



Vliv velikosti deformace na změnu Youngova modulu pružnosti

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství

Autor práce: Jakub Váša
Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.





Zadání bakalářské práce

Vliv velikosti deformace na změnu Youngova modulu pružnosti

Jméno a příjmení: **Jakub Váša**
Osobní číslo: S16000188
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní inženýrství
Zadávající katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2019/2020**

Zásady pro vypracování:

1. Základní principy měření modulu pružnosti u kovových materiálů.
2. Základní přehled hlubokotažných materiálů používaných v automobilovém průmyslu.
3. Pro zvolený materiál provést experimentální zjištění změny velikosti Youngova modulu pružnosti v závislosti na deformaci (v zatěžovacím cyklu a odlehčovacím cyklu).
4. Vyhodnocení experimentu.
5. Závěr.

Rozsah grafických prací: tabulky, grafy
Rozsah pracovní zprávy: cca 30
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] ASM HANDBOOK. *Volume 8 – Mechanical Testing and Evaluation*. 10th ed. Materials Park: ASM International, 2000. s. 998. ISBN 0-87170-389-0.
- [2] PÓHLANDT, K. *Materials Testing for the Metal Forming Industry*. Berlin: Springer-Verlag, 1989. s. 226. ISBN 3-540-50651-9.
- [3] VELES, P. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. Bratislava: ALFA, 1985. s. 401. ISBN: 063-552-89.
- [4] DAVIES, G. *Materials for Automobile Bodies*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. s. 277. ISBN 0-7506-5692-1.
- [5] ASM HANDBOOK. *Volume 14 – Forming and Forging*. 6th ed. Materials Park: ASM International, 2004. s. 978. ISBN 0-87170-020-4.
- [6] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 64 s. Třídící znak 420310.
- [7] ČSN EN ISO 14556. *Ocel – Zkouška rázem v ohybu na kyvadlovém kladivu tyčí Charpy s V-vrubem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001. 18 s. Třídící znak 420380.
- [8] ČSN EN ISO 7438. *Kovové materiály – Zkouška ohybem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005. 12 s. Třídící znak 420401.

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce: 31. října 2019
Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2021

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan



doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2019

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL. V tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval všem, kteří mi pomáhali na tvorbě této práce, ať už přímo či nepřímo a podporovali mě při její tvorbě. Především bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Pavlu Solfronkovi Ph.D. za odborné vedení při tvorbě práce, pomoc při experimentech, konzultace, cenné rady a za všechnen čas který strávil na této práci.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá výzkumem vlivu velikosti plastické deformace na změnu Youngova modulu pružnosti při statické zkoušce tahem. Změna velikosti Youngova modulu pružnosti byla posuzována jak při zatížení, tak i v průběhu odlehčování testovaného vzorku. Pro experimenty byla zvolena hlubokotažná ocel HX180BD+Z100MCO. Materiál byl odebírán ve směru 0°, 45° a 90° vzhledem ke směru válcování. Změna Youngova modulu pružnosti byla hodnocena v návaznosti na předchozí plastické deformace o velikosti 1%, 4%, 6%, 10%, 15% a 20% vzhledem k počáteční měřené délce vzorku. V oblasti odlehčení byla křivka rozdělena na 4 oblasti, v kterých byla sledována změna Youngova modulu pružnosti při odlehčení. V rámci řešení bakalářské práce bylo provedeno porovnání výsledků Youngova modulu pružnosti získaných ze smluvního a skutečného napětí.

Klíčová slova: Youngův modul pružnosti, statická zkouška tahem, hlubokotažný materiál.

Abstract

The bachelor thesis deals with the research of the effect of plastic deformation on the Young's modulus of elasticity during static tensile test. The change in size of the Young's modulus was assessed both under load and during lightening of the test sample. Deep-drawing steel HX180BD + Z100MCO was used for the experiments. The material was cut from steel sheet in the direction of 0°, 45° and 90° relative to the rolling direction of sheet. The change in Young's modulus was evaluated following previous plastic deformation of 1%, 4%, 6%, 10%, 15% and 20% relative to the initial measured length of the sample. In the strain relief area, the curve was divided into 4 areas where the change in Young's modulus of elasticity was observed. The results of the Young's modulus of elasticity obtained from the conventional and actual stresses were compared in the framework of the thesis.

Key words: Young modulus of elasticity, static tensile test, deep-drawing steel.

Obsah

1	Úvod	9
2	Teoretická část	10
2.1	Moduly pružnosti	10
2.1.1	Statický modul pružnosti v tahu E (Youngův)	10
2.1.2	Dynamický modul pružnosti	11
2.1.3	Modul pružnosti ve smyku G	12
2.2	Zkoušení ocelí v kontextu zjišťování modulu pružnosti	14
2.2.1	Mechanické zkoušky	14
2.2.1.1	Statická zkouška tahem	14
2.2.1.2	Zkouška ohybem	19
2.2.1.3	Zkouška hloubením podle Erichsena	21
2.2.1.4	Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy	22
2.2.2	Fyzikální zkoušky	23
2.2.2.1	Metoda ozvěny ultrazvukových impulsů (US)	23
2.2.2.2	Analýza tlumením rezonanční frekvence (RF)	24
2.3	Hlubokotažné oceli	25
2.3.1	Běžná uhlíková ocel	25
2.3.2	Feritické hlubokotažné oceli	25

2.3.3	IF ocel	26
2.3.4	IF ocel s BH efektem.....	26
2.3.5	HSLA ocel.....	27
3	Experimentální část.....	29
3.1	Použitý materiál	29
3.2	Příprava vzorků	31
3.3	Zjištění E při prvotním zatížení.....	32
3.3.1	Diskuze výsledků měření.....	34
3.4	Zjištění vlivu velikosti plastické deformace na změnu modulu E	35
3.4.1	Diskuze výsledků měření.....	40
3.5	Zjišťování modulu E v oblasti odlehčení vzorku.....	40
3.5.1	Diskuze výsledků měření.....	45
3.6	Porovnání rozdílu výsledků modulu E při výpočtu ze smluvních a skutečných napětí	45
3.6.1	Diskuze výsledků měření.....	51
4	Závěr.....	51
5	Seznam použité literatury	52

1 Úvod

Modul pružnosti v tahu patří mezi základní charakteristiky materiálu a je základem mnoha důležitých výpočtů, na kterých závisí technologické postupy, bezpečnost a správné nadimenzování celé konstrukce a v neposlední řadě i výrobní náklady. Je proto užitečné mít o chování tohoto modulu co nejlepší představu, aby naše výpočty a předpoklady byly co nejbližší reálnému chování konstrukce. V této práci prozkoumáme, jak se modul pružnosti mění v závislosti na velikosti předchozí plastické deformace. Dále se v této práci budeme věnovat průběhu odlehčení vzorku při zkoušce tahem. Při teoretických výpočtech se často uvažuje, že průběh odlehčení vzorku je lineární, a rovnoběžný s lineární částí průběhu zatížení vzorku. Jinými slovy to znamená, že modul pružnosti odlehčení je stejný, jako modul pružnosti zatížení vzorku. Ověříme si, zda-li tento předpoklad stále platí, i po plastických deformacích. V poslední části se budeme věnovat skutečnému a smluvnímu napětí. Obvyklý výsledek tahové zkoušky je graf závislosti smluvního napětí, na poměrné deformaci. Toto smluvní napětí zanedbává změnu průřezu v průběhu zkoušky a předpokládá, že po celou dobu zkoušky má vzorek počáteční průřez. Realitě se více blíží skutečné napětí, které se získá ze smluvního napětí a z poměrné deformace. Graf závislosti skutečného napětí na poměrné deformaci je tedy určitě přesnější, a v této práci budeme moduly pružnosti určovat z těchto grafů. I tak si ale vytvoříme i závislosti se smluvním napětím, abychom mohli porovnat, o kolik se liší oproti skutečnému, a o kolik se liší moduly pružnosti spočtené na základě smluvního napětí oproti skutečným.

Modul pružnosti bývá u kovových materiálů nejčastěji určován statickou zkouškou tahem, lze ho ale určit i dalšími destruktivními zkouškami, které se tolik nepoužívají jenom díky rozšířenosti a jednoduchosti zkoušky tahové. Také se dají určit nedestruktivními zkouškami jako například ultrazvukem, jejichž výhoda spočívá převážně v tom, že lze zkoušet přímo na konstrukci a není třeba zvláštních vzorků.

2 Teoretická část

2.1 Moduly pružnosti

Modul pružnosti je materiálová vlastnost, která se obecně definuje jako odpor, který materiál vyvíjí proti působení pružné deformace. S rostoucím modulem pružnosti roste tento odpor, a tím roste i napětí, které musíme vyvinout, abychom tento odpor překonali a vytvořili tak pružnou deformaci. [1]

2.1.1 Statický modul pružnosti v tahu E (Youngův)

Modul pružnosti, kterým se v této práci zabýváme, je **modul pružnosti v tahu E** , neboli Youngův modul pružnosti. Poněvadž bývá měřen statickými mechanickými zkouškami, bývá také označován jako „Statický modul pružnosti“. Ten můžeme popsat Hookovým zákonem, který nám definuje modul E jako poměr napětí a poměrného přetvoření, které je tímto napětím vyvolané. Toto je zapsáno následujícím vzorcem:

$$E_s = \frac{\sigma}{\varepsilon} , \quad (1)$$

kde: E_s [MPa] = statický modul pružnosti

σ [MPa] = napětí

ε [-] = poměrné přetvoření

Oceli mívají modul pružnosti E okolo 205 GPa, pro porovnání v tabulce 1 uvádím moduly pružnosti různých kovů.[10]. Velikost modulu pružnosti primárně závisí na dvou faktorech. Prvním faktorem je množství uhlíku v oceli. S rostoucím množstvím uhlíku modul pružnosti klesá, a to asi o 5 GPa za každé 1 % uhlíku. To je způsobeno tím, že zvyšováním množství uhlíku, se zvýší podíl cementitu vůči feritu, a cementit má nižší modul pružnosti než ferit. Druhým faktorem, který ovlivňuje velikost modulu pružnosti oceli, jsou legury. V závislosti na množství a typu legujícího prvku jej můžeme zvýšit, ale i snížit. Například niklem modul snižujeme, a to až na 135 GPa. Naopak chromem můžeme E zvýšit až na 220 GPa. Mimo tyto dva hlavní způsoby se dá modul pružnosti ovlivnit ještě okamžitou teplotou. [1]. Jareš [2] ve své práci uvádí, že modul pružnosti se snižuje se vzrůstající teplotou, a to až o 2% na každých 100°C, dokud se ovšem nedostaneme do příliš vysokých teplot. Naopak na mechanickém a tepelném zpracování oceli modul E výrobku téměř nezáleží.

Tabulka 1: Moduly pružnosti různých kovů [23]

Materiál	Modul pružnosti E
Ocel uhlíková	210 GPa
Ocel legovaná	185 GPa
Měď	123 GPa
Platina	170 GPa
Zinek	90 GPa
Hliník	71 GPa

Jak již popsal Chen a kolektiv [7] ve svém článku, pokud například při zkoušce tahem ukončíme zkoušku ještě před destrukcí vzorku, a vzorek odlehčíme, pak tento průběh odlehčení nemá lineární průběh. Namísto toho vykazuje znatelné zakřivení a také hysterezi. Tento fakt do jisté míry komplikuje teoretické simulace a výpočty, například simulaci chování pružin v mechanismech. Chen a kolektiv [7] ve svém výzkumu tohoto efektu nelineárnosti odlehčovací křivky dospěli k několika závěrům.

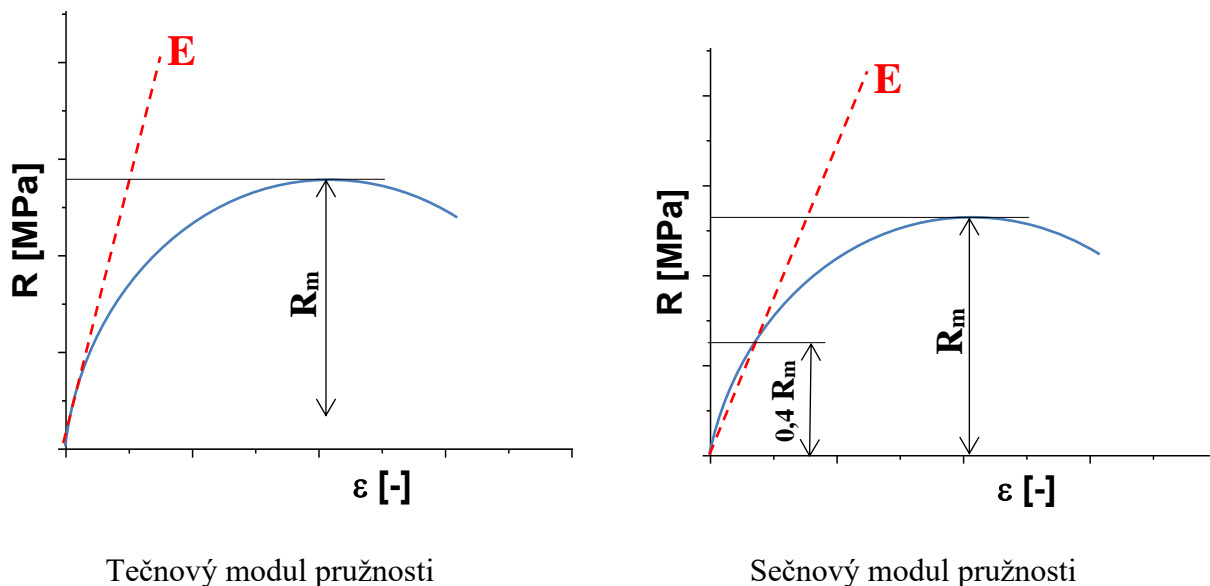
1. Při oceli stejné třídy nezáleží na tom, od jakého pochází dodavatele.
2. Rozdíl tohoto efektu mezi ocelmi různých tříd je jen velmi malý.
3. Cyklické zatěžování a odlehčování nemění průběh efektu.

2.1.2 Dynamický modul pružnosti

Dynamický modul pružnosti bývá stanoven fyzikálními nedestruktivními zkouškami tak, jak je v této práci popsáno dále. Nejčastěji se využívá ultrazvuková metoda a rezonanční metoda. Tyto metody jsou v této práci popsány níže, v kapitole 2.2.2. Výhoda těchto metod spočívá v tom, že se často mohou zkoušet přímo na konstrukci, není potřeba vytvářet speciální vzorky, a výsledky jsou tak bližší hodnotám, které od dané konstrukce můžeme očekávat v praxi.[10]

Dynamický modul, který je zjišťován nedestruktivními metodami, bývá o 20-30 % vyšší než statický modul. To je způsobeno tím, že tyto dva moduly nejsou stejného typu. Statický modul pružnosti se chová jako sečnový modul, zatímco dynamický modul se chová jako tečnový modul. Pokud závislost mezi napětím a přetvořením není lineární, tyto dva moduly se liší, jak můžeme vidět

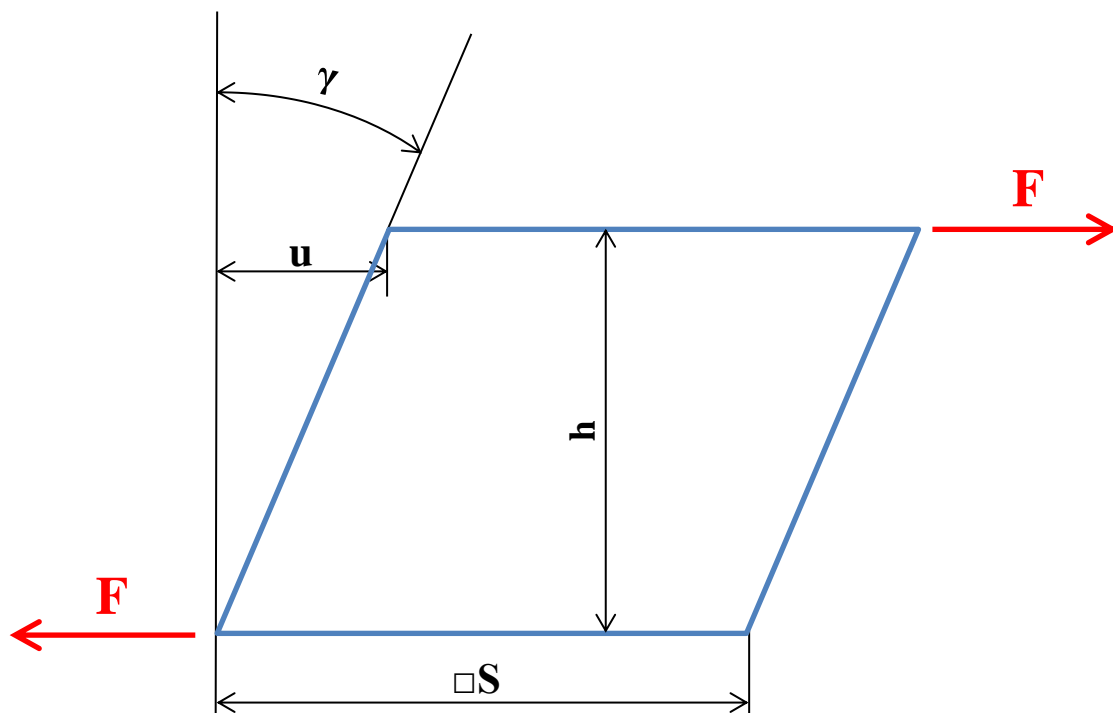
na obrázku 1. Na tomto obrázku můžeme vidět, že vyšší hodnotu má modul tečnový, jelikož má jeho křivka vyšší strmost. [10]



Obrázek 1: Porovnání tečnového a sečnového modulu [10]

2.1.3 Modul pružnosti ve smyku G

Modul pružnosti ve smyku G je principiálně podobný modulu E , jen závisí na smykovém napětí namísto tahového. Je tedy poměrem smykového napětí a jím způsobenou deformací, což vyjadříme vzorec 3. Samotné smykové napětí je přímo úměrné síle, která ho vyvolává, a nepřímo úměrné ploše, která je potřeba zdeformovat. Tento poměr je vyjádřený vztahem 2 a je znázorněn na obrázku 2:



Obrázek 2: Smykové napětí

$$\tau = \frac{F}{S} \quad , \quad \frac{u}{h} = \frac{\tau}{G} \quad (2) , (3)$$

kde:

γ [rad] = úhel smyku

F [N] = síla způsobující smykové napětí

S [m²] = plocha deformovaná smykovým napětím

G [MPa] = modul pružnosti ve smyku

τ [MPa] = smykové napětí

(u/h) [m/m] = relativní posunutí horní základny vůči dolní

Dále pak platí Hookův zákon ve smyku:

$$\tau = G * \gamma \quad (4)$$

A vztah mezi moduly pružnosti E a G :

$$G = \frac{E}{2*(1+\mu)} \quad (5)$$

kde: μ = Poissonovo číslo

[10]

2.2 Zkoušení ocelí v kontextu zjišťování modulu pružnosti

Oceli mohou být testovány různými druhy zkoušek. Například zkoušky mechanické, ať už destruktivní nebo nedestruktivní, zkoušky chemické, metalografické či zkoušky fyzikálních vlastností. V oblasti technologie se zaměříme především na mechanické zkoušky. [3]

2.2.1 Mechanické zkoušky

Mechanické zkoušky se dělí na

- 1) statické
- 2) rázové
- 3) únavové
- 4) tvrdosti
- 5) technologické

Z hlediska určování modulu pružnosti, jsou pro nás nejvýznamnější zkoušky statické. U statických zkoušek je zatížení pomalu a plynule zvyšováno až do okamžiku porušení materiálu nebo dosažení jiného sledovaného jevu. [3]

2.2.1.1 Statická zkouška tahem

Tahová zkouška je nejčastější statickou zkouškou. Zároveň se jedná i o zkoušku, kterou jsem použil pro svůj experiment. Zkoušení tahem podléhá normě ČSN EN ISO 6892-1 Tato zkouška probíhá na principu jednoosého namáhání zkušebního tělesa a obvykle probíhá až do úplného

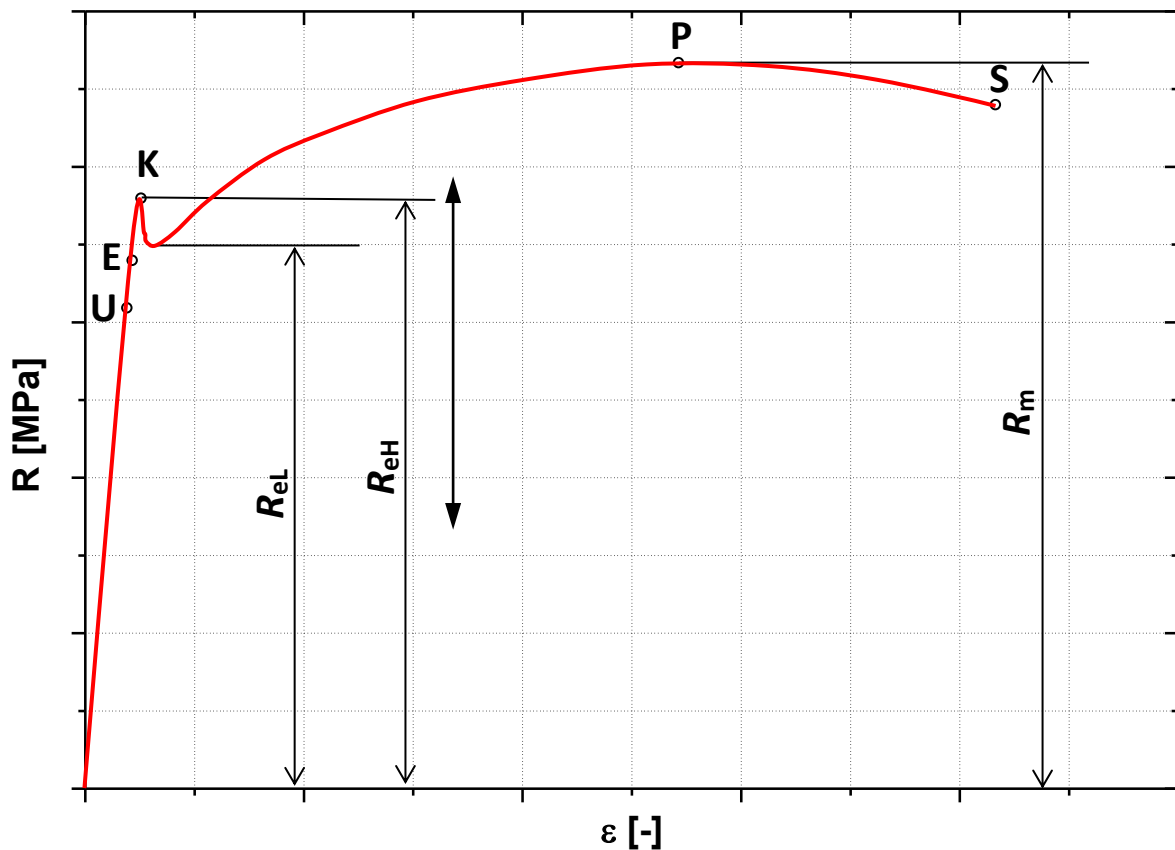
přetržení zkušební vzorku. Výstupem tahové zkoušky je pak graf závislosti smluvního napětí na poměrné deformaci, z něhož lze vyčíst různé materiálové meze a hodnoty.[3] Příklad tohoto grafu můžeme vidět na obrázku 3. Smluvní napětí se vypočítá jako poměr okamžité síly a počátečního průřezu, jak lze vidět ve vztahu 6. Díky tomu úplně neodpovídá skutečnosti, protože předpokládá, že průřez zůstane po celou zkoušku neměnný

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

kde: R [MPa] = Smluvní napětí

F [N] = Zatěžovací síla

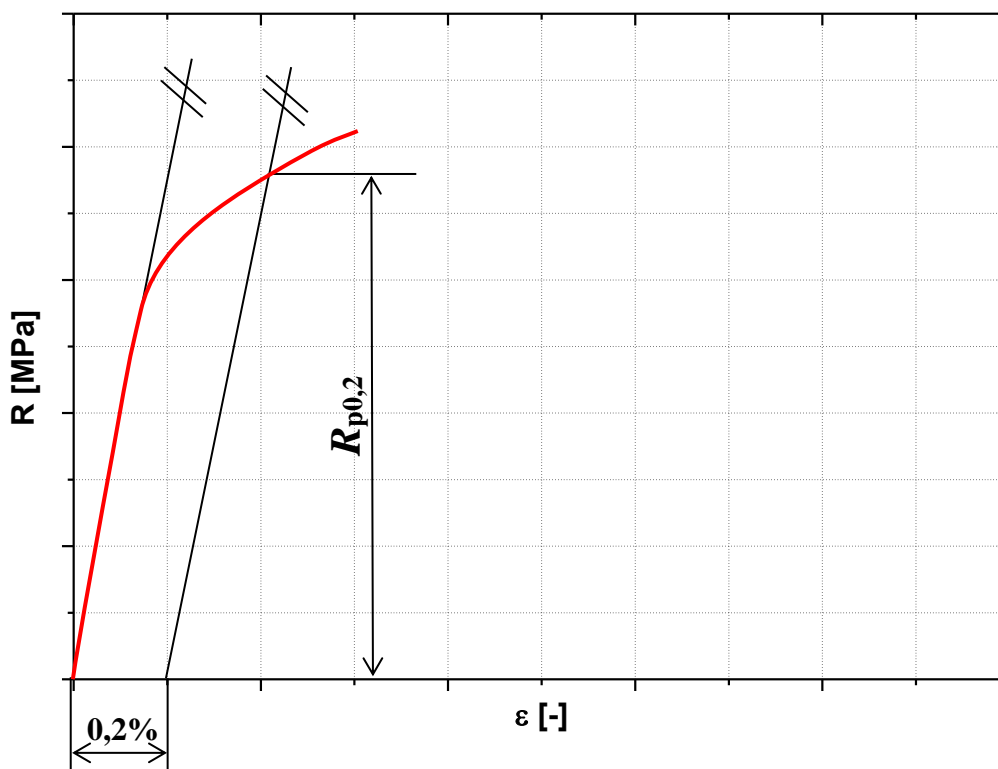
S_0 [mm²] = Počáteční plocha průřezu



Obrázek 3: Graf závislosti napětí na prodloužení [11]

Nyní bych popsal jednotlivé oblasti tohoto grafu. V první fázi zatěžování materiál vykazuje **pružné deformace**. Zde je závislost poměrného prodloužení na napětí lineární, graf má tvar přímky a platí zde Hookův zákon. Těleso je namáháno pouze pružnými deformacemi, což znamená, že když síla přestane působit, těleso se vrátí do původního stavu. Tato část končí, jakmile napětí dosahuje hodnoty **meze úměrnosti**. (bod U). Dále průběh přestává být lineární, stále ale působí pouze pružné deformace a to až do **meze pružnosti** (bod E). Po jejím překročení se začnou tvořit i deformace plastické. Na **mezi kluzu** (bod K) může nastat jedna ze dvou variant:

- a) Mez kluzu je v grafu jasně viditelná v místě, kde vzniká podstatná deformace, která může dočasně růst i bez dalšího zvyšování napětí. Maximální hodnota napětí před prvním poklesem zatížení se v tomto případě nazývá horní mez kluzu a značí se R_{eH} . Nejnižší hodnota napětí během plastického kluzu se nazývá dolní mez kluzu a značí se R_{eL} [17]. Tento průběh lze vidět na obrázku 3.
- b) Mez kluzu není zřetelná a křivka nikdy nezačne klesat. Potom mez kluzu určíme smluvně, a to tak, že vedeme rovnoběžku s lineární částí grafu procházející hodnotou 0,2 % počáteční délky vzorku, tak jak je vidět na obrázku 4. Napětí získané tímto způsobem značíme jako $R_{p0,2}$.



Obrázek 4 Graf napětí bez výrazné meze kluzu [11]

Ve třetí oblasti grafu napětí opět plynule stoupá, a to až po dosažení meze pevnosti (bod P) která je zároveň maximální hodnotou napětí v celém grafu. Napětí, které je potřebné k dosažení meze pevnosti, značíme jako R_m . V poslední části grafu prodloužení stále roste, ale potřebné napětí už klesá. To je způsobeno tím, že na zkoušeném materiálu se vytvořil takzvaný krček, který se neustále zužuje. Zúžení krčku rapidně zmenšuje okamžitý průřez v kritickém místě zkoušeného vzorku, a to pokračuje až do konečného přetržení (bod S).

Zkušební tělesa:

Standardní zkušební tělesa jsou tyče normalizovaných rozměrů. Používají se dva typy zkušebních tyčí, a to obrobené a neobrobené.

Zkušební tělesa obrobená bývají buď kruhového průřezu, nebo obdélníkového průřezu. Kruhové vzorky se obrábí jemným soustružením, či broušením. Vzorky obdélníkového průřezu bývají obvykle frézovány. Upínací části vzorků jsou uzpůsobeny čelistem měřicího stroje. Zkušební tělesa neobrobená bývají výstřižky z plechů či pásů a dále se neupravují. Tyto vzorky jsou levnější, než vzorky obrobené. Nesou s sebou ale nevýhodu, a to že při vystřihování dochází ke zpevnění

střížných hran. Díky tomuto zpevnění se nám snižuje přesnost naměřených hodnot. Největší nepřesnost se projevuje na mezi kluzu. [6]

Podle normy ČSN EN ISO 6892-1 [17] se zkušební vzorky rozdělují do čtyř kategorií

- a) Zkušební tyče určené pro tenké výrobky, například plechy, pásy a ploché výrobky o tloušťce 0,1 mm až 3 mm.
- b) Zkušební tyče určené pro dráty, tyče a profily, a průměru nebo tloušťce maximálně 4 mm.
- c) Zkušební tyče používané u plechů a plochých výrobků o tloušťce od 3mm a tyčí a profilů o průměru od 4 mm.
- d) Zkušební tyče používané u trubek.

Zkušební tyče se podle Jandy [13] skládají ze tří hlavních částí:

1) Hlava – je koncová část tyče, která slouží k upnutí tyče do přístroje. Hlavy mají větší průřez, než měřená část tyče. Tím se zaručí, že veškeré deformace, které sledujeme, budou probíhat v měřené části tyče.

2) Přejížděvací část – propojuje hlavu s měřenou částí. Přejížděvací část zajišťuje, aby změna průřezu mezi těmito dvěma oblastmi proběhla plynule a nevyskytlo se zde kritické místo, které by jinak vzniklo náhlou změnou průřezu.

3) Střední část – nebo také měřená část. Veškeré sledované hodnoty pozorujeme na této části. Nejprve si zjistíme počáteční rozměry této části, jako třeba délku a průřez. Po ukončení zkoušky se tato část opět změří a naměřené změny se použijí ve výpočtech. Sledované proměnné jsou:

S_0 [mm²] = počáteční plocha průřezu

L_c [mm] = počáteční délka extenzometru

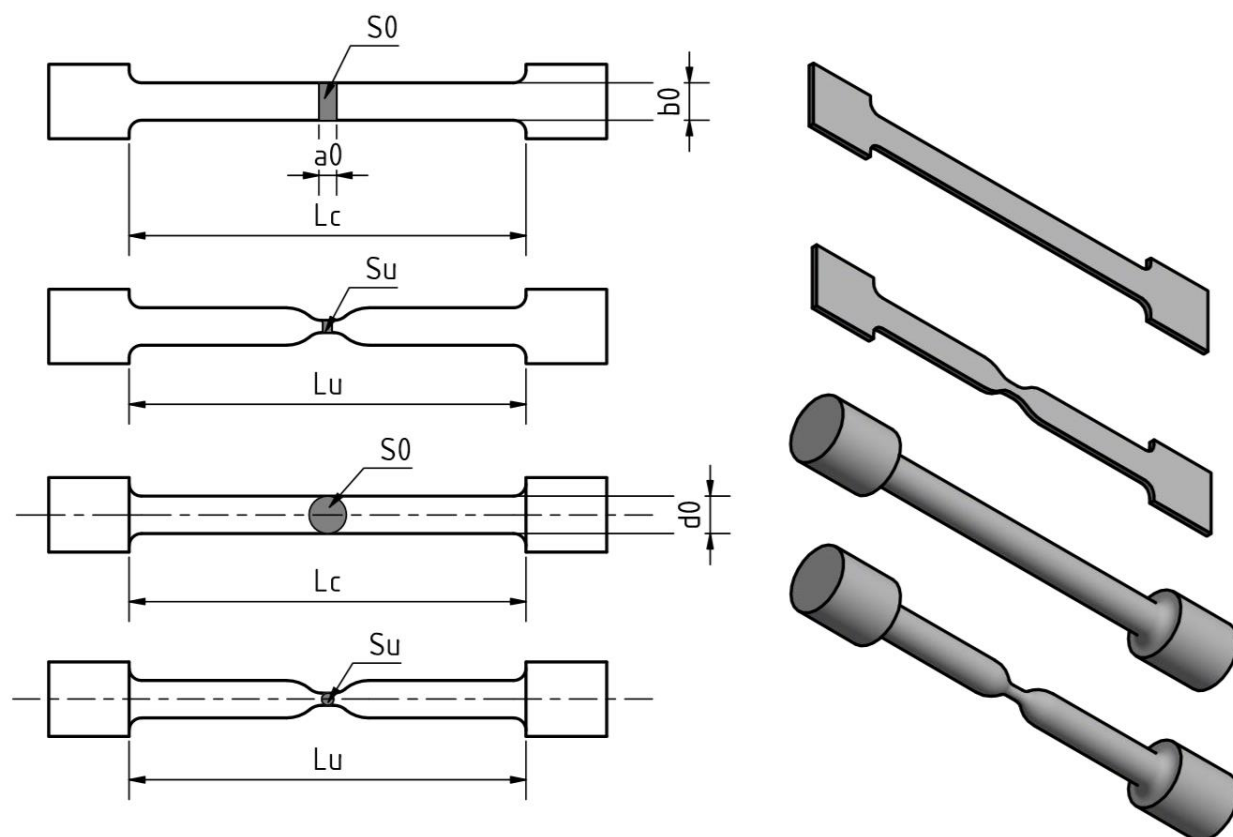
a_0 [mm] = počáteční tloušťka plochých tyčí

b_0 [mm] = počáteční šířka plochých tyčí

d_0 [mm] = počáteční průměr kruhových tyčí

S_u [mm²] = nejmenší plocha průřezu po lomu

L_u [mm] = konečná sledovaná délka



Obrázek 5: Zkušební tyče pro zkoušku tahem [13]

2.2.1.2 Zkouška ohybem

Zkouška ohybem je z další ze skupiny mechanických statických zkoušek. Tato zkouška podléhá normě ČSN EN ISO 7438. Podle této normy zkouška ohybem spočívá v plastické deformaci zkušební tělesa, které má průřez ve tvaru čtverce, obdelníka, kruhu nebo polygonu ohybem do dosažení předepsaného úhlu, a to beze změny směru zatěžování. Měřený vzorek, který obvykle bývá plech, tyč či nosník, se umístí na dvě podpory. V místě, které je uprostřed mezi podporami, působí se shora tlaková síla a vytváří ohybové napětí. Tímto působíme deformaci materiálu, kterou pozorujeme, a měříme průhyb. Osy obou ramen zkušební vzorku musí setrvat v rovině, která je kolmá k ose ohybu. Pokud je materiál křehký tak zkouška končí v okamžiku prasknutí vzorku. Pokud je materiál tvárnější, tak nepraskne a zkouška končí po zdeformování materiálu do určité konečné meze. Na přesnost zkoušky má vliv především vzdálenost podpor L a výška měřeného vzorku a [14] [16]. Při této zkoušce se obvykle měří maximální ohybový moment a pevnost v ohybu. Nicméně i pomocí této

zkoušky lze zjistit modul pružnosti v tahu, pokud je to pro nás z nějakého důvodu výhodnější než provádět zkoušku tahem. Dvořák [1] tento vzorec pro výpočet modulu odvozuje následujícím způsobem.

Velikost průhybu materiálu lze teoreticky spočítat podle vztahu 6, který vychází z Hookova zákona:

$$y = \frac{F \cdot L^3}{4E \cdot a^3 \cdot b} \quad (7)$$

Nejprve je třeba zjistit směrnicí A lineární závislosti působící síly F na průhybu:

$$F = A \cdot y \quad (8)$$

Ze zkoušky ohybem dostaneme průběh síly a průhybu. Pokud si v matematickém programu, například MS Excel, či Origin vytvoříme graf závislosti síly F na průhybu y , graf by měl začínat svůj průběh lineární částí, pokud proložíme tuto část lineární aproximací, měli bychom získat směrnicí přímky A . Pokud ze vztahu 7 vyjádříme sílu, dostaneme vztah:

$$F = \frac{4E \cdot a^3 \cdot b}{L^3} \cdot y \quad (9)$$

Nyní výše zmíněný vztah upravíme vztahem 8, vyjádříme Youngův modul a dostaneme finální vztah:

$$E = \frac{A \cdot L^3}{4 \cdot a^3 \cdot b} \quad (10)$$

kde:

a [mm] = výška nosníku

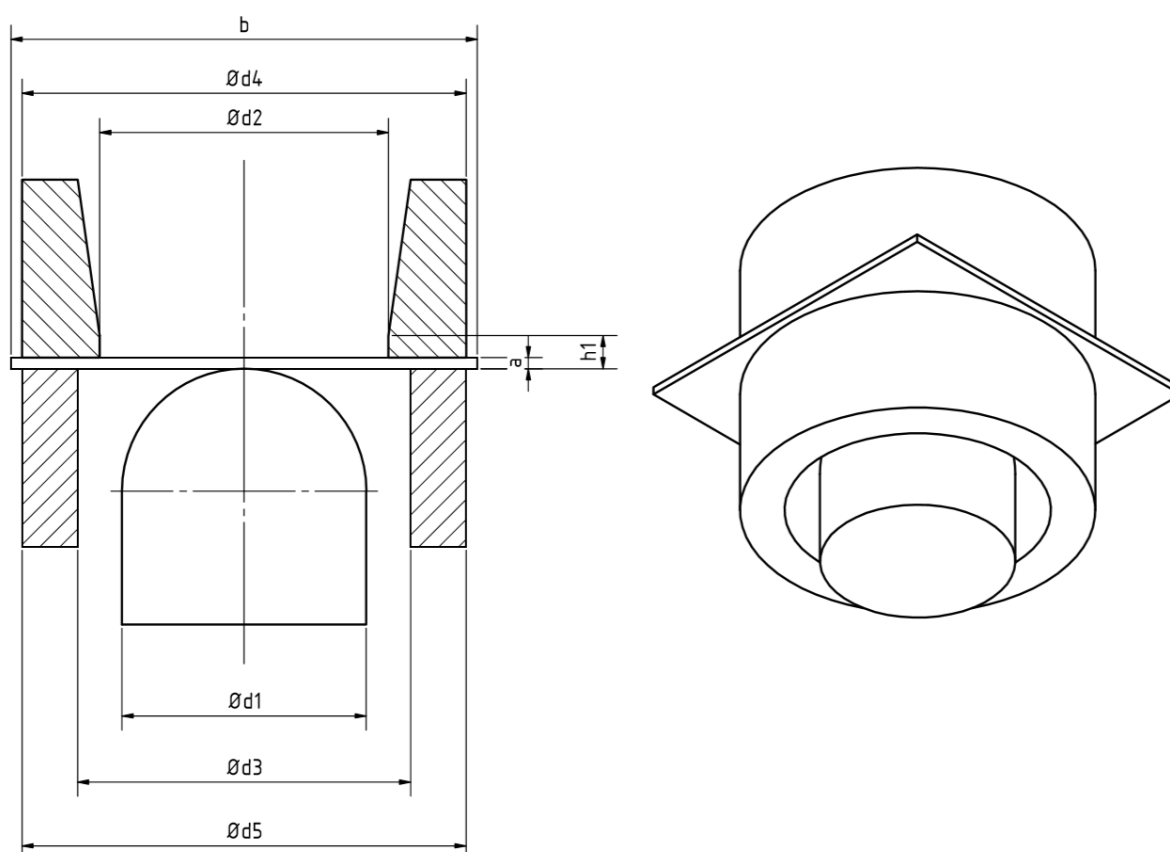
b [mm] = šířka nosníku

A = směrnicí přímky lineární části závislosti $F(y)$

L [mm] = vzdálenost podpor

2.2.1.3 Zkouška hloubením podle Erichsena

Tato zkouška je řízena normou ČSN EN ISO 20482. Podstatou zkoušky je, že razník s kulovým zakončením je zatlačován do zkoušeného plechu, čímž vytváří prohloubení. Tento plech je upnutý mezi přidržovačem a raznicí. Před provedením zkoušky je potřeba stanovit tloušťku zkušebního plechu s přesností alespoň 0,01 mm. Poté se kontaktní plochy zkušebního tělesa namažou grafitovým mazivem a plech se upne mezi přidržovač a raznicí. Razník se uvede do kontaktu se zkušebním tělesem přičemž nesmí dojít k rázu. Od tohoto momentu se začíná měřit velikost prohloubení. Razník se zatlačuje do zkušebního plechu až do vzniku průchozí trhliny, přičemž se měří prohloubení h s přesností 0,1 mm. Složení grafitového maziva je přesně předepsané normou, skládá se především z vápenatého mýdla, rafinovaného minerálního oleje a vločkováného grafitu. V žádném případě nesmí obsahovat korozivní látky, nebo vosk a plniva. [18]



Obrázek 6: Schéma zkoušky hloubením podle Erichsena [18]

Zkouška je výhodná z hlediska jednoduchosti, je velmi rychlá a není náročná na přípravu zkušební plechu. Naopak mezi nevýhody této zkoušky patří větší rozptyl výsledků. Tato zkouška totiž nepodává žádné informace o anizotropii mechanických vlastností zkoušeného vzorku. Pokud se měří na přístroji s ručním ovládáním, jsou výsledky zkoušky také mírně zkresleny, hloubka h totiž krom jiného závisí na rychlosti a plynulosti posuvu tažníku. [19]

2.2.1.4 Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy

Tato zkouška se řadí do kategorie mechanických rázových zkoušek. Podléhá normě ČSN ISO 148-1. Principem této zkoušky je přerazit zkušební těleso jedním rázem, který je způsoben kyvadlovým kladivem. Výsledky této zkoušky hodně závisí na teplotě, proto je potřeba teplotu vzorku při zkoušce kontrolovat. Pokud se zkouška provádí při jiné teplotě než je teplota pokojová, tak se zkušební vzorek před zkouškou za řízených podmínek ohřívá, případně ochlazuje. Po dosažení požadované teploty musí být tato teplota udržována v rozmezí $\pm 1^\circ\text{C}$ alespoň 5 minut. Teplotu je potřeba udržet i během přenášení vzorku mezi chladicí lázní nebo pecí a Charpy kladivem, proto často bývají temperovány i kleště, kterými se manipuluje se vzorkem. Mezi okamžikem, kdy je zkušební těleso vyjmuto z ohřívacího či chladícího média a okamžikem úderu kladiva nesmí uběhnout více než 5 vteřin. [20] [21]

Zkušební tělesa mají přesně stanovené rozměry, a to délku 55 mm a čtvercový průřez o stranách 10 mm. Pokud z daného materiálu nelze vyrobit vzorek o straně 10 mm, lze použít náhradní vzorky, s délkou strany 7,5 mm, 5 mm nebo 2,5 mm. Zkušební těleso je opatřeno vrubem normalizovaných rozměrů, buď ve tvaru U nebo ve tvaru V. „U-vrub“ má podle normy hloubku 5 mm a poloměr kořene 1 mm, „V-vrub“ o úhlu 45% má mít hloubku 2 mm a poloměr kořene 0,25 mm. Jeden z těchto vrubů se nachází přesně uprostřed mezi dvěma podporami, a na straně protilehlé k místu úderu při zkoušce. Drsnost povrchu zkušební tělesa může být maximálně $Ra = 5\mu\text{m}$.

Výstupem této zkoušky je velikost energie, která byla potřebná pro přeražení zkušební vzorku přesných rozměrů. Velikost této energie stroj určí, jako rozdíl potenciální energie kyvadlového kladiva před jeho spuštěním, a potenciální energie po přeražení vzorku. Nárazová energie se značí KV , pokud byl použit vzorek s V-vrubem, a KU , pokud byl použit vzorek s U-vrubem. Z této nárazové energie je následně vypočítána vrubová houževnatost materiálu, dle vztahu 11. [20] [21]

$$KC = \frac{K}{S_0} \quad (11)$$

kde: KC [J/mm²] = vrubová houževnatost
 K [J] = energie spotřebovaná nárazem
 S_0 [mm²] = plocha průřezu zkušební tyče pod vrubem

[21]

2.2.2 Fyzikální zkoušky

2.2.2.1 Metoda ozvěny ultrazvukových impulsů (US)

Tato metoda je založena na pozorování rychlosti šíření ultrazvukového vlnění ve zkoumaném materiálu. Na základě změřené rychlosti poté stanovíme různé fyzikálně-mechanické vlastnosti, mimo jiné i modul pružnosti v tahu. Jedná se ovšem o modul dynamický, který většinou ještě poté přepočítáváme na modul statický. Ultrazvuk se využívá proto, že jeho vlnění projde i silnou vrstvou materiálu, zatímco jiné typy zvuku tohoto schopny nejsou. [1]

Při této metodě se na zkoumaný materiál opakovaně vysílá puls ultrazvukového buzení a poté se sleduje odražená část pulsu (neboli ozvěna). K tomu se využívají frekvence mezi 20 a 150 kHz. Pokud například na plech, vyšleme puls kolmo na povrch, tato ozvěna vznikne odrazem od zadní stěny plechu. Vypočítáme rychlost šíření impulsu, na základě tloušťky materiálu a času, který je potřeba na průchod tímto materiálem.[7]

$$v = \frac{b}{t/2} \quad (12)$$

kde: v [mm/s] = rychlost šíření impulsu
 b [mm] = tloušťka materiálu
 t [s] = čas potřebný na průchod impulsu materiálem

Tuto rychlost ze vzorce 12 zjistíme pro podélný i tečný směr šíření impulsu. Poté můžeme vypočítat Poissonovo číslo, a konečně modu pružnosti následujícími vztahy:

$$\mu = \frac{1-2(v_t-v_p)^2}{2-2(v_t-v_p)^2} \quad (13)$$

$$E = \frac{v_p^2 \rho (1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu} \quad (14)$$

kde:

v_t [m/s] = rychlost šíření impulsu v tečném směru

v_p [m/s] = rychlost šíření impulsu v podélném směru

ρ [kg/m³] = hustota vzorku

μ = Poissonovo číslo

Měřicí přístroje se rozdělují do dvou kategorií. Prvním typem jsou přístroje automatické, které samy naměří čas šíření ultrazvukových vln a výsledky poskytnou v digitální formě. Druhým typem přístrojů jsou osciloskopy. Osciloskop je přístroj, který průběh procházejícího vlnění zobrazí na obrazovce. Z této obrazovky se poté musí hodnoty manuálně odečíst. Oba typy přístrojů snímají vlnění stejným způsobem. Mají dvě sondy, budič a snímač, kde budič vysílá vlnění do materiálu a snímač poté zaznamenává nový, odražený signál. Přístroj poté porovnává změnu těchto signálů. [1]

2.2.2.2 Analýza tlumením rezonanční frekvence (RF)

Analýza tlumením rezonanční frekvence je další nedestruktivní metodou měření modulu pružnosti. Tato metoda využívá rezonanční frekvence vzorku a tlumení těchto frekvencí. Měří se zde některá z vlastních frekvencí materiálu, na základě čeho lze později vypočítat mechanické vlastnosti materiálu pomocí vztahů, které vyjadřují závislost frekvencí vlastních kmitů a pružností materiálu. Tato metoda má jedno omezení a to, že vyžaduje co největší homogenitu testované součásti. Větší počet vnitřních vad nebo trhlin činí výsledky zkoušky méně přesné. [7] [1]

Zkušební vzorky bývají ve formě hranolů nebo válců, které musí být minimálně dvakrát delší, než je delší strana jejich základny (u hranolů) či průměr (u válců). Sondy jsou na těleso připevněny tzv. vazebním prostředkem. Hmotnost zkušebních vzorků musí být tak velká, aby hmotnost vazebních prostředků byla zanedbatelná a neměla vliv na kmitání tělesa. [1]

Vzorek o známých rozměrech se položí na dva tenké dráty rezonančního přístroje. Tyto dráty jsou budičem a snímačem a umisťují se na uzly ohybových vibrací. Na prvním uzlu se vybudí vibrace

ve frekvencích, které jsou dost podobné slyšitelnému spektru (30Hz až 30kHz). Poté se snímá odezva vzorku na druhém uzlu. Nahraný signál se převede na frekvenční spektrum pomocí Fourierovy transformace, takzvané FFT-spektrum. Z FFT spektra se vypočítá Youngův modul dle vzorce 15. Modul pružnosti zde závisí, krom vlastní frekvence také na rozměrech a hmotnosti vzorku, proto je potřeba znát tyto hodnoty co nejpřesněji. [7] [1]

$$E = 0,9465 \left(\frac{m f_f^2}{b} \right) \left(\frac{l^3}{t^3} \right) T \quad (15)$$

kde: f_f [Hz] = ohybová frekvence

l [mm] = délka vzorku

b [mm] = šířka vzorku

t [mm] = tloušťka vzorku

T = korekční součinitel

m [kg] = hmotnost vzorku

2.3 Hlubokotažné oceli

2.3.1 Běžná uhlíková ocel

Základním požadavkem běžných uhlíkových ocelí je nízký obsah uhlíku. Tyto oceli mají feritickou strukturu, většinou obsahují jen minimální množství legujících prvků a nemají žádné zvláštní vlastnosti. Maximální hodnoty meze kluzu se pohybují do 200 MPa. Tyto oceli se například v automobilu používaly spíše v dřívějších dobách. Dnes už nejsou aktuální kvůli vysoké hmotnosti v porovnání s jinými typy ocelí. Díky nízkému množství uhlíku mají tyto oceli dobrou svařitelnost.[12]

2.3.2 Feritické hlubokotažné oceli

Obvykle se jako hlubokotažné oceli označují některé oceli třídy 11, například oceli ČSN 11 302 a ČSN 11 320. Podle normy ČSN je problematika hlubokotažných ocelových plechů popsána také v normě ČSN 42 0128. [12] Opět se zde jedná o oceli s feritickou strukturou, nicméně zde už je možno použít legury ve větším množství a také bývá uklidněna použitím Al. [8] Vyskytuje se zde velmi nízký obsah síry, fosforu a uhlíku a jsou použity legury jako niob, zirkon a titan. Můžeme

se setkat ještě s takzvanou „refosforovanou“ variantou tohoto materiálu, která je navíc legována tuhým roztokem fosforu (0,08%) v čistém železe. Ocel bývá odolná vůči stárnutí, má nižší mez kluzu (170 ÷ 250 MPa). Tato ocel dosahuje tažnosti i přes 40%, zároveň se plech deformuje homogenně. Opět je ocel díky nízkému obsahu uhlíku dobře svařitelná. [12] Tyto materiály bývají dodávány ve formě plechů s povlakováním. Toto povlakování se provádí velkou škálou materiálů například Al+Si, Zn+Al, Cr+Sn, Sn, Cr, Zn. [8]

2.3.3 IF ocel

IF oceli se vyznačují velmi nízkým obsahem uhlíku (max. 0,01%) a dusíku (max. 0,006%) ve feritické matici. Dále se do tyto ocele legují titanem a niobem. Ty se vážou na intersticiální prvky uhlíku a dusíku a tím vytvářejí stabilní precipitáty. Těmito legurami se eliminuje nežádoucí zpevnění materiálu, které bývá způsobeno intersticiálně rozpuštěným zbytkovým uhlíkem a dusíkem, čímž dosáhneme lepší tvárnosti. [4], [12]

IF oceli mívají nižší pevnost v tahu (250 ÷ 360 MPa) a mez kluzu (150 ÷ 250 MPa), za to mají výborné hlubokotažné vlastnosti, jsou proto často využívány na tvarově složité, hlubokažné součásti, například karoserii automobilů. Dále jsou tyto oceli charakteristické vyšším koeficientem anizotropie a vysokým deformačním zpevněním. [12]

IF ocel lze dále upravit, takzvaně refosforizovat. Refosforizovaná IF ocel se velmi dobře tváří a má velký součinitel plastické anizotropie. Nevýhodou ovšem je nižší pevnost. Proto se dále zvyšuje mez kluzu zjemněním feritického zrna. Toho dosáhneme legováním manganem a fosforem. Nejdůležitějším prvkem je zde fosfor, který zvyšuje tvrdost, ovšem s tím i křehkosti. Toho se dosahuje tak, že fosfor obsazuje substituční polohy tuhého roztoku. [12]

2.3.4 IF ocel s BH efektem

BH je nízkouhlíková ocel feritické struktury. Začíná jako ocel s nižší mezí kluzu (200 ÷ 300 MPa), dobrou tažností (20 ÷ 30%) a vyšší tvárností. To je způsobeno tím, že je ve feritické matici úmyslně ponecháno více dusíku a uhlíku. Pak se provede povrchová úprava a to především lakování. Lak se následně vypaluje při teplotě 170°C po dobu dvaceti minut a během tohoto procesu ocel tepelně stárne. Jedná se zde o nízkoteplotní staticko-napěťové stárnutí. Mez kluzu vzroste až o 70 MPa a celkově se zlepši mechanické vlastnosti, maximální zatížení i odolnost povrchu vůči poškození. [5], [12]

Při vypalování laku dochází v oceli k deformačně termickému zpevnění. Dislokace, které jsou uvolněny z intersticiálních atmosfér při plastické deformaci, jsou blokovány a omezeny v pohybu. Tento jev je zodpovědný za zlepšení meze kluzu. Zmíněné staticko-napěťové stárnutí za tepla je podmíněno zpětnou difúzí atomů dusíku a uhlíku do dislokací, které byly vytvořeny během předchozího tváření. To se nazývá Cottrelova atmosféra. Tato difúze ovšem probíhá poměrně rychle a mohlo by nastat rychlé a neřízené stárnutí oceli. Neřízenému stárnutí, jež je pro nás nežádoucím efektem, lze zabránit přidáním hliníku. Hliník na sebe naváže dusík a vytvoří nitrid hlinitý. Tím se zmenší množství dusíku a sníží se tím jeho nežádoucí vliv. I po tomto procesu zůstává dusíku v oceli stále velké množství a jeho další snížení dosáhneme přidáním bóru. I bór na sebe váže dusík a vytváří stabilní nitridy bóru. Dále je možné snížit rozpustnost dusíku v kovu snížením teploty, kterou vyvíjíme během tváření za tepla. Těmito procesy se snažíme snížit obsah uhlíku na minimum. Naproti tomu uhlík není tak škodlivý, jelikož se v porovnání s dusíkem v oceli difunduje podstatně pomaleji, tudíž se snadněji ovládá. Proces stárnutí tedy ovládáme tepelnou aktivací volného uhlíku v oceli. Jako optimální množství volného uhlíku v oceli se uvažuje 0,004 %. Tomu odpovídají parametry stárnutí, teplota 170°C a čas stárnutí 20 minut. [12]

Velikost zpevnění materiálu závisí na množství uhlíku, rozpuštěného v základní matici. U ocelí s nízkým množstvím uhlíku bývá maximální zvýšení meze kluzu okolo 30 MPa. Pokud nám toto nestačí, můžeme podniknout jeden z následujících kroků pro další zvýšení BH zpevnění. Prvním způsobem je zvětšit velikost zrna během kontinuálního žhání. Uhlík je v oceli obsažen jak uvnitř zrn (v matici) tak i na jejich hranici. Pokud zvětšíme velikost zrn, sníží se celková plocha povrchu zrn a tím i množství uhlíku, které se vyskytuje na hranicích zrn. A pokud je méně uhlíku u hranic, tak se zvýší množství uhlíku v matici. Více uhlíku uvnitř matrice znamená BH zpevnění. Druhým způsobem, jak zvětšit BH zpevnění, je rychleji ochlazovat po ukončení kontinuálního žhání. Tím se uhlík difunduje na hranice zrn v menším množství a udrží se v matici zrn. [5]

2.3.5 HSLA ocel

HSLA (High-Strength Low Alloy Steels) neboli vysokopevné nízkolegované (případně mikrolegované) oceli se řadí do skupiny takzvaných HSS (High Strength Steels) ocelí. HSLA oceli mají obsah uhlíku mezi 0,05 a 0,5 % a dále obsahují určité množství legur, všechny v množství mezi 0,01 a 0,1 %. Těmito legurami mohou být Cr, Ni, Mo, Cu, N, V, Nb nebo Ti. Tyto legury začnou vytvářet karbidy, nitridy nebo karbonitridy, jejichž funkcí je zpevnit matici a zjemnit mikrostrukturu. Jedinou legurou, která zde může být přítomna v množství až do 2% je mangan. Ten způsobuje

zpevnění matrice a jeho množství závisí na našich požadavcích na svařitelnost, tvářitelnost a obrobitelnost. HSLA ocel dosahuje meze pevnosti $350 \div 800$ MPa a tažnosti 20-30%, má poměrně vysokou korozivzdornost a je lehčí, než jiné oceli stejné pevnosti. Kromě dobrých mechanických vlastností je HSLA ocel poměrně levná na výrobu. Díky tomu je v praxi hojně využívána na všechny druhy výrobků, od podvozků či nárazníků automobilů, až po potrubí ropovodů, zásobní nádrže či mostní konstrukce. [12], [9]

HSLA oceli se dělí do šesti kategorií:

- 1) oceli s odolností proti atmosférické korozi,
- 2) mikrolegované feriticko perlitické oceli,
- 3) válcované perlitické oceli,
- 4) oceli s jehlicovitým feritem,
- 5) dvoufázové oceli,
- 6) oceli s kontrolovaným tvarem vměstků.

Pokud se díváme na HSLA ocel jako na hlubokotažný materiál, tak nás nejvíce zaujme poslední kategorie (ocel s kontrolovaným tvarem vměstků), protože tato varianta přináší vyšší tažnost a houževnatost. Hlavní legury této varianty jsou Ca, Zr a Ti. Pokud tyto legury přidáme ve správném poměru, tak se sulfidy, které se zde obvykle vyskytují v tenké podlouhlé formě, přemění do formy kulových globulí. [9]

3 Experimentální část

Podstatou bakalářské práce je určování vlivu velikosti deformace na Youngův modul pružnosti na základě výsledků statické zkoušky tahem. Řešení BP lze charakterizovat v následujících bodech:

- Zjišťování modulu pružnosti při prvotním zatížení.
- Zjišťování vlivu plastické deformace na změnu modulu E (voleny deformace o 1%, 4%, 6%, 10%, 15% a 20% původní délky).
- Zjišťování modulu E v oblasti odlehčování vzorku. Z důvodu nelinearity byla oblast odlehčení rozdělena na 4 úseky.
- Porovnání rozdílu výsledků modulu E při výpočtu ze smluvního a skutečného napětí.

3.1 Použitý materiál

Pro vlastní experiment byla použita ocel HX180BD+Z 100 MCO (označení dle normy DIN EN 10346:2009-07), která může být dle stejné normy také označena číselně jako ocel 1.0914. Jednoznačnější je ovšem písmenné označení protože každé písmeno v označení má svůj význam a tím pádem z tohoto označení můžeme poznat spoustu vlastností tohoto materiálu. Význam jednotlivých písmen, ale i další vlastnosti oceli jsou vysvětleny níže a to dle výše zmíněné normy DIN EN 10346:2009-07 [15]. Typické mechanické hodnoty této oceli jsou $R_{p0,2} = 180 \div 240$ MPa, $R_m = 290 \div 360$ MPa, minimální hodnota BH efektu 35 MPa a minimální hodnota prodloužení $A_{80mm} = 34$ %. V tabulce 2 můžeme vidět tabulkové hodnoty maximální množství příměsí v této oceli, dle výše zmíněné normy.

Tabulka 2: Maximální množství legur v oceli HX180BD+Z100MCO

Příměs	Max. množství [%]
C	0,1
Si	0,5
Mn	0,7
P	0,06
S	0,025

Al	0,1
Nb	0,09
Ti	0,12

Vysvětlení jednotlivých písmen v označení:

H = Určuje, že se jedná o vysokopevnostní plochý produkt, určený k tváření za studena.

X = Druh válcování (za tepla nebo za studena) není specifikován.

180 = Značí minimální pevnost $R_{p0,2}$ v MPa.

B = Ocel vykazuje zvýšenou pevnost, která je získána lokálním zahřátím na 170°C po dobu 20 minut.

D = Materiál je určen pro žárové potahování.

+Z = Ocel je povlakována zinkem.

Z100 = Popisuje minimální hmotnost povlaku (v tomto případě zinku). V normě jsou uvedeny dvě hodnoty, jedna pro tříbodové testování a druhá pro jednobodové testování tloušťky (a hmotnosti) povlakované vrstvy. Hmotnost povlakované vrstvy není vždy rovnoměrně rozložena. Lze ale předpokládat, že v každém místě má tato hmotnost alespoň 40% uvedené hodnoty pro jednobodovou zkoušku.

Pro označení Z100 platí, že:

- minimální hmotnost povlaku pro tříbodovou zkoušku = 100 g/m²,
- minimální hmotnost povlaku pro jednobodovou zkoušku = 85 g/m²,
- teoretická tloušťka povlaku = 7 μm ,
- rozmezí povolené tloušťky povlaku = 5-12 μm.

M = Tento znak vyjadřuje třídu kvality povrchu, ta je pak dále rozdělena na podtřídy A, B a C. Tato podtřída je hned následujícím písmenem označení.

C = Podtřída kvality povrchu C označuje povrch nejlepší kvality. Toho je docíleno velmi jemným válcováním (takzvaný skin-pass) kdy se tloušťka plechu válcováním zmenšuje pouze o 0,5 - 1 %. Kvalita povrchu má umožnit velmi snadno upravit povrch lakováním na lícové straně plechu.

Na rubové straně plechu je zároveň povolena kvalita povrchu typu B, která již povoluje malé nedokonalosti jako například škrábance nebo otisky po válcování.

O = Je zde aplikováno olejování povrchu jako zvýšená ochrana oceli proti korozi. Mělo by být možné olejovou vrstvu odstranit určeným odmašťovacím přípravkem, bez jakéhokoliv ovlivnění či poškození povrchu.

3.2 Příprava vzorků

Zkušební vzorky byly zhotoveny stříháním z testovaného plechu, tvar a rozměry zkušebních tyčí byl v souladu s normou ČSN EN ISO 6892. Vzorky byly odebrány ve směrech 0°, 45°, a 90° vzhledem ke směru válcování v počtu 40 ks pro každý směr. Pro určení počátečních rozměrů vzorku bylo provedeno 20 měření na náhodně vybraných vzorcích a z těchto měření byly stanoveny počáteční rozměry. Pro měření šířky a tloušťky vzorku byl použit digitální úchylkoměr Mitutoyo 543-561-1, který lze vidět na obrázku 7. V tabulce 3 jsou uvedeny průměrné hodnoty tloušťky a šířky vzorku spolu s výběrovou směrodatnou odchylkou, tyto hodnoty byly použity pro výpočet počáteční plochy průřezu S_0 .

Tabulka 3: Počáteční rozměry měřených vzorků

	šířka h	tloušťka b
Průměrná hodnota [mm]	20,1814	0,605
Výběrová sm. odchylka [mm]	0,005385	0,007025

$$S_0 = b_0 * h_0 = 12,209747 \text{ mm}^2$$



Měření tloušťky vzorku



Měření šířky vzorku

Obrázek 7: Určování počátečních rozměrů vzorků

3.3 Zjištění E při prvotním zatížení

Zhotovené vzorky byly zatěžovány v souladu s ISO EN 6892-1 na trhacím stroji TIRA test 2300. Rychlost posuv příčnicku byla volena 1 mm/min. Během procesu zatěžování byla přesně zaznamenána velikost prodloužení vzorku pomocí plně automatického průtahoměru pro měření protažení a zúžení do úplného roztržení vzorku MFL 500-B + MFQ-A vyráběného firmou Mess & Feinwerktechnik GmbH. Vzorky byly zatěžovány z předpětí 10 N až do okamžiku dosažení meze kluzu. Z vypočítaných hodnot velikosti napětí a prodloužení, které byly určeny dle vztahů 16 a 17 byl sestrojen graf, z kterého byl následně zjišťován modul pružnosti E .

Počáteční rozměry všech měřených vzorků byly voleny na základě měření takto (viz. tabulka 3):

$$S_0 = 12,209747 \text{ mm}^2$$

$$l_c = 80 \text{ mm}$$

Z protokolu naměřených hodnot, jsme získali na průběh síly F a prodloužení Δl ze kterých jsme vypočítali průběhy smluvního napětí R a poměrné deformace ε podle následujících vztahů:

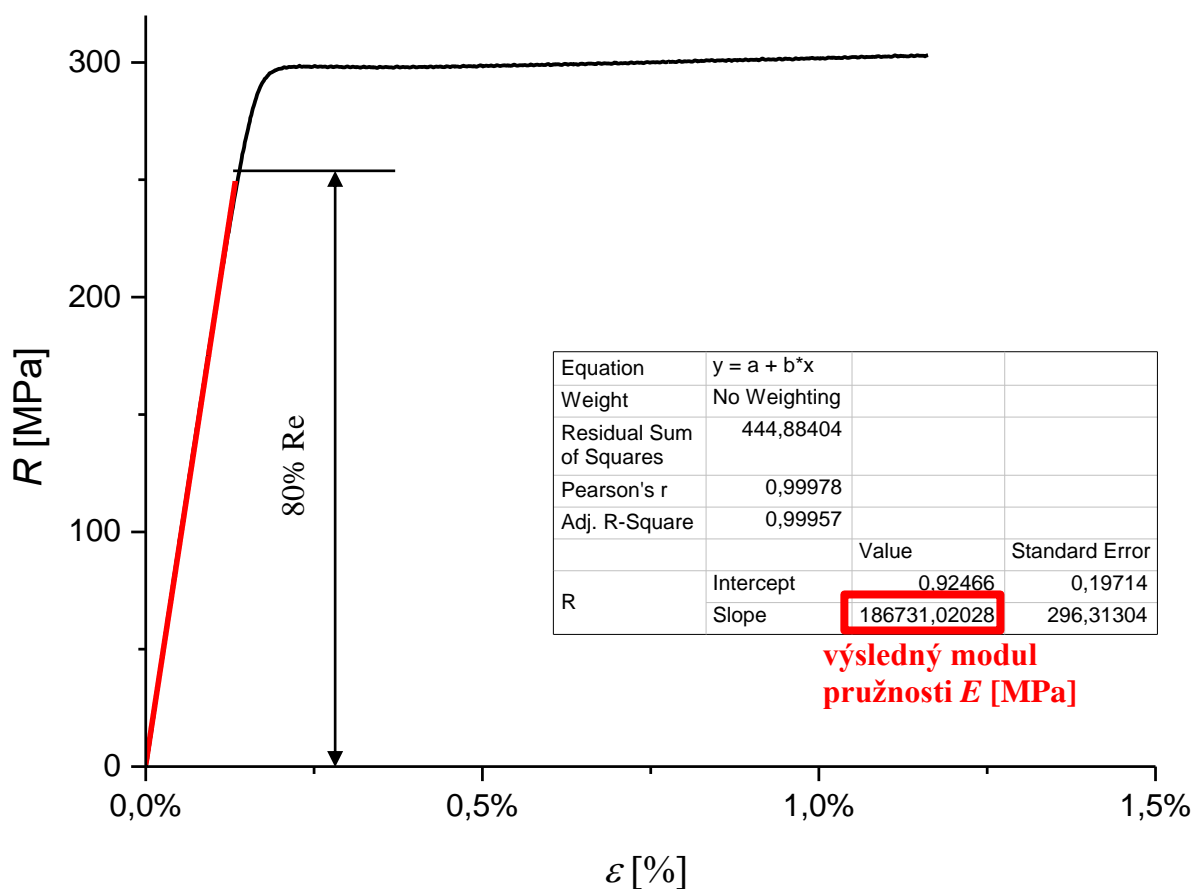
$$R = \frac{F}{S_0} \quad (16)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_c} \quad (17)$$

kde:

- R [MPa] = smluvní napětí
- F [N] = síla vyvinutá trhacím strojem
- S_0 [mm²] = počáteční průřez měřeného vzorku
- Δl [mm] = prodloužení vzorku
- l_c [mm] = počáteční měřená délka extenzometru
- ε [%] = poměrné prodloužení

Příklad grafu lze vidět na obrázku 8. Hodnoty modulu pružnosti při prvotním zatěžování byly zjišťovány ze souboru 10 vzorků pro každý směr odebrání. Pro výpočet E byla použita regresní metoda, kdy naměřenými hodnotami byla proložena přímka (viz obr. 8). Tato přímka je proložena pouze lineární oblastí grafu, která začíná v počátku a končí na hodnotě 80% R_e . Pro zpracování dat byl použit SW Origin 9. Na obr. 8 je zobrazen výsledek modulu E v červeném poli. Hodnoty výsledných modulů E jsou uvedeny v tabulce 4, kde je uvedena střední hodnota spolu se směrodatnou odchylkou pro jednotlivé směry odebrání.



Obrázek 8: Příklad určení zatěžovacího modulu E pomocí lineární regrese.

Tabulka 4: Hodnoty modulu E při prvotním zatížení

	Směr odebrání		
	0°	45°	90°
E [GPa]	195,48	203,74	201,52
Směrodatná odchylka [GPa]	1,631	1,142	1,953

3.3.1 Diskuze výsledků měření

Z naměřených výsledků je patrné, že směr válcování má vliv na velikost Youngova modulu pružnosti E . Nejvyšší hodnota modulu E byla naměřena u vzorků odebraných ve směru 45° vůči směru válcování. Pokud vycházíme ze zažité konvence, že jako základ pro porovnání je brán směr válcování, je nejvyšší naměřená hodnota modulu E ve směru 45° vyšší o 4,2 % vůči směru 0°.

Příčinou naměřených rozdílů modulu E mezi jednotlivými směry je cílená orientace jednotlivých zrn při výrobě plechu technologií válcování a dosažení anizotropních vlastností materiálu. Vhodná cílená anizotropie (především normálová anizotropie) tenkých ocelových plechů vede ke zvýšení jejich odolnosti proti nežádoucímu ztenčení při lisování. Naměřené výsledky jsou v souladu s doposud prováděnými testy u těchto typů materiálů.

3.4 Zjištění vlivu velikosti plastické deformace na změnu modulu E

Vliv velikosti deformace na změnu E byl sledován pro zvolené předdeformace 1%, 4%, 6%, 10%, 15% a 20%. Při testu bylo postupováno tak, že jednotlivé vzorky byly nejprve deformovány na příslušnou velikost plastické deformace a následně znovu zatěžovány pro zjištění E . Z tohoto měření byl zaznamenán průběh síly F a průběh prodloužení vzorku v oblasti pružných deformací. Měření bylo opakováno pro 5 shodných vzorků od každého směru odebrání. Hodnoty výsledků každých pěti identických vzorků byly poté zprůměrovány. Následně byla provedena další měření stejným způsobem, kde byla zkouška zastavena po dosažení celkového prodloužení 4%, poté 6%, 10%, 15% a 20%. Po změření všech 30 vzorků, vystřižených z plechu se směrem válcování 0° , bylo provedeno totéž pro vzorky z plechů se směrem válcování 45° a 90° . Celkem tedy bylo změřeno 90 vzorků. Naměřené průběhy byly během zkoušky zaznamenávány v programu a poté vyexportovány do tabulek. Ty byly dále zpracovávány v programu Origin 9.

Pro výčet napětí při opakovaném zatížení bylo nutné zohlednit změnu průřezu vzorku po plastické deformaci. Změna průřezu byla vypočítána dle vztahu 18. Ve vztahu 19 je uveden příklad výpočtu změny průřezu pro deformaci 10%. Stejný postup byl uplatněn i pro ostatní hodnoty deformace. Pro přehlednost jsou v tabulce 5 uvedeny změny průřezu S použité pro výpočet deformace.

$$S = \frac{S_0}{1+\varepsilon} \quad (18)$$

$$S_{10\%} = \frac{S_0}{1+\varepsilon_{10\%}} = \frac{12,209747}{1+0,1} = 11,09977 \text{ mm}^2 \quad (19)$$

Tabulka 5: Hodnoty počátečního průřezu pro všechny deformační skupiny

ε	S_0
1%	12,088858
4%	11,740141
6%	11,518629
10%	11,09977
15%	10,617171
20%	10,174789

Poté byl aplikovaný stejný postup výpočtu napětí a deformace jako v předchozím případě, jen s výjimkou odlišných vstupních hodnot S_0

$$R = \frac{F}{S_{10\%}} \quad (20)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_c} \quad (21)$$

kde:

R [MPa] = smluvní napětí

F [N] = síla vyvinutá trhacím strojem

$S_{10\%}$ [mm²] = průřez měřeného vzorku po deformaci o 10%

Δl [mm] = prodloužení vzorku

l_c [mm] = počáteční měřená délka extenzometru

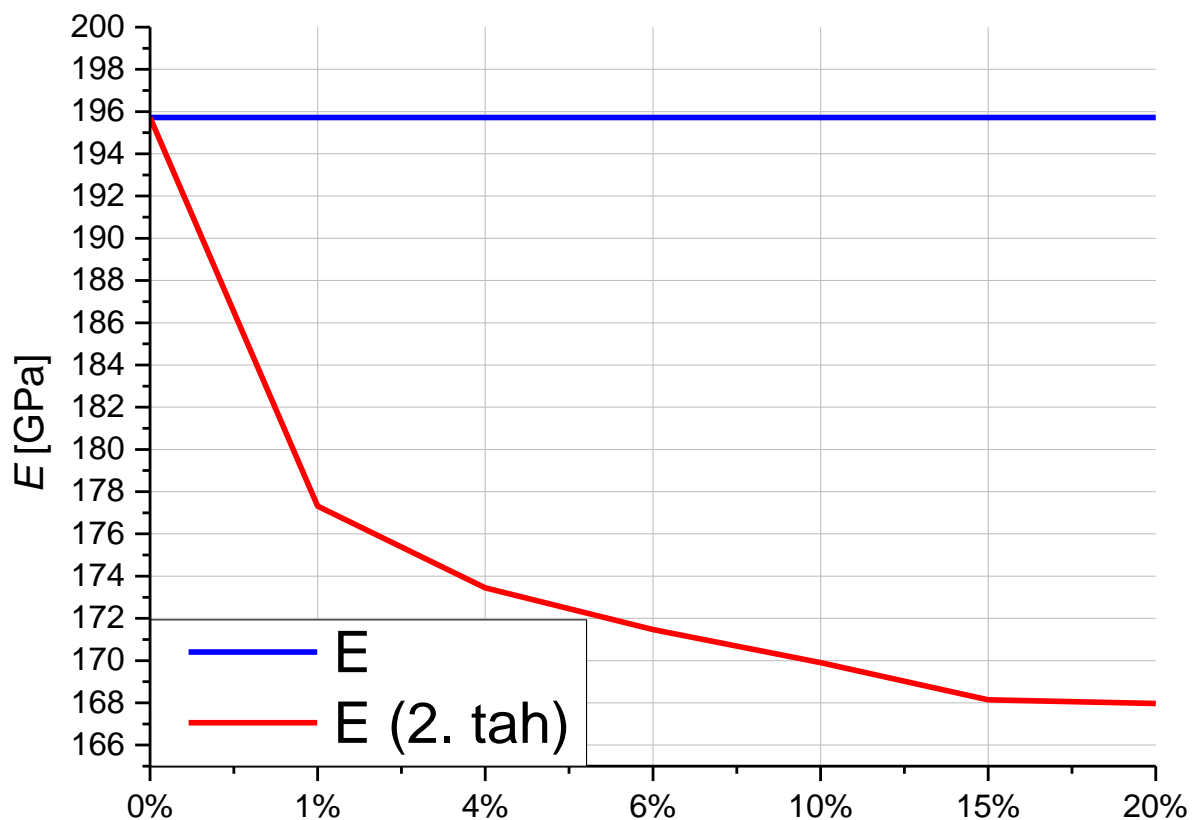
ε [%] = poměrné prodloužení

Byly vytvořeny grafy závislosti smluvního napětí R na poměrném prodloužení ε ze kterých byl zjištěn modul pružnosti E stejným způsobem, jako v případě určování modulu E při prvotním zatížení. Průměrnou hodnotu zatěžovacích modulů E po předchozí plastické deformaci spolu s jejich směrodatnou odchylkou můžeme pro všechny tři směry odebrání vidět v tabulkách 6, 7 a 8. Tyto hodnoty jsou dále znázorněny a porovnány s původním modulem E v grafech 1, 2 a 3. Můžeme vidět, že modul E deformovaného vzorku je vždy nižší, než modul před deformací. Se zvyšující se deformací se hodnota modulu E dále snižuje.

Tabulka 6: Porovnání zatěžovacích modulů pružnosti, na materiálu o směru válcování 0°

	Poměrná deformace ε [%]					
	1%	4%	6%	10%	15%	20%
E před deformací [GPa]	195,72					
E po deformaci [GPa]	177,31	173,44	171,46	169,90	168,14	167,96
Směr. odchylka [GPa]	0,268	1,290	1,905	1,051	1,849	0,656

Porovnání E v 1. a 2. tahu, směr 0°

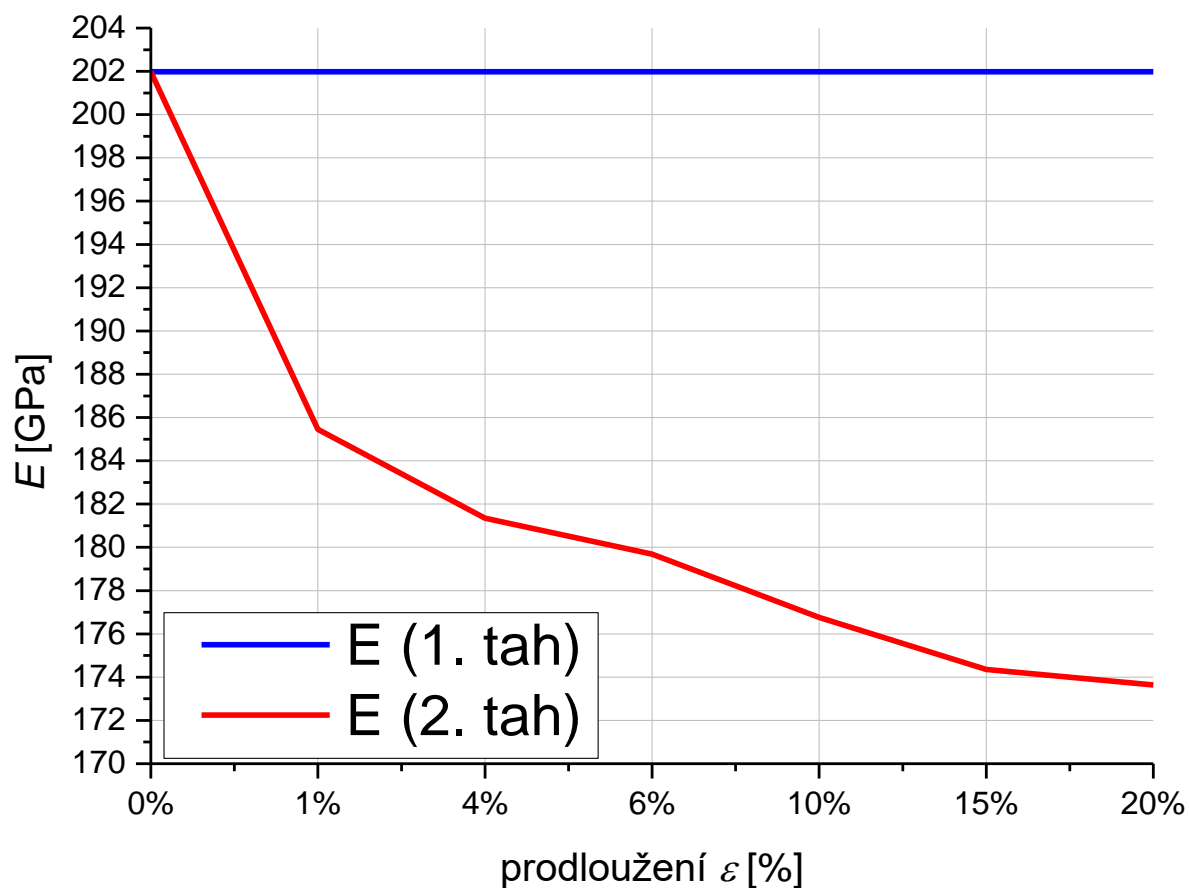


Graf 1: Porovnání zatěžovacích modulů pružnosti, na materiálu o směru válcování 0°

Tabulka 7: Porovnání zatěžovacích modulů pružnosti, na materiálu o směru válcování 45°

	Poměrná deformace ε [%]					
	1%	4%	6%	10%	15%	20%
E před deformací [GPa]	201,98					
E po deformaci [GPa]	185,45	181,34	179,68	176,76	174,35	173,63
Směr. odchylka [GPa]	0,724	1,385	1,004	0,675	0,941	0,586

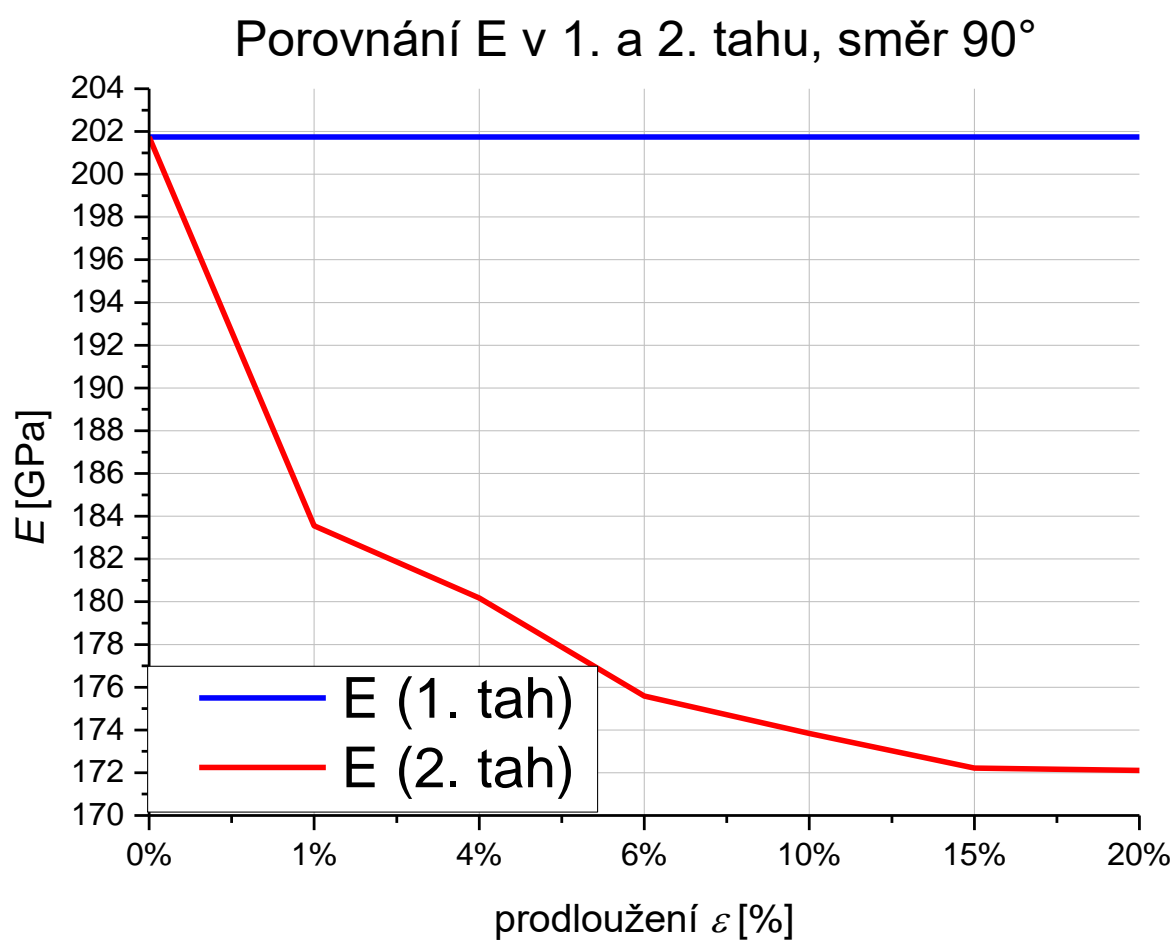
Porovnání E v 1. a 2. tahu, směr 45°



Graf 2: Porovnání zatěžovacích modulů pružnosti, na materiálu o směru válcování 45°

Tabulka 8: Porovnání zatěžovacích modulů pružnosti, na materiálu o směru válcování 90°

	Poměrná deformace ε [%]					
	1%	4%	6%	10%	15%	20%
E před deformací [GPa]	201,74					
E po deformaci [GPa]	183,55	180,17	175,59	173,83	172,21	172,11
Směr. odchylka [GPa]	1,274	0,666	0,745	0,278	1,164	0,873



Graf 3: Porovnání zatěžovacích modulů pružnosti, na materiálu o směru válcování 90°

3.4.1 Diskuze výsledků měření

Z naměřených hodnot je patrný výrazný vliv velikosti plastické deformace na hodnotu Youngova modulu pružnosti E . S rostoucí hodnotou plastické deformace Youngův modul pružnosti E klesá. K výraznému poklesu dochází především v oblasti malých plastických deformací. Tento pokles se postupně zmenšuje se zvyšující se hodnotou plastické deformace. Například pro vzorky odebrané ve směru 0° vzhledem ke směru válcování se po deformaci o 1% původní délky, modul E po deformaci snížil oproti původnímu modulu E před deformací o cca 9,4%, při deformaci $\varepsilon = 10\%$ pak o cca 13,2 % a při $\varepsilon = 20\%$ se snížil o 14,2%, přesné hodnoty lze vidět v tabulce 6.

Pokles hodnot E je patrný u všech vzorků odebraných ve směrech 0° , 45° a 90° vzhledem ke směru válcování. Výrazná závislost Youngova modulu pružnosti je v rozporu se všeobecně přijímaným faktem, že plastická deformace u kovových materiálů neovlivňuje velikost Youngova modulu pružnosti. Pro hlubokotažné materiály je tato změna markantní a naměřené hodnoty změny Youngova modulu pružnosti jsou v souladu s výzkumem zveřejněným v odborné literatuře.

3.5 Zjišťování modulu E v oblasti odlehčení vzorku

Vzorky použité pro předchozí měření byly využity pro analýzu vlivu velikosti plastické deformace na změnu E v oblasti odlehčení. Předchozí provedená měření, jak již bylo uvedeno např. v článku, jejímž autorem je Chen a kolektiv [7], prokázaly nelineární chování materiálu v odlehčovací fázi. Z tohoto důvodu byla tato oblast rozdělena na 4 části, kde byl zjišťován modul pružnosti při odlehčení. Přesněji modul E_{o1} v rozmezí 95-75 % napětí v oblasti odlehčení vzorku, modul E_{o2} v rozmezí 75-50 %, modul E_{o3} v rozmezí 50-25 % a modul E_{o4} v rozmezí 25-0 %.

Při tomto měření jsme se zabývali výsledky, které byly získány až za mezí kluzu v oblasti plastických deformací. Proto bylo nutné zohlednit změny průřezu vzorku při probíhající plastické deformaci použitím skutečného napětí namísto smluvního. Zatímco smluvní napětí R po celou dobu vztahuje působící sílu F na počáteční průřez S_0 , tak skutečné napětí σ tuto sílu vztahuje na okamžitý průřez vzorku S . Skutečné napětí bylo získáno ze vztahu 22.

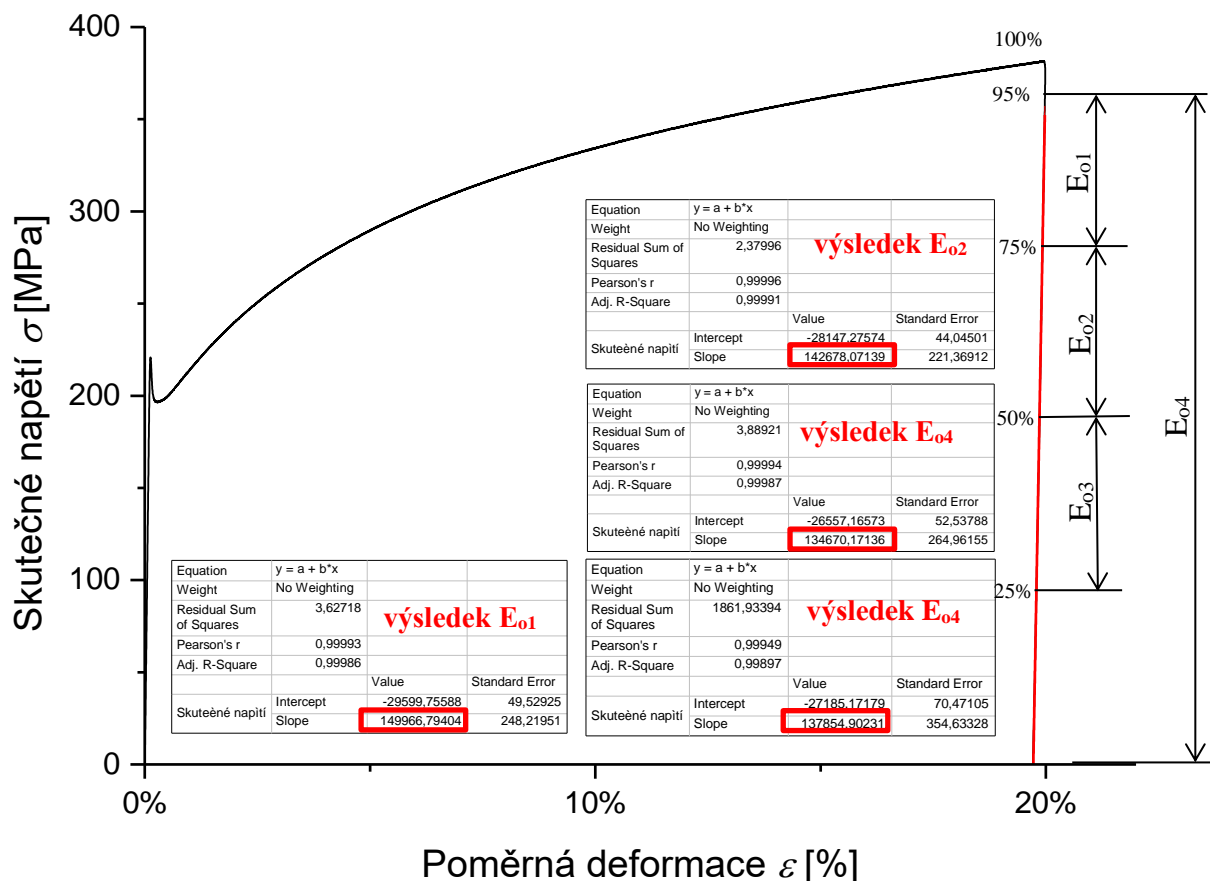
$$\sigma = R * (1 + \varepsilon) \quad (22)$$

kde: σ [MPa] = skutečné napětí

R [MPa] = smluvní napětí

ε [%] = poměrné prodloužení

Princip zjišťování modulu pružnosti v odlehčovací fázi je zřejmý z příkladu výsledku měření na obrázku 9. Moduly E v jednotlivých částech byly opět zjišťovány pomocí lineární regrese.



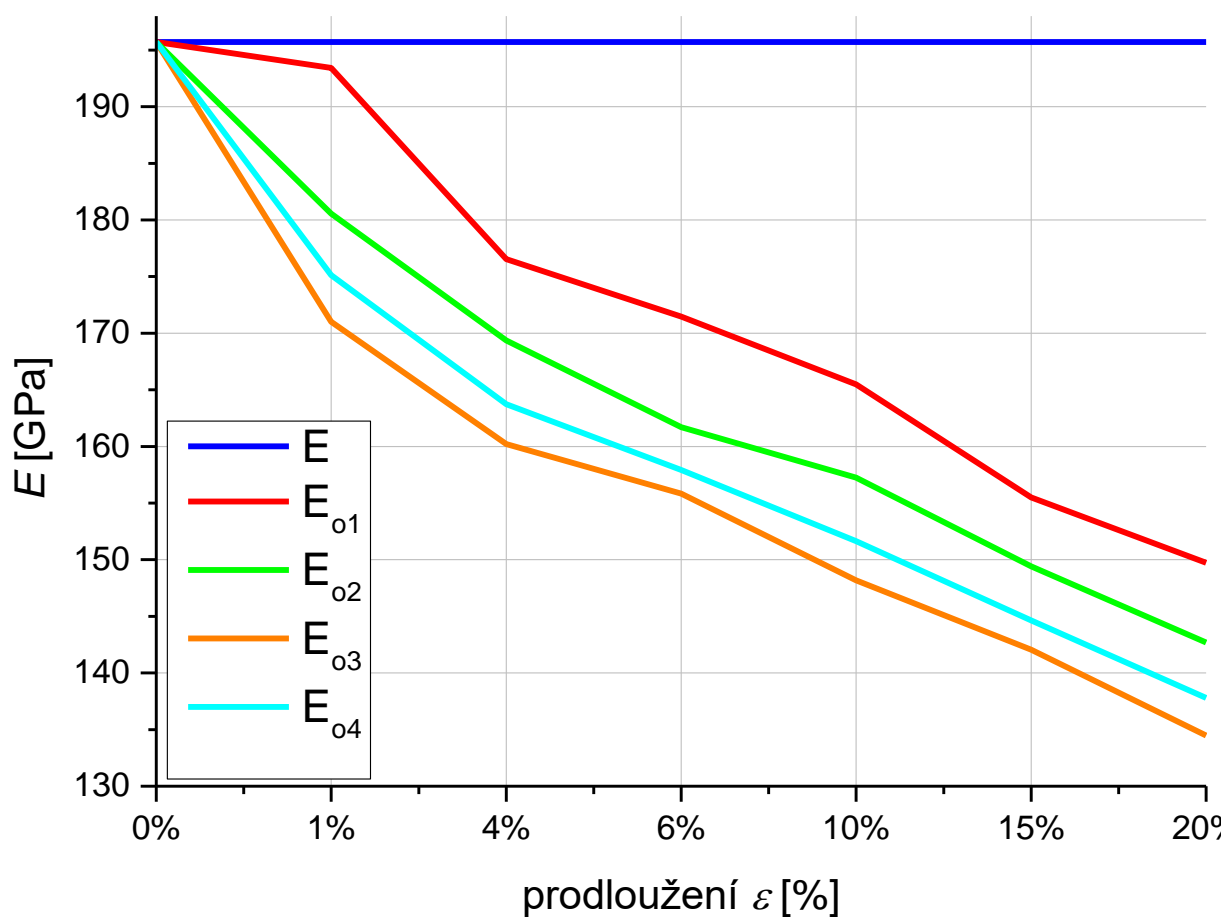
Obrázek 9: Příklad výsledků měření odlehčovacích modulů pružnosti

Níže můžeme v tabulkách 9 ÷ 11 a grafech 4 ÷ 6 vidět výsledky měření odlehčovacích modulů ve všech směrech odebrání. Z výsledků je patrné, že všechny čtyři odlehčovací moduly jsou nižší než modul zatěžovací a s rostoucí deformací jejich hodnoty dále klesají. Ve všech třech směrech se odlehčovací moduly řadí v pořadí podle velikosti $E_{01} > E_{02} > E_{04} > E_{03}$. Vzhledem k tomu, že při určování modulu E z grafu pomocí lineární regrese platí, že čím strmější je přímka, tím vyšší je modul E , tak toto pořadí odlehčovacích modulů značí, že průběh odlehčení má konvexní zakřivení.

Tabulka 9: Porovnání odlehčovacích modulů pružnosti na materiálu o směru válcování 0°

	Poměrná deformace ε [%]					
	1%	4%	6%	10%	15%	20%
E [GPa]	195,72					
E_{o1} [GPa]	193,42	176,53	171,46	165,48	155,50	149,73
E_{o2} [GPa]	180,56	169,36	161,70	157,23	149,40	142,68
E_{o3} [GPa]	171,01	160,20	155,84	148,17	142,04	134,48
E_{o4} [GPa]	175,12	163,72	157,92	151,64	144,64	137,79

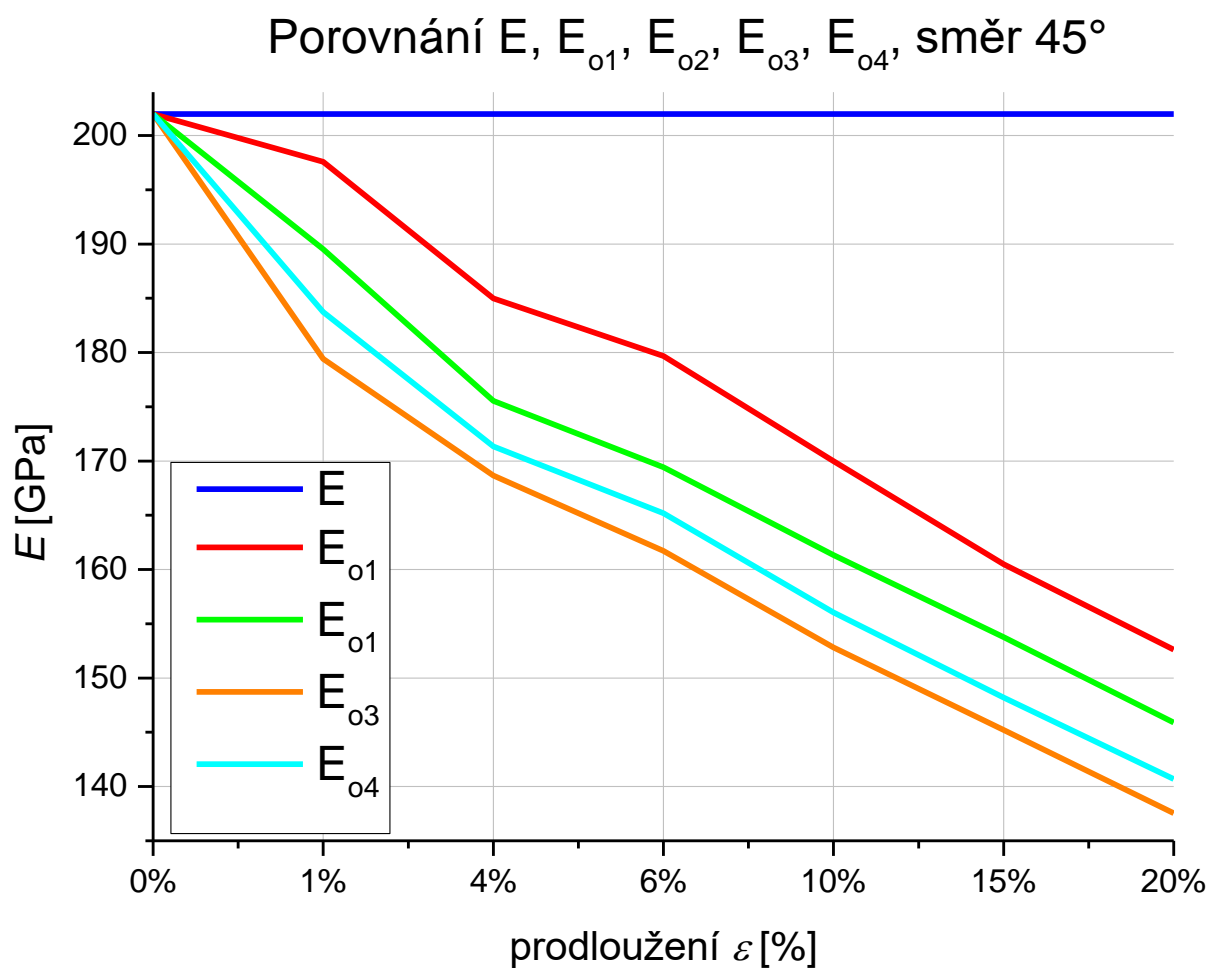
Porovnání E , E_{o1} , E_{o2} , E_{o3} , E_{o4} , Směr 0°



Graf 4: Porovnání odlehčovacích modulů pružnosti na materiálu o směru válcování 0°

Tabulka 10: Porovnání odlehčovacích modulů pružnosti na materiálu o směru válcování 45°

	Poměrná deformace ε [%]					
	1%	4%	6%	10%	15%	20%
E [GPa]	201,98					
E_{o1} [GPa]	197,57	184,98	179,68	169,99	160,49	152,61
E_{o2} [GPa]	189,52	175,54	169,43	161,34	153,77	145,90
E_{o3} [GPa]	179,42	168,66	161,72	152,81	145,20	137,54
E_{o4} [GPa]	183,73	171,34	165,18	156,04	148,19	140,69

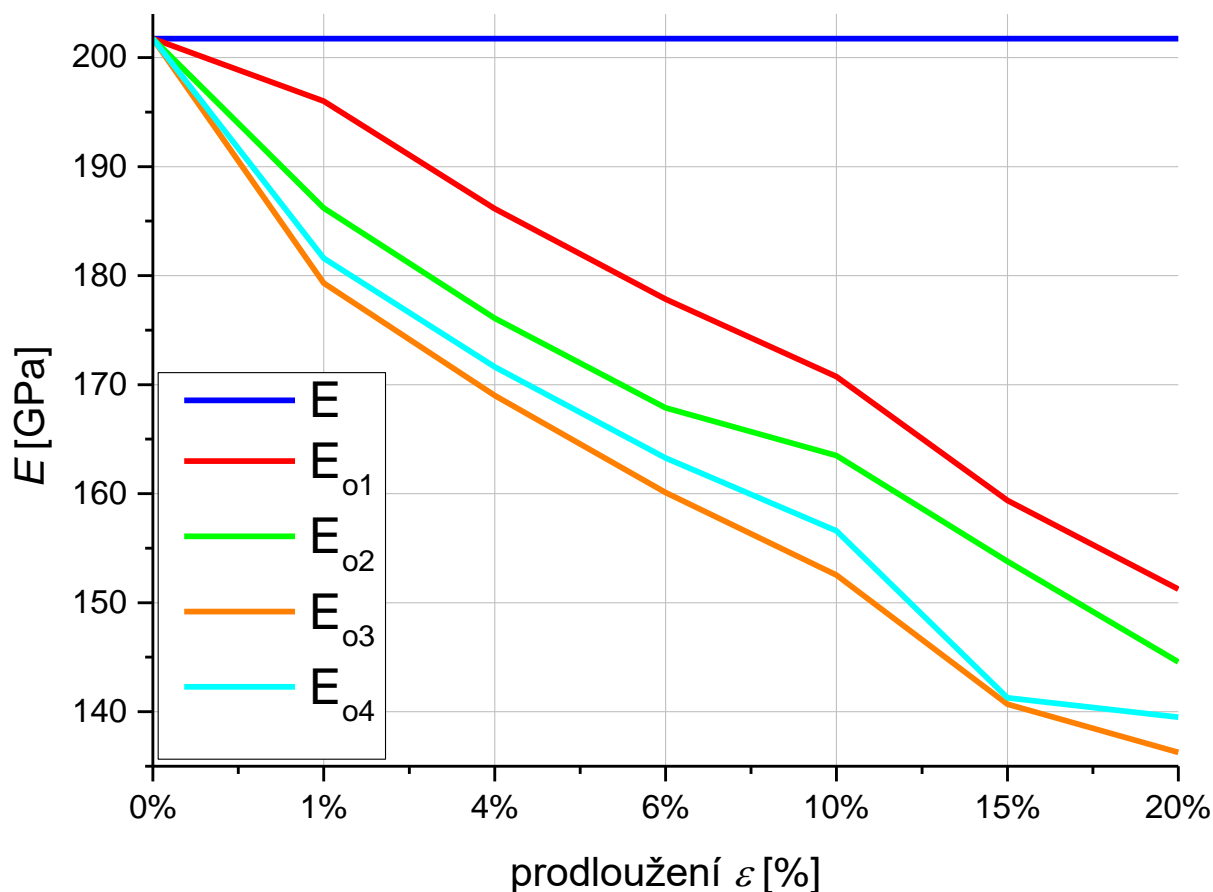


Graf 5: Porovnání odlehčovacích modulů pružnosti na materiálu o směru válcování 45°

Tabulka 11: Porovnání odlehčovacích modulů pružnosti na materiálu o směru válcování 90°

	Poměrná deformace ε [%]					
	1%	4%	6%	10%	15%	20%
E [GPa]	201,74					
E_{o1} [GPa]	196,00	186,13	177,85	170,74	159,38	151,25
E_{o2} [GPa]	186,20	176,09	167,87	163,50	153,79	144,56
E_{o3} [GPa]	179,32	169,00	160,10	152,53	140,69	136,26
E_{o4} [GPa]	181,60	171,63	163,28	156,59	141,28	139,50

Porovnání E , E_{o1} , E_{o2} , E_{o3} , E_{o4} , Směr 90°



Graf 6: Porovnání odlehčovacích modulů pružnosti na materiálu o směru válcování 45°

Často se v teoretických výpočtech křivka odlehčení uvažuje za přímku rovnoběžnou s lineární částí průběhu zatěžování, neboli s částí grafu od nuly do meze úměrnosti. To jinými slovy znamená,

že se modul pružnosti odlehčování uvažuje jako konstantní o stejné velikosti jako modul pružnosti zatěžování. Modul E_{04} pokrývá téměř celou oblast odlehčení vzorku (viz obrázek 9). Pokud tedy porovnáme odlehčovací modul E_{04} a zatěžovací modul E můžeme určit, jak velká chyba nastane, pokud průběh odlehčení budeme považovat za přímku rovnoběžnou s částí grafu do meze úměrnosti. V tabulce 12 můžeme vidět toto porovnání pro směr 0° , přičemž víme, že výsledky v ostatních směrech budou velice podobné.

Tabulka 12: Porovnání zatěžovacího a odlehčovacího modulu

	Poměrná deformace ε [%]					
	1%	4%	6%	10%	15%	20%
E [GPa]	195,48					
E_{04} [GPa]	173,38	157,44	148,95	137,868	125,78	114,83
Chyba	11,31%	19,46%	23,80%	29,47%	35,66%	41,26%

3.5.1 Diskuze výsledků měření

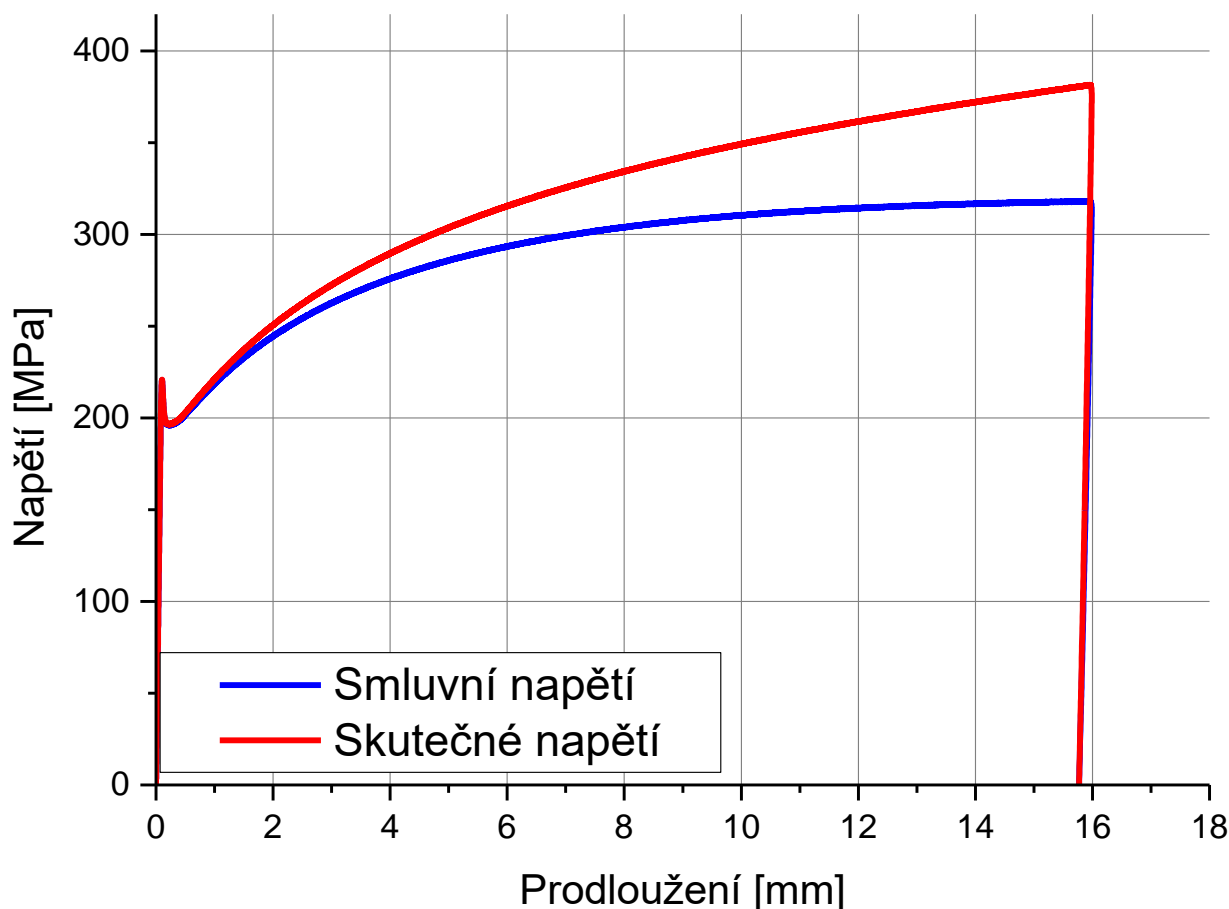
Z naměřených hodnot je patrné, že modul pružnosti v oblasti odlehčení není lineární a skutečná velikost elastické deformace při odlehčení je vyšší než hodnota vypočítaná z předpokladu shodnosti modulu pružnosti při zatížení a při odlehčení. Tento fakt má významný vliv při sestavování matematických modelů pro predikci odpružení hlubokotažných materiálů. Pro testovaný materiál je vidět, že změna velikosti modulu při zatěžování a při odlehčování se může lišit v závislosti na velikosti plastické deformace až o cca 40 %, tak jak je patrné z tabulky 12. Matematická definice různé velikosti modulu pružnosti v jednotlivých částech odlehčovací křivky je poměrně složitá a problematiku s ní spojenou lze nalézt v publikacích prof. Yoshidy a Uemoriho [22] z Hiroshima University a Okayama University v Japonsku.

3.6 Porovnání rozdílů výsledků modulu E při výpočtu ze smluvních a skutečných napětí

Pro toto porovnání byly použity naměřené a vypočítané hodnoty z předchozí kapitoly (kapitola 3.5), kde bylo k určení modulů pružnosti využito skutečné napětí σ . Tyto moduly pružnosti byly stejnou metodou určeny ještě jednou, ale tentokrát z grafů smluvního napětí $R(\varepsilon)$. Následně byly moduly zjištěné oběma způsoby porovnány.

Jak už bylo řečeno výše, smluvní napětí R po celou dobu vztahuje působící sílu F na počáteční průřez S_0 , zatímco skutečné napětí σ tuto sílu vztahuje na okamžitý průřez vzorku S . Vzhledem k tomu, že průřez S se během zkoušky tahem zmenšuje, je skutečné napětí vždy vyšší než smluvní. Zároveň skutečné napětí se zvyšující se plastickou deformací roste. Znázornění rozdílu průběhu těchto dvou napětí můžeme vidět na obrázku 10.

Porovnání skutečného a smluvního napětí



Obrázek 10: Znázornění rozdílu skutečného a smluvního napětí

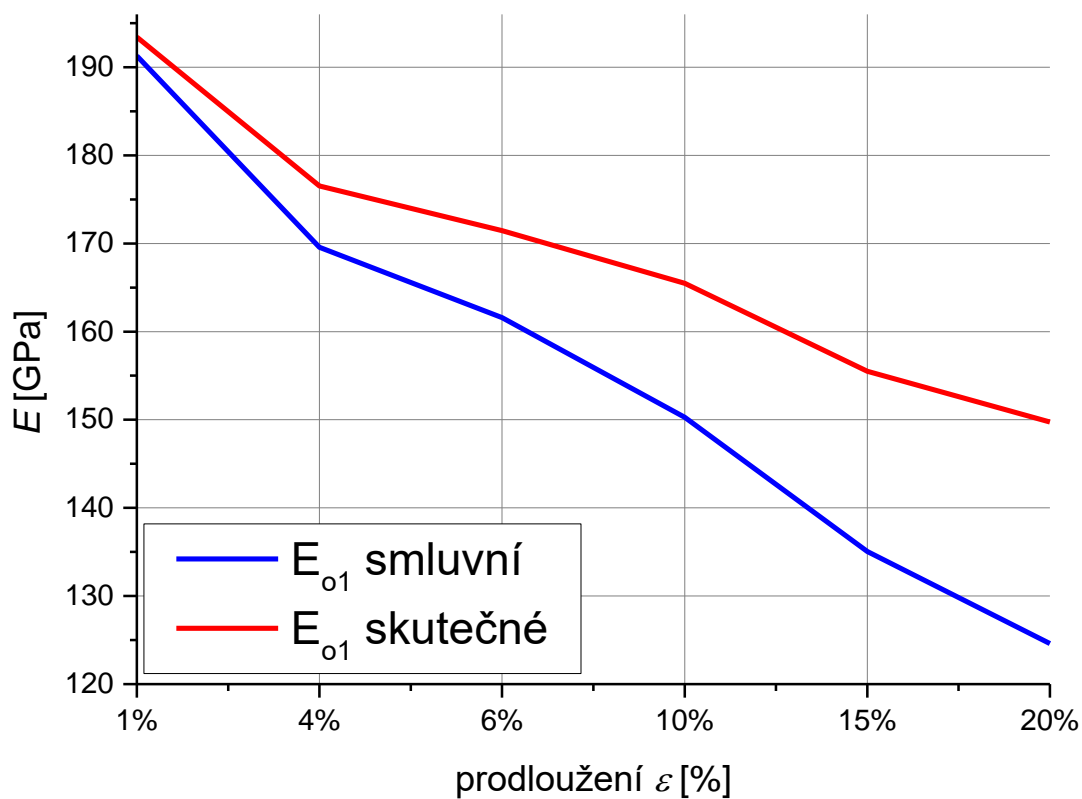
Jak už bylo řečeno výše, rozdíl mezi smluvním a skutečným napětím se zvyšuje s rostoucí hodnotou deformace. Proto zatěžovací modul E je při použití smluvního i skutečného napětí téměř stejný a liší se pouze o 0,12%. Rozdíl mezi moduly vycházejícími z různých napětí se mnohem více projeví u odlehčovacích modulů, které se zjišťují až po plastické deformaci. Z obrázku 10 je patrné, že čím větší je tato deformace, tím můžeme očekávat větší rozdíl modulů.

V tabulkách 13÷16 můžeme vidět hodnoty odlehčovacích modulů zjištěných z obou napětí a jejich odlišnost vyjádřenou v procentech. Tyto hodnoty jsou pak znázorněny v grafech 7÷10.

Tabulka 13: Porovnání skutečného a smluvního E_{o1}

	Poměrná deformace ε [%]					
	1%	4%	6%	10%	15%	20%
E_{o1} smluvní [GPa]	191,28	169,58	161,59	150,27	135,04	124,6
E_{o1} skutečný [GPa]	196	186,13	177,85	170,74	159,38	151,25
rozdíl [%]	1,10%	3,96%	5,76%	9,20%	13,16%	16,78%

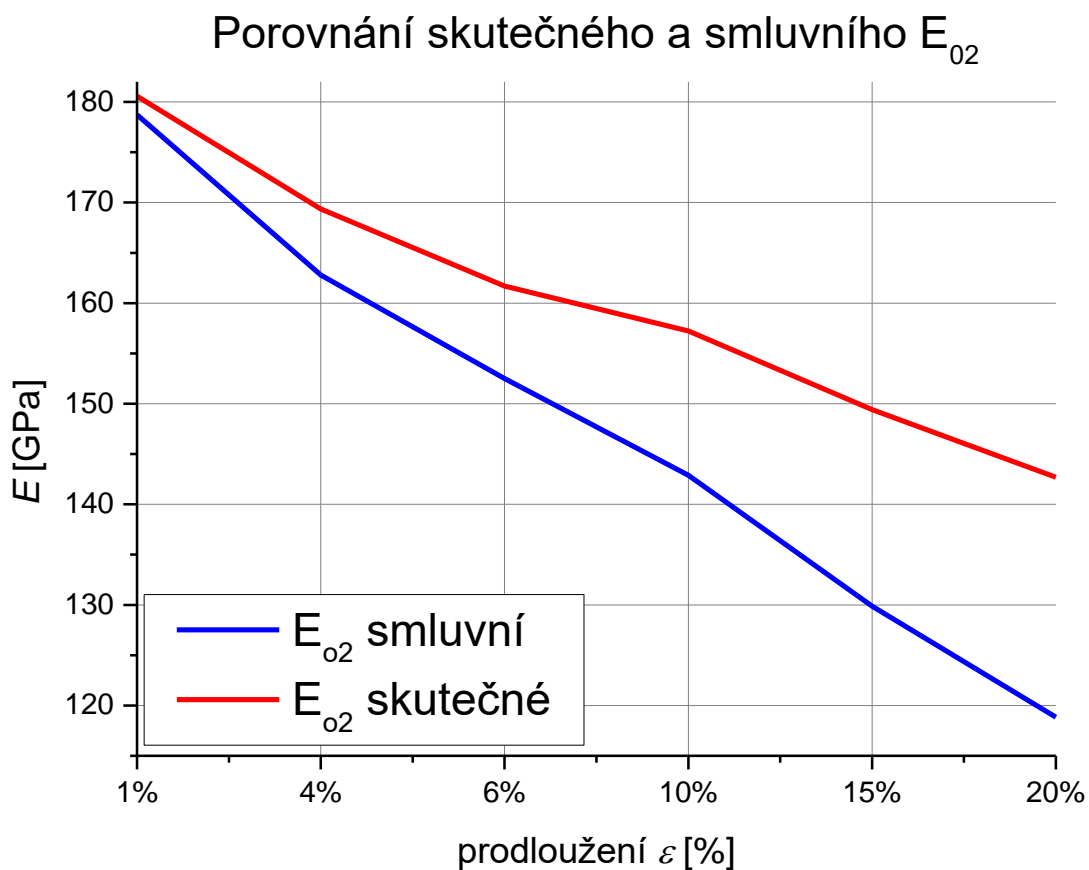
Porovnání skutečného a smluvního E_{o1}



Graf 7: Porovnání skutečného a smluvního E_{o1}

Tabulka 14: Porovnání skutečného a smluvního E_{o2}

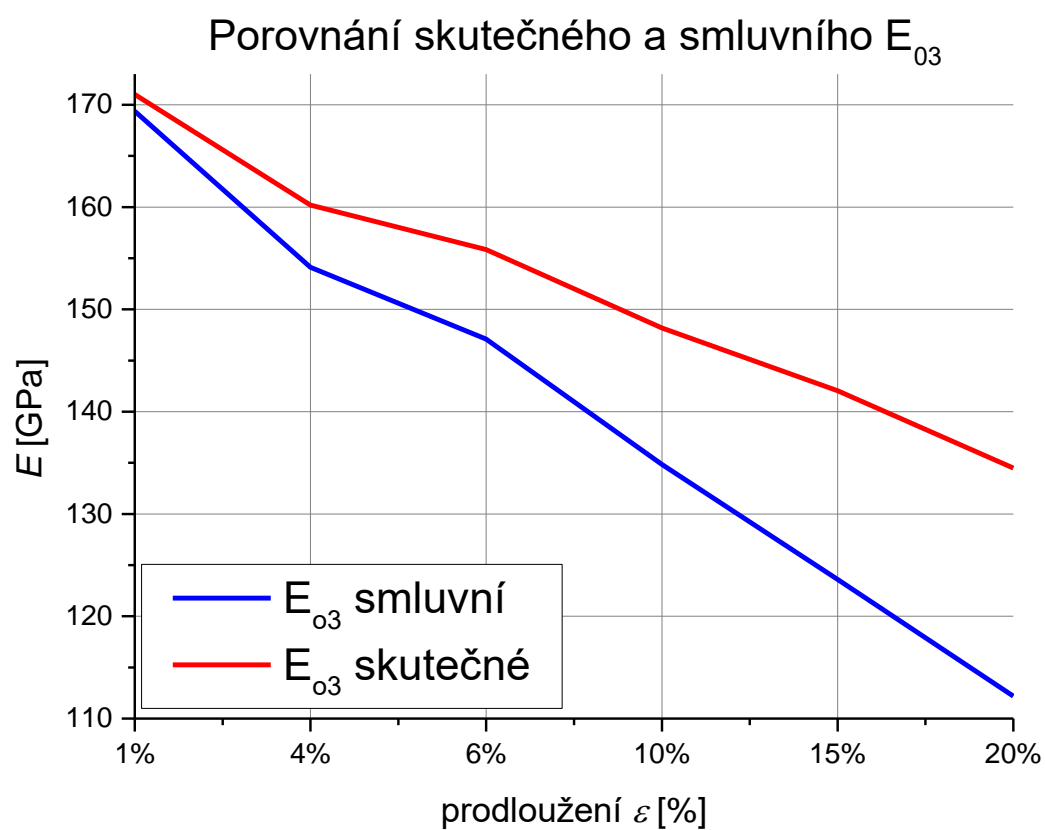
	Poměrná deformace ε [%]					
	1%	4%	6%	10%	15%	20%
E_{o2} smluvní [GPa]	178,72	162,80	152,49	142,88	129,86	118,84
E_{o2} skutečný [GPa]	180,56	169,37	161,71	157,24	149,41	142,69
rozdíl [%]	1,02%	3,87%	5,69%	9,13%	13,08%	16,71%



Graf 8: Porovnání skutečného a smluvního E_{o2}

Tabulka 15: Porovnání skutečného a smluvního E_{03}

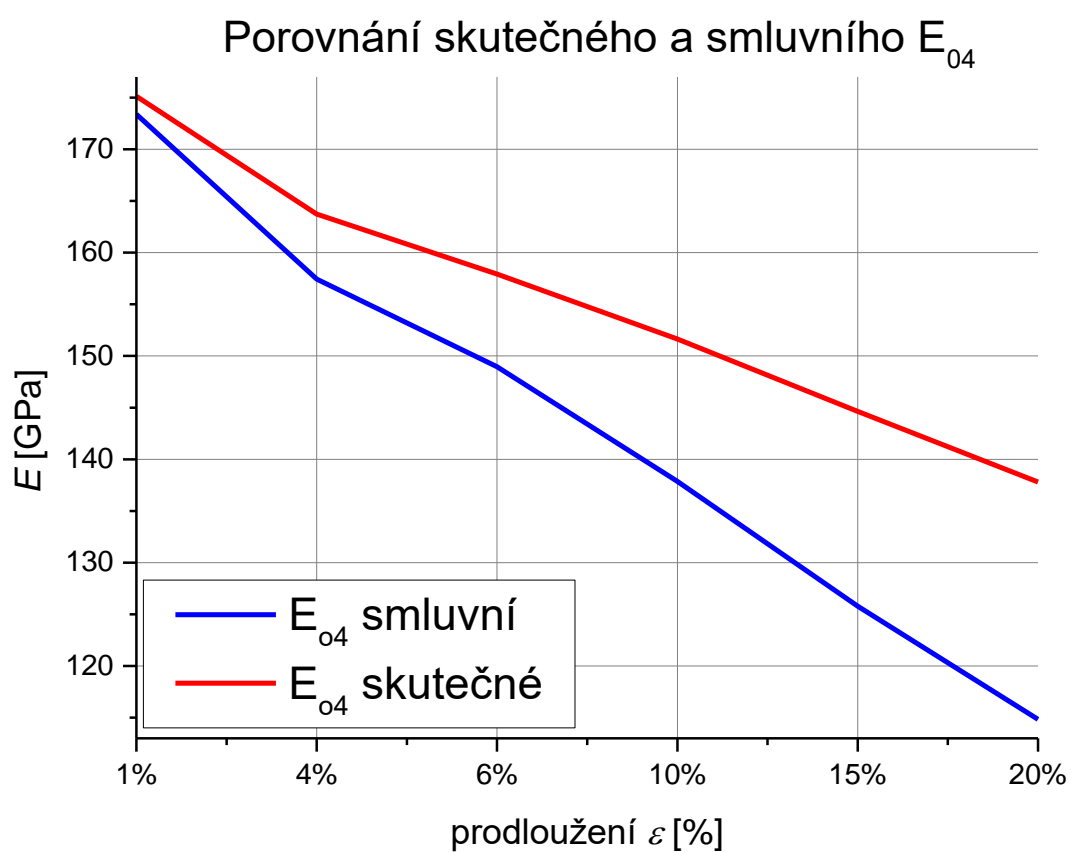
	Poměrná deformace ε [%]					
	1%	4%	6%	10%	15%	20%
E_{03} smluvní [GPa]	169,36	154,10	147,09	134,83	123,59	112,19
E_{03} skutečný [GPa]	171,01	160,20	155,84	148,18	142,04	134,48
rozdíl [%]	0,96%	3,81%	5,61%	9%	12,99%	16,57%



Graf 9: Porovnání skutečného a smluvního E_{03}

Tabulka 16: Porovnání skutečného a smluvního E_{04}

	Poměrná deformace ε [%]					
	1%	4%	6%	10%	15%	20%
E_{04} smluvní [GPa]	173,38	157,44	148,95	137,86	125,78	114,83
E_{04} skutečný [GPa]	175,13	163,73	157,92	151,64	144,64	137,8
rozdíl [%]	0,99%	3,84%	5,68%	9,08%	13,04%	16,66%



Graf 10: Porovnání skutečného a smluvního E_{04}

3.6.1 Diskuze výsledků měření

Rozdíly mezi hodnotami Youngova modulu pružnosti zjišťovaných ze smluvních a skutečných napětí se daly předpokládat. Smluvní napětí nerespektuje změnu průřezu vzorku v oblasti plastické deformace. Pro výpočty v oblasti pružných deformací je použití Youngova modulu pružnosti získávaného ze smluvních napětí naprosto korektní. Pro výpočty v oblasti tváření je toto použití značně nepřesné, tak jak ukazují výsledky výzkumu prováděného v rámci předkládané bakalářské práce. Pro výpočty tvářecích procesů je proto nutné provádět výpočty vždy z hodnot skutečných napětí.

4 Závěr

Hlavním cílem předkládané bakalářské práce bylo zjistit, jak se mění Youngův modul pružnosti v závislosti na velikosti předchozí plastické deformace a to jak v oblasti zatěžování, tak i v oblasti odlehčování. Za tímto účelem byla provedena tahová zkouška celkem 120 vzorků z hlubokotažné oceli s označením HX180BD+Z100MCO. Vzorky byly odebrány ve směru 0° , 45° a 90° vůči směru válcování. Experimentem bylo zjištěno, že plastická deformace ovlivňuje Youngův modul pružnosti E . U všech vzorků s předchozí plastickou deformací (bez ohledu na směr odebrání) došlo k poklesu Youngova modulu pružnosti E oproti vzorkům bez předchozí plastické deformace. Nejvyšší pokles vykazují vzorky s malou plastickou deformací.

Dalším cílem práce bylo prozkoumat průběh odlehčení měřeného vzorku. V grafech závislosti smluvního napětí na poměrném prodloužení byly lineárními interpolacemi naměřeny tři částečné odlehčovací moduly E_{o1} , E_{o2} , E_{o3} , a celkový odlehčovací modul E_{o4} . Byly sestaveny závislosti těchto čtyř modulů na velikosti předchozí plastické deformace. Všechny čtyři odlehčovací moduly mají menší velikost než modul před deformací a se vzrůstající deformací se dále snižují. Teoretické výpočty často uvažují, že průběh odlehčování je lineární, a rovnoběžný s částí grafu do meze pružnosti, což jinak řečeno znamená, že $E_{o4} = E$. V kapitole 3.5. je podrobně popsána změna velikosti modulu pružnosti v oblasti zatěžování a odlehčování. Rozdíly mezi Youngovým modulem pružnosti v oblasti zatěžování a odlehčování rostou se vzrůstající velikostí plastické deformace. Podrobné výsledky a hodnoty rozdílů jsou uvedeny v kapitole 3.5.

Posledním cílem řešení BP bylo určit, jak velkou chybou by bylo použít smluvní napětí namísto skutečného. Zde šlo o jednoduché porovnání modulů pružnosti, které byly odečteny z grafu skutečného napětí a modulů odečtených z grafu smluvního napětí. V oblasti prvotního zatěžování v pružném stavu není použita metodika výpočtu ze smluvního a skutečného napětí patrná a výsledné naměřené hodnoty jsou totožné. Pro oblast odlehčení je použita metodika výpočtu však zásadní a u modulů E_{o1} , E_{o2} , E_{o3} a E_{o4} jsou rozdíly mezi naměřenými hodnotami silně závislé na velikosti plastické deformace, což vyplývá ze změny průřezu vzorku při testu. Podrobné výsledky měření jsou uvedeny v kapitole 3.6.

Bakalářská práce prokázala vliv velikosti plastické deformace na hodnotu Youngova modulu pružnosti. Dále byl prokázán rozdíl v naměřených hodnotách Youngova modulu pružnosti při zatěžování a odlehčování testovaného vzorku v oblasti plastických deformací a také nelineární průběh tohoto modulu při odlehčení vzorku.

5 Seznam použité literatury

- [1] DVOŘÁK, Petr. *Způsoby stanovení modulu pružnosti v tahu*. Praha, 2018. 45 s. Bakalářská práce. Fakulta strojní. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí bakalářské práce Ing. František Tatíček, Ph.D.
- [2] JAREŠ, Vojtěch. *Ocel: základy metalografie, tepelného zpracování a rozdělení ocelí*. 5. uprav. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1953.
- [3] WALLA, Viktor. *Zkoušení ocelí a ostatních kovů: zkoušky statické, rázové, na únavu, tvrdostní, technologické, vady ocelí a ostatních kovů*. Praha: Práce, 1952. Technické příručky Práce.
- [4] PRŮCHA, Vojtěch. *Vývoj mikrostruktury vícefázové oceli s TRIP efektem*. Plzeň, 2013. 86 s. Diplomová práce. Fakulta strojní. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí diplomové práce Ing. Ludmila Kučerová, Ph.D.
- [5] HERMAN, Michal. *Zjištění BH efektu u hlubokotažnou oceli*. Liberec 2013. 54 s. Bakalářská práce. Fakulta strojní. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

- [6] SCHINDLER, Patrik. *Tahová zkouška u různých druhů materiálů*. Ostrava, 2016. 38 s. Bakalářská práce. Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství. Technická univerzita Ostrava. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Eva Mazancová, CSc.
- [7] CHEN, Zhong ,GANDHI, Umesh, LEE, Jinwoo, WAGONER, R.H. *Variation nad consistency of Young's modulus in steel*. Elektronický časopis Journal of Materials Processing Technology, Leden 2016, svazek 227, s. 227-242. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.08.024>
- [8] SKRBK, Břetislav. *Vlastnosti konstrukčních ocelí v systému jakosti podle EN a ČSN*. Veletrh metalurgie METAL 2003. Hrádek nad Moravicí, květen 2003.
- [9] Vysoce pevné mikrolegované oceli: High Strength Low Alloy Steels HSLA [online]. , 44s [cit. 2018-07-26]. Dostupné z: <http://svv.cz/files/2.11.vysocepevnmikroleg.ocelipdf.pdf>
- [10] BALLON, Marek. *Porovnání modulů pružnosti stavebních materiálů*. Brno, 2014. 79 s. Bakalářská práce. Fakulta stavební. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.
- [11] ZÁŠKODA, David. *Zjišťování mechanických vlastností tvářených materiálů*. Brno, 2008. 28 s. Bakalářská práce. Fakulta strojního inženýrství. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí bakalářské práce Ing. Kamil Podaný
- [12] HRDÝ, Pavel. *Vliv BH efektu na změnu mechanických vlastností u ultra-pevnostních ocelových plechů*. Liberec, 2015. 101 s. Diplomová práce. Fakulta strojní. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.
- [13] JANDA, Luděk. *Tahová zkouška trubek*. Brno, 2015. 63 s. Bakalářská práce. Fakulta strojního inženýrství. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí bakalářské práce Ing. Eva Peterková, Ph.D.
- [14] OŠTÁDAL, Josef. *Zkoušky tvařitelnosti a jejich uplatnění v praxi*. Brno, 2011. 33 s. Bakalářská práce. Fakulta strojního inženýrství. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí bakalářské práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.
- [15] DIN EN 10346:2009-07 *Kontinuierlich schmelztauchveredelte Flacherzeugnisse aus Stahl – Technische Lieferbedingungen*. Berlín: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2009, 41 s. Třídící znak: 51256

- [16] ČSN EN ISO 7438 *Kovové materiály – Zkouška ohybem*. Praha: Český normalizační institut, 2005, 12 s. Třídící znak: 74618
- [17] ČSN EN ISO 6892-1 *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Ústav pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, únor 2010, 64 s. Třídící znak: 84656
- [18] ČSN EN ISO 20482 *Kovové materiály – Plechy a pásy – Zkouška hloubením podle Erichsena*. Praha: Ústav pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014, 12 s. Třídící znak: 95217
- [19] PAGÁČ, Aleš. *Použití technologických zkoušek tvaritelnosti při tváření*. Brno 2012. 66 s. Bakalářská práce. Falukta strojního inženýrství. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Michaela Císařová.
- [20] ČSN ISO 148-1 *Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu – metodou Charpy – Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Ústav pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 28 s. Třídící znak: 86144
- [21] JANTOŠOVÁ, Pavla. *Vliv teploty na výsledky zkoušky rázem v ohybu podle Charpyho*. Ostrava 2010, 33 s. Bakalářská práce. Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství. Technická univerzita Ostrava. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petra Váňová, Ph.D.
- [22] YOSHIDA, Fusahito, UEMORI, Takeshi, FUJIWARA, Kenji. *Elastic-plastic behavior of steel sheets under in-plane cyclic tension-compression at large strain*. Elektronický časopis Journal of Plasticity Únor 2002, svazek 18, s. 633-659. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(01\)00049-3](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(01)00049-3)
- [23] ANON., nedatováno. *Mechanické vlastnosti pevných látek - Portál pro strojní konstruktéry* [online] [vid. 2019-11-25]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/mechanicke-vlastnosti-pevnych-latek>