvisí s obecnou snahou o reprodukovatelnost výsledků v případech, že jsou tyto získány zkoušením shodného materiálu v různých zkušebnách. Objektívni podklady o úrovni zkoušení v jednotlivých zkušebnách poskytují statistická hodnocení výsledků mezilaboratorních porovnávacích zkoušek (MPZ), která umožní odhalit zdroje chyb, ze kterých jsou odvozovány nejistoty zkoušení a zároveň též naznačují cesty zlepšení v oblasti možného zdokonalení používané zkušební techniky, zkušebních postupů a v neposlední řadě též i v oblasti nutné kvalifikace zkušební personálu. Je však zapotřebí poznamenat, že zkušební metoda a její popis uvedený ve zkušebních normách, neodrážejí vždy objektívni požadavky vedoucí ke splnění výše uvedených cílů a v některých případech spíše vycházejí z komerčních zájmů výrobců zkušební techniky než ze skutečných potřeb.

Každý zkušební výsledek je presentován s určitou nejistotou. Před tím než bude přistoupeno k definování zdrojů nejistot působících na variabilitu výsledků zkoušení bude stručně pojednáno o významech některých pojmů používaných při statistickém hodnocení presentovaných výsledků.

1 Nejistoty, přesnost, opakovatelnost, reprodukovatelnost a správnost zkušebního měření

Jak již název napovídá, nejistota zkušebního měření zpochybňuje jeho výsledek, a proto je žádoucí, aby hodnota nejistoty byla, pokud možno, co nejmenší. Tento požadavek, jak bude níže uvedeno, však nemusí být postačující pro získání správných výsledků zkoušení.

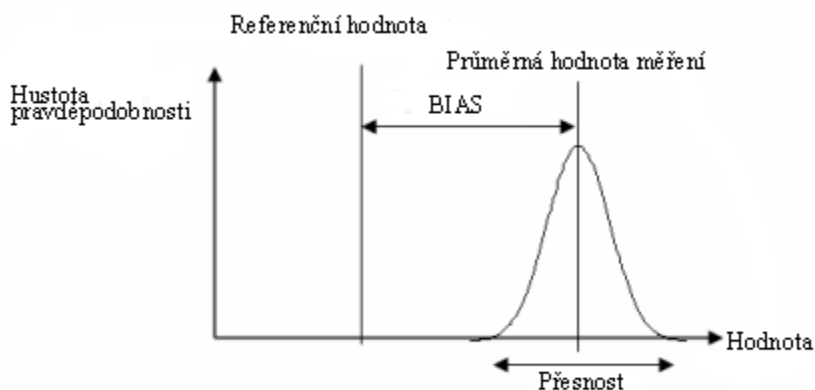
Nejistota zkušebního měření dle definice uvedené v [1] říká, že se jedná o parametr přidružený k výsledku měření charakterizující rozptýlení hodnot, jež by mohly být důvodně přisuzovány k měřené veličině. Z uvedené definice vyplývá, že nejistota měření je spojována s chybou, která kvantitativně charakterizuje rozdíl naměřené hodnoty od hodnoty pravé, referenční. Jak bude ukázáno dále, tento předpoklad platí pouze za eliminace systematické chyby BIAS a v daném případě je lépe hovořit o rozdílu naměřené hodnoty x_i od váženého průměru \bar{x} všech provedených zkušebních měření. Obecně lze konstatovat, že proměnná, která pravděpodobně nabývá hodnot $\bar{x} \pm \Delta x$ má nejistotu (nebo chybu) $\Delta x = x_i - \bar{x}$. Někdy se v těchto případech nejistota vyjadřuje relativní chybou v procentech, tedy $r = \frac{\Delta x}{\bar{x}} * 100 = \frac{x_i - \bar{x}}{\bar{x}} * 100$; [%].

V mnoha případech opakovaných měření na shodných objektech se oprávněně předpokládá, že rozdíly mezi měřenou veličinou a její pravou hodnotou vykazují „normální pravděpodobnostní rozdělení“ a nejistota měření závisí na jejich výběrové směrodatné odchylce, s , vyjádřené rovnicí (1):

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

kde: n – počet měření; \bar{x} - vážený průměr všech měření; x_i – individuální hodnota měření.

Přesnost měření je definována jako míra, která udává jak další následná měření budou vykazovat shodné nebo podobné výsledky nebo, jinými slovy, jako těsnost souhlasu mezi nezávislými výsledky zkoušky získanými za předem specifikovaných podmínek [2]. Kvantitativně se dá vyjádřit pomocí výběrové směrodatné odchylky, jelikož bylo zjištěno, že při normálním rozdělení chyb měření leží 68.2% výsledků v pásmu směrodatné odchylky $\pm s$, 95.4% výsledků v pásmu $\pm 2 \times s$ a 99.8% výsledků pak v pásmu $\pm 3 \times s$. S rostoucí hodnotou směrodatné odchylky roste i interval reálných hodnot, které mohou výsledky měření získat a přesnost, ve smyslu uvedených definic, klesá (viz obr. 1).



Obr. 1: Schéma k vysvětlení pojmů používaných při měření

Směrodatná odchylka nachází uplatnění v případech, kdy se měření opakují a průměrují. V tomto případě je přesnost váženého průměru měření rovna směrodatné odchylce podělené odmocninou počtu měření. Takovýmto způsobem se statisticky vyjadřuje standardní nejistota měření typu „A“:

$$u_A = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot s \quad (2)$$

Lze tedy říci, že nejistota měření typu „A“ má přímou návaznost na vlastní měření při zkušební činnosti, má statistickou povahu a lze ji stanovit statistickou analýzou dat získaných přímo z tohoto měření. Jelikož vychází z výběrové směrodatné odchylky, která specifikuje přesnost, má rovněž přímou návaznost na přesnost prezentovaných výsledků měření. Čím je nejistota měření u_A menší, tím jsou popisované výsledky přesnější. Ruku v ruce s pojmem přesnost je možno hovořit i o opakovatelnosti a reprodukovatelnosti výsledků měření.

Opakovatelnost uvažuje rozdíly výsledků měření vznikající, když se veškeré úsilí koncentruje na udržování konstantních podmínek měření shodným zařízením a operátorem a jeho opakování během krátké časové periody. Čím jsou tyto rozdíly menší, tím je opakovatelnost výsledků měření lepší.

Reprodukovatelnost výsledků měření pak uvažuje změny výsledků měření získaných v delších časových úsecích, ke kterým dochází při používání shodných procesů měření, avšak u rozdílných zkušebních zařízení obsluhovaných různými operátory. Z definice je jasně vidět důležitost použitého procesu měření. Ten musí být jednoznačně definován do všech podrobností od vlastní metodiky měření, použité měřicí techniky, včetně požadované úrovně zkušebního personálu tak, aby zabraňoval nevídanému voluntarismu při zkušebním procesu, který vede k významným odchylkám dosažených výsledků měření. Z dosud vyhodnocených výsledků MPZ [3, 4, 5] je vidět, že základní metodické vodítko pro provedení zkoušek tahem za okolních teplot, tj. zkušební norma, rozhodně nepatří mezi popisovaný typ dokonalých dokumentů, jak bude rozvedeno dále.

Správnost nelze ztotožňovat s přesností. Je třeba podotknout, že vysoká přesnost měření není garancí toho, že zkušebna zkouší správně. Z obr. 1 plyne, že nižší hodnota nejistoty typu „A“ dává užší pásmo rozpětí možných hodnot normálního rozdělení a tedy zvyšuje jeho přesnost. Nicméně, vzhledem k odchylce BIAS, někdy nazývané systematickou chybou, která je bezprostředně spojená se standardní nejistotou typu „B“, mohou přesné výsledky měření zasahovat do oblasti tzv. výsledků odlehlých. Systematická chyba (nejistota typu „B“) může být vyvolána vlivem prostředí, metodikou měření, používaným přístrojem, apod. Zpravidla ovlivňuje zkušební měření stále stejným způsobem. Systematické chyby se velmi obtížně kvantifikují, jelikož jejich vliv je pozorovatelný pouze tehdy, když se tyto chyby odstraní. Vzhledem ke skutečnosti, že nemají statistickou povahu, žádná opakovaná měření ani průměrování neumožní kvantitativně tuto chybu stanovit. Hodnota systematické chyby ovlivňuje správnost, jelikož udává rozdíl mezi referenční (pravou) hodnotou výsledku měření a průměrnou hodnotou měření v laboratoři (viz obr. 1).

„Správnost“ lze chápat jako těsnost souhlasu mezi výsledkem měření a přijatou referenční hodnotou.

Na základě výše uvedeného rozboru je vidět, že základním požadavkem pro prezentaci přesných a správných zkušebních výsledků měření jsou minimální standardní nejistoty měření typu „A“ a „B“, ze kterých se odvozují nejistoty kombinované, rozšířené a celkové. Zatímco hodnotu standardní nejistoty typu „A“ lze snadno stanovit statistickým vyhodnocením výsledků vlastního zkušebního měření, nelze tento postup využít ke stanovení nejistoty typu „B“. Kvantitativní údaje o těchto nejistotách lze získat pouze z externích zdrojů, případně inženýrskými odhady [2]. Jako nejdůležitější zdroje chyb, se kterými souvisí nejistoty typu „B“ při provádění zkoušek tahem za okolních teplot, se v normě EN 10002-1 [6] uvádějí:

- i. příprava zkušební tyče (měření, značení, apod.);
- ii. nastavení rychlosti zkoušení a její kontrola;
- iii. způsob upnutí zkušební tyče;
- iv. měření sil a prodloužení;
- v. charakteristiky (mechanické, elektrické, hydraulické, apod.) zkušebního stroje;
- vi. chyby registrace a hodnocení sledovaných veličin (hodnotící subjekt, software a jeho koncepce);
- vii. materiálové nehomogenity.

Při odhadu nejistoty typu „B“ v případě tahové zkoušky za okolních teplot se doporučuje separátně uvažovat chyby spojené s tzv. materiálově závislými a nezávislými zdroji [6, 2]. U materiálově nezávislých zdrojů jsou povolené chyby vesměs stanoveny formou mezních úchylek, kdy ku příkladu měřená délka, L_0 , se musí vyznačit s mezní úchylkou $\Delta x = \pm 1\%$. Citlivost snímání siloměrné cely udaná výrobcem může např. rovněž dosahovat $\Delta x = \pm 1\%$. Při výpočtu nejistot typu „B“ s využitím takto kvantifikovaných chyb se zjednodušeně předpokládá, že i pro tyto případy lze použít model rovnoměrného rozdělení a hodnoty jednotlivých nejistot typu „B“ vyjádřit jako $u_B = \Delta x / \sqrt{3}$. Pro uvedené příklady související s vyznačením měřené délky L_0 na zkušební tyči a s chybou snímání siloměrné cely jsou tedy obě odpovídající nejistoty typu „B“ vyjádřeny jako $u_B = 1 / \sqrt{3} = 0,577$ [%].

Hodnoty chyb z titulu materiálově závislých parametrů lze pro některé typy ocelí dohledat např. v [7]. I zde lze při kvantitativním výpočtu nejistot spojených s materiálově závislými zdroji vycházet z rovnoměrné distribuce a proto je způsob vyjádření nejistoty typu „B“ analogický, jako v předchozím případě, tedy $u_B = \Delta x / \sqrt{3}$.

Sumární účinek dílčích příspěvků jednotlivých nejistot typu „B“, u_{B_i} , lze vyjádřit tzv. kombinovanou nejistotou, u_C :

$$u_C = \sqrt{u_{B_1}^2 + u_{B_2}^2 + u_{B_3}^2 + \dots + u_{B_n}^2} \quad (3)$$

Kombinovaná nejistota typu „B“ stanovená naznačeným způsobem je též základem pro odhad rozšířené nejistoty, u_E . Ta se získá násobením kombinované standardní nejistoty krycím faktorem k . Pro 95 % konfidenční hladinu nabývá tento faktor hodnoty $k = 2$. Tedy:

$$u_E = u_C \times k \quad (4)$$

Shodný postup odmocniny sumy druhých mocnin jednotlivých přispívajících nejistot se používá i pro vyjádření celkové nejistoty, u_T , kdy:

$$u_T = \sqrt{u_A^2 + u_C^2} \quad (5)$$

Z předložené koncepce odhadu nejistot měření plyne, že standardní nejistota typu „A“ je jedinou složkou, která může být přímo stanovena ve zkušební laboratoři. Složku kombinované standardní nejistoty typu „B“ je možno, s ohledem na výše uvedené zásady odhadu, považovat za předem definovanou pro daný typ zkoušeného materiálu a zkušebního zařízení. Konkrétní kvantitativní vliv nejistot typu „B“ na zkušební výsledek však lze zjistit pouze tím, že tyto nejistoty budou minimalizovány cestou minimalizace chyb, se kterými tyto nejistoty bezprostředně souvisí. Za tímto účelem je však třeba co nejlépe poznat a definovat zdroje zmíněných chyb. Tyto problémy budou diskutovány dále.

2 Zdroje chyb ovlivňující nejistoty typu „B“ a jejich vliv na výsledky tahové zkoušky za okolní teploty

V MPZ ověřujících způsobilost zúčastněných laboratoří k provádění tahové zkoušky za okolních teplot se zpravidla požaduje presentace následujících výsledků:

- mez kluzu (výrazná nebo smluvní);
- mez pevnosti v tahu;
- celkové a plastické prodloužení v % měřené průtahoměrem při maximálním zatížení;
- tažnost.

V souvislosti s uvedeným přehledem požadovaných výsledků MPZ budou uvedeny základní zdroje chyb při jejich zjišťování, které ovlivňují nejistoty typu „B“ a tak i variabilitu presentovaných výsledků.

Výrazné meze kluzu

Výrazná mez kluzu je vždy spojena s diskontinuitou závislosti napětí – prodloužení, vyvolanou odtržením zakotvených dislokací v Cottrellových atmosférách a následným nestabilním plastickým tokem, zpravidla popisovaným jako Lüdersova deformace. Popisovaná diskontinuita by měla být na tahovém diagramu jasně pozorovatelná a příslušná napětí, resp. deformace (prodloužení) korespondující s tímto mezním stavem lze z diagramu snadno odečíst.

V práci [4] je popisována zajímavá skutečnost plynoucí se vzájemného srovnání hodnoty horní meze kluzu, R_{eH} , měřené ve dvou laboratořích disponujících shodným zkušebním strojem, který zaručoval identický způsob snímání zatěžovacích sil i hodnot prodloužení v %. Rovněž zvolené zkušební podmínky nevybočovaly z povolených intervalů definovaných v normě EN 10002-1 a proto by se dalo předpokládat, že ani obdržené výsledky by neměly být výrazněji odlišné. Nicméně laboratoř, která jako zkušební rychlost do dosažení horní meze kluzu, R_{eH} , zvolila napěťovou rychlost $\dot{\epsilon} = 10 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$, tedy rychlost ležící cca v dolní čtvrtině předepsaného rozsahu ($\dot{\epsilon} \in \langle 6, 60 \rangle \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$) vykazovala podstatně nižší hodnoty zaznamenané R_{eH} a navíc větší rozptyl výsledků než druhá laboratoř, která jako zkušební rychlost zvolila deformační rychlost konvergující k horní povolené mezi ($\dot{\epsilon} = 2.5\text{E}-3 \text{ s}^{-1}$). Vzhledem ke skutečnosti, že definované podmínky zkoušení by měly u shodných materiálů garantovat dosažení výsledků měření v přijatelném pásmu rozptylu, nedá se říci, že by zjištěný rozdíl 89 MPa tento předpoklad splňoval.

Problém nekompatibility zkušebních rychlostí do dosažení meze kluzu, zadávaných jako napěťová nebo deformační rychlost, je základní příčinou odlišnosti presentovaných výsledků jak výrazných, tak i smluvních mezí kluzu presentovaných na shodných materiálech různými laboratořemi. Zpráva hodnotící mezinárodní MPZ ve zkoušce tahem za okolní teploty [4] jasně prokázala, že stanovené pásmo zkušebních rychlostí v normě EN 10002-1 je příliš široké a navíc, není ani v základech specifikovaná metoda, jak správně nastavit zvolenou zkušební rychlost.

Kromě zkušebních rychlostí literatura uvádí [8, 9], že velmi důležitým parametrem ovlivňujícím výraznou mez kluzu je tuhost rámu zkušebního stroje. Je prokázáno, že vyšší tuhost rámu stroje zpravidla vede k výraznějšemu napětí na horní mezi kluzu, R_{eH} . Tuhost rámu zkušebních strojů je tedy další příčinou rozdílných výsledků mezí kluzu presentovaných různými zkušebnami. Vliv tuhosti rámu je ale vždy nutno posuzovat společně s vlivy rychlosti zkoušení.

Je s podivem, že výsledky MPZ vykazují zpravidla menší rozptyl výsledků horních mezí kluzu, R_{eH} , u starších zkušebních strojů, které spojitě zaznamenávají závislost zatížení - prodloužení vahovým systémem s plynulým vyvažováním a mechanickým převodem pro registraci posunu příčnicku. Operátor odečítá zatížení na horní mezi kluzu buď přímo v průběhu zkoušky ze stupnice analogového ukazatele nebo po provedení zkoušky z diagramu. Moderní zkušební stroje s řídicím a vyhodnocovacím software vyhodnocují závislost napětí – deformace nejčastěji z jednotlivých elektronických pulzů v koordinátech zatěžující síly a prodloužení snímaných ze siloměrné cely a průtahoměru. Četnost těchto pulzů závisí na tzv. snímací rychlosti (sampling rate) udávající jejich počet v časové jednotce. Čím je vyšší, tím je záznam závislosti zatížení - prodloužení přesnější. Byla předložena hypotéza, že v případě nízké hodnoty snímací rychlosti nemusí být fenomén výrazné meze kluzu, spojený s uvolněním dislokací z Cottrellových atmosfér a jejich lavinovitým šířením rychlostí zvuku ve vybraných lokalitách objemu zkoušeného tělesa, vůbec zaznamenan nebo zaznamenan jen z části. Uvedenou okolnost je vhodné rovněž zahrnout do možných příčin rozdílných popisovaných výsledků u výrazných mezí kluzu.

Vzhledem k výše uvedenému rozboru příčin rozdílů výsledků výrazných mezi kluzu lze mezi materiálově nezávislé zdroje chyb ovlivňujících nejistoty typu „B“ uvažovat:

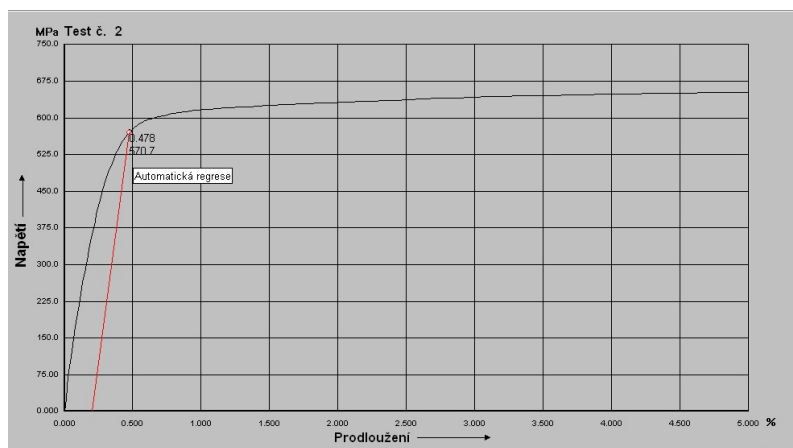
- rychlosti zkoušení a jejich nekompatibilita;
- tuhost rámu;
- snímací rychlost;
- souosost upnutí zkušební tyče v čelistech stroje;
- měření zatěžující síly, F ;
- stanovení počáteční plochy příčného průřezu zkoušené délky zkušební tyče, S_0 .

Přitom pouze poslední dva zdroje jsou uvedeny v současné platné normě EN 10002-1 [6].

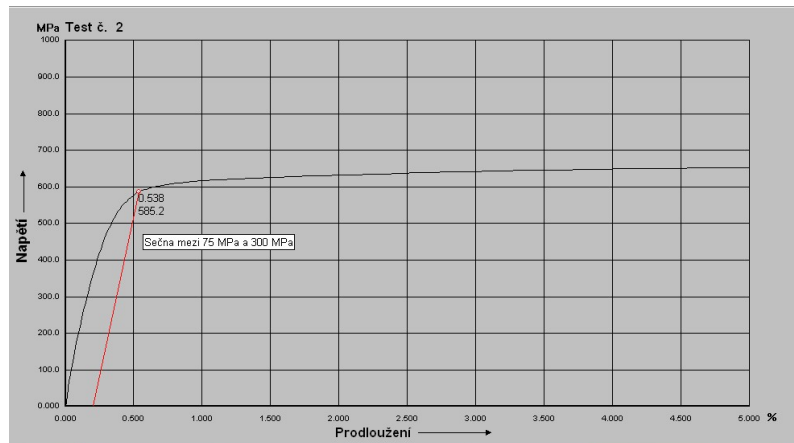
Smluvní meze kluzu

V případech, kdy tahový diagram nevykazuje výraznou mez kluzu je stanovení počátku makroplastického toku zkoušeného materiálu z diagramu obtížné. Empirické zkušenosti vedly k přijetí usance, že mezní napětí tento jev vyvolávající koresponduje s plastickou deformací pod zatížením, $e = 0.002$, případně s celkovou deformací pod zatížením, $e = 0.005$, nebo s trvalou (plastickou) deformací po odlehčení, $e = 0.001$. Ke stanovení definovaných deformací je zapotřebí použít průtahoměr a s ohledem na poměrně malé deformační stupně se požadují nejlépe průtahoměry třídy 0,5 a lepší.

Způsob stanovení smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ je založen na určení směrnice závislosti zatížení - prodloužení v oblasti pružných deformací, používané při zjišťování hodnoty modulu pružnosti, E . Software stroje monitoruje odpovídající dvojice dat zatížení - prodloužení se stanovenou frekvencí určenou snímací rychlostí a závislost je vyrovnávána nejčastěji metodou nejmenších čtverců, příp. metodou sečny nebo tečny v předem definované oblasti. Nejvhodnější metodu si může určit operátor. Následuje automatické vymezení definované deformace $e = 0.002$ pomocí průtahoměru, přičemž přesnost tohoto vymezení je poplatná jeho třídě. Vymezeným bodem deformace (prodloužení) proloží software přímku rovnoběžnou se stanovenou směrnicí, která diagram zatížení – prodloužení protne v diskretním bodě, jehož napěťová souřadnice nám určuje hledanou smluvní mez kluzu, $R_{p0,2}$. Diagramy na obrázcích 2, 3 demonstrují případy, kdy definovaná deformace byla vymezena s pomocí videoprůtahoměru třídy 1 a směrnice ve smyslu Hookova zákona byla v prvním případě určena metodou automatické regrese (vyrovnání metodou nejmenších čtverců) a ve druhém pak metodou sečny v oblasti napětí 75 a 300 MPa.



Obr. 2: Diagram se smluvní mezí kluzu $R_{p0,2}$ (E vyjádřen automatickou regresí) [10]



Obr. 3: Diagram se smluvní mezí kluzu $R_{p0,2}$ (E vyjádřen sečnou) [10]

Rozdíl ve stanovení smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ dosahuje $\Delta R_{p0,2} = 14.5$ MPa. Z předložených diagramů plyne, že v obou případech bylo postupováno korektně a přesto došlo k rozdílu výsledků.

Z uvedeného výkladu plyne, že kromě typu používaného průtahoměru, který musí zaručit správné měření odpovídajících změn malých pružných deformací korespondujících s hodnotami současně snímaného zatížení, je příčinou zdrojů chyb výsledků měření smluvních mezí kluzu, $R_{p0,2}$ a $R_{t0,5}$, též metoda linearizace počáteční části tahového diagramu v tahu, jejíž směrnice určuje, ve smyslu Hookova zákona, modul pružnosti v tahu, E . Nesprávné měření pružných deformací průtahoměrem spolu s chybnou linearizací v pružné oblasti závislosti zatížení – prodloužení vedou k hrubým chybám při stanovení smluvních mezí kluzu, zejména pak meze $R_{t0,5}$, kde příliš nízká hodnota E , vede ke stanovení této meze kluzu v pružné oblasti tahového diagramu.

Při ověřování smluvní meze kluzu při trvalém prodloužení v % po odlehčení, $R_{r0,1}$, je, z metodického hlediska měření této meze kluzu, hlavní příčina rozdílů naměřených výsledků spojována s použitým průtahoměrem pro měření zmíněné trvalé deformace.

Uvedený rozbor příčin rozdílů výsledků smluvních mezí kluzu ukázal, že mezi materiálově nezávislé zdroje chyb těchto vlastností musíme uvažovat ty, které byly uvedeny v případě výrazných mezí kluzu (i když snímací rychlost nehraje v tomto případě tak důležitou roli) a navíc pak ještě:

- vymezení (měření) stanovené deformace ($R_{p0,2}$, $R_{t0,5}$, $R_{r0,1}$);
- metodu linearizace pružné oblasti tahového diagramu ($R_{p0,2}$, $R_{t0,5}$).

Mez pevnosti

Z metodického hlediska hodnocení mechanických vlastností u tahové zkoušky za okolních teplot je praktický postup stanovení meze pevnosti v tahu, R_m , považován za nejjednodušší. Na rozdíl od hodnot mezí kluzu, jejichž rozbor byl uveden výše, vykazuje statistické hodnocení meze pevnosti R_m zpravidla nejnižší hodnotu výběrové směrodatné odchylky a tím i standardní nejistotu typu „A“ [4]. Ukazuje se rovněž, že tato napěťová charakteristika je nejmíň citlivá na rychlost zkoušení.

Za daných okolností je třeba při specifikaci materiálově nezávislých zdrojů chyb měření R_m determinujících příslušnou nejistotu typu „B“ především uvažovat:

- souosost upnutí zkušební tyče v čelistech stroje;
- měření zatěžující síly;
- nastavení rychlosti zkoušení;
- stanovení příčného průřezu zkušební tyče;

Celkové a plastické prodloužení v % měřené průtahoměrem při maximálním zatížení

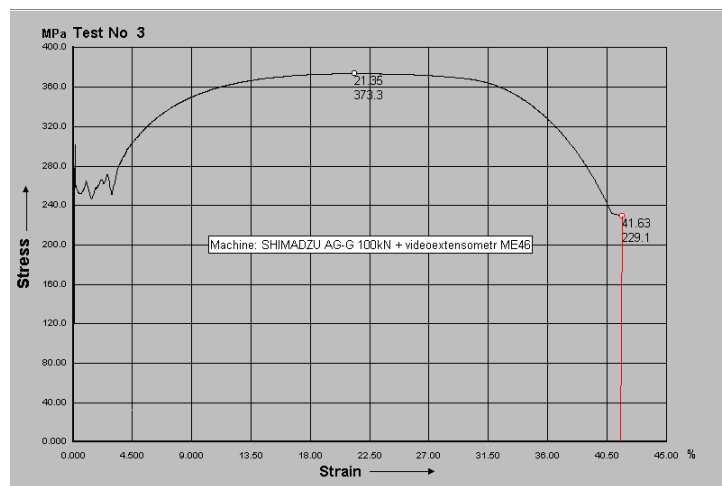
Na rozdíl od tažnosti, která běžně reprezentuje plastické vlastnosti zkoušených materiálů, je hodnota celkového prodloužení v % měřeného průtahoměrem při maximálním zatížení, A_{gt} , resp. hodnota plastického prodloužení v % měřeného průtahoměrem při maximálním zatížení, reálným ukazatelem zásoby plasticity. Tažnost, která se vyhodnocuje po přetržení zkušební tyče zahrnuje

i lokalizované prodloužení v místě krčku, při jehož tvorbě již došlo ke ztrátě plastické stability, a které se proto při hodnocení plasticity materiálu nedá prakticky využít. Lokální deformace spojená s tvorbou krčku není do hodnot A_{gt} a A_g zahrnována. Navíc je známo, jak bude ukázáno dále, že hodnoty A_{gt} a A_g jsou mechanické vlastnosti nezávislé na geometrické proporcionalitě zkušebních tyčí a tedy vždy navzájem bez problému srovnatelné.

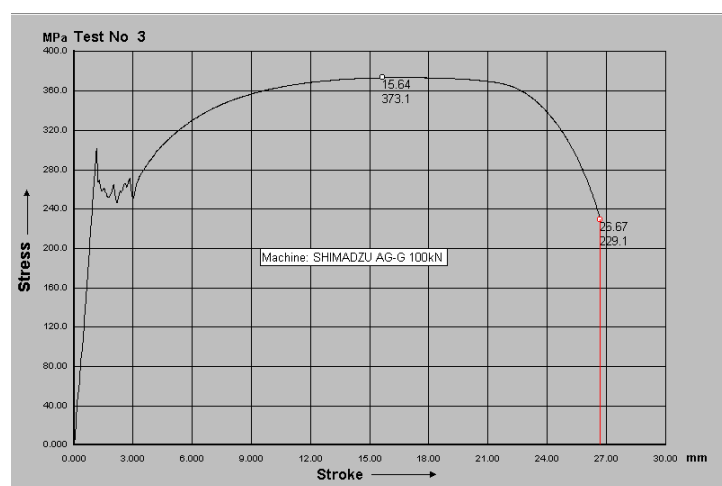
I když současně platná norma pro tahové zkoušky za okolní teploty, EN 10002-1, požaduje pro stanovení celkového prodloužení při maximálním zatížení měření průtahoměrem, mnohé laboratoře, dokonce i při mezilaboratorním porovnávání, určují tuto vlastnost z diagramu zatížení – posun příčnicku. Na základě mylného předpokladu se hodnota manuálně stanovené tažnosti vztáhne k maximálnímu posunu příčnicku odvozenému z diagramu a následně se hodnota A_{gt} vypočítá jako proporcionální část maximálního posunu, která v grafickém záznamu odpovídá maximálnímu zatížení. Následující diagramy na obr. 4, 5 demonstrují tuto chybnou, zjednodušenou metodu, která nabere do úvahu plastickou nestabilitu po vzniku krčku, kdy proporcionalita neplatí. Tedy, po výpočtu naznačenou metodou se obdrží:

$$A_{gt} = \frac{15,64}{26,67} \times 41,63 = 24,41 \text{ [%]}$$

na rozdíl od správné hodnoty $A_{gt} = 21,36 \text{ [%]}$, měřené průtahoměrem [4].



Obr. 4: Závislost napětí – prodloužení v % měřené průtahoměrem [4]



Obr. 5: Závislost napětí – posun příčnicku [4]

Výsledky hodnocení A_{gt} a A_g v provedených mezilaboratorních porovnáních ukazují, že tento „logický“, leč chybný přístup v odvození těchto vlastností je možno považovat za základní příčinu zjištěných odchylek.

Materiálově nezávislé zdroje chyb určujících nejistotu typu „B“ v tomto případě souvisí s:

- souosostí upnutí zkušební tyče v čelistech stroje;
- měřením prodloužení průtahoměrem během deformace při tahové zkoušce;
- stanovením maximální zatěžovací síly siloměrnou celou stroje;
- nastavením rychlosti zkoušení;
- vymezením měřené délky.

Snímací rychlost není v případě stanovení hodnot A_g a A_{gt} tak podstatná, jako v případě měření výrazné meze kluzu, s ohledem na poměrně široké plató křivky diagramu, ve kterém se zatěžovací maximum vyskytuje.

Tažnost

Tažnost, A , lze považovat za rutinní hodnotu plastických vlastností zjišťovaných tahovou zkouškou, která vyjadřuje trvalé prodloužení po lomu zkušební tělesa v procentech počáteční měřené délky L_0 dle vztahu:

$$A = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100 = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \quad (6)$$

S ohledem na nerovnoměrnou distribuci deformace v průběhu tahové zkoušky, kdy po dosažení maximálního napětí na mezi pevnosti, R_m , dochází ke ztrátě plastické stability, lze trvalé prodloužení po lomu vyjádřit jako:

$$\Delta L = \Delta L_h + \Delta L_u; [\text{mm}] \quad (7)$$

kde: ΔL_h - homogenní prodloužení do ztráty plastické stability závislé na počáteční měřené délce, L_0 , a součiniteli rovnoměrné podélné deformace, a ;

ΔL_u - nehomogenní prodloužení po ztrátě plastické stability soustředěné do oblasti krčku, které závisí na velikosti příčného průřezu tyče, S_0 [mm^2], a součiniteli nehomogenní deformace, b , tedy:

$$\Delta L_h = a \cdot L_0; [\text{mm}] \quad (8)$$

$$\Delta L_u = b \cdot \sqrt{S_0}; [\text{mm}] \quad (9)$$

Po dosažení (8) a (9) do vztahů (7) a (6) se tažnost může zapsat jako:

$$A = \left[a + b \cdot \frac{\sqrt{S_0}}{L_0} \right] \times 100 = A_h + A_u; [\%] \quad (10)$$

Hodnota homogenní tažnosti, A_h , je totožná s hodnotou A_g , (plastické prodloužení v % měřené průtahoměrem při maximálním zatížení):

$$A_g = \left(\frac{\Delta L_m}{L_e} - \frac{R_m}{m_E} \right) \times 100 \quad (11)$$

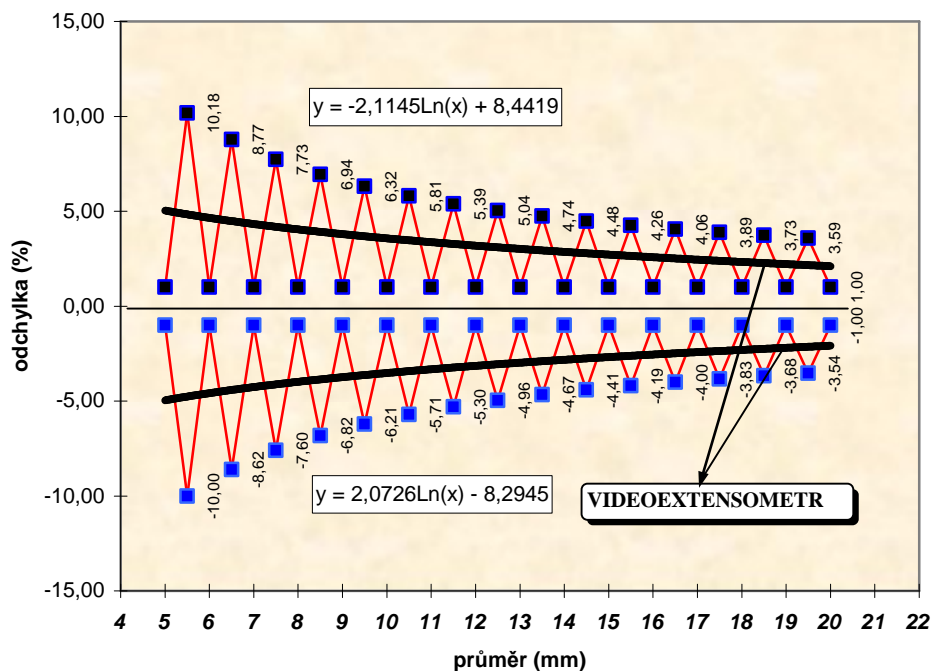
kde: L_e , L_m – měřená délka průtahoměru na počátku zkoušky a při maximálním zatížení [mm]; ΔL_m – prodloužení měřené průtahoměrem při maximálním zatížení [mm]; m_E – směrnice pružné části křivky „zatížení - prodloužení v % měřené průtahoměrem“ [MPa].

Hodnota A_g není ovlivněna faktorem geometrické proporcionality zkušební tyče a je tedy fyzikální charakteristikou materiálu, na rozdíl od hodnoty „nehomogenní“ tažnosti A_u . Z praktického hlediska je hodnota tažnosti po ztrátě plastické stability, A_u , naprosto nevyužitelná pro následující úvahy o technologické tvařitelnosti materiálů a zbytečně komplikuje vzájemné srovnávání výsledků tažnosti, jelikož vyžaduje geometrickou podobnost zkušebních tyčí, z níž resultuje podmínka jejich proporcionality vyjádřena vztahem pro výpočet měřené délky:

$$L_0 = k \cdot \sqrt{S_0}; [\text{mm}] \quad (12)$$

kde: k – konstanta proporcionality zkušebních tyčí.

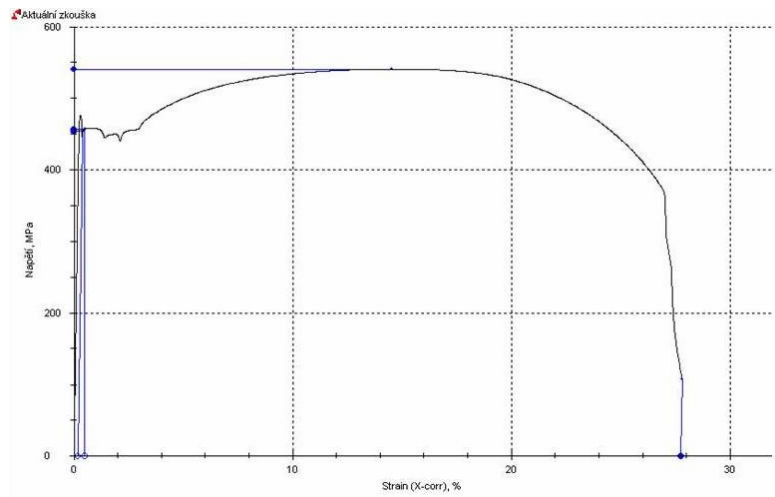
Takto definovaná měřená délka se zpravidla zaokrouhluje na nejbližší násobek 5 mm a pak vyznačuje s tolerancí $\pm 1\%$ na zkoušenou délku tyče, L_c . Vymezení měřené délky vycházející ze zaokrouhlení vypočtené měřené délky a následného vyznačení na zkoušené části je možno považovat za další zdroje chyb u výsledků měření tažnosti A . Sumarizace zaokrouhlení vypočtené měřené délky a $\pm 1\%$ tolerance jejího praktického vymezení ve smyslu uvedených požadavků vyvolává odchylky od proporcionality, které pro praktické průměry kruhových tyčí $\phi \in (5, 20)$ mm znázorňuje obrázek 6 pro případ měření prodloužení videoprůtahoměrem ME 46 Messphysik. Z obrázku je zřejmé, že tyto odchylky rostou s klesajícími průměry zkušebních tyčí.



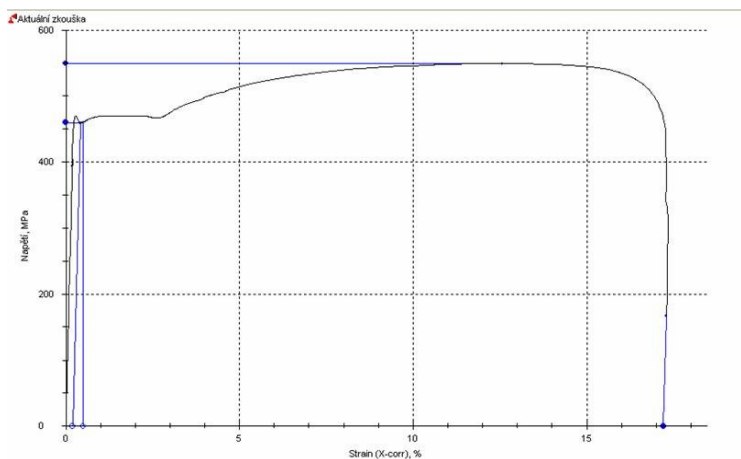
Obr. 6: – Závislost odchylky proporcionality na průměru zkušební tyče [10]

Další příčiny odlišnosti výsledků při měření tažnosti A souvisí s technikou měření konečné měřené délky po přetržení zkušební tyče. Jak dále bude vysvětleno, dochází k poměrně značným rozdílům v hodnotě odvozené tažnosti v případech, že měření L_u je provedeno ručně přiložením obou částí po lomu k sobě v ose a následným proměřením vzdálenosti původních rysek, které vymezovaly L_0 nebo, bude-li k měření L_u použitý průtahoměr monitorující změny prodloužení až do okamžiku porušení tyče. U ručního měření je si třeba uvědomit, že při značení měřené délky, L_0 , se na povrch zkušební tyče nanášejí délkové podíly, $L_p = L_0/n$ (kde n – celé číslo), a to po celé zkoušené délce L_c . Tento způsob pak po přetržení zkušební tyče umožní vždy lokalizovat „krček“ do středové oblasti, čímž vliv polohy krčku a následného lomu na výsledek měření hodnoty A je z velké části eliminován. Tak tomu ovšem není při měření tažnosti pomocí průtahoměru, kdy se počáteční měřená délka L_0 na tělo tyče nevynáší, ale přímo průtahoměrem vymezí pokud možno ve středové pozici zkoušené délky, L_c , zkušební tyče. V tomto případě je hodnota L_u a konečná hodnota tažnosti silně závislá na poloze krčku před porušením zkoušky.

Tahové diagramy na následujících obr. 7, 8, které byly získány při zkoušení shodného materiálu, demonstrují vliv polohy krčku na hodnotu tažnosti, A , v případech, kdy měření L_u bylo provedeno pomocí průtahoměru. Obr. 7 znázorňuje ideální případ, kdy při měření celkového trvalého prodloužení průtahoměrem se krček lokalizoval ve středu zkoušené délky tyče. Tažnost stanovená průtahoměrem je shodná s tažností stanovenou manuálně, tj. $A = 27,75\%$. Obr. 8 znázorňuje závislost napětí – prodloužení v % měřené průtahoměrem pro případ, kdy se krček, a následně i lom, lokalizuje v blízkosti břitu průtahoměru vymezujícího měřenou délku průtahoměru, L_e . Zjištěná hodnota tažnosti A je v tomto případě pouze $17,2\%$.



Obr. 7: Tahový diagram při lokalizaci krčku ve středové části zkušební tyče (prodloužení v % měřeno průtahoměrem)



Obr. 8: Tahový diagram při lokalizaci krčku u břítu průtahoměru vymezejícího délku L_e (prodloužení v % měřeno průtahoměrem)

Na rozdíl od lišících se hodnot tažnosti, A , lze konstatovat dobrou shodu u hodnot A_{gt} , která v obou případech dosahovala 14 %.

S ohledem na uvedené okolnosti, a zejména pak konstatování normy EN 10002-1 považující měření za platné pouze tehdy, když vzdálenost mezi lomem a nejbližší značkou měřené délky je nejméně jedna třetina počáteční měřené délky (L_0) nebo, bez ohledu na polohu lomu, když tažnost dosahuje nebo převyšuje předepsanou hodnotu, je určování nejistot měření u této mechanické vlastnosti při nejmenším diskutabilní. Hodnota konečné měřené délky, L_u , se obvykle stanoví měřením až po lomu zkušební tyče, kdy se obě porušené části k sobě přiloží tak, aby byly v těsném kontaktu a jejich podélné osy ležely v jedné přímce. Prodloužení po lomu, ΔL , dané rozdílem konečné a počáteční měřené délky, $L - L_0$ [mm], se musí stanovit s přesností na nejbližších 0,25 mm. Jestliže se k měření tažnosti používá průtahoměr, není zapotřebí vyznačovat na zkušební tyči měřenou délku. Průtahoměr ale měří celkové prodloužení v okamžiku porušení a za účelem obdržení tažnosti je proto nutno od této hodnoty odečíst odpovídající pružné prodloužení. Toto měření je zpravidla platné pouze tehdy, když k lomu dojde uvnitř měřené délky průtahoměru, L_e . Měření je platné, bez ohledu na polohu lomové plochy, jestliže tažnost převyšuje nebo alespoň dosahuje předepsanou hodnotu.

Tato mechanická vlastnost, tak jak je v současné normě pro tahové zkoušky pojata, je spíše kriteriální veličinou bez větších nároků na její přesnost a správnost. Materiálově nezávislé zdroje chyb při určování tažnosti tedy souvisí s:

- souosostí upnutí zkušební tyče v čelistech stroje;

- dodržení geometrické podobnosti zkoušených tyčí;
- vyznačením vypočtené a zaokrouhlené měřené délky na zkušební tyči;
- měřením měřené délky po přetržení zkušební tyče;
- nastavením rychlosti zkoušení;
- snímací rychlostí;
- lokalizací krčku.

Uvedené souvislosti jednoznačně preferují homogenní tažnost, vyjádřenou jako celkové, A_{gt} , nebo plastické, A_g , prodloužení v % měřené průtahoměrem při maximálním zatížení, jako základní veličinu reprezentující plastické vlastnosti zkoušeného materiálu.

3 Podmínky zkoušení a jejich rozbor

Vzhledem k příčinám rozdílů výsledků měření (zdrojům chyb ovlivňujících nejistoty typu „B“) mechanických vlastností zjišťovaných zkouškou tahem za okolních teplot v různých zkušebnách, které byly rozebrány v předchozí kapitole této práce, je zřejmé, že základní problém je nutno především hledat v nedokonalosti metodického postupu pro provedení této zkoušky. Je naprosto nepřípustné, aby podmínky normy umožňovaly u stejných zkoušených materiálů významné změny měřených výsledků, zejména pak mezi kluzu. Nicméně, snad každý vedoucí pracovník mechanické zkušebny se setkal s požadavkem závodních útvarů jakosti, aby „na mez kluzu zkušebna najížděla co nejrychleji“ z důvodu potřebného zvýšení této hodnoty. Vskutku, interval možných deformačních rychlostí zkoušení předepsaný v současné platné normě EN 10002-1 do dosažení meze kluzu, $\dot{\epsilon} \in \langle 2,5E-4; 2,5E-3 \rangle [s^{-1}]$, umožňuje značné „korekce“ této mechanické vlastnosti a u některých typů ocelí není problémem, při nastavení rychlosti deformace na horní mezi $2,5E-3 [s^{-1}]$, zvýšit hodnotu meze kluzu až o 40 až 50 MPa. S ohledem na uvedenou skutečnost je třeba se zamyslet, zda má pak vůbec smysl vést reklamační řízení z titulu nedodržení předepsaných mechanických vlastností zjišťovaných tahovou zkouškou a to zvláště z toho důvodu, že kromě předepsaného širokého intervalu možných podmínek zkoušení (v konkrétním případě pak rychlosti zkoušení) ovlivňují výsledky měření i strukturní nehomogenity, které se vyskytují i v nepečlivěji připravených materiálech. Za daných okolností může být každá tahová zkouška v různých zkušebnách v jistém smyslu unikátní a ve smyslu normy EN 10002-1 velmi obtížně reprodukovatelná.

Tato skutečnost je již dávno známá a revize normy EN 10002-1 je v současné době požadovaná zcela urgentně v mnoha vyspělých průmyslových státech zemí Evropské unie. V rámci unifikace světových a evropských norem bylo rozhodnuto používat ve všech zemích pro tahovou zkoušku za okolních teplot jednotnou normu ISO 6892, jejíž stávající verze je v podstatě identická s EN 10002-1. Z již uvedených důvodů byla proto v r. 2006 podrobena revizi. V současné době byla rozeslána členským zemím ve formě ISO/DIS 6892, [11], k závěrečným připomínkám.

V dalším textu této práce budou uvedeny návrhy úprav nejdůležitějších podmínek tahové zkoušky, se kterými souvisí reprodukovatelnost měřených výsledků, a které by měly být provedeny v každé zkušebně, aniž by byla porušena platnost stávající normy EN 10002-1. Diskutované úpravy se budou především týkat zkušebních rychlostí a v navazujících souvislostech též tuhosti rámu zkušebních strojů a metod stanovení modulu E .

Vliv rychlosti zkoušení do dosažení meze kluzu na výsledky tahové zkoušky

S odvoláním na kapitolu 10.2 normy EN 10002-1 definující volbu rychlostí zkoušení do dosažení meze kluzu R_p , R_t a R_{eH} je vidět, že uvedená norma předepisuje pro kovové materiály s hodnotou modulu pružnosti $E \geq 150000$ MPa interval rychlostí napětí:

$$\dot{\epsilon} \in \langle 6, 60 \rangle [\text{MPa/s}],$$

přičemž rychlost deformace v oblasti nad mezí pružnosti, R_E , do dosažení uvedených meze nesmí překročit hodnotu $\dot{\epsilon} = 2,5E-3 s^{-1}$. Požaduje-li se jako výsledek zkoušení pouze dolní mez kluzu, R_{eL} , nebo obě meze, R_{eL} a R_{eH} , pak zkušební rychlost je vyjádřena intervalem rychlostí deformace:

$$\dot{\epsilon} \in \langle 2,5E-4, 2,5E-3 \rangle; [s^{-1}]$$

přičemž v žádném případě nesmí rychlost napětí v elastické oblasti překročit hodnotu $\dot{\epsilon} = 60$ MPa/s. V plastické oblasti tahového diagramu nad mezí kluzu je předepsána rychlost

zkoušení ve formě rychlosti deformace, jejíž horní mez je $\dot{\epsilon} = 8.0E-3 \text{ s}^{-1}$. Tabulka 1 uvádí pro jednotlivé oblasti tahového diagramu definované typy zkušebních rychlostí dle norem ČSN EN 10002-1 a ASTM E8M, jejich konkrétní hodnoty a nutné prostředky pro jejich nastavení.

Tabulka 1: Hodnoty definovaných typů zkušebních rychlostí dle norem ČSN EN 10002-1 a ASTM E8M pro tahovou zkoušku ve vybraných oblastech diagramu a prostředky k jejich nastavení; [12]

Norma	Oblast diagramu	Zkušební rychlost				Prostředky nastavení
		$\dot{\epsilon}_{\min}$	$\dot{\epsilon}_{\max}$	$\dot{\epsilon}_{\min}$	$\dot{\epsilon}_{\max}$	
		[s ⁻¹]	[s ⁻¹]	[MPa/s]	[MPa/s]	
EN 10002-1	0 - R _{eH}			6	60	Indikátor času a síly
	0 - R _{eL}	2.5 E-4*	2.5 E-3*			Průtahoměr, záznam $\sigma - e$, indikátor času
	0 - R _{p0,2}			6	60	Indikátor času a síly
	0 - R _{t0,5}			6	30	Indikátor času a síly
	R _{e,p,t} - R _m		2.5 E-3			Průtahoměr, záznam $\sigma - e$, indikátor času
	R _m - lom		8.0 E-3			Průtahoměr, záznam $\sigma - e$, indikátor času
ASTM E8M	0 - R _{e,p,t}				12	Indikátor času a síly
	R _{e,p,t} - lom		1.0 E-2			Průtahoměr, záznam $\sigma - e$, indikátor času

* Pozn.: Nelze-li deformační rychlost nastavit přímo, definuje se deformační rychlost jako pro oblast tahového diagramu 0 - R_{eH}.

Pro splnění definovaných podmínek rychlosti zkoušení, resp. kombinace a vzájemné zastupitelnosti rychlosti deformace a rychlosti napětí v povolených mezích, je nutná jejich vzájemná kompatibilita [12]. Z experimentálních údajů tahových zkoušek konstrukčních uhlíkových ocelí plyne, že interval celkových smluvních deformací pod zatížením, korespondujících s horní mezí kluzu, R_{eH}, lze zpravidla vyjádřit jako $\epsilon_{ReH} \in (0.001, 0.004)$; [-]. Při zvolené rychlosti deformace, $\dot{\epsilon}$, lze pak čas do okamžiku dosažení deformace, ϵ_{ReH} , a tedy horní meze kluzu, R_{eH}, vyjádřit jako:

$$t_{ReH} = \frac{\epsilon_{ReH}}{\dot{\epsilon}}; [s] \quad (13)$$

a s jeho pomocí pak vypočítat rychlost napětí do meze kluzu, R_{eH}:

$$\dot{\epsilon} = \frac{R_{eH}}{t_{ReH}}; \quad (14)$$

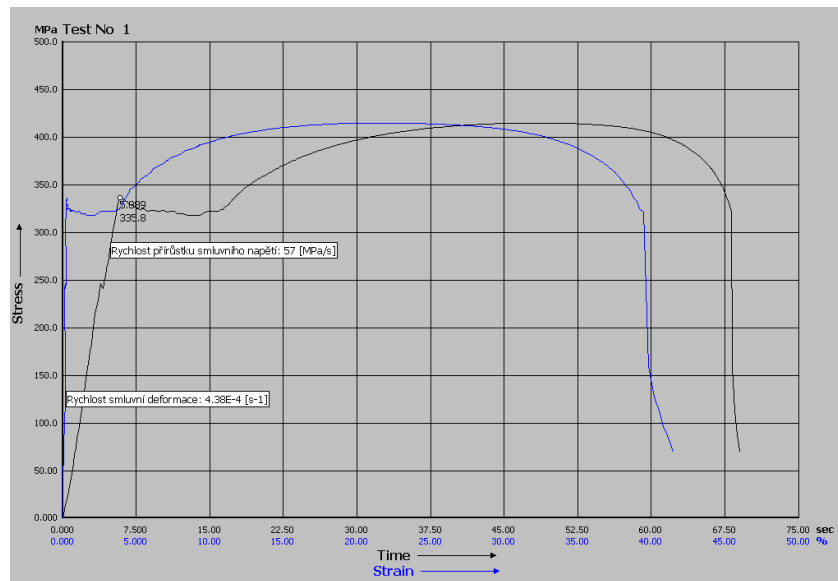
Na základě uvedených předpokladů byla provedena analýza vzájemné korespondence mezi zadanými limitními hodnotami rychlosti deformace, $\dot{\epsilon}$, a z nich resultujících rychlostí napětí, $\dot{\epsilon}$, pro konstrukční uhlíkovou ocel s průměrnou mezí kluzu R_{eH} ≈ 340 MPa, vyskytující se při celkovém (pružném i plastickém) prodloužení 0.253 % ($\epsilon_{ReH} \approx 0.00253$). Výsledky zjištěného nesouladu demonstruje tabulka 2.

Tabulka 2: Vypočítané hodnoty rychlosti napětí, $\dot{\sigma}$, ze zadaných hodnot rychlostí deformace, $\dot{\epsilon}$, pro konstrukční uhlíkovou ocel s průměrnou hodnotou meze kluzu, $R_{eH} \gg 340$ MPa; [12]

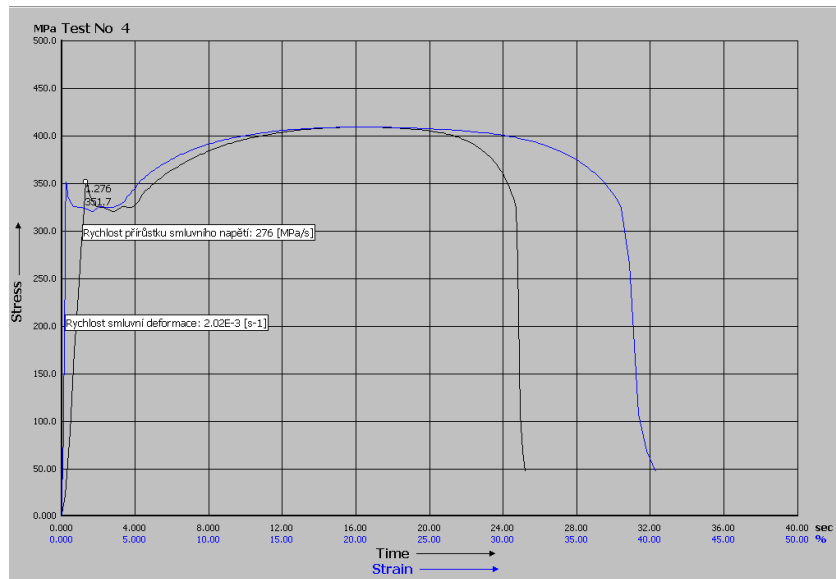
$\dot{\epsilon}$ [s ⁻¹]	$e_{ReH} = 0.00253$	
	$t_{ReH} = e_{ReH} / \dot{\epsilon}$	$\dot{\sigma}_{ReH} = R_{eH} / t_{ReH}$
	[s]	[MPa/s]
2.5E-4	10	34
4.44E-4	5,7	60
2.5E-3	1	340

Z tabulky 2 je zřejmé, že kompatibilita mezi normou požadovanými hodnotami $\dot{\sigma}$ a $\dot{\epsilon}$ je splněna pouze v pásmu pro $\dot{\epsilon} \in (2.5E-4, 4.44E-4)$ [s⁻¹], ve kterém jsou odpovídající rychlosti napětí v pásmu $\dot{\sigma} \in (34, 60)$ [MPa/s].

Správnost předložené úvahy byla doložena experimentálně tahovou zkouškou na universálním tahovém stroji SHIMADZU AG-G100 kN, která byla provedena na plochých zkušebních tyčích shodné jakosti oceli. Obrázek 9 demonstruje případ, kdy mez kluzu $R_{eH} = 335.8$ MPa byla dosažena při celkové deformaci $e = 0.00258$ [-] v čase $t_{ReH} = 5.889$ [s]. Nastavená rychlost deformace $\dot{\epsilon} = 4.38E-4$ [s⁻¹] koresponduje s rychlostí napětí $\dot{\sigma} = 57$ [MPa/s].



Obr. 9: Závislosti napětí – čas a napětí – deformace získané při rychlosti deformace $4.38E-4$ [s⁻¹] [12]



Obr. 10: Závislosti napětí – čas a napětí – deformace získané při rychlosti deformace $2.02E-3 [s^{-1}]$; [12]

Obrázek 10 znázorňuje případ, kdy se skutečná rychlost deformace blíží horní přípustné mezi $\dot{\epsilon} = 2,5E-3 s^{-1}$. Je zřejmé, že resultující rychlost napětí $\dot{\sigma} = 276 \text{ MPa/s}$ odpovídá výše uvedeným teoretickým předpokladům a výrazně převyšuje povolenou mez uvedenou v normě. Z obrázků je rovněž patrný vliv rychlosti zkoušení na hodnotu výrazné meze kluzu R_{eH} , která ve sledovaných případech vzrostla z hodnoty 336 MPa ($\dot{\epsilon} = 4,38E-4 s^{-1}$) na 352 MPa ($\dot{\epsilon} = 2,02E-3 s^{-1}$). Provedené experimenty na shodném typu oceli v pásmu deformačních rychlostí $\dot{\epsilon} \in \langle 2.31E-4, 2.02E-3 \rangle$ prokázaly, že hodnoty mezí kluzu, odpovídající zmíněnému pásmu rychlostí deformace, leží v intervalu $R_{eH} \in \langle 321, 364 \rangle \text{ MPa}$.

Nelze vyloučit případ, kdy při měření výrazné meze kluzu na shodném materiálu nastaví jedna zkušebna při mezilaboratorním kruhovém testu rychlost zkoušení jako horní mez rychlosti deformace ($2.5 E-3 s^{-1}$) a druhá pak jako spodní mez rychlosti napětí (6 MPa/s). Obě zkušebny přitom respektují normou povolené pásmo rychlostí zkoušení. Nicméně, přepočtený rozdíl rychlostí mezi oběma zkušebnami, vyjádřený např. rychlostí napětí, dosahuje hodnoty $\Delta\dot{\sigma} = 334 \text{ MPa/s}$. S ohledem na uvedený vliv zkušebních rychlostí na hodnoty výrazné meze kluzu pak není překvapující, že zdaleka největší rozptyly jsou u mezilaboratorních porovnávacích testů zkoušek tahem registrovány právě při hodnocení těchto výsledků [5, 13].

Uvedený rozpor musí každá zkušebna řešit ve svých zkušebních postupech tak, aby podmínky definic zkušebních rychlostí ve smyslu normy EN 10002-1 byly dodrženy. V praxi k naznačenému problému přistupuje i komplikace při nastavování zvolené rychlosti zkoušení u tahových strojů různých generací. Otázkami praktického nastavení zkušebních rychlostí se norma EN 10002-1 vůbec nezabývá. U současných univerzálních strojů pro zkoušky tahem umožňuje řídicí software stroje přímé nastavení rychlosti zkoušení buď ve formě napěťové rychlosti (rychlost přírůstku smluvního napětí) nebo deformační rychlosti (rychlost přírůstku smluvní deformace). Práce [12] však upozorňuje na odlišnosti „skutečná vs. nastavená rychlost“ s ohledem na regulační zpoždění a setrvačnost mechanických částí zkušebního stroje a preferuje nastavování rychlostí zkoušení přes rychlost posunu příčnicku, která není v regulační vazbě. Odvození pro správné praktické nastavení rychlostí pomocí rychlosti posunu příčnicku uvádí [14] a vychází z následujících předpokladů:

Ø Ze zadané hodnoty $R_{mk}^{*})$ (viz dodací list) se vypočítá čas, t_{mk} , nutný k jejímu dosažení:

$$t_{mk} = \frac{R_{mk}}{\dot{\epsilon}}; [s];$$

^{*)} Obecné značení meze kluzu, R_{mk} , slouží dále pro matematické odvození a nekoresponduje s normou ČSN EN 10002-1.

- Ø Odpovídající rychlost deformace do dosažení zadané hodnoty R_{mk} :

$$\dot{\epsilon}_{mk} = \frac{e_{mk}}{t_{mk}} = \frac{0,005}{\frac{R_{mk}}{\dot{\epsilon}}} = \frac{0,005 \cdot \dot{\epsilon}}{R_{mk}}; [s^{-1}^{**});$$

- Ø Odpovídající rychlost posuvu příčnicku tahového stroje, v_p [mm/min]:

V prvním přiblížení platí:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_p}{L_c \cdot 60}; \dot{\epsilon}_{mk} = \frac{v_p}{L_c \cdot 60}; [s^{-1}]$$

a tedy:

$$v_p = \dot{\epsilon}_{mk} \cdot L_c \cdot 60 = \frac{0,3 \cdot L_c \cdot \dot{\epsilon}}{R_{mk}}; [mm/min], \text{ kde}$$

L_c – zkoušená délka zkušebního tělesa.

- Ø Hledá-li se řešení splňující maximální povolenou rychlost zkoušení pro $\dot{\epsilon}_{max} = 60$ [MPa/s], pak:

$$v_p = \frac{18 \cdot L_c}{R_{mk}}; [mm/min].$$

- Ø Hledá-li se řešení splňující minimální povolenou rychlost zkoušení pro $\dot{\epsilon}_{max} = 6$ [MPa/s], pak:

$$v_p = \frac{1,8 \cdot L_c}{R_{mk}}; [mm/min].$$

Aby byly splněny podmínky nepřekročení maximální deformační rychlosti $\dot{\epsilon} < 2,5E-3$, [s⁻¹], pak:

- Ø Čas korespondující s maximální rychlostí deformace

$$\dot{\epsilon}_{mk} = 2,5E-3 [s^{-1}]:$$

$$t_{mk} = \frac{e_{mk}}{\dot{\epsilon}_{mk}} = \frac{0,005}{2,5E-3} = 2 [s];$$

- Ø Při současném splnění podmínek $\dot{\epsilon}_{max} = 60$ [MPa/s] a $\dot{\epsilon} < 2,5E-3$ [s⁻¹] nesmí mez kluzu klesnout pod hodnotu:

$$R_{mk} = \dot{\epsilon}_{max} \cdot t = 60 \cdot 2 = 120 [MPa].$$

- Ø Při současném splnění podmínek $\dot{\epsilon}_{max} = 6$ [MPa/s] a $\dot{\epsilon} < 2,5E-3$ [s⁻¹] nesmí mez kluzu klesnout pod hodnotu:

$$R_{mk} = \dot{\epsilon}_{max} \cdot t = 6 \cdot 2 = 12 [MPa].$$

Ve všech ostatních kombinacích zvolených rychlostí $\dot{\epsilon}$ a $\dot{\epsilon}_{max}$ jsou výše uvedené podmínky splněny.

Na základě předloženého odvození lze sestavit tabulku nastavení správných hodnot rychlostí zkoušení, která splňuje požadavky normy EN 10002-1 (viz tabulka 3). Způsob navrženého odvození včetně řešeného příkladu navrhuje ČNI uvést v příloze revidované normy ISO 6892, [11, 12].

***) Značení celkové smluvní deformace, e_{mk} , a rychlosti $\dot{\epsilon}_{mk}$ slouží dále pro matematické odvození a nekoresponduje s normou ČSN EN 10002-1. Hodnota e_{mk} korespondující s R_{mk} se uvažuje v relaci s $R_{t0,5}$, tedy $e_{mk} = 0,005 [-]$.

Tabulka 3: Nastavení správných hodnot rychlosti zkoušení

Zkušební rychlost posunu příčnicku	Výpočetní vztah	Korespondující $\dot{\epsilon}$ [MPa/s]; $\dot{\epsilon}$ [s ⁻¹]	Poznámka
Vypočtená [mm/min] (do dosažení R_{mk})	$v_p = \frac{k \cdot L_c}{R_{mk}}$; $k \in \langle 1,8; 18 \rangle$	$\dot{\epsilon} \in \langle 6; 60 \rangle$	Platné pro nominální hodnotu meze kluzu zkoušené zkušební tyče $R_{mk} \geq 120$ MPa
Maximální [mm/min] (do dosažení R_{mk})	$v_p = \frac{18 \cdot L_c}{R_{mk}}$	$\dot{\epsilon} = 60$	Platné pro nominální hodnotu meze kluzu zkoušené zkušební tyče $R_{mk} \geq 120$ MPa
Minimální [mm/min] (do dosažení R_{mk})	$v_p = \frac{1,8 \cdot L_c}{R_{mk}}$	$\dot{\epsilon} = 6$	Platné pro nominální hodnotu meze kluzu zkoušené zkušební tyče $R_{mk} \geq 120$ MPa
Vypočtená [mm/min] (za mezí R_{mk} do dosažení R_m)	$v_p = k \cdot L_c$ $k \leq 0,48$	$\dot{\epsilon} \leq 8,0E-3$	
Maximální [mm/min] (za mezí R_{mk} do dosažení R_m)	$v_p = 0,48 \cdot L_c$	$\dot{\epsilon} = 8,0E-3$	
<p>Postup nastavení a výpočtu rychlosti zkoušení:</p> <ul style="list-style-type: none"> Ø Z dodacího listu se zjistí nominální hodnota meze kluzu R_{mk} [MPa]; Ø Změří se zkoušená délka zkušební tělesa L_c [mm]; Ø Zjištěné hodnoty R_{mk} a L_c se dosadí do vztahu $v_p = \frac{k \cdot L_c}{R_{mk}}$, přičemž jako konstanta k se volí libovolná hodnota od 1,8 do 18; Ø Vypočtená hodnota posunu příčnicku, v_p [mm/min] se zadá do příslušného dialogového okna software stroje; Ø V případě, že po dosažení meze kluzu bude žádoucí přepnutí stroje na vyšší druhou rychlost, vypočte se druhá rychlost ze vztahu $v_p = k \cdot L_c$ (jako konstanta k se volí libovolná hodnota do 0,48), která se zadá do příslušného dialogového okna software stroje, spolu s okamžikem přepnutí (např. po posunu 0,5 mm). 			

Problém tuhosti rámu zkušebního stroje a jeho vlivu na výsledky tahových zkoušek

Zmíněný problém bezprostředně souvisí s výše diskutovanou rychlostí zkoušení a projevuje se zejména v presentovaných hodnotách výrazných mezí kluzu. Čím je rychlost zkoušení a tuhost rámu vyšší, tím markantněji se projeví maximum na výrazné mezi kluzu, a tím vyšší zatížení a resultující napětí bude potřebné k odtržení dislokací z Cottrellových atmosfér. U vysoce tuhých strojů se občas vyskytne i případ, kdy R_{eH} převyší mez pevnosti u zkoušeného materiálu.

U „měkkých“ strojů se spolu se zkušebními tělesy deformuje i rám a jev výrazné meze kluzu nemusí být tak zřetelný. Je popisován případ mezilaboratorního zkoušení měkké uhlíkové oceli, kdy 2 zkušební z 63 zúčastněných vůbec nezachytily výraznou mez R_{eH} a na místo R_{eH} ve výsledcích presentovaly smluvní mez $R_{p0,2}$ [4].

Za daných okolností se pro objektivní porovnávání dosažených výsledků, zejména pak zmíněné výrazné meze kluzu R_{eH} , doporučuje do zkušebních protokolů uvádět, kromě hodnoty zkušební rychlosti, i hodnotu tuhosti stroje, na kterém byly dané výsledky měřeny. Druhou možností je pak objektivně doporučit pásmo možných tuhostí zkušebních strojů, které zaručí, že dosažené výsledky se budou nacházet v rozumném pásmu spolehlivosti. Nevýhodou těchto požadavků je nutnost poměrně obtížného metrologického ověření tuhosti zkušebních strojů, které vychází z přesného měření malých pružných deformací. Možnost přibližného odhadu tuhosti zkušebního stroje uvádějí práce [8, 9, 15] a vycházejí z porovnání deformace vycházející z posuvu příčnicku a deformace měřené na zkušebním tělese průtahoměrem. V případě ideálně tuhého stroje se veškerá

deformace, e , koncentruje do zkušební tělesa a jeho posuv, X_{id} , se vyjádří jako součin této deformace a zkoušené délky, L_c , zkušební tyče, tedy:

$$X_{id} = e \times L_c; [\text{mm}] \quad (15)$$

S ohledem na elastickou poddajnost reálných strojů je posuv příčnicku, X , vždy větší než X_{id} a rozdíl mezi X a X_{id} definuje posuv vztažený k elastické poddajnosti stroje, X' ; tedy:

$$X' = X - X_{id}; [\text{mm}] \quad (16)$$

Tuhost stroje, C_M , se pro dané konstantní zatížení, F , vyjádří jako:

$$C_M = \frac{F}{X'}; [\text{N/mm}] \quad (17)$$

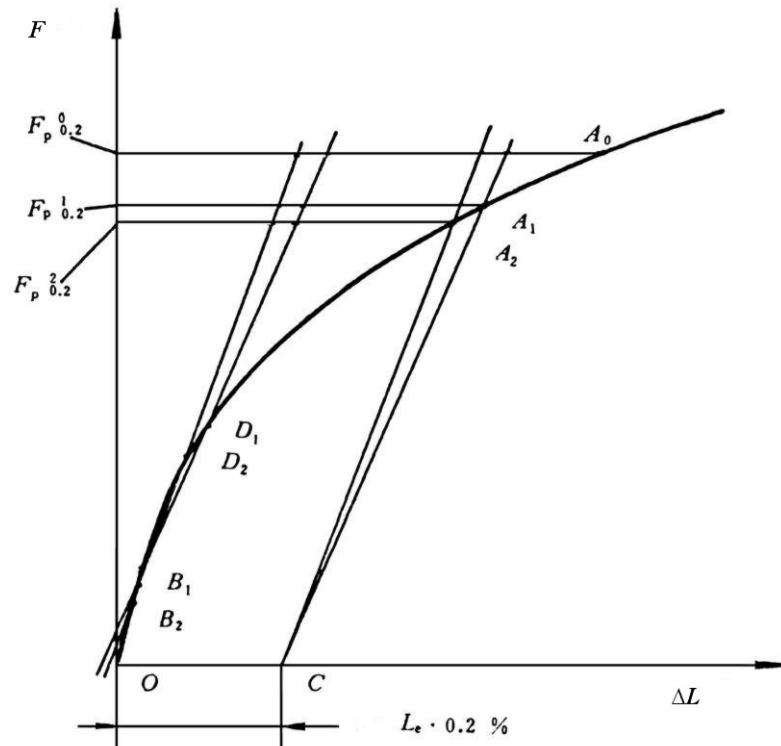
a její reciproká hodnota reprezentuje elastickou poddajnost. Přípravný výbor ISO TC 164 SC 1 pověřený revizí normy ISO 6892 uvažuje zařadit naznačený postup do přílohy revidované normy.

Problémy odhadu modulu pružnosti v tahu, E

I když stanovení modulu pružnosti v tahu, E , ze závislosti zatížení – prodloužení je možno považovat za přibližné řešení, hraje velmi významnou úlohu při určování smluvních mezí kluzu a hodnoty tažnosti, jak bylo objasněno v předchozích kapitolách této práce.

Jak již bylo uvedeno, kromě typu používaného průtahoměru, který musí zaručit správné měření odpovídajících změn malých pružných deformací korespondujících s hodnotami současně snímaného zatížení, je příčinou zdrojů chyb výsledků měření smluvních mezí kluzu, $R_{p0,2}$ a $R_{t0,5}$, též metoda linearizace počáteční části tahového diagramu v tahu, jejíž směrnice určuje, ve smyslu Hookova zákona, modul pružnosti v tahu, E . Nesprávné měření pružných deformací průtahoměrem spolu s chybnou linearizací v pružné oblasti závislosti zatížení – prodloužení vedou k hrubým chybám při stanovení smluvních mezí kluzu, zejména pak meze $R_{t0,5}$, kde příliš nízká hodnota E , posouvá tuto mez kluzu do pružné oblasti tahového diagramu. To je důvodem, proč ke stanovení smluvních mezí kluzu je zapotřebí používat vysoce přesné průtahoměry, které nenačítají inkrementální změny deformací při případných prokluzech břitů, ke kterým může docházet při odpadávání okují ze zkušební tyče v prvních fázích zkoušky. Pokud to zkušební stroj umožní, je vždy vhodné zadat do průběžných výpisů výsledků též hodnotu modulu E , z jejíž velikosti (očekávané pásmo je 190 až 220 GPa) lze v prvním přiblížení identifikovat, zda naměřenou hodnotu smluvní meze kluzu bude možno považovat za správnou. Jak bylo rovněž ukázáno, vede k různým výsledkům smluvních mezí kluzu rozdílný způsob použité linearizace v oblasti pružných deformací. Z tohoto hlediska se pracovníci zkušeben z různých zemí přimlouvají za zavedení jednotného způsobu linearizace, který by rozdíl ve výsledcích vyvolané touto příčinou eliminoval. Velmi vhodný způsob iterace používaný na čínských univerzitách, který bude uveden v příloze revidované normy ISO 6892 [11], vychází ze schématu na obr. 11:

- Ø Na počáteční části křivky zatížení, F , prodloužení, ΔL_e , ve které se předpokládá výskyt smluvní meze kluzu, $R_{p0,2}$, se náhodně zvolí bod A_0 . Tomuto bodu odpovídá na ose zatížení hodnota $F_{p0,2}^0$, o které se předpokládá, že reprezentuje zatížení na mezi kluzu, $F_{p0,2}$.
- Ø Současně se na křivce diagramu definují dva body B_1 a D_1 , s korespondujícím zatížením, $0,1 F_{p0,2}^0$ a $0,5 F_{p0,2}^0$, a těmito body se proloží přímka B_1D_1 .



Obr. 11: Iterační metoda stanovení smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ a modulu E [11]

- Ø Ve vzdálenosti OC na ose prodloužení, která odpovídá 0,2% prodloužení ($L_e \times 0,002$), se vede rovnoběžka s přímkou B_1D_1 , která protne křivku diagramu v bodě A_1 .
- Ø Pokud je bod A_1 totožný s bodem A_0 , pak zatížení $F_{p0,2}^0$ je zatížení na smluvní mezi kluzu $F_{p0,2}$, pokud ne, celá procedura se opakuje a na ose zatížení se odečte nová následující hodnota $F_{p0,2}^1$, o které se předpokládá, že representuje zatížení na mezi kluzu, $F_{p0,2}$.
- Ø Současně se na křivce diagramu definují další dva body B_2 a D_2 , s korespondujícím zatížením, $0,1 F_{p0,2}^1$ a $0,5 F_{p0,2}^1$, a těmito body se proloží přímkou B_2D_2 , atd.
- Ø Iterační procedura pokračuje tak dlouho, až $A_n = A_{n-1}$. Korespondující zatížení F_n představuje hledané zatížení na smluvní mezi kluzu $F_{p0,2}$, která se dopočítá podělením této hodnoty počáteční průřezovou plochou zkušebního tělesa.
- Ø Směrnice přímky B_nD_n representuje hodnotu modulu pružnosti E .

Naznačená iterační metoda je snadno využitelná zejména u automatizovaných zkušebních systémů a kromě zmíněných smluvních mezí kluzu je aplikovatelná pro stanovení tažnosti v případě, kdy je určovaná pomocí průtahoměru. Spolu s odpovídajícím průtahoměrem přispívá významnou měrou k odstranění rozdílů mezi uváděnými výsledky měření.

Problémy stanovení tažnosti, A

Smysl hodnocení tažnosti, jako ukazatele tvařitelnosti zkoušeného materiálu, byl podroben oprávněné kritice. Hodnocení této vlastnosti zjišťované tahovou zkouškou mělo význam u starých zkušebních strojů, které nedisponovaly vhodnými průtahoměry s dostatečným zdvihem (měřicím posunem) a bylo proto odkázáno na ruční způsob. Rovněž byly podrobně uvedeny důvody, proč by měla být jako ukazatel plasticity preferována homogenní tažnost vyjádřena celkovým a plastickým prodloužením, A_{gt} , A_g , v % měřeným průtahoměrem při maximálním zatížení.

- Ø Na rozdíl od hodnot tažnosti, A , jsou hodnoty A_g a A_{gt} „čistými“ vlastnostmi zkoušeného materiálu, které nezávisí na tvaru a rozměrech zkušebních těles;

- Ø Naměřené hodnoty jsou snadno a přesně mezi sebou porovnatelné, bez nutnosti přepočtů a používání pomocných nomogramů respektujících různé měřené délky, L_0 (převod tažnosti zjištěné zkouškou dle ASTM a její srovnání s tažností měřenou dle normy EN);
- Ø A_g a A_{gt} vyjadřují skutečnou zásobu plastičnosti zkoušených materiálů, jelikož nezahrnují stádium plastické deformace při tahové zkoušce po ztrátě plastické stability, která začíná tvorbou krčku, a která nemá žádný praktický význam. Při tvářecím procesu za studena je naopak deformační stádium, kdy vzniká lokální zužování materiálu, např. při lisování, naprosto nežádoucí a je za hranicí hodnocené mezní technologické tvařitelnosti.;
- Ø Měření A_g a A_{gt} umožňuje plnou automatizaci provádění tahových zkoušek. Zcela odpadá nutnost manuálního stanovení v těch případech, kdy porušení zkoušky se realizuje mimo vymezenou oblast měřené délky průtahoměru, jak je tomu v případě určování hodnot tažnosti A .

Z uvedených důvodů by měly být především změněny výrobní normy tak, aby mezi základní vlastnosti charakterizující jakost a užité vlastnosti výrobků, které popisují, byla místo tažnosti požadována hodnota A_g , resp. A_{gt} . Argument, že pro stanovení výše uvedených vlastností je nutný průtahoměr nelze brát jako omezující, jelikož taková zkušebna, která by ke zjišťování mechanických vlastností tahovou zkouškou nevyužívala průtahoměr snad v současnosti neexistuje.

Zavedení této úpravy významnou měrou přispěje ke zlepšení hodnocení plastických vlastností zkoušených materiálů tahovou zkouškou, jakož i zvýšením správnosti a přesnosti popisovaných výsledků.

4 Závěry

Základním cílem této práce byla konstruktivní kritika metodiky provádění jedné z nejdůležitějších zkoušek mechanických vlastností, zkoušky tahem za okolních teplot ve vztahu k variabilitě jejich výsledků. Byly rozebírány základní hlediska hodnocení dosažených výsledků zkoušek z pozic nejistot měření a dalších pojmů matematické statistiky. Dosažené výsledky lze v zásadních rysech charakterizovat následovně:

- Ø Byly definovány a rozebrány pojmy související s hodnocením výsledků zkoušek tahem vycházející z nejistot měření, které byly vysvětleny na praktických příkladech hodnocení výsledků mezilaboratorního porovnávání. Byly vysvětleny pojmy správnost, přesnost, opakovatelnost a reprodukovatelnost, které přímo souvisely s nejistotami měření.
- Ø Byly hodnoceny příčiny rozdílů výsledků napětových a deformačních charakteristik zjišťovaných tahovou zkouškou. U výrazných i smluvních mezi kluzu je nejdůležitějším aspektem v tomto smyslu rychlost zkoušení, spolu s tuhostí zkušebních strojů. Další příčina mající vliv na výsledky popisovaných mezi kluzu hypoteticky souvisí s nastavením rychlosti snímání bodů „zatížení – prodloužení“, které následně zpracovává a vyhodnocuje software stroje. V neposlední řadě ovlivňují výsledky smluvních mezi kluzu také zvolené metody linearizace závislosti „napětí – deformace“ v pružné oblasti tahového diagramu.
- Ø Byla objasněna úloha homogenní tažnosti, kterou norma vyjadřuje ve formě celkového nebo plastického prodloužení v procentech (A_{gt} , A_g) při maximálním zatížení, která se měří průtahoměrem. Jedná se o vlastnost nezávislou na geometrii zkušebních tyčí, která, na rozdíl od tažnosti A , reprezentuje skutečnou míru plasticity zkoušených materiálů.
- Ø Vyjadřování plastických vlastností formou tažnosti v procentech bylo podrobena kritice. Tato vlastnost, tak jak je v normě EN 10002-1 vyjádřena, není schopna splnit nároky na minimalizaci nejistot měření. Byly poukázána na možné disproporce ve výsledcích po manuálním hodnocení tažnosti A po hodnocení pomocí průtahoměru.
- Ø Byly diskutovány požadavky na nastavení rychlosti zkoušení v jednotlivých oblastech tahové zkoušky dle norem EN 10002-1 a ASTM E8M. Bylo poukázáno na zásadní rozpor v kompatibilitě rychlostí zkoušení do meze kluzu, definovaných ve stávající normě EN 10002-1 jako napětová rychlost, $\dot{\epsilon}$, a rychlost deformační, $\dot{\epsilon}_p$. Na základě vzájemného respektování obou typů zkušebních rychlostí je uvedeno řešení praktického nastavení správných rychlostí zkoušení, respektujících vzájemnou kompatibilitu deformačních a napětových rychlostí.

- Ø Byly uvedeny představy o vlivu tuhosti zkušebních strojů a jejich vlivu na výraznou mez kluzu. Tento vliv se projevuje v kombinaci s rychlostí zkoušení. Jsou presentovány zásady přibližného odvození hodnoty tuhosti na základě měření malých pružných deformací pomocí průtahoměru.
- Ø Byl vysvětlen vliv rozdílných metod linearizace závislosti napětí – deformace v pružné oblasti tahového diagramu na výsledky modulu pružnosti v tahu, E , a následně též na výsledky smluvních mezí kluzu. Byla doporučena metoda linearizace, která je použitelná v případech automatického hodnocení E . Hodnotu E lze využít jako kritériální veličinu rozhodující o správnosti odvozených výsledků smluvních mezí kluzu.

Použitá literatura

- [1] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), 1st edition, 1993.
- [2] LUDVÍK V.: Nejistoty měření, přesnost měření správnost měření a otázky spojené se vzájemnou porovnatelností výsledků měření a s prohlášením o shodě s technickými specifikacemi. Sborníky technické harmonizace. ÚNMZ, 2005.
- [3] JAKOB M., WOZNIAC J., HONS J.: Shrnutí výsledků mezilaboratorních porovnávacích zkoušek v oblasti zkoušení základních mechanických vlastností kovů v období let 1996 až 2003. Pracovní seminář k vyhodnocení MPZ SČZL č. 16 a SČZL č. 17. Ostrava, říjen 2004
- [4] EA Interlaboratory Comparison MT 1 Tensile Testing of Metals. Final Report. Czech Testing Laboratories Association (CTLA). Czech Accreditation Institute (CAI), March 2000.
- [5] Závěrečná zpráva o výsledcích mezilaboratorních porovnávacích zkoušek. MPZ SČZL 16/2001 Zkoušky tahem. SČZL, 2002.
- [6] ČSN EN 10002-1:2002 (42 0310) Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za okolní teploty.
- [7] L. ROESCH, N. COUE, J. VITALI, M. DI FANT – Results of an Interlaboratory Test Programme on Room Temperature Tensile Properties – Standard Deviation of the Measured Values – IRSID Report N. DT. 93310, July 1993.
- [8] WOZNIAC J., JAKOB M.: K problematice některých zdrojů nejistot typu „B“ u tahové zkoušky a možnosti jejich kontroly. Seminář Stanovení a vyjadřování nejistot kvantitativních výsledků zkoušek v oblasti fyzikálně mechanického zkoušení a NDT., ČIA Praha, prosinec 1999.
- [9] JAKOB M., WOZNIAC J.: Effect of the Frame Stiffness and Testing Conditions on the Results of Tensile Tests. Tech. Rep. ISO TC 164, SC 2, September 2001.
- [10] WOZNIAC J.: Využití nové techniky při měření deformace u tahových zkoušek. Elektronický sborník 4.semináře ZSS a SČZL. Tále, říjen 2003.
- [11] Draft International Standard ISO/DIS 6892:2007 Metallic materials – Tensile testing – Method of testing at ambient temperature.
- [12] WOZNIAC J.: Vliv rychlosti zkoušení na výsledky zkoušky tahem. Pracovní seminář k vyhodnocení MPZ SČZL Zkoušky tahem. SČZL - ČIA Praha, 2002.
- [13] ČSN EN ISO 9513:2003 (42 0386) Kovové materiály – Kalibrace průtahoměrů používaných při zkoušení jednoosým zatížením.
- [14] WOZNIAC J.: Metoda zkoušek kovů tahem za okolní teploty. Pracovní postup v systému jakosti PP-L/10.03.01. Vydání 6. Mittal Steel Ostrava a.s., březen 2006.
- [15] WOZNIAC J.: Dopady revize normy ISO 6892-1 na praktické provádění tahových zkoušek. Elektronický sborník mezinárodní konference „Setkání odborníků z oblasti zkoušení“, Velké Karlovice, září 2006.