

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2010

Bc. Jiří Foltá

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

Využití analýzy obrazu pro zkoušku tahem na plochých vzorcích

Jiří Folta

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2010

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří Folta**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky-Silniční vozidla**
Název tématu: **Využití analýzy obrazu pro zkoušku tahem na plochých vzorcích**
Zadávající katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

Zásady pro vypracování:

1. Stanovení mechanických vlastností materiálů (zkouška tahem, tvrdosti)
2. Možnosti obrazové analýzy pro studium materiálů (mikroskopie, obrazová analýza)
3. Metodika měření, analýza dat
4. Vyhodnocení
5. Závěr

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam literatury

Ptáček, L. a kol.: Nauka o materiálu I.-II. CERM, s.r.o. Brno 1999

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Pavel Švanda, Ph.D.

Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání diplomové práce:

26. února 2010

Termín odevzdání diplomové práce.

24. května 2010



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

dne

L.S.



doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.

vedoucí katedry

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše. Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 20. 5. 2010

Bc. Jiří Folta

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval všem lidem, kteří mi při tvorbě mé diplomové práce pomohli, hlavně pak panu Ing. Pavlu Švandovi, Ph.D., za pomoc v laboratořích, motivaci ke studiu a za poskytnutí studijních materiálů.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá obrazovou analýzou zkoušky tahem na plochých vzorcích. V první, teoretické části je podrobně rozebrána zkouška tahem, pracovní diagramy a zkušební tělíska. Okrajově jsou zde zmíněny i zkoušky tvrdosti. V praktické části této práce jsou dva cíle. V první části bylo cílem za použití daného optického zařízení navrhnout analýzu pro měření modulu pružnosti, tzv. Youngova modulu. A ve druhé zjistit skutečné tahové napětí ve vzorku a zkonstruovat skutečný graf napětí-deformace.

KLÍČOVÁ SLOVA

Modul pružnosti v tahu, Youngův modul, zkouška tahem, graf napětí-deformace

TITLE

Image analysis for tensile test of the flat samples

ABSTRACT

The diploma work is focused on image analysis a tensile test of the flat samples. In the first theoretical part there are the tensile test, working stress-strain diagrams and test bodies examined in a detail way. The hardness testing is marginally mentioned. The practical part of the task includes two targets. The first target is intended for the use of an optical device design analysis for measuring the modulus of elasticity at tensile by Young's modulus. The second one finds out the actual tensile stress in the sample and construct a real stress-strain diagram.

KEYWORDS

modulus of elasticity at tensile, Youngs modul, tensile test, stres-strain diagraeme

Obsah

Úvod – cíle práce.....	7
1. Stanovení mechanických vlastností materiálů.....	8
1.1 Úvod do mechanických vlastností materiálů	8
1.2 Základní mechanické zkoušky	10
1.3 Statická zkouška tahem	10
1.3.1 Zkušební zařízení	11
1.3.2 Zkušební tělísko	12
1.3.3 Pracovní diagram	15
1.3.4 Vyhodnocení pracovního diagramu	22
1.3.5 Výpočet základních normalizovaných parametrů	26
1.4 Zkoušky tvrdosti	33
1.4.1 Zhodnocení různých metod měření tvrdosti	34
1.4.2 Vztah mezi tvrdostí a mezí pevnosti	36
2. Možnosti obrazové analýzy pro studium materiálů.....	37
2.1 Mikroskopie	37
2.2 Obrazová analýza	37
3. Praktická část - Metodika měření.....	39
3.1 Zkušební tělísko - mřížka	42
3.2 Tvar zkušební tělíska	46
4. Analýza dat.....	48
4.1 Modul pružnosti v tahu	48
4.1.1 Vlastní měření	48
4.1.2 Experimentální příklad	50
4.1.3 Vyhodnocení modulu pružnosti	53
4.2 Graf napětí-deformace	54
4.2.1 Vlastní měření	54
4.2.2 Vyhodnocení grafu napětí-deformace	59
Závěr.....	60
Seznam literatury.....	61
Seznam obrázků.....	62
Seznam tabulek.....	63

Úvod – cíle práce

Práce je věnována problematice stanovení mechanických vlastností materiálů za použití analýzy obrazu při zkoušce tahem na plochých vzorcích. Cílem práce bylo vytvoření metodiky zjišťování přesného modulu pružnosti v tahu, tzv. Youngova modulu a stanovení zpevnování oceli při tváření, tzn. stanovení skutečného tahového diagramu. Podstatou problému bylo, že jenom pomocí univerzálního zkušebního stroje pro zkoušku tahem a tlakem se měří deformace vzorku s určitou nepřesností a možnost měření zúžení není vůbec. Ovšem pomocí fotografií vytvořených kamerou a sejmutých do PC, lze velice přesně změřit vzniklé deformace. Kamera byla připevněna přímo na konstrukci zkušebního zařízení. Ovšem nejdříve bylo nutné navrhnout a vytvořit vhodnou mřížku díky níž by se daly potřebné rozměry z fotografií získat a vhodně nakalibrovat vzniklý obraz se skutečnými rozměry. Díky přesným hodnotám poměrné deformace byl poté daleko přesněji vypočten modul pružnosti v tahu, neboli Youngův modul a vytvořen skutečný tahový diagram napětí a deformace, který se dá poté porovnat se smluvním diagramem. Modul pružnosti v tahu nezávisí na rozměrech tělesa, ale pouze na vlastnostech materiálu tělesa, jeho teplotě a vlhkosti.

1. Stanovení mechanických vlastností materiálů

1.1 Úvod do mechanických vlastností materiálů

Základními vlastnostmi každého výrobku jsou jeho mechanické vlastnosti, které charakterizují odolnost výrobku proti vnějším silám a to jak statickým tak i dynamickým. Zjišťování mechanických vlastností se zjišťuje praktickými laboratorními zkouškami, protože teoretické výpočty např. pevnosti ze znalosti fyzikálních vztahů platících na úrovni atomů nejsou v praxi použitelné. Je to proto, že neberou v úvahu defekty krystalové struktury, které snižují teoretické hodnoty o dva až tři řády. [1]

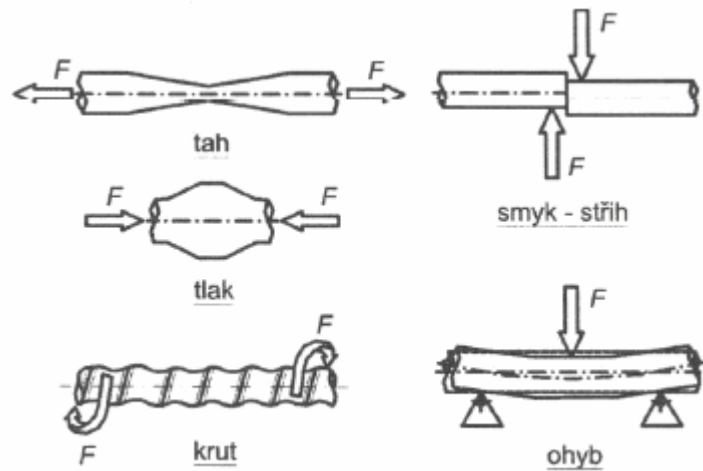
Všeobecně se mezi statické mechanické vlastnosti zahrnuje pevnost a tvrdost, pružnost, houževnatost a odolnost proti vnějšmu opotřebení. Tyto vlastnosti nejsou ale mezi sebou bez souvislosti, protože více pevný kovový materiál má i větší tvrdost a většinou i větší odolnost proti povrchovému opotřebení. K mechanickým vlastnostem materiálu se přiřazuje i schopnost v případě potřeby měnit svůj tvar. [1]

Pevnost, kterou většina lidí si představuje jako odolnost proti porušení výrobku, není možné přijmout jinak než jako obecný pojem, který technicky nespecifikuje téměř nic. Proto je ho nutné značně zpřesnit, neboť není jasné, zda vyjadřuje sílu nebo napětí při předpokládaném porušení výrobku. [1]

Vývoj nových konstrukčních materiálů v minulém i tomto století a obavy z havárií vedly k rozvoji oboru zkoušení materiálů. Nejzákladnější úvaha konstruktéra, jak zabránit havárii konstrukce, spočívá v dodržení podmínky, že provozní napětí v součásti nedosáhne pevnosti materiálu. Za pevnost je v tomto případě považováno napětí, které způsobí plastickou deformaci, nebo vznik lomu, což jsou napěťové charakteristiky určované zkouškou tahem. Na základě zkušeností konstruktérů se ukázalo, že tento přístup navrhování konstrukce je úspěšný pokud zavedeme vhodný koeficient bezpečnosti z hlediska napětí a požadavek určité minimální hodnoty tažnosti materiálu. [2]

Pevnost materiálu charakterizuje mez pevnosti, což je napětí (poměr síly k průřezu), které se u kovových materiálů udává v MPa. Základní hodnotou jsou mez pevnosti v tahu, popř. v tlaku, které udávají odolnost materiálu proti porušení normálovým napětím. K nim se pak řadí meze pevnosti ve smyku (stříhu) a krutu, které udávají odolnost materiálu proti porušení smykovým napětím - OBR.1. K porušení materiálu dochází ve srovnání s normálovými napětími vždy při nižších hodnotách

smykových napětí. Smyková napětí se určují buď laboratorně nebo se na základě praktických zkušeností počítávají z mezí pevnosti. [1]



OBR. 1 Základní způsoby namáhání [1]

Dalšími velice často používanými hodnotami jsou meze kluzu a meze pružnosti, popř. meze úměrnosti. Mez kluzu je charakterizována napětím, při jehož překročení dochází k výrazné trvalé deformaci materiálu. Mez pružnosti je pak výrazně zpřísněná hodnota meze kluzu, která je přesně stanovená. Ale i při dosažení nejpřísněji stanovené meze pružnosti již dochází k určité, byť minimální, trvalé deformaci. Aby se prakticky zcela vyloučila trvalá deformace materiálu, je nutno namáhat materiál pod tzv. mez úměrnosti, kdy dochází pouze k pružné deformaci. Oblast namáhání materiálu pod mezí úměrnosti je využívána pro navrhování konstrukcí, oblast namáhání materiálu nad mezí kluzu je pak využívána pro tváření materiálu. [1]

Mezi dynamické zkoušky se řadí zkoušky rázové a únavové, které charakterizují výrobky množstvím energie nenarušující celistvost výrobku nebo namáhající výrobek opakovaně silami menšími než je statická pevnost daného materiálu. [1]

Základní technologické operace, které se používají při výrobě zařízení a konstrukcí jsou: tváření, obrábění, svařování, tepelné zpracování a různé povrchové úpravy. Pro posouzení, zda určitou technologickou operaci je možné aplikovat pro daný materiál se používají technologické zkoušky, které tvoří zvláštní skupinu zkoušení materiálu. Všechny uvedené operace výrazně ovlivňují strukturu materiálu a tedy i jeho vlastnosti. Pro kontrolu ovlivnění mechanických vlastností se zpravidla používají některé z mechanických charakteristik určených zkouškou tahem, zkouškou rázem v ohybu případně zkouškou tvrdosti. [2]

V praxi se potvrdilo, že všechny tři profesní skupiny inženýrů (výrobci materiálu, konstruktéři a technologové výroby) ke své práci nejčastěji potřebují tři typy mechanických zkoušek - zkoušku tahem, zkoušku rázem v ohybu a zkoušku tvrdosti. Zařízení k provádění těchto zkoušek tvoří základ většiny mechanických zkušeben materiálu a proto tyto tři typy zkoušek označíme jako zkoušky základní. [2]

1.2 Základní mechanické zkoušky

Statické zkoušky, při nichž zatížení zvětšujeme poměrně zvolna. Působí obvykle minuty, při dlouhodobých zkouškách dny až roky. Mezi takové zkoušky patří například zkouška tahem, smykem ohybem, nebo zkoušky tvrdosti. Z nich nejpoužívanější jsou statická zkouška tahem a zkoušky tvrdosti. [3]

Dynamické zkoušky rázové a cyklické, při kterých působí síla nárazově po zlomek sekundy. Při cyklických zkouškách (tzv. zkoušky na únavu materiálu) se proměnné zatížení opakuje i mnoha cykly za sekundu až do mnoha milionů jejich celkového počtu. Zde patří například rázová zkouška ohybem, nebo únavové zkoušky. [3]

Protože se tato práce zaměřuje výhradně na statickou zkoušku tahem, bude zde popsána podrobně právě jenom tato zkouška a jenom stručně i zkoušky tvrdosti.

1.3 Statická zkouška tahem

Při rozboru deformačního a lomového chování materiálu je důležitá jeho závislost napětí-deformace. Tato závislost se určuje experimentálně zkouškou tahem hladkých zkušebních těles. Zkouška tahem spočívá v deformaci zkušební tyče postupně se zvyšujícím tahovým zatížením předepsanou (poměrně malou) rychlostí, obvykle až do lomu. Účelem je stanovení napětí při daných deformacích. Zkouška se provádí za okolní teploty mezi 10 až 35 °C (v arbitrážních případech 23 +/- 5°C), ale podle požadavku i za teplot vyšších nebo i nižších (kryogenních). Podrobně je metodika zkoušení rozpracována v normě ČSN EN 10002-1. [3]

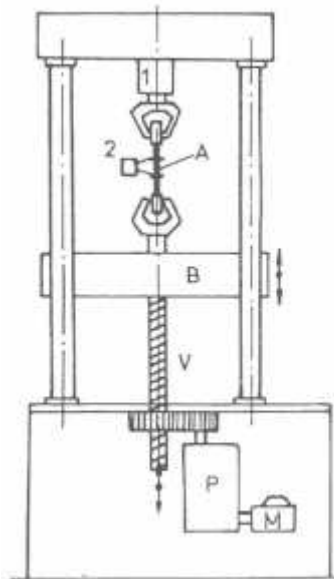
Zkušební těleso (jednoduchého tvaru nejčastěji kruhového nebo obdélníkového průřezu) uchytíme do čelistí zkušebního stroje a na těleso nasadíme průtahoměr. Během zkoušky se na zapisovači registruje, příp. do paměti počítače ukládá závislost působící

síly F (zatížení - snímané dynamometrem) na prodloužení zkušební tyče (snímané průtahoměrem, případně určené z pohybu příčnicku zkušebního stroje). [2]

1.3.1 Zkušební zařízení

K základnímu vybavení laboratoře mechanických zkoušek patří univerzální zkušební stroj – OBR.2, na kterém se provádí zkoušky tahem, tlakem a zkouška ohybem. Stroj tvoří pevný rám, v jehož horní části je umístěn dynamometr I - zařízení pro měření síly. Zkušební těleso A je jedním koncem uchyceno k dynamometru a druhým koncem k pohyblivému příčnicku B . Příčnick je uváděn do pohybu motorem M , přes vřeteno V a převodovou skříň P . Při pohybu příčnicku dochází k postupnému zatěžování a deformaci zkušebního tělesa. Deformace tělesa je registrována průtahoměrem 2 . Vhodnou úpravou uchycení zkušebního tělesa a průtahoměru se na tomto stroji provádí i ostatní mechanické zkoušky. [2]

Pohon zkušebních strojů může být mechanický, nebo hydraulický (stroje pro zatížení větší než 200 kN). Mechanické stroje byly původně vybaveny dynamometry, které měřily sílu na principu mechanické váhy. U hydraulických strojů se síla snímala z hydrostatického tlaku oleje v pracovním válci. Deformace se měřila při desetinásobném zvětšení pohybu příčnicku. Měření malých deformací (citlivost $1\ \mu\text{m}$ až $0,1\ \mu\text{m}$) stejně tak i přesné měření síly umožnil až rozvoj elektroniky v druhé polovině dvacátého století, vznikají tzv. elektronické zkušební stroje. [2]



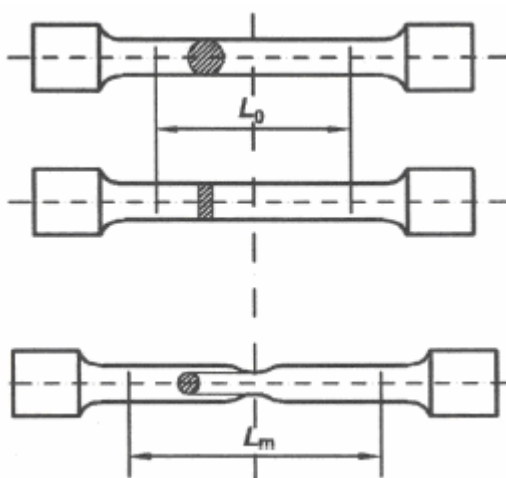
OBR. 2 Zkušební zařízení [1]

V šedesátých letech byl vyvinut elektronický servohydraulický zkušební stroj, který umožňuje během zkoušky regulovat časový průběh jedné ze tří snímaných veličin - pohyb příčnicku, prodloužení zkušebního tělesa, případně sílu. V současné době takovýto způsob řízení chodu zkušebního stroje je běžný i u mechanických zkušebních strojů řízených počítačem. [2]

1.3.2 Zkušební tělísko

1) Průřezy zkušebních tyčí a jejich počáteční měřená délka

Zkušební tyče mají kruhový, obdélníkový, čtvercový nebo víceúhelníkový průřez. Konce tyčí, které slouží k upnutí, mají větší průřez, než je vnitřní část tyče, která je určena k měření. Je to proto, aby lom tyče nastal vždy v měřené části tyče - OBR.3. Na základě dohody může zkušební tyč nekruhového průřezu být zkoušena i bez rozšířených upínacích konců. U výrobků (pásů a tyčí) o výrobní šířce menší než 20 mm mohou mít zkušební tyče tuto šířku. [1]



OBR. 3 Zkušební tyč se zesílenými konci pro upnutí do čelistí trhacího zkušebního stroje Postupně od shora: kruhový průřez tyče, obdélníkový průřez tyče, kruhová tyč před přetržením [1]

Kruhové tyče se obvykle vyrábějí obráběním (jemným soustružením, popř. broušením), tyče nekruhového průřezu pak frézováním. Tyče vyráběné z plechů nebo pásů se v sériové výrobě někdy z úsporných důvodů vyrábějí vystřihováním pomocí střížného nástroje nebo i bez rozšířených konců nejčastěji stříhem na kotoučových nůžkách. V tomto případě je však nutno počítat s určitým zpevněním střížených hran,

což má vliv zejména na hodnotu meze kluzu, která se tím zvyšuje v průměru asi o 15 MPa. Vliv zpevnění hran lze odstranit dodatečným obroušením zpevněné vrstvy. Výrobky stálého průřezu (tyče, dráty, profily) a lité tyče z litin a neželezných kovů se smí zkoušet, aniž by musely být obrobena. [1]

Na zkušební tyči se vyznačí vzdálenost, na níž se zjišťují všechny potřebné hodnoty nutné pro výpočet mechanických parametrů zkoušeného materiálu. Tato vzdálenost s označením L_0 se nazývá počáteční měřená délka a stanovuje se jako poměrná nebo nepoměrná. Podle toho se pak nazývá zkušební tyč jako poměrná nebo nepoměrná. [1]

Poměrné zkušební tyče

Poměrné zkušební tyče jsou ty, u nichž se počáteční měřená délka vztahuje k počáteční ploše příčného průřezu tyče S_0 . Počáteční měřená délka L_0 se pak vypočítává z rovnice [4]

$$L_0 = k \cdot \sqrt{S_0} \quad (1)$$

Přednostně se používá počáteční měřená délka L_0 vypočtená koeficientem $k = 5,65$.

Tento koeficient k je odvozen od určení počáteční měřené délky tyče kruhového průřezu, která byla stanovena jako pětinásobek průměru tyče d_0 (tyč dříve označovaná jako krátká tyč), tj. $L_0 = 5 \cdot d_0$. Jestliže se pěti násobek průměru kruhu vyjádří jeho průřezem, pak

$$L_0 = 5 \cdot d_0 = 5 \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \sqrt{S_0} = 5,65 \cdot \sqrt{S_0} \quad (2)$$

Podobně se používá tyč s dvojnásobnou počáteční měřenou délkou L_0 vypočteno u koeficientem $k = 11,3$. Tento koeficient k je odvozen od určení počáteční měřené délky tyče kruhového průřezu, která byla stanovena jako desetinásobek průměru tyče d_0 (tyč dříve označovaná jako dlouhá tyč), tj. $L_0 = 10 \cdot d_0$. Jestliže se desetinásobek průměru kruhu vyjádří jeho průřezem, pak

$$L_0 = 10 \cdot d_0 = 10 \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \sqrt{S_0} = 11,3 \cdot \sqrt{S_0} \quad (3)$$

Počáteční měřená délka L_0 musí být min. 20 mm. Pokud by měla být kratší, používá se tyč s počáteční měřenou délkou vypočtenou koeficientem $k=11,3$, nebo se použije nepoměrná zkušební tyč. Vypočtenou hodnotu počáteční délky je možno zaokrouhlit na nejbližší násobek 5 mm. [1]

Nepoměrné zkušební tyče

Nepoměrné zkušební tyče jsou ty, u nichž počáteční měřená délka L_0 není vázána na počáteční průřez tyče S_0 . V praxi se používají délky 50, 80, 100 a 200 mm, není je ale možno volit libovolně. Jejich volba závisí na rozměrech zkoušených výrobků a zkušebních tyčí. [1]

2) Zkušební tyče pravoúhlých a kruhových průřezů

a) Zkušební tyče z pásů a plechů o tloušťce pod 3 mm

Pro zkoušení se používají poměrné i nepoměrné tyče.

Poměrné tyče

Pro určení měřené délky se používá koeficient $k=5,65$ nebo $k=11,3$. [1]

Nepoměrné tyče

Zkušební tyče o tloušťce 0,5 až 3 mm jsou dvojího rozměru. Bud' mají šířku $b_0 = 20$ mm a počáteční měřenou délku $L_0 = 80$ mm, nebo mají šířku 12,5 mm a počáteční měřenou délku $L_0 = 50$ mm. [1]

V případě, že jsou zkoušeny tyče o tloušťce 0,5 až 3 mm a šířce rovné šířce výrobku (pásu, tyče), která je menší než 20 mm, je možné použít jen měřenou délku $L_0 = 50$ mm. [1]

Zkušební tyče obdélníkového průřezu (pásky, plechy) o tloušťce menší než 0,5 mm mají výhradně šířku 12,5 mm a počáteční měřenou délku $L_0 = 50$ mm. [1]

b) Zkušební tyče z drátů a tyčí o průměru nebo tloušťce do 4 mm

Pro zkoušení drátů a tyčí (nejedná se o pásy a plechy) o tloušťkách 4 mm a menších se používají nepoměrné zkušební tyče o délkách 100 nebo 200 mm. [1]

c) Zkušební tyče z pásů a plechů o tloušťce nejméně 3 mm a z drátů a tyčí o průměru nebo tloušťce nad 4 mm

Pro zkoušení se používají poměrné i nepoměrné tyče.

Poměrné tyče.

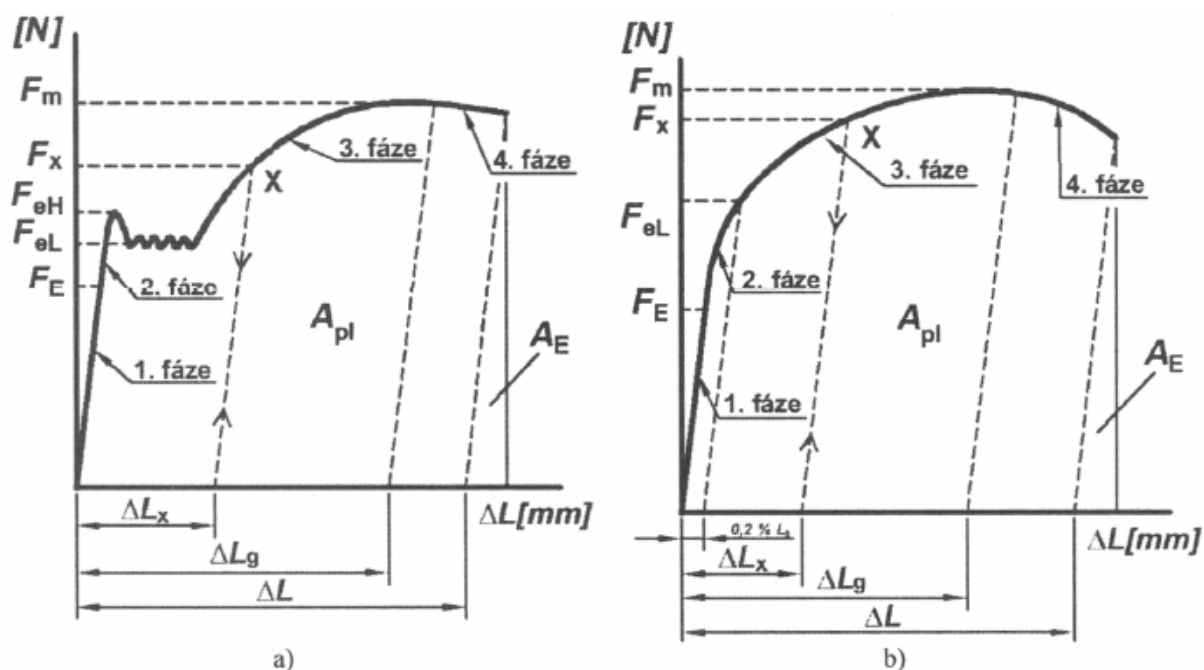
Pro určení měřené délky se používá koeficient $k = 5,65$ nebo $k = 11,3$. Pro tyče kruhového průřezu se používají přednostně měřené délky zkušebních tyčí vypočtené s koeficientem $k = 5,65$. Doporučené průměry tyčí jsou 5, 10 a 20 mm. [1]

Nepoměrné tyče

Nepoměrné tyče se používají vždy, když se jedná o nekruhový průřez. Při šířce zkušební tyče 20 mm musí být měřená délka tyče 80 mm, při šířkách tyčí 25 nebo 40 mm musí být měřená délka 200 mm. [1]

1.3.3 Pracovní diagram

Postupně se zvyšující tahová síla F vyvozená zkušebním strojem zkušební tyč prodlužuje, při čemž se prodlužuje i měřená část tyče z původní délky L_0 na okamžitou délku $L = L_0 + \Delta L$ (ΔL je prodloužení vyvození silou F). Závislost tohoto prodloužení na velikosti vyvozené síly se graficky znázorňuje tzv. *pracovním diagramem*, který zaznamenává registrační zařízení trhačského stroje. Současně se podle zákonitosti o neměnnosti objemu zmenšuje původní průřez S_0 na okamžitý S . [4]



OBR. 4 Pracovní diagram s mezí kluzu a) s výraznou, b) s nevýraznou [1]

Tvary diagramů kovových materiálů se dělí na dva základní typy:

1) Pracovní diagram s výraznou mezí kluzu, jehož představitelem je diagram neuklidněné nízkouhlíkové vyžíhané oceli - OBR.4a.

2) Pracovní diagram s nevýraznou mezí kluzu, který tvoří plynule stoupající křivku. Jeho představitelem je diagram vyžíhané ukladněné oceli - obr.4b. Tento tvar diagramu se vyskytuje častěji. [4]

Na obou pracovních diagramech je možno určit čtyři úseky, které odpovídají čtyřem fázím tahové zkoušky. [4]

1. fáze (oblast pružných, deformací)

Zkušební tyč se prodlužuje přímo úměrně ke vzrůstající zatěžující síle. Grafickým záznamem této fáze je proto přímka. Tyč se v této fázi deformuje pouze pružně (elasticky), prodloužení ΔL po odlehčení zmizí a tyč se vrátí na svou původní délku. Vztah mezi zatěžující silou a absolutním prodloužením vyjadřuje Hookův zákon:

$$F = E \cdot S \cdot \frac{\Delta L}{L_0} [N] \quad (4)$$

Kde:	E [MPa]	je modul pružnosti v tahu
	S [mm ²]	je průřez tyče
	ΔL [mm]	je absolutní prodloužení
	L_0 [mm]	je počáteční měřená délka

Konec 1. fáze ohraničuje síla, která se nazývá *síla na mezi úměrnosti* a označuje se F_E (**Mez úměrnosti**). Její zjišťování se v běžné laboratoři neprovádí pro nepostřehnutelně pozvolný přechod přímkové části pružné deformace do oblasti trvalých deformací. U většiny neželezných kovů a u litiny s lístkovým grafitem se přímková část pracovního diagramu nevyskytuje a pracovní diagram začíná proto až 2. fází. [1]

V oblasti pružných deformací se vyskytuje tzv. anelastická deformace. Ta by se projevila tehdy, kdyby došlo při tahové zkoušce v této fázi k odlehčení, čára pracovního diagramu by se při podrobnějším sledování neshodovala s původně vytvořenou přímkou. Při zkoušce tahem za normální teploty se tato anelastická deformace zanedbává, protože k odlehčení dochází jen výjimečně. [1]

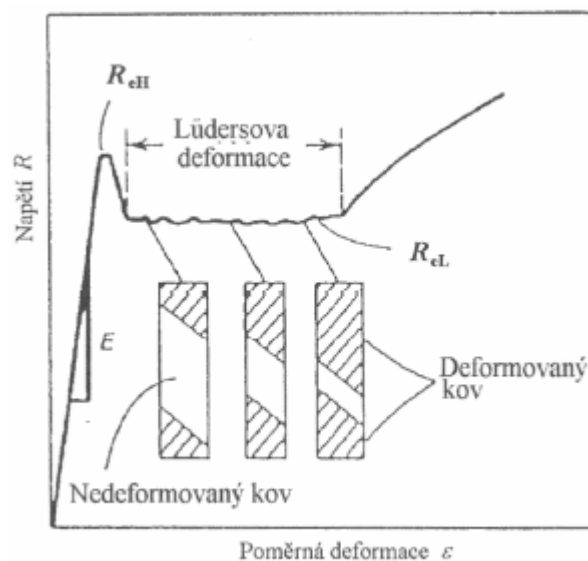
2. fáze (oblast od meze úměrnosti k mezi kluzu)

Při překročení síly na mezi úměrnosti se zkušební tyč začíná již trvale (plasticky) deformovat. U diagramu s výraznou mezí kluzu je konec 2. fáze charakterizován různě dlouhým zastavením, někdy i poklesem zatěžující síly - OBR.4a. Deformace, která vzniká při těchto podmínkách se nazývá Lüdersova deformace ΔL_L . [1]

Po celou dobu tvorby Lüdersovy deformace je možno pozorovat na vyleštěném povrchu zkušební tyče pod úhlem cca 45° ke směru deformace viditelné povrchové skluzové čáry – OBR.6. V pracovním diagramu se v souvislosti s nimi vyskytují nepravidelné kmity v rozmezí mezi horní a dolní mezí kluzu jako důsledek nehomogenní deformace. Velikost výkmitů (amplitudy) pracovního diagramu v oblasti Lüdersovy deformace je ovlivněna tuhostí trhacího stroje. Čím má trhací stroj tužší konstrukci, tím menší výkmity na pracovním diagramu vzniknou. Tato heterogenita při

vzniku plastické deformace je nežádoucí např. při lisování plechů, protože skluzové pásy na povrchu výlisků jsou viditelné a kazí vzhled výrobku. [2]

Vyskytují se v materiálech, např. slitinách, u nichž jsou dislokace uchyceny. Pro počáteční pohyb příp. vznik nových dislokací je třeba mnohem větší napětí ve srovnání s napětím pro pohyb dislokací. Uvolnění a vznik nových dislokací se v diagramu napětí-deformace projeví výraznou nespojitostí v oblasti přechodu z elastické do elasticko-plastické deformace. Napětí, jež odpovídá nespojitosti v diagramu se označuje pojmem výrazná **mez kluzu** R_e . V případě měření meze kluzu R_e již není nutné používat snímače prodloužení, ale zcela postačuje záznam síla-čas, případně síla-posun příčnicku. U nízkouhlíkové vyžíhané oceli je uchycení dislokací velice silné (je způsobeno atomy uhlíku příp. dusíku) a proces vzniku plastické deformace je proto výrazně heterogenní. Vznik plastické deformace se u těchto ocelí projeví charakteristickým tvarem tahového diagramu - OBR.5 právě v oblasti meze kluzu. Na konci přímkové části diagramu napětí-deformace dochází k výraznému poklesu napětí, který je spojen s rozšířením plastické deformace v úzkém pásu přes celý nosný průřez zkušební tyče. Tento bod je v diagramu označován symbolem R_{eH} a nazývá se **horní mez kluzu**. [5]

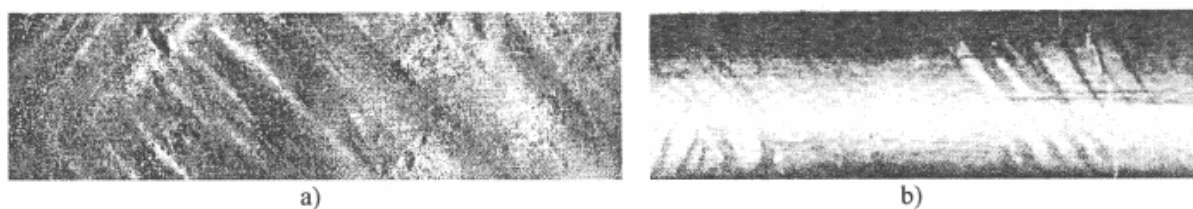


OBR. 5 Tvar tahového diagramu typický pro nízkouhlíkovou ocel [2]

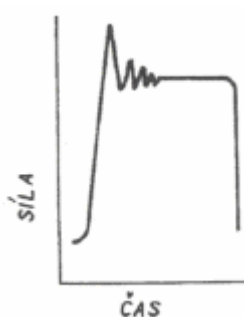
Z hodnoty napětí R_{eH} dochází k poklesu na hodnotu R_{eL} (označení **dolní mez kluzu**). Při napětí dolní meze kluzu se skluzové pásy postupně rozšiřují přes celou měrnou délku zkušební tělesa. [1]

Z uvedeného vyplývá, že spolehlivějším údajem je síla na dolní mezi kluzu F_{eL} , a to i proto, že při vyšších rychlostech zatěžování může síla na horní mezi kluzu

dosáhnout neúměrně vysoké hodnoty, které mohou při extrémních rychlostech dosáhnout i vyšších hodnot než je síla na mezi pevnosti – OBR.7.



OBR. 6 Lüdersovy čáry na zkušební tyči na a) ploché tyči, b) na tyči s kruhovým průřezem [1]



OBR. 7 Pracovní diagram s extrémně vysokou rychlostí zatěžování [1]

U diagramu s nevýraznou mezí kluzu je 2. fáze ukončena dosažením smluvní trvalé deformace, která je dána např. hodnotou 0,2% původní měřené délky L_0 , která je podrobně rozepsaná v normě ČSN EN 10002-1. Dosažená síla se nazývá **smluvní síla na mezi kluzu** a označuje se $F_{p0,2}$. Je definovaná jako síla, při níž se dosáhne při odstranění zatěžující síly trvalé deformace 0,2% L_0 . Tuto sílu je možno znázornit v pracovním diagramu průsečíkem rovnoběžky s přímkovou částí 1. fáze pracovního diagramu vzdálené od počátku o délku $0,002 \cdot L_0$ - OBR.4b. [1]

Síly, které způsobí trvalou deformaci menší než 0,2% původní měřené délky, se nazývají síly na mezi pružnosti. Označují se povolenou trvalou deformací, která dovoluje, aby výrobek namáhaný maximálně na tuto sílu byl ještě funkční. Tyto síly se určují jen ve speciálních laboratořích. Síly na mezi pružnosti v praxi nahrazují síly na mezi úměrnosti. [1]

Zde si musíme uvědomit, že celková deformace ε_t zkušebního tělesa při napětí

$R_{p0,2}$ je dána součtem deformace elastické $\varepsilon_e = \frac{R_{p0,2}}{E}$ a deformace plastické $\varepsilon_p = 0,002$.

U některých materiálů, např. čisté vyžíhané mědi nebo šedé litiny je prakticky nemožné zjistit lineární část v diagramu napětí-deformace. Proto se v těchto případech

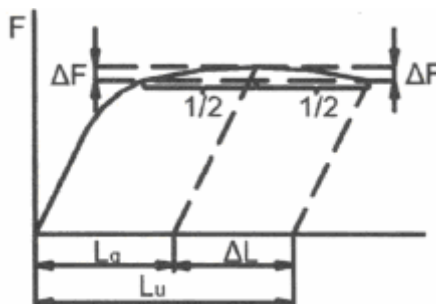
mez kluzu určuje jako napětí, které vyvolá určitou hodnotu celkové deformace. Jedná se opět o smluvní hodnotu, ale v tomto případě celkové deformace ε_t . Zpravidla se volí hodnota $\varepsilon_t = 0,005$ a mez kluzu se značí symbolem $R_{p0,5}$. [2]

3. fáze (oblast rovnoměrných trvalých deformací)

Zkušební tyč při vzrůstajícím zatížení nad mez kluzu se trvale deformuje a to rovnoměrně po celé své měřené délce až do okamžiku, kdy se zkušební tyč začne na některém svém místě zaškrcovat. Největší zatížení, které se dosáhne v průběhu zkoušky se označuje F_m (**Mez pevnosti**). Tato oblast pracovního diagramu se nazývá oblast rovnoměrné (homogenní) deformace. [2]

Přestože v makroměřítku lze tuto deformaci považovat za rovnoměrnou, z hlediska mikrostruktury se trvalá deformace v této oblasti děje značně nerovnoměrně (skokově).

Trvalá deformace, která odpovídá konci 3. fáze, se nazývá největší rovnoměrné (homogenní) prodloužení ΔL_g . V případě plochého tvaru konce této oblasti pracovního diagramu se největší rovnoměrné prodloužení L_g určuje jako středový bod tohoto úseku – OBR.8.



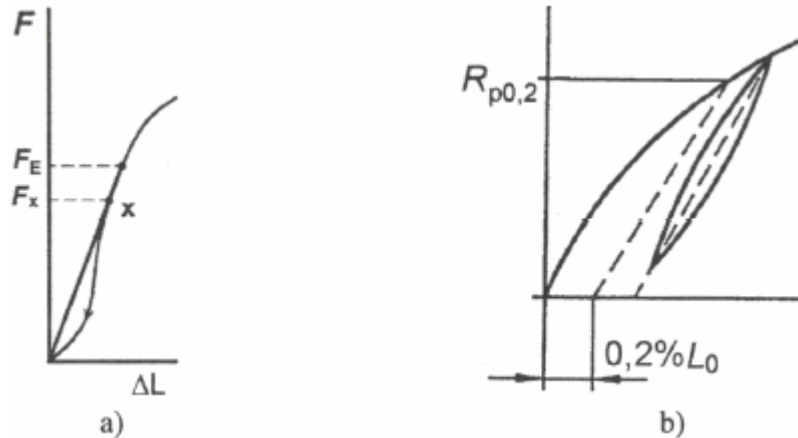
OBR. 8 Určování maximálního rovnoměrného prodloužení u plochých tvarů pracovního diagramu [1]

V průběhu zatěžování zkušební tyče v této oblasti je možno růst zatěžovací síly kdykoliv zastavit a zatěžovací sílu odstranit - bod X v OBR.4a a OBR.4b. Při odlehčení zkušební tyče v libovolném bodě X za mezí úměrnosti a kluzu odpruží zkušební tyč podle čáry XY, která se znázorní zjednodušeně jako rovnoběžka s přímkovou částí I. fáze pracovního diagramu. Zjednodušení spočívá v zanedbání anelasticity.

Po úplném odlehčení je možno změřit trvalou deformaci $\Delta L_X = OY$ – OBR.4, které bylo při použité síle F_X dosaženo. Po novém zatěžování se záznam vrací stejnou cestou na přerušenu část pracovního diagramu a po dosažení síly F_X se pracovní

diagram tvoří dále, jako kdyby odlehčení nebylo provedeno. Opět je zde zanedbán vliv anelasticity – OBR.9.

Trvalé prodloužení ΔL_X v kterémkoliv místě pracovního diagramu se vypočte, jestliže se od deformované délky L_X odečte původní měřená délka L_0 : $\Delta L_X = L_X - L_0$.



OBR. 9 Anelasticita při oblehčení a) pod mezí úměrnosti, b) nad mezí kluzu [1]

4. Fáze (oblast nerovnoměrných trvalých deformací)

Po oblasti rovnoměrné deformace přechází zkušební tyč do 4. fáze, kdy zatěžující síla i při postupující deformaci klesá a současně se na zkušební tyči vytváří větší či menší místní zúžení průřezu (zaškrcení), kdy vzniká tzv. krček – OBR.10.



OBR. 10 Zaškrcení zkušební tyče s kruhovým průřezem [1]

Tato fáze a celý pracovní diagram končí přetržením zkoušené tyče. V této fázi se mimo oblast krčku již zkušební tyč neprodlužuje. Zužování krčku (kontrakce) však postupuje i při klesající zatěžovací síle. Velikost zúžení je velmi dobrým měřítkem odolnosti proti trojosému namáhání, protože vnitřní napětí zkoušeného materiálu je ve 4. fázi výrazně trojosé oproti převážně jednoosému namáhání tyče v prvních třech fázích. [6]

Tvar krčku je závislý na zkoušeném materiálu a na průřezu zkušební tyče. U kruhových tyčí bývá i průřez v přetrženém místě kruhový – OBR.10, u plochých tyčí je

však tento průřez tvarově značně komplikovaný. V případě nutnosti zjištění skutečné plochy průřezu se měří rozměry a_1 , b_1 , na které se zmenší původní rozměry a_0 , b_0 , zkušebních tyčí – OBR.18.

Maximální trvalé prodloužení ΔL_U se změní po přiložení obou částí přetržené tyče k sobě, kdy se od délky L_U odečte původní délka L_0 :

$$\Delta L_U = L_U - L_0 \quad (5)$$

1.3.4 Vyhodnocení pracovního diagramu

Pracovní diagramy síla-prodloužení (F - ΔL) na zkušebních tělesech neumožňují porovnání jednotlivých materiálů, a proto se síly i prodloužení přepočítávají na napětí a relativní prodloužení (poměrná deformace). [6]

Při zatěžování vzniká ve zkušební tyči tahové napětí $\sigma = \frac{F}{S} [MPa]$, které se označuje jako skutečné napětí. V diagramu σ - ε se tento vztah znázorní stále se zvyšující křivkou, která dosáhne v okamžiku lomu maxima – OBR.11. a OBR.13

Protože zjišťování okamžitých průřezů tyče S , které se během zatěžování snižují, by činilo velké potíže, zvláště u nekruhových tyčí, u nichž se nezmenšuje jen tloušťka a šířka, ale mění se i tvar průřezu tyče, používají se výhradně tzv. smluvní napětí označované písmenem R , která se vypočítávají jako poměr příslušné síly k ploše původního průřezu tyče S_0 : [6]

Smluvní napětí

$$R = \frac{F}{S_0} [MPa] \quad (6)$$

Kde: R [MPa] je smluvní napětí
 F [N] je síla v tahu
 S_0 [mm²] je původní průřez tyče

Smluvní napětí nevyjadřují skutečnou hodnotu napětí ve zkušební tyči, ale vždy hodnoty nižší. Průběh skutečných napětí σ se od smluvních napětí R postupně při zvyšování napětí odlišuje, a to tím více, čím je deformace tyče větší. V oblasti pružných

deformací je tvar obou diagramů v podstatě shodný, protože $S \cong S_0$. Tento rozdíl se zvyšuje nad mezí kluzu stále více, ale zvlášť výrazný rozdíl a tím i tvar křivek znázorňujících skutečná a smluvní napětí je vidět od začátku vzniku zaškrvení. Od tohoto okamžiku hodnoty skutečného napětí σ v důsledku rychle se snižujícího průřezu tyče S prudce rostou a to až do maxima, kdy dochází k přetržení zkušební tyče. Pro vyjádření deformace se používá poměrné prodloužení (poměrná deformace). [6]

Poměrné prodloužení

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} [-] \quad \varepsilon = 100 \cdot \frac{L - L_0}{L_0} [\%] \quad (7)$$

Kde: L [mm] je konečná měřená délka
 L_0 [mm] je počáteční měřená délka

Mezi napětím σ a poměrným prodloužením ε platí Hookův zákon

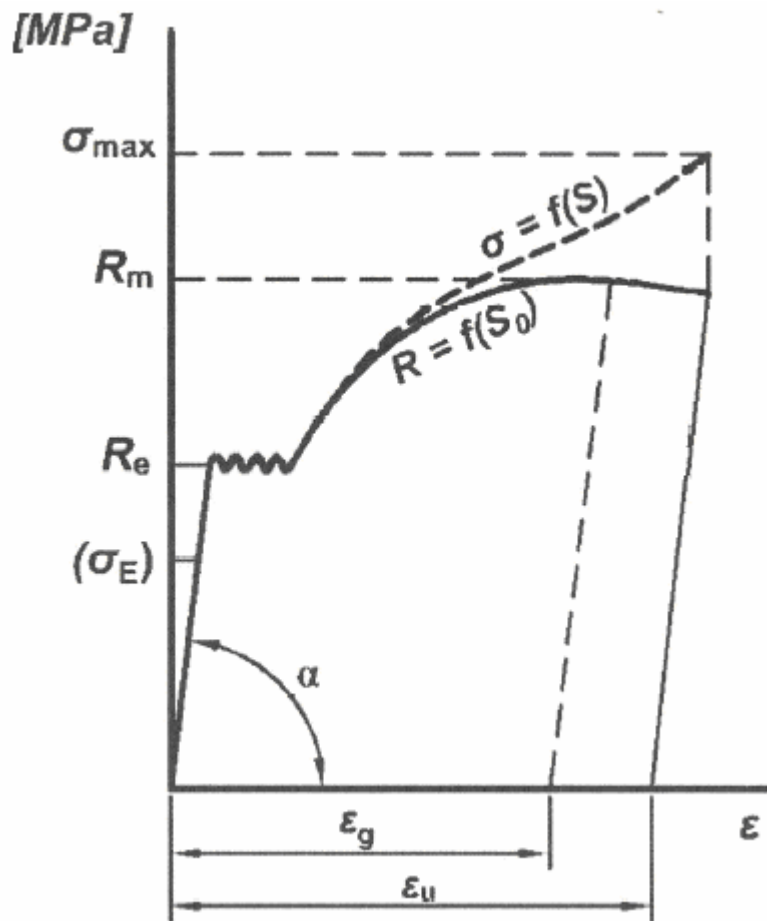
$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (8)$$

Kde: σ [MPa] je napětí
 E [MPa] je modul pružnosti v tahu
 ε [%] je poměrné prodloužení

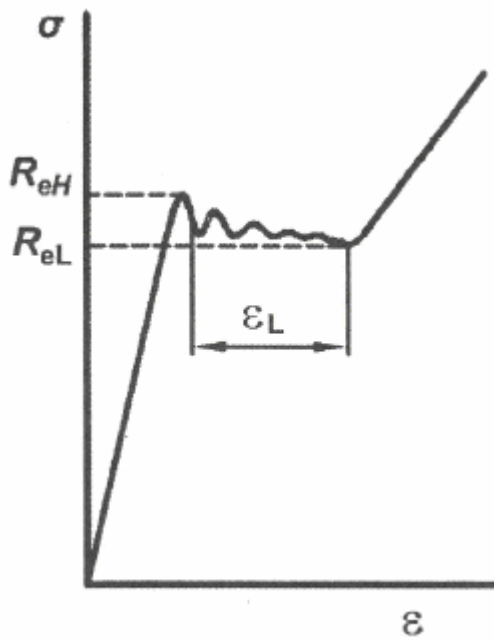
Z Hookova zákona vyplývá, že modul pružnosti v tahu (tzv. Youngův modul)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \operatorname{tg} \alpha, \text{ kde } \alpha \text{ je úhel mezi přímkovou částí grafu a osou } \varepsilon - \text{OBR.11 a OBR.13.}$$

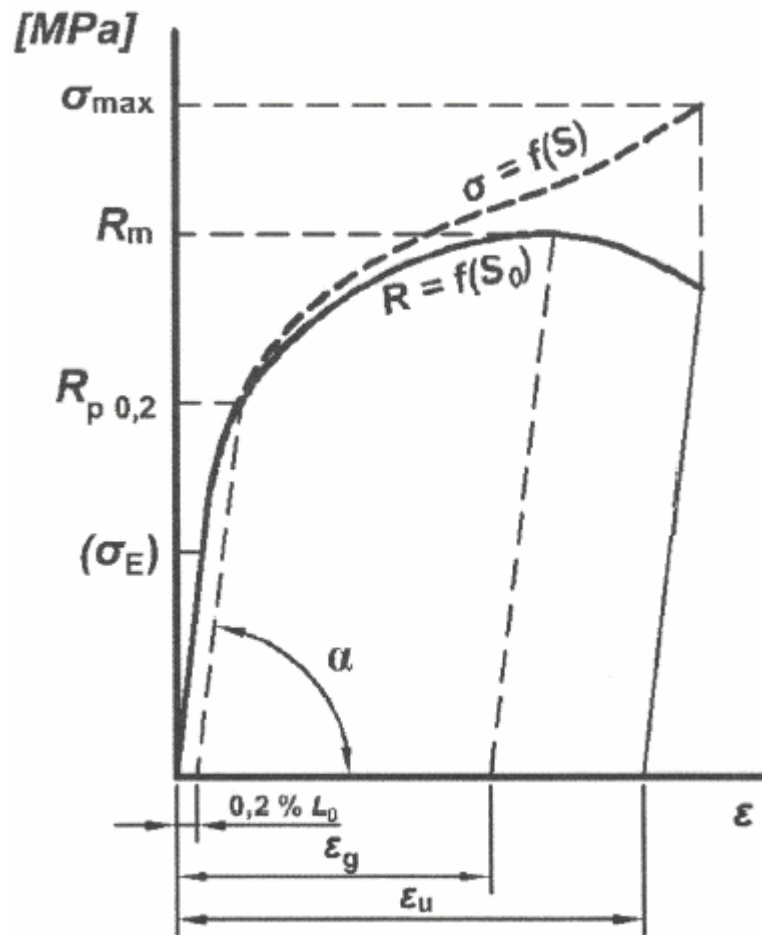
Poměrné prodloužení ε je v této oblasti vždy vratné, proto se deformace materiálu nazývají pružné.



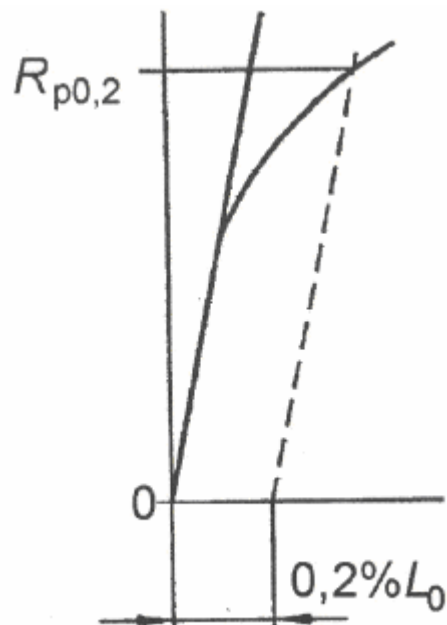
OBR. 11 Diagram R - ϵ tahové zkoušky s výraznou mezí kluzu [1]



OBR. 12 Určení Horní a dolní meze kluzu a Lüdersovy deformace [1]

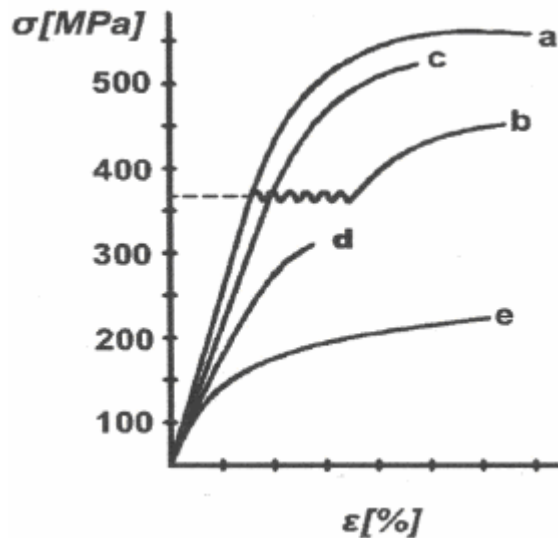


OBR. 13 Digram R - ϵ tahové zkoušky materiálu s nevýraznou mezí kluzu [1]



OBR. 14 Určování smluvní meze kluzu [1]

Při zakreslení diagramů $R-\varepsilon$ různých materiálů do jednoho obrázku vyniknou zásadní rozdíly v pevnostních i deformačních hodnotách a ukáží se i rozdíly v modulech pružnosti znázorněné úhlem sklonu přímkových částí diagramu. Na OBR.15 je možno porovnáním zjistit, že ocel a litina s kuličkovým grafitem mají konkrétní modul pružnosti E , kdežto u litin s lístkovým grafitem a u neželezných kovů přímková část diagramu chybí. Přesto se určují ze sklonu tečny ke křivce diagramu v počátku souřadnic. [1]



OBR. 15 Schématické porovnávání diagramů $R-\varepsilon$ různých kovových materiálů a) oceli bez výrazné meze kluzu, b) oceli s výraznou mezí kluzu, c) litiny s kuličkovým grafitem, d) litiny s lístkovým grafitem, e) hliníku [1]

1.3.5 Výpočet základních normalizovaných parametrů

Mez kluzu

Mez kluzu je napětí při němž začíná vznikat plastická deformace. Je to smluvní napětí, které se vypočte jako poměr příslušné síly na mezi kluzu k ploše původního průřezu. Nevyjadřuje skutečné napětí v materiálu, ale značně se mu blíží. [5]

Výrazná mez kluzu R_e

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} [\text{MPa}] \quad (9)$$

Kde. F_e [N] je síla na mezi kluzu
 S_0 [mm²] je plocha původního průřezu

U ní se ještě někdy rozlišuje horní mez kluzu R_{eH} a dolní mez kluzu R_{eL} – OBR.14.

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} [MPa] \quad (10)$$

$$R_{eL} = \frac{F_{eD}}{S_0} [MPa] \quad (11)$$

Nevýrazná mez kluzu $R_{p0,2}$

Nevýrazná mez kluzu $R_{p0,2}$ se určuje ze síly odpovídající trvalé absolutní deformaci $\Delta L = 0,2\% L_0$:

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} [MPa] \quad (12)$$

Kde: $F_{p0,2}$ [N] je síla na mezi kluzu
 S_0 [mm²] je plocha původního průřezu

Mez pružnosti

Mez pružnosti R_x je výrazně zpřísněná mez kluzu, která se určuje pouze u materiálů s nevýraznou mezí kluzu. Index $x < 0,2$ např. 0,1, 0,05, 0,02 atd. pak označuje maximální povolenou trvalou deformaci 0,1% L_0 , 0,05% L_0 , 0,02% L_0 atd. [5]

$$R_x = \frac{F_x}{S_0} [MPa] \quad (13)$$

Kde: F_x [N] je dosažená síla
 S_0 [mm²] je původní průřez tyče

Mez pevnosti

Mez pevnosti R_m je maximální napětí dosažené ve smluvním diagramu napětí-deformace, což je poměr hodnot maximální síly dosažené při zkoušce a původního průřezu zkušební tělesa. [5]

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} [MPa] \quad (14)$$

Kde: F_m [N] je maximální dosažená síla

S_0 [mm²] je původní průřez tyče

Smluvní mez pevnosti se nejčastěji uvádí jako základní mechanická charakteristika určená zkouškou tahem. Ve skutečnosti tato veličina nevystihuje přesně pevnost materiálu. Pro tvárné materiály smluvní mez pevnosti vyjadřuje zatížení, které materiál přenese za velmi přísných podmínek jednoosé napjatosti. Tato veličina prakticky nevystihuje skutečnou únosnost součástí, které jsou vystaveny působení víceosé napjatosti. [5]

Pro výpočty součástí mnoho let tvořila základ smluvní mez pevnosti vhodně redukována faktorem bezpečnosti. Současný trend výpočtu konstrukcí používá mnohem racionálnější přístup v případě tvárných materiálů, a to je přístup na základě druhé napěťové charakteristiky - meze kluzu. Z hlediska zkušeností inženýrů z dřívějších let však smluvní mez pevnosti zůstává i v současné době v materiálových listech. Pro určení R_m je možné použít i jednodušší zkušební stroje, které nejsou vybaveny snímači prodloužení zkušebního tělesa. Zjištěné hodnoty jsou reprodukovatelné a proto hodnota R_m má své opodstatnění pro specifikaci a kontrolu jakosti materiálu. Dále existuje řada empirických korelačních vztahů mezi smluvní mezí pevnosti a dalšími charakteristikami (tvrdotí, mezí únavy apod.). [5]

Určování deformačních charakteristik

Vedle uvedených napěťových charakteristik, které určujeme ze záznamu síla-prodloužení zkušebního tělesa jsou v materiálových listech ještě další dvě charakteristiky, které určujeme pouze na základě rozměrů zkušební tyče před a po zkoušce. Jedná se o deformační charakteristiky tažnost A [%] a zúžení Z [%]. Před zkouškou na rovnoměrné části zkušební tyče vyznačíme ryskami vzdálenost L_0 . Po přetržení obě části tyče přiložíme lomovými plochami těsně k sobě a změříme vzdálenost rysek L_u a průřez tyče S_u v místě lomu. [8]

Je-li prodloužení zkušebního tělesa odvozeno pouze z posuvu příčnicku zkušebního stroje, potom sklon počátečního úseku tahového diagramu zahrnuje vedle

elastické deformace zkušební tělesa i elastické deformace zkušební stroje (rám stroje, dynamometr, čelisti). Elastická deformace zkušební stroje je zpravidla řádově větší ve srovnání s elastickou deformací zkušební tyče. Proto z takového záznamu nelze modul E vyhodnotit. [8]

Tažnost

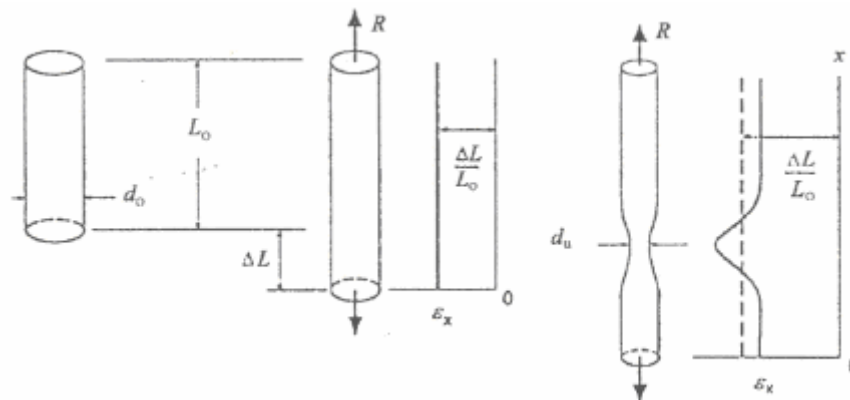
Tažnost obecně označovaná písmenem A je maximální poměrné trvalé prodloužení ε_u vyjádřené v %.

$$A = 100 \cdot \varepsilon_u = 100 \cdot \frac{L_u - L_0}{L_0} [\%] \quad (15)$$

Hodnoty tažností se zaokrouhlují na 0,5%. Jestliže hodnota tažnosti nedosahuje 5 %, je nutno věnovat jejímu měření zvláštní pozornost spočívající v měření vzorku upnutého do vhodného přípravku a měření délek provádět pomocí přesnějších měřidel, popř. mikroskopem. [2]

Měření hodnot A i Z provádíme na přetržených, tj. nezátížených zkušebních tělesech, a proto tyto materiálové charakteristiky souvisí pouze s plastickou deformací zkoušeného materiálu. [2]

V případě tvárných materiálů, u nichž dochází před lomem ke vzniku krčku, je deformace podél měřené délky nerovnoměrná OBR.16.



OBR. 16 Schéma ilustrující měření tažnosti [2]

K největšímu prodloužení dochází v oblasti krčku. Tvar krčku závisí jen na průřezu zkušební tyče. Je tedy zřejmé, že výsledná hodnota A bude tím větší, čím menší zvolíme počáteční délku L_0 . [2]

Je-li materiálovou normou předepsána tažnost A , pak ke zkoušce musí být použita zkušební tyč určitého tvaru. V normě je použit termín "*poměrná zkušební tyč*" a rozumíme tím tyč, pro kterou je jednoznačně dán poměr k počáteční měřené délky L_0 k druhé odmocnině průřezu S_0 :

$$k = \frac{L_0}{\sqrt{S_0}} \quad (16)$$

Kde: L_0 [mm] je počáteční délka
 S_0 [mm²] je počáteční plocha

Pro výpočet tažností je předepsáno, že k lomu musí dojít v prostřední třetině měřené délky. Jestliže se ale i při nedodržení tohoto požadavku dosáhne požadované hodnoty tažnosti nebo tažnosti vyšší, není třeba provádět žádné korekce a zkouška se považuje za platnou. Pro případy, kdy se nedosáhne požadovaná tažnost, provádí se korekce, která však vyžaduje již před začátkem zkoušky rozdělení měřené délky na více dílů. Proto je lépe počítat pro zkoušku tahem s vyšším počtem zkušebních tyčí, které by umožnily zkoušku opakovat. [2]

Je nutné zdůraznit, že stejný materiál má v závislosti na různých původních měřených délkách zcela odlišné číselné hodnoty tažnosti, a to takové, že vždy platí: $A_{11,3} < A_{5,65} < A_g$. Převádění hodnot tažností s různými původními měřenými délkami se v technické praxi neprovádí. Tyto převody, které dokonce uvádějí i normy, jsou totiž tak komplikované splněním nejrůznějších podmínek, že je výhodnější zjistit tažnost na jiné původní měřené délce novou zkouškou. [2]

Tažnost a kontrakce (viz dále) nejsou přesně vzato nejvhodnějšími hodnotami pro posuzování schopnosti k tváření materiálu. Lepší informaci o tom podává oddělené jednak rovnoměrná (homogenní) tažnost a velikost místního zaškrcení. Velké místní zaškrcení ukazuje na dobrou tvárnost a vhodnost pro víceosé namáhání. Velká rovnoměrná tažnost pak ukazuje na dobrou tvárnost bez ztenčování stěny výlisku. Z těchto důvodů je třeba považovat určování rovnoměrného prodloužení za vhodný doplněk zkoušky tahem. Rovnoměrná tažnost A_g se pak vypočte:

$$A_g = \varepsilon_g \cdot 100 = 100 \frac{\Delta L_g}{L_0} [\%] \quad (17)$$

Kde: L_0 je původní měřená délka

L_g je délka měřeného úseku při dosažení maximální rovnoměrné (homogenní) deformace

$\Delta L_g = (L_g - L_0)$ je přírůstek délky do velikosti maximální homogenní def.

Délku měřeného úseku tyče je v tomto případě možno zvolit libovolně, protože se u tyče nevyskytuje zaškrčení.

Rovnoměrná tažnost má další přednosti:

1) Rovnoměrná tažnost charakterizuje velikost maximální rovnoměrné deformace materiálu

2) Rovnoměrná tažnost není závislá na počáteční měřené délce, takže tuto počáteční délku lze stanovit podle okamžité potřeby. Z toho vyplývá, že hodnota rovnoměrné tažnosti je rovna tažnosti měřené na nekonečně dlouhé tyči a je tedy číselně nejnižší hodnotou tažnosti vůbec

3) Určení rovnoměrné tažnosti netrvá déle než určení celkové tažnosti

4) Rovnoměrná tažnost se může určovat na nepřetržené tyči a tím odpadá chyba měření vyplývající se skládání dvou polovin přetržené tyče k sobě;

5) Při určování rovnoměrné tažnosti není třeba se obávat přetržení tyče mimo měřené pásmo;

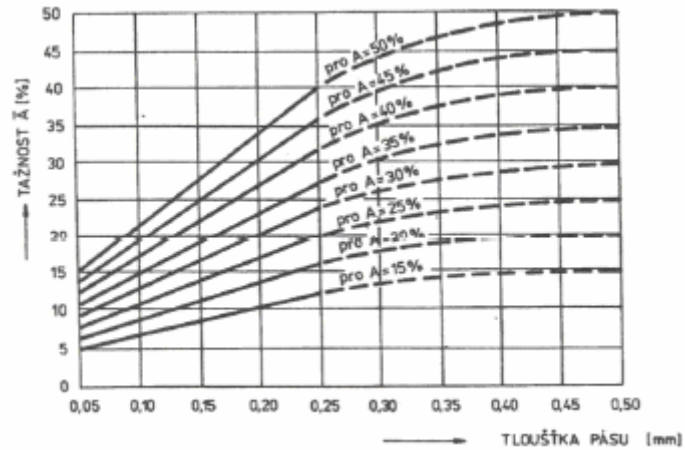
6) Určování rovnoměrné tažnosti nebrání určení ostatních dalších požadovaných mechanických parametrů. Celková tažnost se dá zjistit novým vložením zkušební tyče do zkušebního stroje a dodatečným přetržením.

Tažnosti velmi tenkých plochých tyčí

Hodnoty tažnosti zjištěné u plochých tyčí nejsou ovlivněny tloušťkou tyče, pokud tato tloušťka je větší než 0,5 mm.

U plochých tyčí při tloušťkách menších než 0,5 mm hodnoty tažnosti s tloušťkou klesají, přestože se jedná o totožný a stejně zpracovaný materiál. Hodnoty tažnosti

zkušební tyče tenčí než 0,5 mm, a to až do tloušťky 0,05 mm, lze určit z diagramu uvedeném na OBR.17, který vychází ze znalosti tažnosti při minimální tloušťce zkušební tyče 0,5 mm a platí pro všechny oceli. V rozmezí tlouštěk tyče 0,50 až 0,25 mm je pokles hodnot tažností nelineární a na obrázku je vyznačen čárkovaně.



OBR. 17 Určení tažnosti $A'_{80 \text{ mm}}$ plochých tyčí o tloušťce pod 0,5 mm z hodnot tažnosti $A_{80 \text{ mm}}$ [1]

Z grafického znázornění je patrný lineární pokles tažnosti $A_{80 \text{ mm}}$ v rozmezí tlouštěk zkušební tyče 0,25 až 0,05 mm. Pro oceli se snížená tažnost $A'_{80 \text{ mm}}$ vypočte ze vztahu:

$$A'_{80 \text{ mm}} = A_{80 \text{ mm}} \cdot (2,45 \cdot h + 0,2) \quad (18)$$

Kde: $A'_{80 \text{ mm}}$ [%] je hodnota tažnosti $A_{80 \text{ mm}}$ pro tloušťku h (0,05 – h – 0,25 mm)

$A_{80 \text{ mm}}$ [%] je hodnota tažnosti $A_{80 \text{ mm}}$ zjištěna při tloušťce 0,50 mm a větší

h [mm] je tloušťka zkušebního materiálu v rozmezí 0,05 až 0,25 mm

Poznámka: Normy uvádějí i hodnoty celkových tažností A_t což je označení pro tažnosti zahrnující deformace plastické i elastické, které je možno zaznamenávat na moderních trhacích strojích používající průtahoměr. V technické praxi se ale tyto tažnosti nepoužívají.

Kontrakce (zúžení)

Kontrakce Z vyjadřuje procentuální poměr průřezu přetržené zkušební tyče k jejímu původnímu průřezu. V technické praxi se určuje pouze u kruhových tyčí po změření průměru tyče v místě lomu tyče. Zjištění průměru zúžené části kruhové tyče po přetržení není obtížné, protože tvar zúženého průřezu zůstává kruhový. Hodnoty kontrakce se zaokrouhlují na celá procenta. [1]

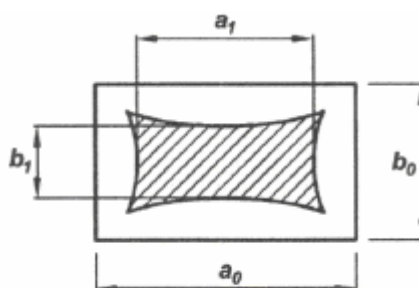
$$Z = 100 \cdot \frac{\Delta S}{S_0} [\%] \quad (19)$$

Kde: S_u [mm²] je průřez tyče v místě přetržení

S_0 [mm²] je původní průřez tyče

$$\Delta S = S_0 - S_u$$

U tyčí jiných než kruhových průřezů se kontrakce určuje výjimečně právě z důvodů obtížnosti zjišťování zúženého průřezu, jehož tvar se již značně odlišuje od tvaru původního nehledě ještě k tomu, že výsledná hodnota je nižší než na tyči s průřezem kruhovým z téhož materiálu. U pravoúhelníkového průřezu se proto postupuje tak, že se za zúžený průřez považuje vepsaný pravoúhelník o ploše $a_1 \cdot b_1$ – OBR.18. Tím je přibližně kompenzováno skutečné menší zúžení tyčí s pravoúhlým průřezem. [1]



OBR. 18 Kontrakce obdélníkového průřezu [1]

1.4 Zkoušky tvrdosti

Tvrdost je obecně definována jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa do jeho povrchu. Každá naměřená tvrdost je funkcí celé řady činitelů, jako jsou pružné a tvárné vlastnosti tělesa, jeho rozměry, velikost zatížení, tvar indentoru, rychlost a doba vnikání indentoru atd. Největší korelace tvrdosti je s mezí pevnosti. [1]

Výhodou zkoušek tvrdosti je jejich operativnost. Nevyžadují ani nákladná zařízení a někdy ani nadměrně pracnou přípravu vzorků, přičemž se povrch materiálu poruší jen nepatrně. Pomocí těchto zkoušek je možno získat informativní údaje o pevnosti materiálu, aniž by bylo nutno součást porušit. Před zkouškou se však musí odstranit povrchová vrstva v případech, má-li tato vrstva jinou tvrdost než základní materiál, což se např. stává u oduhličeného nebo naopak nahličeného povrchu ocelí, výskytu okují aj. [1]

Zkoušky tvrdosti kovových materiálů se provádějí především jako zkoušky vnikací, v určitých případech také jako odrazové. [1]

Podstatou vnikacích zkoušek je zatlačování zkušebního tělesa definovaného tvaru, tzv. indentoru kolmo do povrchu zkoušeného materiálu. Výsledkem je určitá trvalá deformace

materiálu pod indentorem. [1]

Od počátku zkoušky až do meze úměrnosti je materiál deformován pouze pružně, takže o deformaci rozhoduje především modul pružnosti zkoušeného materiálu. Proto v oblasti pružných deformací není tvrdost materiálovou vlastností. Na to je nutné pamatovat zejména při zkoušení velmi tvrdých materiálů a při zkouškách, kdy se používají velmi malé zatěžovací síly (např. mikrotvrdost podle Vickerse). [1]

Výsledky zkoušek tvrdosti proto vyjadřují dvě vlastnosti materiálu: odpor proti deformacím pružným a proti deformacím plastickým. Při vnikacích zkouškách výrazně převažuje odpor proti deformacím plastickým. [1]

1.4.1 Zhodnocení různých metod měření tvrdosti

Vztah mezi mezí pevnosti a tvrdostí, byť jen přibližný, je hlavní příčinou obliby zkoušek tvrdosti. Jednoduchým způsobem a bez velkého porušení výrobku je možno zkouškou tvrdosti najít u kovových materiálů přibližný obraz o jeho pevnosti. V praxi se nejčastěji používá vnikacích zkoušek tvrdosti, odrazových zkoušek se používá zcela výjimečně.

Zkouška tvrdosti podle Brinella

Je nejužívanější zkouškou pro měkké a středně tvrdé materiály - do 450 HB. Velmi tvrdé materiály s ocelovým indentorem nelze měřit z důvodů znatelné deformace ocelové kuličky, která již nevytváří kulový vrchlík, a proto se pro tyto materiály

používají kuličky tvrdokovové nebo se použije jiná metoda zkoušení. Výhodou Brinellovy zkoušky je zjištění průměrné tvrdosti materiálu z větší plochy, zvláště jestliže je materiál tvořen dvou a vícefázovou strukturou o značně rozdílných tvrdostech jednotlivých fází. Z tohoto důvodu je Brinellova metoda vhodná pro měření heterogenních materiálů, jako jsou např. lité materiály, které mají většinou hrubší a nestejnou strukturu (grafitická litina). Zkoušený vzorek přitom nevyžaduje příliš náročnou úpravu povrchu. Nevýhodou je poměrně velký vtisk, který porušuje vzhled povrchu. [1]

Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Výhodou je její jednoduchost a rychlost, protože hodnota tvrdosti se získává přímým odečtením na stupnici tvrdoměru. Příprava vzorku nevyžaduje zvláštní úpravu povrchu kromě někdy nutného odstranění příliš silné povrchové vrstvy o jiné tvrdosti (např. okuje nebo oduhličené vrstvy). S ohledem na tyto skutečnosti je Rockwellova metoda zvláště vhodná pro automatizované zkoušky v hromadné výrobě. Pomocí této zkoušky lze určovat tvrdost jak měkkých, tak i velmi tvrdých materiálů. Nelze však určovat tvrdost nadměrně tenkých plechů a pásů. [1]

Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Je nejpřesnější užívanou vnikací metodou a je univerzální pro všechny materiály. Výhodou je velmi malý vtisk a tím i možnost změření tvrdosti pro nejtenčí plechy a pásy jedním druhem indentoru. Je to umožněno používáním různých zatěžovacích sil. Je to i jediná metoda, kterou je možno zjistit tvrdosti i jednotlivých fází struktury použitím mikrotvrdosti. Zkouška tvrdosti podle Vickerse je ze všech metod tvrdosti jediná, která dává jednotnou stupnici tvrdosti od nejměkčích ocelí až po nejtvrďší kalené ocelí, při čemž jsou tvrdosti na velikosti zatížení prakticky nezávislé. Poměr čísel tvrdosti odpovídá skutečným poměrům, tzn., že materiál o tvrdosti 200 *HV* má dvojnásobnou tvrdost a tím i pevnost, než kovový materiál o tvrdosti 100 *HV*. To u čísel získaných jinými metodami neplatí. Další výhodou je, že vtisk je poměrně malý a tím se měřená plocha nepoškozuje. [1]

Zkouška tvrdosti podle Vickerse se nehodí pouze pro materiály hrubozrnné a nehomogenní, u nichž je malý vtisk nevýhodný a proto nelze získat jednoznačné výsledky tvrdosti. Další nevýhodou Vickersovy zkoušky je nutnost pečlivé úpravy

měřené plošky pro provedení vpichu a přesné změření délek úhlopříček a to tím přesněji, čím nižšího zatížení je použito. [1]

1.4.2 Vztah mezi tvrdostí a mezí pevnosti

Hodnoty jednotlivých tvrdostí nelze exaktně převádět na jiné tvrdosti nebo na meze pevnosti v tahu a ty pak brát jako rovnocenné k hodnotám zjištěným příslušnou zkouškou. Přesto existují převodní tabulky pro zkoušky tvrdosti a meze pevnosti (např. ČSN EN ISO 18265 Kovové materiály - Převod hodnot tvrdosti). Převod je však možné provést pouze informativně nebo na základě dohod pro jednotlivé konkrétní případy, kdy jsou pro přepočty k dispozici spolehlivé podklady. Je však nutné vždy uvést, že uváděné hodnoty byly získány tabulkovým porovnáním, a udat zdroj převodní tabulky nebo autora tabulek. [1]

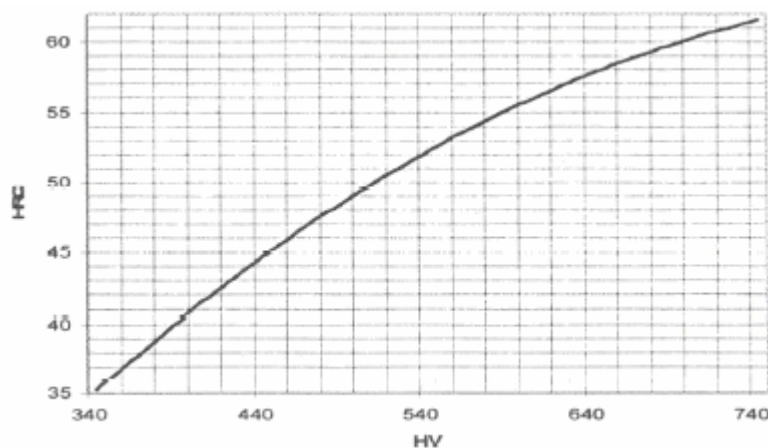
Vztah R_m s HV pro oceli uhlíkové a nízkolegované je podle některých odborníků ve velké shodě s výsledky fy Böhler. Na druhé straně se ale ne zcela shodují s převody jiných zdrojů.

$$R_m = 3,37.HV - 35, \text{ a naopak } HV = 0,297.R_m + 10 \quad (20)$$

Porovnání R_m a HBW podle fy Böhler:

$$R_m = 3,53.HBW - 36, \text{ a recipročně } HBW = 0,283.R_m + 10 \quad (21)$$

Porovnání HRC a HV podle fy Böhler je dáno v OBR.19



OBR. 19 Vztah mezi HRC a HV podle fy Böhler

2. Možnosti obrazové analýzy pro studium materiálů

Vlastnosti obrazové analýzy nabízejí další a rozsáhlejší možnosti zjišťování mechanických vlastností materiálů. Jedná se především o možnost zvětšení pozorovaného a zkoumaného povrchu, popř. plochy vzorku. Mezi základní možnosti využití patří mikroskopie struktury vzorku a obrazová analýza, kde je možnost promítnutí vytvořeného obrazu na monitor PC a jeho následná úprava, měření, popsání atd.

2.1 Mikroskopie

Metalografická analýza

Pod strukturou kovu, nebo slitiny rozumíme projev její krystalické stavby na vhodně upraveném řezu, nebo lomové ploše. Zkoumání struktury je neoddělitelnou součástí studia závislosti mezi strukturou a vlastnostmi kovů ve vědeckém výzkumu a kontroly materiálu, popřípadě technologického postupu, v praxi. Na rozdíl od biologických preparátů, které jsou průsvitné, se v metalografii pracuje se světelným mikroskopem. Světelná metalografická mikroskopie je nejpoužívanější zobrazovací metodou strukturní analýzy. Je založená na pozorování odraženého světla od rovinných řezů vzorku kovových materiálů světelným mikroskopem. Umožňuje hodnotit strukturní útvary v rovinném řezu při zvětšení do 2000x. Základní úlohou metalografické analýzy je identifikace a klasifikace strukturních složek kovových materiálů. [10]

2.2 Obrazová analýza

Pomocí vhodného programu a optického zařízení je umožněna daleko přesnější analýza vzorku. Je zde možnost vzniklý obraz na monitoru dále upravit tak, aby byla možnost měřit vzniklé deformace, spočítat výskyt určitých jevů apod. Mezi základní úkony pro tuto úpravu jsou různé natočení, korekce osvětlení, změna kontrastu, odstranění šumu, fototransformace apod.

Protože cílem této práce není mikroskopické zkoumání struktury složení materiálu vzorku jako například po lomu, zjišťování velikosti krystalu, nebo vzniklé typy tvaru grafitu (u grafitických litin), nebude jí proto v této práci věnována velká pozornost. Cílem práce je pomocí určitého zvětšení na vytvořeném obrazu sledovat přímo danou deformaci plochého zkušebního tělíska při zatěžování tahem a tomuto bude věnována pozornost právě v praktické části této práce.

3. Praktická část - Metodika měření

Princip měření byl zvolen takový, že pomocí kamery značky Micrometrics 122CU se vyfotí obrazy skutečného stavu vzorku během zatěžování tahem. Ze vzniklých fotek se, za použití vhodného zvětšení, změří přesné deformace, které na zkušebním tělísku vzniknou. Kamera byla připevněna pomocí speciálního nástavce přímo ke konstrukci zkušebního zařízení – OBR. 20 a ve stejných místech byla umístěna i lampa pro osvětlení vzorku.

Kamera byla spojena přímo s PC a její funkci umožňoval speciální program určený pro tuto kameru, Program Micrometrics SE Premium. Nevýhoda tohoto programu spočívala v tom že nebyl schopen zaznamenávat snímky sám od sebe v nějaké zvolené časové frekvenci, ale obraz musela vždy vytvořit osoba obsluhující zařízení. Sice možnost vytvořit video průběhu zkoušky program umožňoval, ovšem tento způsob byl zavrhnut z důvodu nízkého rozlišení obrazu. Proto byl i při zaznamenávání obrazů průběhu vždy na chvíli zkušební stroj zastaven, aby byla fotografie vytvořena v klidu a byla co nejostřejší.

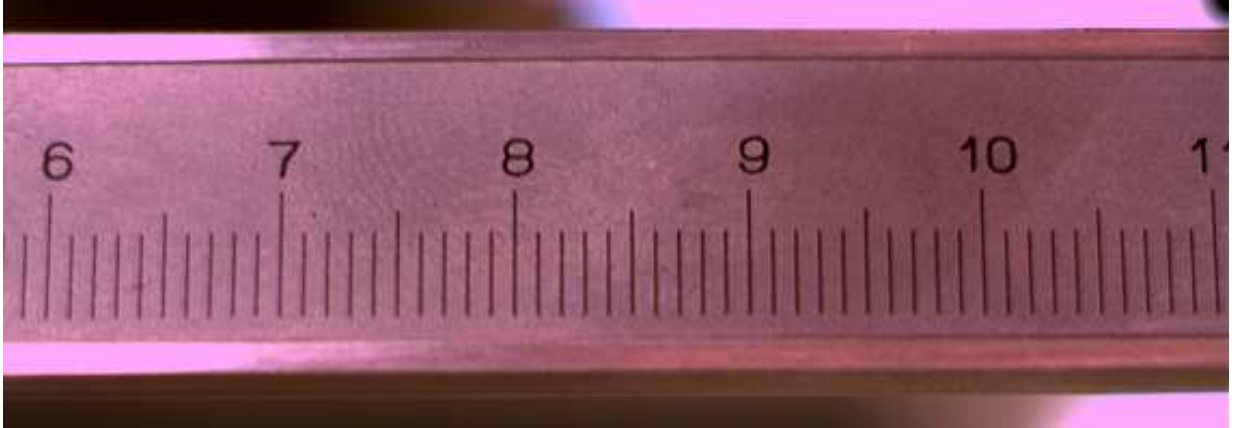


OBR. 20 Uchycení kamery a lampy na zkušebním zařízení

Kalibrace

Pro správnou funkci programu bylo nutné nejdříve vytvořený obraz zkalibrovat. Kalibrace programu spočívala v nastavení přesných rozměrů s jakými bude program pracovat, protože obraz na monitoru je zobrazen v určitém poměru ke skutečným hodnotám. Po uchycení kamery se na místo, kde bude poté uchyceno zkušební tělísko, uchytil nástroj na měření přesných délkových rozměrů. V tomto případě byl do pracovních čelistí umístěn ocelový metr – OBR.21. Následovalo seřízení objektivu, aby na monitoru byl zobrazen ostrý obraz. Přes speciální funkci se na monitoru změřila délková vzdálenost metru a napsala se skutečná vzdálenost. Od této chvíle program sám

přepočítával odměřené hodnoty na skutečné vzdálenosti a to s přesností na desetitisíciny milimetrů.

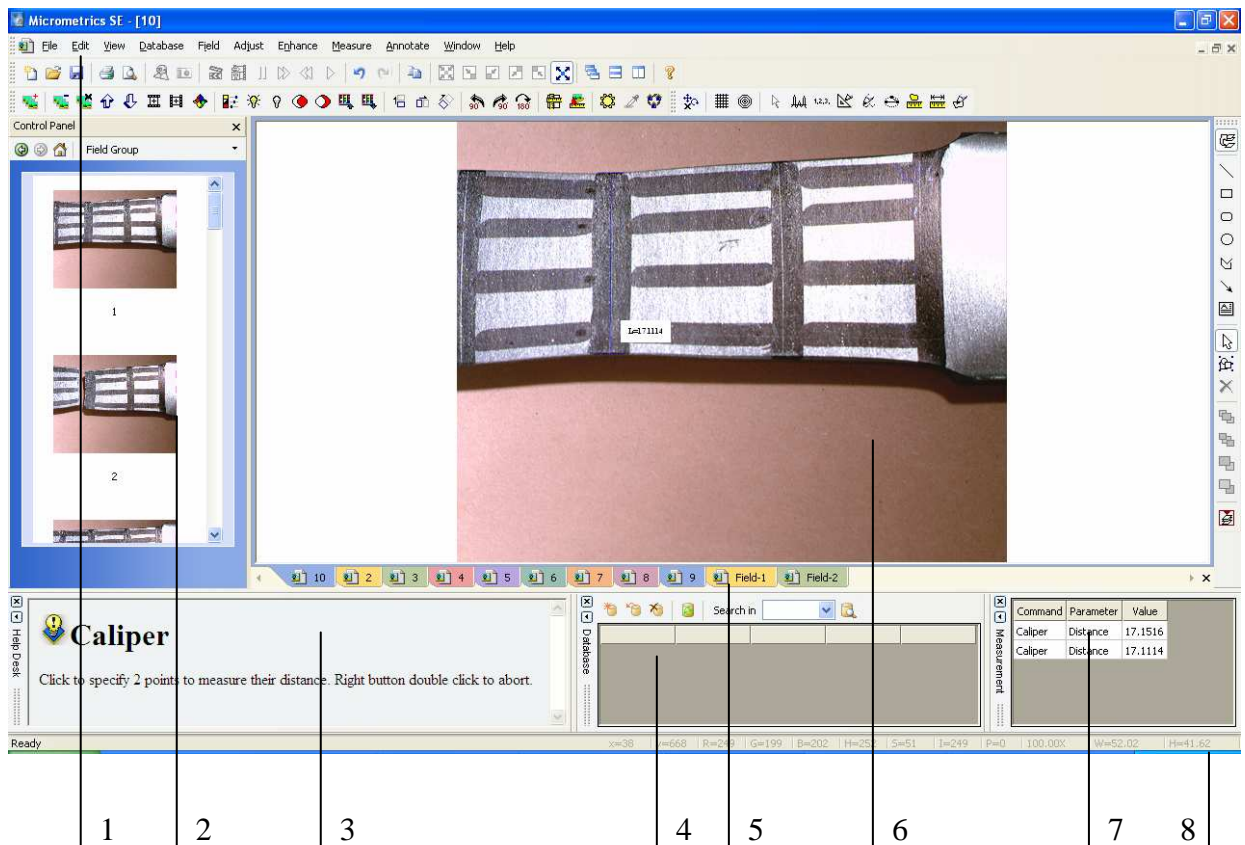


OBR. 21 Na monitoru zobrazen ocelový metr v čelistech pro kalibraci

Program

Micrometrics SE je software umožňující obrazovou analýzu snímku v optické mikroskopii. Ačkoli je tento program celkem jednoduchý, umožňuje provádění mnoha operací na zcela profesionální úrovni. Mezi základní patří úprava obrazu, nastavení jasu, kontrastu, barev apod. Dále měření různých vzdáleností, úhlů obvodů apod. Tyto hodnoty se měří s přesností až na 10^{-4} mm. [12]

Úprava obrázku spočívá převážně v možnosti vkládat text i grafiku do obrazu. Zpracování obrazu tvoří základní část obrazové analýzy. Výstupem tohoto procesu je obrázek, který vznikl z jednoho i více sejmutých obrázků. Micrometrics SE nabízí přes 20 nástrojů pro úpravu obrázku dle potřeb jednotlivých aplikací. Program disponuje mimo jiné skupinou příkazů pro vytvoření obrazu z několika sejmutých obrázků. [12]



OBR. 22 Hlavní okno programu Micrometrics

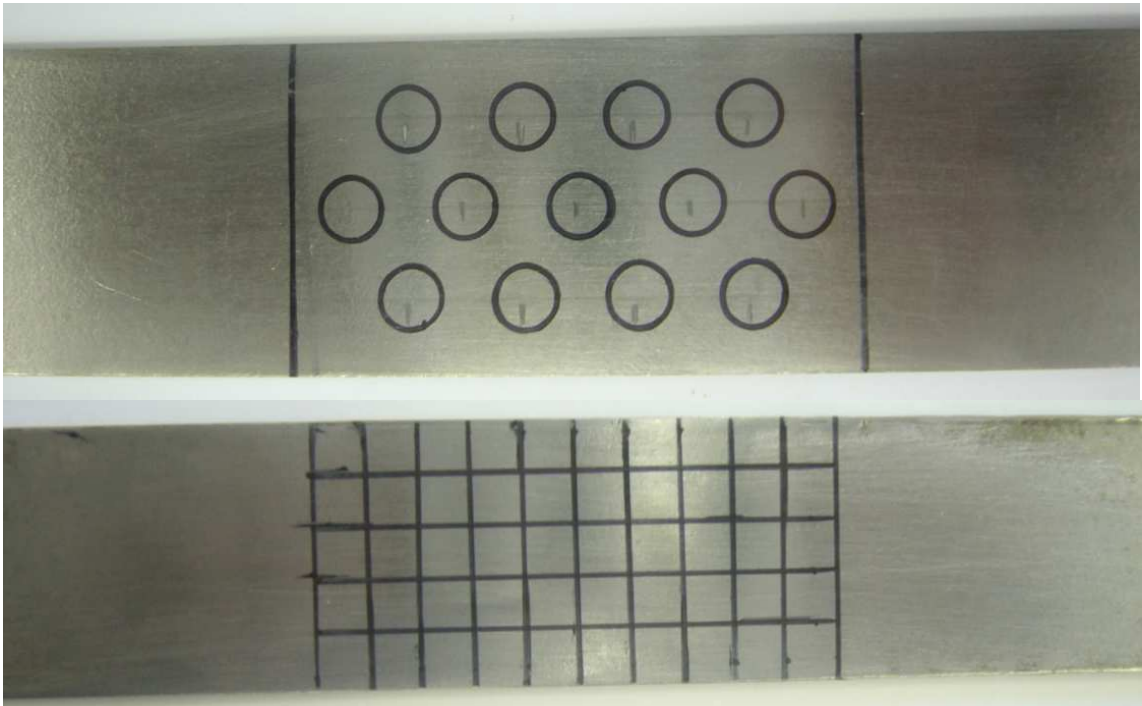
Hlavní okno programu je rozděleno na několik základních sekcí. Kromě běžných nabídek a nástrojových lišt {1} je zde skupina polí {2}, okno nápovědy {3}, okno databáze {4}, obrazové záložky {5}, obrazové okno {6}, okno výsledkům měření {7}, informační stavový řádek {8}.

3.1 Zkušební tělísko - mřížka

Protože se jednalo o nové optické zařízení se specifickým programem a nebyly s ním žádné zkušenosti, byly nejdříve zvoleny vzorky pro zkouškové měření z klasické konstrukční oceli třídy 11 373 ve tvaru plochého plechového vzorku o délce 150 mm a šířce 25 mm. Pro experimentální měření se poté přešlo na chromovou feritickou korozivzdornou ocel 1.4016.

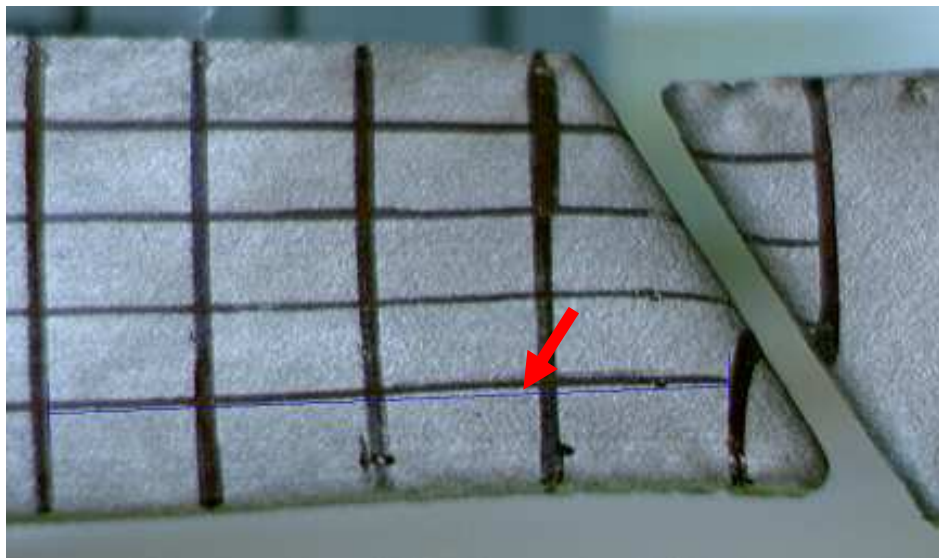
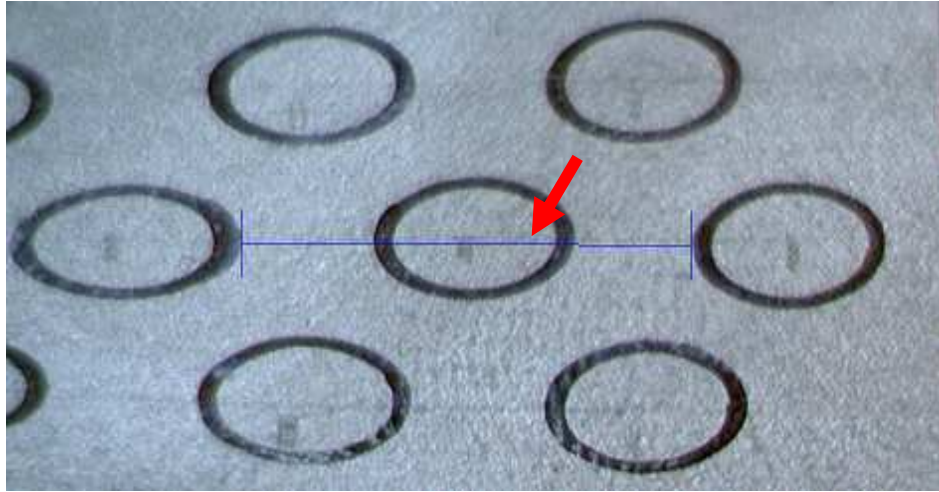
Aby vůbec bylo možné měřit nějaké vzdálenosti, bylo třeba se na obraze chytit nějakých záchytných (měřících) bodů, které by se během zatěžování vzdalovaly (popř. sblížovaly) a tím by se měřila změna vzdálenosti. Proto byla zkoumaná plocha zkušebního tělíska vybavena mřížkou, díky které by byly záchytné body snadno určeny.

Jako první zkušební mřížka byla navržnuta klasická mřížka o velikosti 5 x 5 mm anebo soustavou kruhových značek o průměru 5 mm. Mřížka a značky byly narýsovány na očištěný povrch pomocí nesmazatelného popisovače o tloušťce 0,5 mm – OBR.23. Z provedených zkoušek se zjistilo že vhodnější je mřížka než kolečka, protože v mřížce se pomocí kolmých rysek lépe zachytával a udržoval směr, a především samotné body měření, které byly křížením rysek vždy jasně definovány.



OBR. 23 Fotografie první mřížky a soustavy koleček

Hned při prvních pokusech se ale zjistilo špatné zvolení nákresu mřížky, resp. koleček. Tvar jako takový byl vhodný, ovšem při deformaci a určitém zvětšení na monitoru, se i tato stopa popisovače zdála velice široká a měření nebylo přesné. Bylo to dáno tím, že při tak přesném měření (desetitisíciny milimetrů) se jenom nepatrný pohyb kurzoru myši mohl odchýlit o několik setin až desetin milimetrů. A z důvodu poměrně široké stopy popisovače nebylo možno označit vždy naprosto přesně stejné body měření. Je sice možnost že se bude měřit na hranách stopy, ovšem i zde vznikaly díky deformace jisté nepřesnosti a není jistota že se vždy označí naprosto přesné body. Je to možné vidět na OBR.24. kde, zejména u soustavy koleček, nebylo snadné zajistit opětovné označení měřících bodů.



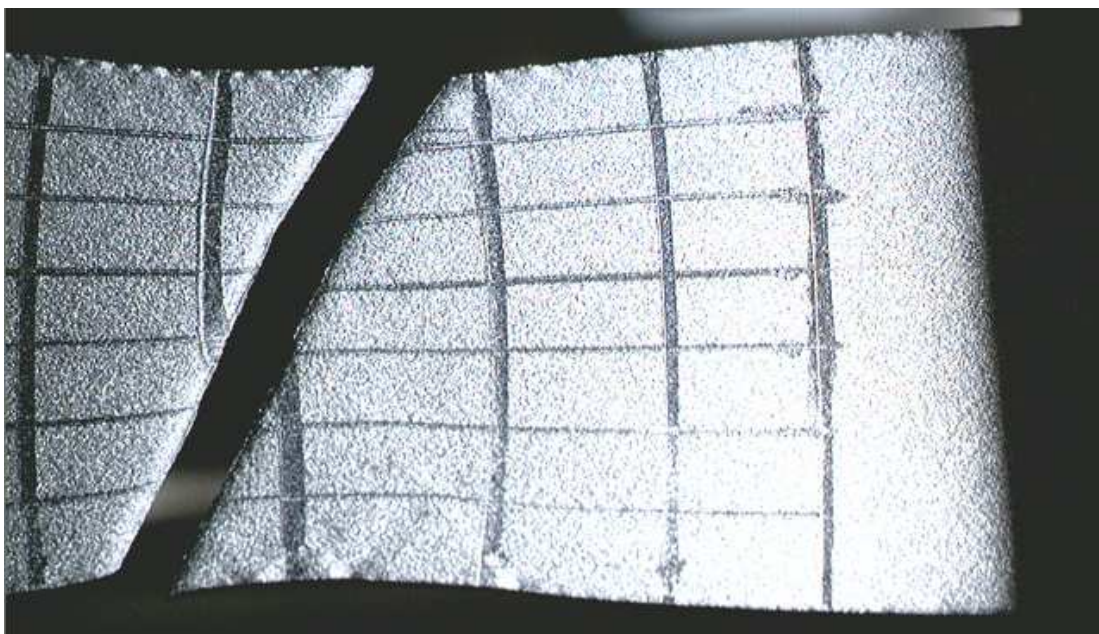
OBR. 24 Deformované první mřížky a koleček s měřicí úsečkou která se nesnadno uchytává do správných bodů z důvodu široké stopy popisovače

Z uvedeného důvodu bylo nutné narýsovat mřížku nějakým tenčím nástrojem. Proto bylo zvoleno strojařské rydlo. Rýhy byly z důvodu viditelnosti vyryty na již narýsovanou mřížku popisovačem – OBR.25.



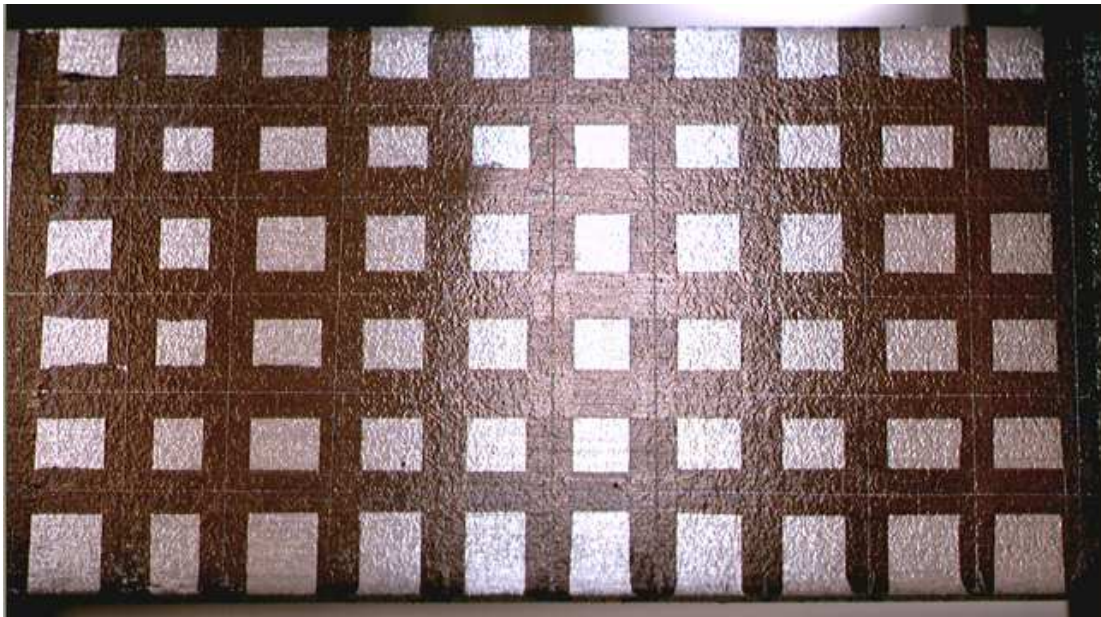
OBR. 25 Mřížka narýsovaná rydlem

Výsledný efekt byl daleko lepší než mřížka narýsovaná pouze popisovačem, ale ještě pořád byla při deformaci rýha poměrně velká a tím pádem se vyskytl ten samý problém – OBR.26.



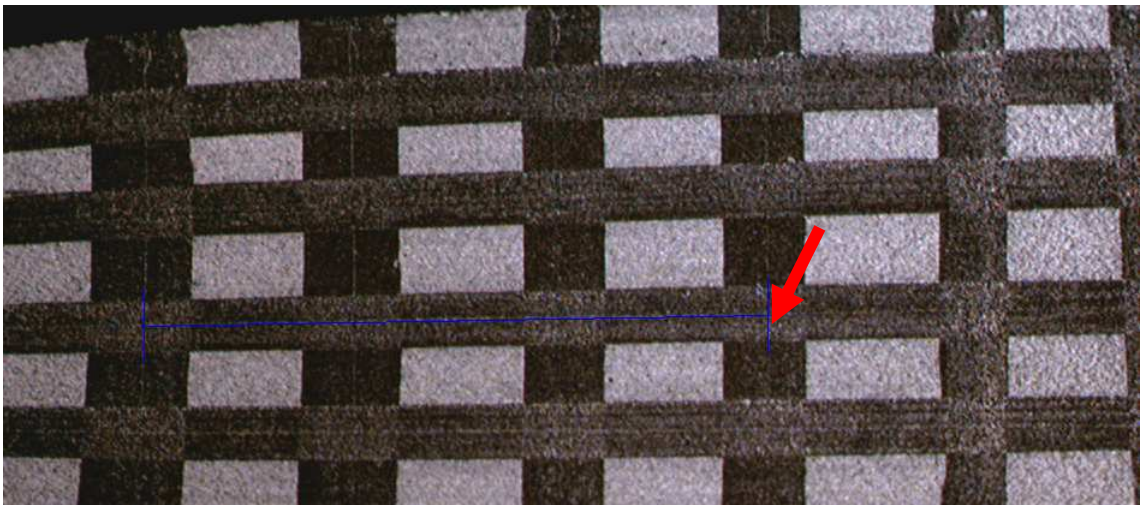
OBR. 26 Přetržená mřížka narýsovaná rydlem

Bylo třeba zvolit nástroj, který by byl schopen vytvořit rysku, která by byla dostatečně vidět, ale zároveň taková, aby byla tak tenká, že by se nezvětšovala zároveň s natahováním vzorku. Navrhnuta byla klasická šicí jehla. Kvůli lepší viditelnosti rysky jehly, se opět rýsovalo až do mřížky narýsované popisovačem – OBR.27.



OBR. 27 Mřížka narýsovaná šicí jehlou

Tento způsob výroby mřížky se ukázal jako správný a dostačující, protože i po deformaci zůstala ryska tenká a hodnoty se snadno vyčetly – OBR.28.

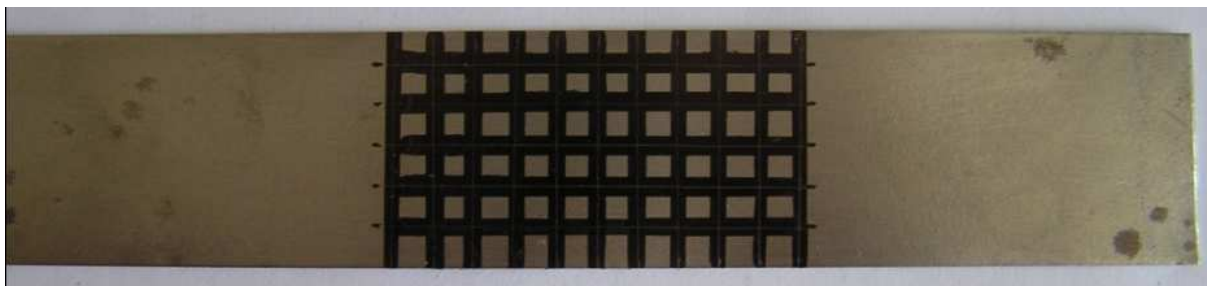


OBR. 28 Mřížka s jehlou po deformaci – snadné uchycení do stejných bodů

3.2 Tvar zkušebního tělíska

Jako další problém se ukázal být tvar vzorku. Při prvních zkušebních experimentech bylo použito plochých vzorku, kde byla po celé délce šířka konstantní OBR.29. Protože objektiv kamery má určité rozměrové omezení, nebylo možné snímat celou plochu vzorku a proto docházelo k tomu, že se vzorek zužoval a přetrhnul mimo zorné pole kamery, popřípadě přímo u čelisti. Na konečné vzorové experimenty měření byl poté použit vzorek rozměrů vycházejících z nepoměrné zkušební tyče dle normy

ČSN EN 10002-1, tzv. tvaru kosti OBR.30. Především kvůli toho aby největší zúžení probíhalo ve středu objektivu.



OBR. 29 Nevhodný tvar zkušebního tělíska při prvních zkouškách



OBR. 30 Vhodný nepoměrný tvar zkušebního tělíska, tvz. tvar kosti

Jako další velký problém se ukázalo být nasvícení vzorku. Protože jak u naleštěné oceli tak i u nerezové oceli se světlo lampy odráželo od zkoumané plochy a nebylo přes něj vidět narýsovanou mřížku popřípadě vůbec žádné záchytné body mřížky. Vyřešilo se to poměrně zdlouhavým přesměrováváním osvětlení i když ze dvou stran byl pohyb značně omezen z důvodů existence pracovních čelistí zkušebního zařízení, které zaprvé zavázely a zadruhé stínily.

Také bylo vhodné umístit za zkušební tělísko vhodné pozadí, díky kterému by byly jasněji vidět hrany tělesa. Černé vhodné není z důvodu černé barvy kurzoru myši, který se poté při měření vzdáleností ztrácel v okamžiku překrytí černého pozadí. Vhodnější byl nějaký světlejší, například bílý nebo světle červený který byl i použit pro experiment.

4. Analýza dat

4.1 Modul pružnosti v tahu

První z úkolů této práce bylo zjistit zda by se pomocí použité optiky a obrazové analýzy dal vypočítat modul pružnosti v tahu tzv. Youngův modul. Tento modul sice umí vypočítat i program sestavený přímo pro dané zkušební zařízení, ovšem jeho výsledné hodnoty byly poněkud zkreslené a velice nepřesné. Protože při porovnání hodnot vypočtených zkušebním zařízením s hodnotami tabulkovými, tak se v jednotkách GPa lišily o jeden až dva řády. Proto se mělo pomocí dané optiky zjistit zda by se dal modul pružnosti v tahu vypočítat daleko přesněji.

Nejdříve zkoušky probíhaly za použití vzorků z konstrukční oceli 11 373 a poté se vzorky z chromové feritické korozivzdorné oceli. Tabulka udávala u konstrukční oceli třídy 11 373 hodnotu pro modul pružnosti v tahu 206 GPa a pro chromovou feritickou korozivzdornou ocel 220 GPa.

4.1.1 Vlastní měření

Více důležitá, než se ze začátku předpokládalo, se ukázala být velice jemná a přesná mřížka. Protože zachytit kurzorem myši opravdu přesně správný bod se ukázalo jako poměrně velký problém, vyžadující velmi přesnou a jemnou práci. Protože i odchylka v řádech setin a desetin milimetrů znamenala rozdílnou hodnotu modulu pružnosti až o jeden, v krajních případech až o dva, řády.

Již z prvních měření se zjistilo, že zde může velice snadno docházet k nepřesnostem vzniklým při získávání délkových hodnot po deformaci a to právě z důvodu velice jemné práci s kurzorem myši neboť, jak již bylo zmíněno, i změna o setinu až desetinu milimetru má za následek poměrně velkou změnu modulu pružnosti. Určitá možnost jak předejít této chybě lidského faktoru je změřit několik vzdáleností mezi určitými body na různých místech – OBR.31 a vypočítat aritmetický průměr. Poté změřit vzdálenosti mezi těmi samými body na namáhaném vzorku a opět přepočítat do aritmetického průměru viz TAB.1. Do vzorečku se pochopitelně dosadí získané aritmetické průměry.



OBR. 31 Pět různých měřících pozic – již při zatěžující síle 6700 N

	L₀ [mm]	L_{6700N} [mm]
Pozice 1	25,1992	25,2002
Pozice 2	25,6056	25,6063
Pozice 3	25,6473	25,6508
Pozice 4	25,8811	25,892
Pozice 5	26,3378	26,5428
Σ L	128,892	128,771
Σ L/5	25,778	25,754
ΔL_{celková} [mm]	0,121	
ΔL/5 [mm]	0,0242	

TAB. 1 Statisticky vypočítaná průměrná hodnota z pěti míst (pozic)

Poté, jakmile byly známy hodnoty a spočítána průměrná hodnota z pěti měření, byly pro porovnání s průměrnou hodnotou navrhnuté hodnoty na pozicích 1 a 5, jejichž hodnota ΔL je o řád vyšší popřípadě nižší. Toto porovnání je znázorněno v tabulce TAB.2

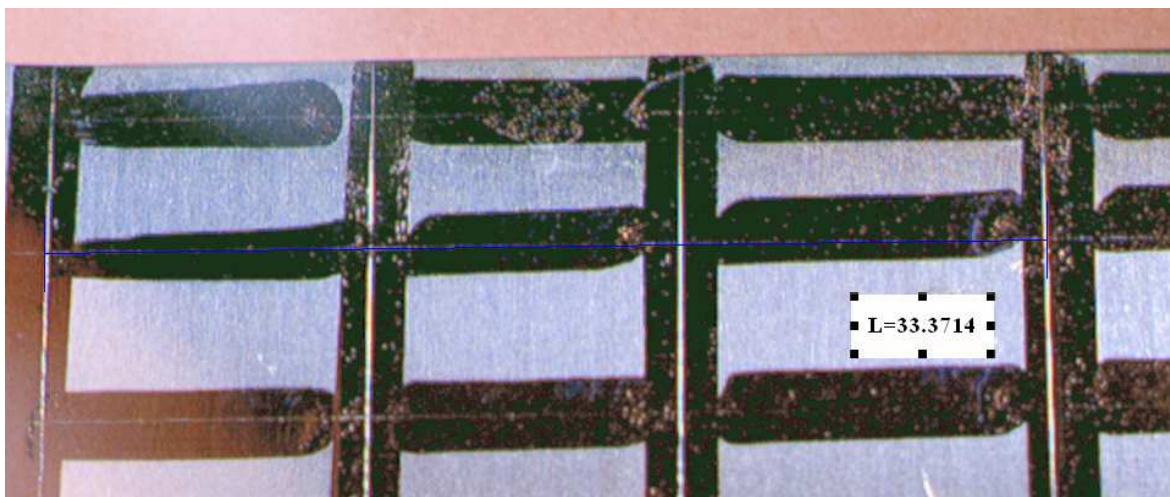
	Statisticky vypočteno	Pozice 1	Pozice 2
L₀ [mm]	25,778	25,199	26,438
ΔL [mm]	0,0242	0,001	0,105
S [mm²]	35,6		
E [GPa]	200,5	4742,5	47,4
E tabulková [GPa]	206		

TAB. 2 Porovnání modulu pružnosti z pozic 1 a 5 se statisticky vypočítanou

Z této tabulky je patrné že statisticky vypočítaná průměrná hodnota je nejpřesnější a téměř stejná jako tabulková hodnota. Na druhou stranu je třeba poznamenat, že pro porovnávací hodnoty byly použity mezní hodnoty s maximálním (resp. minimálním) rozdílem a proto jsou tak hodně rozdílné. A při porovnání s jinými, bližšími hodnotami by nebyly rozdíly Youngova modulu tak vysoké. Jedná z možností jak měření ještě zpřesnit by bylo při použití ještě více pozic měření například nepočítat s dvěma krajními hodnotami, které mají mezi sebou největší rozptyl, jednu nejvyšší a druhou nejnižší naměřenou hodnotu.

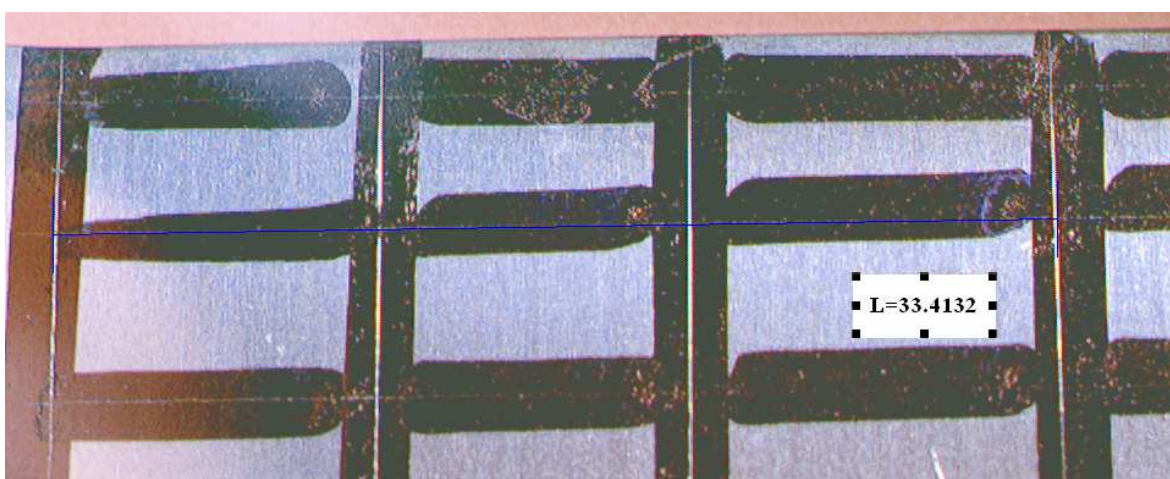
4.1.2 Experimentální příklad

Na OBR.32. se jedná o detail naměřené skutečné vzdálenosti mezi dvěma vybranými body. Jedná se o nezátížený vzorek a tudíž ještě bez deformace. I zde byla samozřejmě změřena deformace na více místech a poté vypočítaná průměrná hodnota, která se poté použila pro výpočet.



OBR. 32 Nezatížený vzorek

Vzorky byly poté zatěžovány a zatěžování bylo zastaveno v okamžiku, kdy jsme se ještě nacházeli v oblasti platnosti Hookova zákona. Poté byl sejmут další snímek, který byl použit pro stanovení Youngova modulu pružnosti – OBR.33.



OBR. 33 Vzorek zatížen silou 10800 N

Z odměřených vzdáleností na zatíženém i nezatíženém vzorku poté byl vypočtený modul pružnosti v tahu. Pro výpočet bylo použito jednoduchých vzorců. Protože modul pružnosti v tahu byl měřen ještě před mezí kluzu v místech kde se předpokládala závislost napětí-deformace ve tvaru lineárního průběhu. Proto byl použit vzorec který charakterizuje Hookův zákon.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F}{S \cdot \varepsilon} = \frac{F \cdot L_0}{S \cdot (L - L_0)} [\text{GPa}] \quad (22)$$

Kde: F [N] je zatěžující síla
L₀ [mm] je původní naměřená vzdálenost
L [mm] je konečná naměřená vzdálenost
S [mm²] je průřez plochy

	Materiál	L ₀ [mm]	L [mm]	ΔL [mm]	F [N]	S [mm ²]
1. vzorek	11 373	24,9446	25,4354	0,4908	6200	29,00
2. vzorek	11 373	30,3758	30,6267	0,2509	4700	26,00
3. vzorek	11 373	23,2592	23,3010	0,0418	6600	35,30
4. vzorek	11 373	30,2660	30,3067	0,0406	3900	29,50
5. vzorek	11 373	29,7249	29,8196	0,0947	3200	24,90
6. vzorek	11 373	29,6837	29,7060	0,0222	3600	28,80
7. vzorek	Nerez	33,3714	33,4132	0,0418	10800	36,00

TAB. 3 Vstupní hodnoty pro vybrané vzorky pro změření modulu pružnosti

	E-tabulková [GPa]	E-naměřená zkušebním zařízením [GPa]	E-vypočtená [GPa]	ΔE -rozdíl mezi tabulkovou a vypočítanou hodnotou
1. vzorek	206,0	8,7	10,9	195,1
2. vzorek	206,0	9,9	21,9	184,1
3. vzorek	206,0	10,0	104,1	101,9
4. vzorek	206,0	12,1	98,5	107,5
5. vzorek	206,0	14,4	40,3	165,7
6. vzorek	206,0	13,6	167,0	39,1
7. vzorek	220,0	11,8	239,5	-19,5

TAB. 4 Moduly pružnosti

4.1.3 Vyhodnocení modulu pružnosti

Všechny vzorky z konstrukční oceli 11 373 byly ve tvaru o konstantní šířce a všechny vzorky z chromové feritické korozivzdorné oceli měly tvar nepoměrného zkušební tělesa.

Vzorky 1 a 2 se od tabulkové hodnoty lišily o řád a to nejvíce ze všech provedených pokusů, tento veliký rozdíl byl dán především špatnou mřížku narýsovanou pouze poměrně širokým popisovačem. Především vzorek 1 kde je místo mřížky soustava koleček je opravdu nevhodná a to hlavně z již zmíněných nevýhod jako je nepřesné určení měřících bodů a těžkého udržování jejich směrů.

U vzorku 3 byly výsledné hodnoty přesnější a shodují se tabulkovými alespoň v řádu. Na tento vzorek byla mřížka narýsovaná strojařským rydlem a tento postup naznačil, že se použita analýza pomalu ubírá správným směrem.

Na vzorky 4, 5 a 6 byly mřížky narýsovány velmi tenkou jehlou. Ovšem při měřeních 4 a 5 se ukázalo být nutností, aby bylo měření prováděno na nepoměrném zkušebním tělese, neboť při těchto měřeních se největší protažení a následné protržení uskutečnilo přímo u čelisti mimo zorné pole kamery, především z tohoto důvodu jsou výsledné hodnoty poměrně hodně zkresleny. U vzorku 6 protažení sice neproběhlo přímo u čelisti, ale ani před kamerou, ale i tak se protažení dalo poměrně dobře změřit a tudíž se naměřila daleko přesnější hodnota 167 GPa, které se lišily od tabulkové jen o 39,1 GPa. Z toho vyplývá, že když se tato hodnota porovná s hodnotou naměřenou programem ve zkušebním zařízení která byla 13,6 GPa, tak se zjistí že se dosáhlo velkého zpřesnění pro výpočet Youngova modulu.

Jako vzorek 7 byl použit experimentální příklad zkušební tělíska z nerezové oceli vhodnějšího, nepoměrného zkušební tělesa. Zde se opakovaně dosahovalo nejpresnější hodnot, které se od předepsané tabulkové hodnoty lišily jen o poměrně malé hodnoty.

Pro větší přesnost a prokazatelnost byly všechny tyto hodnoty vypočteny z několika (vždy minimálně 4), na různých místech změřených hodnotách a z nich poté vypočítaná průměrná hodnota která se použila pro výpočet Youngova modulu.

4.2 Graf napětí-deformace

Dalším úkolem této práce bylo zjistit, sestrojít a porovnat smluvní a skutečný graf napětí-deformace, který vznikl při zatěžování zkoušky tahem. Rozdíl mezi smluvním a skutečným grafem napětí-deformace byl vysvětlen v teoretické části této práce. Tento experiment byl proveden na stejných vzorcích ve tvaru nepoměrného zkušební tělesa z chromové feritické korozivzdorné oceli, stejných na kterých se zjišťoval modul pružnosti v tahu.

4.2.1 Vlastní měření

Grafy byly vytvořeny následujícím způsobem. Při zatěžování tahem se zatěžovací síla po určitých krocích zastavovala a v daném okamžiku byl vytvořen obraz při aktuální deformaci. Ze vzniklých obrazů deformací nebylo těžké změřit aktuální hodnoty zúžení a při znalosti hodnot jednotlivých sil, při kterých byly jednotlivé obrazy vytvořeny, se dal snadno pomocí těchto hodnot sestrojít skutečný graf napětí-deformace.

Obecný vzorec pro napětí

$$\sigma = \frac{F}{S} [MPa] \quad (23)$$

Vzorec pro aktuální napětí

$$\sigma_x = \frac{F_x}{S_x} = \frac{F_x}{a_x \cdot b_x} [MPa] \quad (24)$$

Kde: F_x [N] je aktuální síla
 S_x [mm²] je aktuální plocha průřezu
 a_x [mm] je aktuální šířka
 b_x [mm] je aktuální tloušťka

Zúžení

$$Z = \frac{S_0 - S_x}{S_0} = 1 - \frac{S_x}{S_0} \quad (25)$$

$$\Rightarrow S_x = S_0(1 - Z) \quad (26)$$

Změna deformace zúžení ve směru šířky a_x se změří snadno z pořízených obrazů, ovšem není možnost při jednotlivých zúženích přeměřit i aktuální změnu tloušťky b_x , tak proto se v tomto okamžiku naskytují dvě možnosti jak počítat se zúžením ve směru tloušťky.

$$\varepsilon = \frac{b_0 - b_x}{b_0} = 1 - \frac{b_x}{b_0} \quad (27)$$

$$\Rightarrow b_x = b_0 \cdot (1 - \varepsilon) \quad (28)$$

Rovnici (28) poté dosadíme do rovnice (24) a z nich získáme rovnici (29), do které se poté postupně dosadí obě možnosti pro zjištění zúžení ve směru tloušťky.

$$\sigma_x = \frac{F_x}{a_x \cdot b_0 \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (29)$$

1) Buďto se bude počítat s tím že dochází k rovnoměrnému zúžení ve všech směrech a tudíž se bude za zúžení tloušťky dosazovat zúžení šířky, to znamená že se bude zúžení proměňovat a nebude po celou dobu konstantní.

$$(1 - \varepsilon) = 1 - \frac{a_0 - a_x}{a_0} = 1 - 1 + \frac{a_x}{a_0} = \frac{a_x}{a_0} \quad (30)$$

A rovnici (30) dosadíme do rovnice (29) a vznikne (31).

$$\sigma_x = \frac{F_x}{a_x \cdot b_0 \cdot \frac{a_x}{a_0}} \quad (31)$$

2) Nebo za zúžení ve směru tloušťky dosadíme zúžení vypočtené z původního a konečného rozměru po přetržení, to znamená že za něj dosadíme konstantu která bude pro celý průběh stejná.

$$\varepsilon = \frac{b_0 - b_U}{b_0} \cdot 100[\%] \quad (32)$$

Kde: b_0 [mm] je počáteční tloušťka
 b_U [mm] je konečná tloušťka

$$(1 - \varepsilon) = 1 - \frac{b_0 - b_U}{b_0} = 1 - 1 + \frac{b_U}{b_0} = \frac{b_U}{b_0} \quad (33)$$

A rovnice (33) se opět dosadí do rovnice (29) a vznikne (34)

$$\sigma_x = \frac{F_x}{a_x \cdot b_0 \cdot \frac{b_U}{b_0}} \quad (34)$$

Pro sestavení smluvního grafu napětí-deformace se také použijí jednotlivé hodnoty zatěžovací síly jako u skutečného grafu napětí-deformace, ale vydělí se konstantním počátečním rozměrem plochy průřezu.

$$\sigma = \frac{F_x}{S_0} [MPa] \quad (35)$$

Kde: F_x [N] je aktuální síla
 S_0 [mm²] je počáteční plocha průřezu

Z provedené zkoušky jsme získali následující hodnoty viz TAB.5.

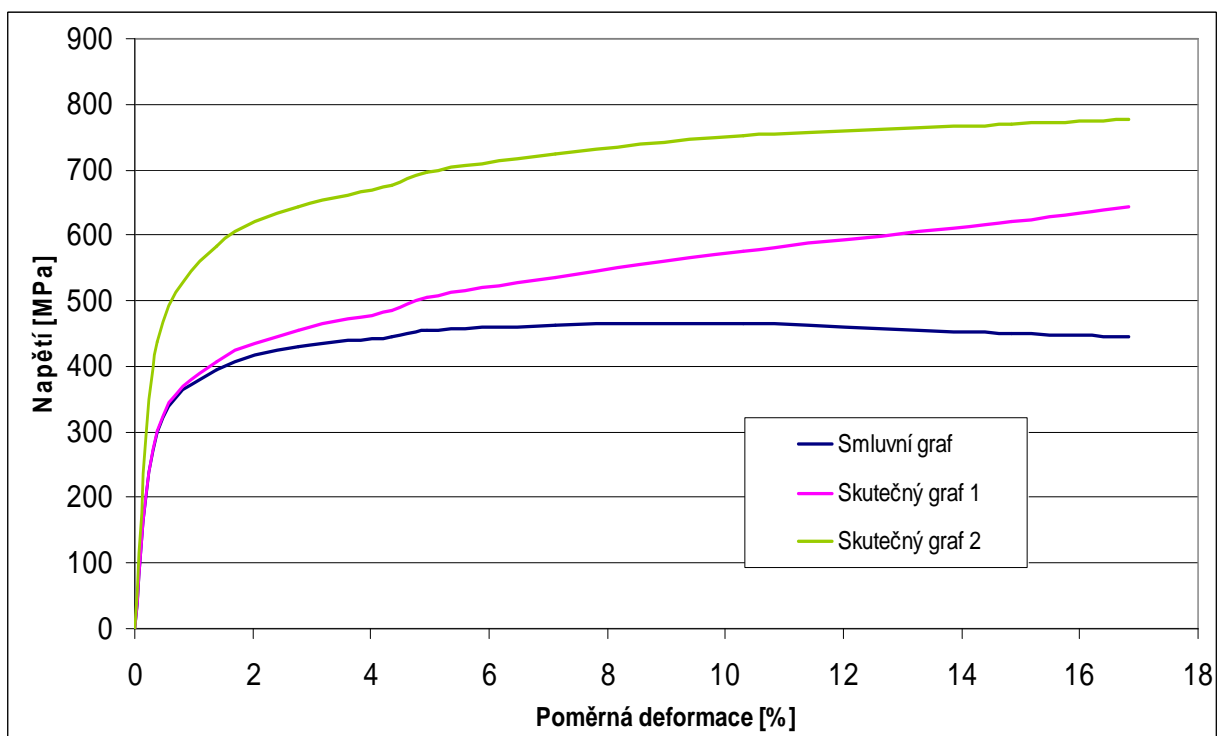
F [N]	Naměřená šířka [mm]	Přepočtená šířka [mm]	σ smluvní [MPa]	σ skutečné 1 [MPa]	σ skutečné 2 [MPa]	ϵ [%]
0	20,53	22,5	0	0	0	0
10800	20,44	22,41	300	302,37	438,08	0,39
14250	20,24	22,19	395,83	407,03	583,84	1,39
15500	19,96	21,88	430,56	455,46	644,12	2,77
16000	19,63	21,52	444,44	485,86	675,91	4,36
16400	19,51	21,39	455,56	504,23	697,13	4,95
16650	19,06	20,9	462,5	536,23	724,37	7,13
16700	18,41	20,18	463,89	576,46	752,18	10,29
16200	17,48	19,16	450	620,62	768,68	14,85
16000	17,07	18,71	444,44	642,55	777,3	16,83

TAB. 5 Vypočtené hodnoty pro sestrojení grafu napětí-deformace

Hodnota šířky naměřená v programu nemohla být použita rovnou, ale musela se přepočítat do skutečné hodnoty. Bylo to způsobeno nevhodně nastaveným softwarem programu, který sice snímal obraz o čtvercovém nárysu, ovšem na monitoru jej zobrazoval v nárysu obdélníkovém. Z toho vyplývá že délkové vzdálenosti se daly měřit rovnou, ale na ně kolmé šířkové rozměry se musely přepočítat, neboť byly zobrazeny v určitém zmenšení.

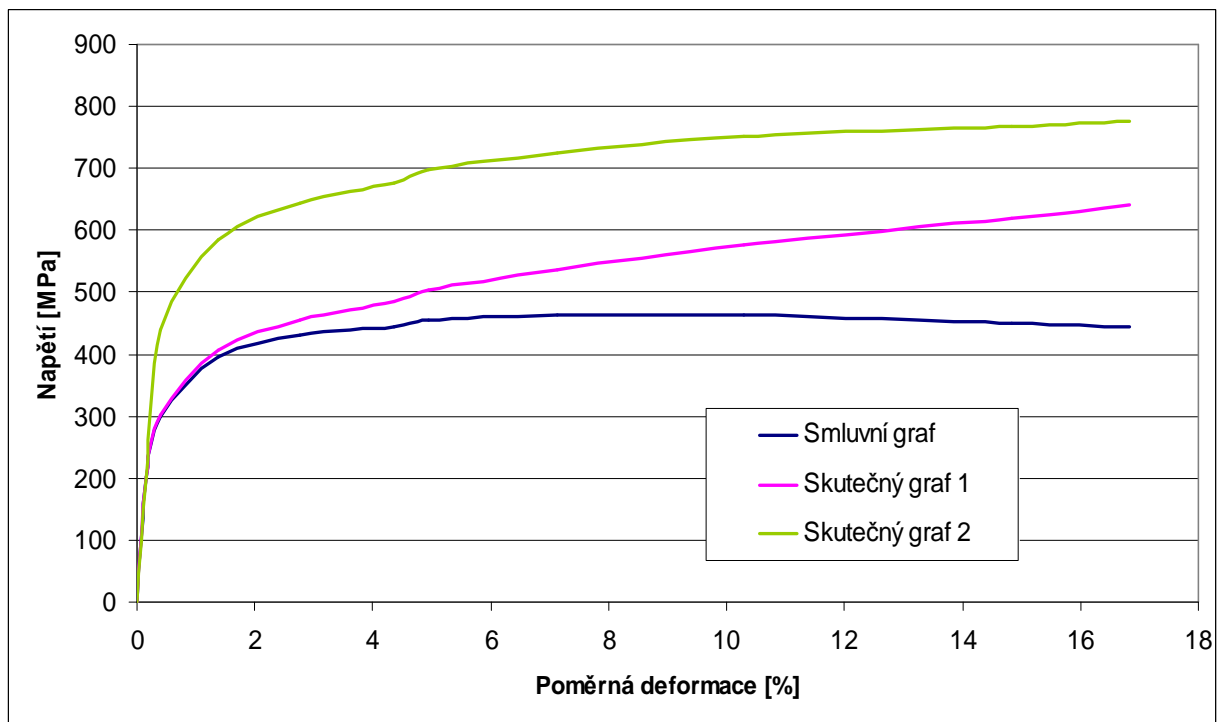
Dále se v tabulce objevily dvoje hodnoty pro skutečné napětí. V prvním případě počítáme s rovnoměrným zúžením po celém průřezu dle vzorce (31), ve druhém je použito vypočtení zúžení šířky jako konstanty dle vzorce (34).

Z výsledných hodnot byly poté sestrojeny grafy jednotlivých průběhů napětí-deformace. Na OBR.34 jsou znázorněny tyto průběhy s rozdílnými počátečními průběhy.



OBR. 34 Graf napětí-deformace s rozdílným počátečním průběhem

V dalším grafu je znázorněn průběh těch samých napětí, ovšem s tím rozdílem že je zde pro všechny průběhy ponechán stejný počáteční průběh přibližně do síly zatěžování 7000 N, potom se průběhy opět rozdělí podle vypočtených hodnot.



OBR. 35 Graf napětí-deformace se společným počátečním průběhem

4.2.2 Vyhodnocení grafu napětí-deformace

Z grafu je vidět že opravdu existuje rozdíl mezi smluvním a skutečným průběhem napětí-deformace a bylo dokázáno že materiál vydrží daleko větší napětí než jaké hodnoty udává smluvní graf napětí-deformace tak, jak bylo vidět i na grafu napětí-deformace na OBR.13 v teoretické části. Při porovnání dvou vzniklých skutečných průběhů je nutné dodat že skutečný průběh 1 bude nejspíš přesnější. Je to dáno tím, že zde bude přesnější průběh zúžení ve směru tloušťky vzorku, které je v tomto případě vypočítané ze zúžení šířky protože se považuje, že zúžení je rovnoměrné. Z grafu lze vidět že skutečný průběh 2 má daleko větší hodnoty napětí jak meze kluzu, tak meze pevnosti, ovšem s největší pravděpodobností se bude jednat o zkreslený průběh, neboť zvolený průběh výpočtu zúžení šířky není tak přesný jako v případě skutečného průběhu 1.

Závěr

Tato práce měla za úkol zjistit, zda by se dalo pomocí obrazové analýzy, která byla k dispozici, vypočítat modul pružnosti v tahu. Modul pružnosti v tahu sice umí vypočítat i program určený pro zkušební zařízení, ale jeho výsledky nejsou dostatečně přesné, protože se jeho odchylky pohybují o řád až dva řády níž. Bylo to vidět i na vzorcích, na kterém byly provedeny praktické příklady.

Z provedených a vyhodnocených experimentů se došlo k následujícím závěrům. Především je nutné zajistit aby prodloužení probíhalo jenom v oblasti snímané kamerou a aby se pochopitelně jednalo o maximální prodloužení na vzorku, toho lze snadno docílit zvolením vhodnějšího tvaru nepoměrného zkušebního tělesa tzv. tvaru kosti. Při prvních zkušebních experimentech byly použity vzorky z konstrukčních ocelí třídy 11 373. U těchto vzorků docházelo k odchylkám vypočítané a tabulkové hodnoty modulu pružnosti v rámci jednoho až dvou řádu a to především z důvodů použití nevhodného tvaru vzorku o stálém průřezu a také z důvodu nevhodně navržené mřížky. Pro další pokusy již byla použita chromová feritické korozivzdorná ocel 1.4016, tyto vzorky již měl tvar nepoměrného zkušebního tělesa s velice jemnou mřížkou, i proto jsou už výsledné hodnoty modulu pružnosti daleko přesnější a jen s poměrně malými odchylkami od tabulkové hodnoty.

To znamená že použitý postup je v zásadě správný, ovšem určité nepřesnosti do tohoto postupu vnáší použitá optika, která spolu s lidskou chybou při práci s programem může poměrně značně ovlivnit výsledky. Z toho vyplývá, že dosáhnouti naprosto přesných výsledků je velice obtížné (v podstatě nemožné) a vždy se výsledky měření musí brát s určitou rezervou.

Jako druhým cílem této práce bylo sestavit skutečný graf napětí-deformace. Při sestavování se narazilo na dvě varianty pro sestavení, protože existovaly dvě možnosti jak přistupovat k výpočtu zúžení ve směru tloušťky zkušebního tělíska. Jedna možnost byla předpokládat že se jedná o zúžení rovnoměrné v celém průřezu a pro výpočet zúžení tloušťky se použilo znalosti zúžení šířky, nebo pro zúžení tloušťky použít konstantu vypočtenou z původní a konečné hodnoty změřené tloušťky. Ze sestavených grafů se zjistilo že je výhodnější použít první variantu, neboť u druhé se vyskytly poměrně vysoké hodnoty, které nebudou odpovídat skutečnosti tak objektivně jako varianta první.

Seznam literatury

- [1] Skripta: Machálek Václav a Sodomka Jaromír: Vlastnosti kovových materiálů, Praha, Nakladatelství ČVUT, 2007, 141 stran, ISBN 978 – 80 – 01 – 03686 - 0.
- [2] Kniha: Ptáček Luděk a kolektiv: Nauka o materiálu I. 1. vydání, Brno, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001, 505 stran, ISBN 80 - 7204 - 193 - 2.
- [3] MACEK, Karel; ZUNA, Petr. *Strojírenské materiály*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2003. 204 s. ISBN 80-01-02798-8.
- [4] Skripta: Macek Karel, Sedláček Vladimír a Stránský Karel: Struktura a vlastnosti konstrukčních materiálů, Praha, Nakladatelství ČVUT, 1996, 111 stran, ISBN 80 – 01 – 01492 - 4.
- [5] Kniha: Macek K., Zuna P.: Nauka o materiálu. 2. vydání, Praha, vydavatelství ČVUT, 2002, 209 stran, ISBN 80 - 01 - 02543 - 8.
- [5] ASHBY, Michael f; JONES, David R H. *Engineering Materials 1 : An Introduction to Properties, Applications and Design*. 3rd edition. Oxford, British : Copyright, 2005. 424 s. ISBN 0-7506-6380-4.
- [6] HIGGINS, Raymond A. *Materials for engineers and technicians*. 4th edition. Oxford, British : Copyright, 2006. 400 s. ISBN 0-7506-6850-4.
- [7] FISHER-CRIPPS, Anthony C. *Introduction to Contact Mechanics*. New York, USA : Springer, 2000. 243 s. ISBN 0-387-98914-5.
- [8] MENARD, Kevin P. *Dynamic mechanical analysis : A Practical Introduction*. Printed in USA : CRC Press LLC, 1999. 208 s. ISBN 0-8493-8688-8.
- [9] HLUCHÝ, Miroslav, et al. *Mechanická technologie*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, n.p., 1966. 344 s. ISBN 04-203-65.
- [10] Kniha: Skočavský Petr a Vaško Alan: Kvantitativní hodnocení struktury litin. 1, vydání, Žilina, Vydala Žilinská univerzita v Žilině v EDIS, 2007, 73 stran, ISBN 978 – 80 – 8070 – 748 – 4.
- [11] Tabulkové hodnoty Chromové feritické korozivzdorné oceli – WNr. 1.4016
- [12] Pracovní manuál pro Program Micrometrics SE Premium
- [13] Norma ČSN EN 10002-1

Seznam obrázků

OBR. 1 Základní způsoby namáhání.....	9
OBR. 2 Zkušební zařízení	11
OBR. 3 Zkušební tyč se zesílenými konci pro upnutí do čelistí trhacího zkušebního stroje Postupně od shora: kruhový průřez tyče, obdélníkový průřez tyče, kruhová tyč před přetržením	12
OBR. 4 Pracovní diagram s mezí kluzu a) s výraznou, b) s nevýraznou	16
OBR. 5 Tvar tahového diagramu typický pro nízkouhlikovou ocel	18
OBR. 6 Lüdersovy čáry na zkušební tyči na a) ploché tyči, b) na tyči s kruhovým průřezem	19
OBR. 7 Pracovní diagram s extrémně vysokou rychlostí zatěžování	19
OBR. 8 Určování maximálního rovnoměrného prodloužení u plochých tvarů pracovního diagramu	20
OBR. 9 Anelasticita při oblehčení a) pod mezí úměrnosti, b) nad mezí kluzu.....	21
OBR. 10 Zaškrcení zkušební tyče s kruhovým průřezem	21
OBR. 11 Diagram R-ε tahové zkoušky s výraznou mezí kluzu.....	24
OBR. 12 Určení Horní a dolní meze kluzu a Lüdersovy deformace	24
OBR. 13 Diagram R-ε tahové zkoušky materiálu s nevýraznou mezí kluzu	25
OBR. 14 Určování smluvní meze kluzu.....	25
OBR. 15 Schématické porovnávání diagramů R-ε různých kovových materiálů a) oceli bez výrazné meze kluzu, b) oceli s výraznou mezí kluzu, c) litiny s kuličkovým grafitem, d) litiny s lístkovým grafitem, e) hliníku	26
OBR. 16 Schéma ilustrující měření tažnosti	29
OBR. 17 Určení tažnosti A ₈₀ mm plochých tyčí o tloušťce pod 0,5 mm z hodnot tažnosti A _{80 mm}	32
OBR. 18 Kontrakce obdélníkového průřezu	33
OBR. 19 Vztah mezi HRC a HV podle fy Böhler.....	36
OBR. 20 Uchycení kamery a lampy na zkušebním zařízení.....	40
OBR. 21 Na monitoru zobrazen ocelový metr v čelistech pro kalibraci.....	41
OBR. 22 Hlavní okno programu Micrometrics	42
OBR. 23 Fotografie první mřížky a soustavy koleček.....	43
OBR. 24 Deformované první mřížky a koleček s měřicí úsečkou která se nesnadno uchytává do správných bodů z důvodu široké stopy popisovače	44
OBR. 25 Mřížka narysovaná rydlem.....	45
OBR. 26 Přetržená mřížka narysovaná rydlem	45
OBR. 27 Mřížka narysovaná šicí jehlou	46
OBR. 28 Mřížka s jehlou po deformaci – snadné uchycení do stejných bodů	46
OBR. 29 Nevhodný tvar zkušebního tělíška při prvních zkouškách.....	47
OBR. 30 Vhodný nepoměrný tvar zkušebního tělíška, tvz. tvar kosti.....	47
OBR. 31 Pět různých měřících pozic – již při zatěžující síle 6700 N	49
OBR. 32 Nezatížený vzorek	51
OBR. 33 Vzorek zatížen silou 10800 N.....	51
OBR. 34 Graf napětí-deformace s rozdílným počátečním průběhem	58
OBR. 35 Graf napětí-deformace se společným počátečním průběhem	58

Seznam tabulek

<i>TAB. 1</i> Statisticky vypočítaná průměrná hodnota z pěti míst (pozic)	49
<i>TAB. 2</i> Porovnání modulu pružnosti z pozic 1 a 5 se statisticky vypočítanou.....	50
<i>TAB. 3</i> Vstupní hodnoty pro vybrané vzorky pro změření modulu pružnosti	52
<i>TAB. 4</i> Moduly pružnosti	52
<i>TAB. 5</i> Vypočtené hodnoty pro sestrojení grafu napětí-deformace	57