

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T019 Stavba výrobních strojů a zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Přípravek pro pokročilé testování plechů - Bauschingerův efekt

Autor: **Bc. Josef MIŠTERA**

Vedoucí práce: **Ing. Václav KUBEC, Ph.D.**

Akademický rok 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Josef MIŠTERA**
Osobní číslo: **S16N0048P**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Stavba výrobních strojů a zařízení**
Název tématu: **Přípravek pro pokročilé testování plechů - Bauschingerův efekt**
Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Základní požadavky:

Cílem je na základě analýzy současného stavu navrhnout přípravek pro zkoušení plechu, který bude provozován na univerzálním zkušebním stroji. Princip testu vychází z cyklického namáhání tah-tlak. Navržené řešení bude otestováno pomocí numerických simulací.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova diplomové práce:

1. Analýza stávajícího stavu
2. Definice podmínek průběhu zkoušky Bauschingerova efektu
3. Variantní návrh konstrukce přípravku
4. Virtuální testování optimální varianty
5. Závěr, zpracování výkresové dokumentace

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah kvalifikační práce: **50-70 stran A4**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

STANĚK, J., *Základy stavby výrobních strojů*,. Plzeň: ZČU, 2001. ISBN 80-7082-738-6

DIETER, G. E., *Mechanical Metallurgy*,. Philadelphia: McGraw Hill Book Company, 1988. ISBN 0-07-084187-X

HÄRTEL, M., *Materials Science and Engineering 118 012018*,. Chemnitz: IOP Publishing Ltd, 2016

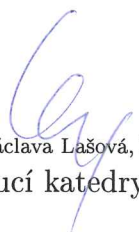
Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Václav Kubec, Ph.D.**
Katedra konstruování strojů
Konzultant diplomové práce: **Ing. Danuše Jánská**
COMTES FHT a.s.

Datum zadání diplomové práce: **19. září 2017**
Termín odevzdání diplomové práce: **21. května 2018**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Václava Lašová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 19. září 2017

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Mištera	Jméno Josef		
STUDIJNÍ OBOR	2302T019 Stavba výrobních strojů a zařízení			
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Kubec, Ph.D.	Jméno Václav		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKS			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Přípravek pro pokročilé testování plechů - Bauschingerův efekt			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2018
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	102	TEXTOVÁ ČÁST	82	GRAFICKÁ ČÁST	20
---------------	-----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Diplomová práce se zaměřuje na možnosti modelování plasticity materiálu v prostředí MKP softwaru. Pozornost je věnována charakteristikám deformačního zpevnění v průběhu cyklického zatěžování, především Bauschingerově efektu. Teoretické poznatky jsou následně využity v parametrické studii zkušebních přípravků pro testování plechů. Součástí práce je pak doporučení konkrétního typu zkušebního zařízení pro společnost zadavatele práce, provedení zkoušek na vybraném zařízení a návrh zpracování naměřených dat.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>tváření kovů, automobilový průmysl, hluboké tažení, tváření plechů, teorie plasticity, cyklické deformační zpevnění, nelineární modely zpevnění, technologické zkoušky plechů, Bauschingerův efekt, MKP simulace, zkušební zařízení, parametrická studie, negativní vlivy</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Mištera	Name Josef
FIELD OF STUDY	2302T019 Design of Manufacturing Machines and Equipment	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Kubec, Ph.D.	Name Václav
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR
TITLE OF THE WORK	Facility for advanced sheet metal testing - Bauschinger Effect	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2018
----------------	---------------------------	-------------------	-------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	102	TEXT PART	82	GRAPHICAL PART	20
----------------	-----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>This thesis is focused on the possibilities of modeling plasticity in FEM software environment. Attention is given to the characteristics of deformation hardening during cyclic loading, in particular Bauschinger effect. Theoretical knowledge is then used in a parametric study of testing equipment for sheet metal components. Part of the thesis is the recommendation of a specific type of testing equipment for the company's sponsor, the testing of selected equipment and a proposal for the processing of measured data.</p>
KEY WORDS	<p>metal forming, automotive industry, deep drawing, sheet metal forming, metal plasticity, work hardening, nonlinear hardening model, sheet metal testing, Bauschinger effect, FEM simulation, testing equipment, parametric study, negative effects</p>

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří se podíleli na vzniku mé diplomové práce. Největší dík patří Ing. Václavovi Kubcovi PhD. za vedení práce a Ing. Antonínu Prantlovi, CSc. za iniciaci vzniku, cenné poznatky a konzultace v celém průběhu tvorby práce. Další poděkování patří Ing. Martinovi Marešovi za odborné rady v oblasti MKP modelování. Také bych chtěl poděkovat celé společnosti COMTES FHT za možnost zabývat se zajímavým tématem, poznat její provoz a účastnit se provádění experimentů a specializovaných školení.

Obsah

Představení COMTES FHT	10
Úvod.....	11
Specifikace zadání práce	11
1 Tváření kovů	12
1.1 Mechanická podstata tváření	12
1.1.1 Stav napjatosti	12
1.1.2 Stav deformace	13
1.1.3 Hodnocení stavu napjatosti a deformace.....	14
1.2 Rozdělení tváření.....	15
1.2.1 Rozdělení podle teploty.....	15
1.2.2 Rozdělení podle tepelného efektu	15
1.2.3 Podle působení vnějších sil	15
1.3 Plošné tváření za studena.....	16
1.3.1 Deformace kovů	17
1.3.2 Materiály v automobilovém průmyslu	18
2 Plasticita materiálu	20
2.1 Experimentální poznatky	20
2.1.1 Materiálové charakteristiky hlubokotažných ocelí	22
2.1.2 Průběh plastické deformace	22
2.2 Matematický popis materiálu	24
2.2.1 Podmínka plasticity	24
2.2.2 Pravidlo zpevnění	25
2.2.3 Pravidlo plasticity.....	26
2.2.4 Konkrétní matematické modely zpevnění.....	27
2.3 Technologické zkoušky plechů	30
2.3.1 Zkouška hlubokotažnosti dle Erichsena	31
2.3.2 Kalíšková zkouška (Schmiedtova zkouška).....	31
2.3.3 Zkouška LDH (Zkouška Nakajima).....	32
2.3.4 Hydraulická zkouška (Tomlenova zkouška)	32
3 Bauschingerův efekt.....	33
3.1 Popis jevu	33
3.2 Hlavní charakteristiky a parametry.....	34
3.3 Fyzikální podstata jevu.....	36
3.3.1 Teorie vnitřních napětí	36
3.3.2 Teorie dislokací	36
3.3.3 Kompozitní model.....	37
3.4 Význam Bauschingerova efektu.....	37
3.5 Modelování Bauschingerova efektu	38
4 Analýza požadavků na zařízení.....	39
4.1 Základní požadavky na průběh zkoušky	39
4.2 Požadavky na vyhodnocení zkoušky	42
4.3 Nežádoucí vlivy na zkoušky	43
5 Možnosti konstrukčního řešení	45
5.1 Pevné klemy	45
5.2 Posuvné přídržné pláty	46
5.3 Posuvné klemy s tvarovými výběžky	46
5.3.1 Inovace zařízení.....	47
5.4 Zařízení využívající přitlačné síly pružin	47
5.5 Zařízení využívající smykové napětí.....	49

5.6	Zařízení založené na principu tříbodového ohybu	50
6	Variantní řešení přípravku.....	52
6.1	Zařízení využívající přitlačné síly pružin	52
6.1.1	Popis zařízení	52
6.1.2	MKP model průběhu testu.....	53
6.1.3	Význam poškozujících vlivů.....	55
6.1.4	Vyplývající vlastnosti přípravku	58
6.2	Zařízení využívající smykové napětí.....	59
6.2.1	Popis zařízení	59
6.2.2	MKP model průběhu testu.....	60
6.2.3	Význam poškozujících vlivů.....	62
6.2.4	Vyplývající vlastnosti přípravku	67
7	Provedení zkoušky	68
7.1	Výběr vhodné varianty řešení přípravku	68
7.2	Popis provedených zkoušek.....	69
7.3	Doporučení o praktickém provádění	73
	Závěr.....	74
	Seznam použitých zdrojů	75
	Seznam obrázků	78
	Seznam tabulek	80
	Seznam použitého software.....	81
	Seznam příloh.....	82

Představení COMTES FHT

Společnost COMTES FHT je významná firma zabývající se zejména vývojem technologie tváření kovů. Mezi hlavní aktivity patří navrhování komplexních postupů termomechanického zpracování a konstrukční řešení tvářecích nástrojů pro zvýšení jejich životnosti a provozní spolehlivosti. V oblasti počítačového modelování se zaměstnanci zabývají modelováním technologických procesů, především procesů různých druhů tváření – za tepla i za studena a tepelného zpracování. Například jsou to technologické procesy volného a zápusťkového kování, výroby trubek, válcování, protlačování a dalších. COMTES FHT mimo jiné nabízí navrhování a pevnostní ověřování konstrukcí, zahrnující například i teplotní a dynamickou analýzu či jejich optimalizaci. Společnost disponuje vakuovou indukční pecí pro možnosti tavení a odlévání ingotů a tvarových odlitků především pro zpracování ocelí, niklových a hliníkových slitin.

Další významnou oblastí práce společnosti je provádění širokého spektra standartních i specificky vyvinutých zkoušek a měření. Z nejvýznamnějších lze uvést například únavové zkoušky, zkoušky lomové houževnatosti, zkoušky prokalitelnosti, zkoušky tvrdosti nebo měření deformačních charakteristik. Součástí je pak akreditovaná laboratoř s množstvím zkušebních strojů. Významnou skupinou je oblast testování a měření plechů, které představují jednu ze specializací společnosti. V oddělení metalografie je pak firma schopna provádět například analýzy mikrostruktury, elektronové mikroanalýzy, fraktografie a další.

Společnost spolupracuje s mnohými významnými partnery na poli strojírenské praxe, z nejvýznamnějších lze uvést ŠKODA AUTO a.s., Doosan Škoda Power s.r.o., Mubea, spol. s r.o. a Schaeffler CZ s.r.o.

Úvod

Technologie tváření je spojena s vysokým využitím materiálu a vysokou produktivitou práce. I z těchto důvodů je tváření plechů v automobilovém průmyslu významným představitelem tvářecích procesů v České republice. Tento obor klade vysoké požadavky na sériovost výroby, a proto je představitelem spektra oborů, pro které má význam zabývat se detailním chováním materiálu. Na tyto procesy jsou kladeny zvýšené požadavky, jejichž cílem je snižování chybovosti, které doposud nenabývaly zvláštního významu. Znalost chování plechů v procesech tváření je jeden ze základních předpokladů pro možnost odlaďování sériové výroby. Proto se práce bude opírat především o technologické procesy nacházející uplatnění v tomto oboru.

Specifikace zadání práce

Cílem práce bylo shrnutí základních poznatků o modelování experimentálně prokázaného chování kovových materiálů při tvářecích procesech, především procesech hlubokého tažení plechů. Jedná se tedy o chování materiálů nad mezí kluzu, touto problematikou se blíže zabývá teorie plasticity. Vysoká pozornost bude pak věnována teoretickému popisu deformačnímu zpevnění materiálů v průběhu cyklického zatížení, především Bauschingerově efektu. Pro náležité matematické modelování těchto procesů je nutné mít možnost experimentálně určit charakteristiky tohoto chování pro konkrétní materiály. To se provádí pomocí zkoušek na speciálních přípravcích. Pro konstrukční zpracování bude nutné provést analýzu požadavků kladených na tyto přípravky a jejich řešerši.

Cílem praktické části práce bude vybrat možnosti řešení pro společnost zadavatele a podílet se na jejich konstrukčním řešení. Dalším cílem je pak určení míry ovlivnění výsledků jednotlivých konstrukčních variant při vystavení testu reálným vlivům, které mohou při používání nastat. To bude provedeno pomocí parametrické studie MKP modelu průběhu zkoušky s ohledem na provoz zadavatele práce. Na základě provedené analýzy variant bude cílem rozhodnout o používání konkrétního přípravku, s předepsáním závazných doporučení pro provádění zkoušky. Vyslovená doporučení se budou vztahovat výhradně k provozu přípravku ve společnosti COMTES FHT a nebudou tedy všeobecně platná. S použitím vybraného přípravku bude provedena série experimentů pro verifikaci zjištěných procesních parametrů prováděné zkoušky. Na základě provedeného postupu zkoušky budou prezentovány dosažené výsledky a bude doporučen postup jejich dalšího zpracování a použití.

1 Tváření kovů

Tváření kovů je technologický postup výroby, při kterém dochází ke změně tvaru a vlastností polotovaru v důsledku působení vnějších sil. Podstatou tváření je vznik plastických deformací, k těm dochází v okamžiku dosažení napětí na mezi kluzu pro daný materiál. Tento děj doprovází především změny ve struktuře materiálu, to výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti materiálu. Tváření kovů se vyznačuje vysokým využitím materiálu, vysokou produktivitou práce, ale také vysokou pořizovací cenou strojů a nástrojů. Tyto vlastnosti předurčují proces tváření pro použití v sériové a hromadné výrobě, která klade zvýšené nároky na nízkou chybovost výroby, a tím na znalost chování materiálu.

1.1 Mechanická podstata tváření

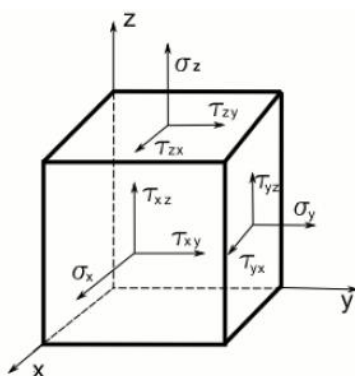
1.1.1 Stav napjatosti

Napětí je definováno jako síla vztažená na jednotku plochy. Vzhledem k tomu, že síla obecně není rozložena po ploše rovnoměrně, je nutné definovat napětí na diferenciální úrovni. Rovnice (1.1) definuje normálové napětí, kdy síla působí na plochu kolmo, rovnice (1.2) pak definuje tečné napětí pro sílu působící v ploše.

$$\sigma = \frac{dN}{dS} \quad (1.1)$$

$$\tau = \frac{dT}{dS} \quad (1.2)$$

V pravoúhlém souřadnicovém systému $x; y; z$ působí na hmotný bod obecně normálová napětí $\sigma_x; \sigma_y; \sigma_z$ a smyková napětí $\tau_{xy}; \tau_{xz}; \tau_{yz}; \tau_{yx}; \tau_{zx}; \tau_{zy}$. To lze reprezentovat graficky na obrázku 1.



Obrázek 1 - Napětí působící na prostorový element [1]

Stav napjatosti pro jeden bod je pak dán devíti složkami napětí, které lze uspořádat do matice (1.3).

$$\mathbf{T}_\sigma = \boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

Podle zákona sdružených napětí platí rovnice (1.4), a tedy matici napětí lze obecně popsat tenzorem (1.5), kde zbývá pouze 6 různých složek napětí.

$$\begin{aligned}\tau_{xy} &= \tau_{yx} = \tau_z \\ \tau_{xz} &= \tau_{zx} = \tau_y \\ \tau_{yz} &= \tau_{zy} = \tau_x\end{aligned}\quad (1.4)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_x \sigma_y \sigma_z \tau_z \tau_y \tau_x)^T = (\sigma_{11} \sigma_{22} \sigma_{33} \sigma_{12} \sigma_{23} \sigma_{13})^T \quad (1.5)$$

Stav napjatosti lze také popsat pomocí hlavních napětí, což jsou normálová napětí působící v hlavních rovinách. Hlavní roviny jsou roviny, kde jsou smykové složky napětí nulové. Hlavní napětí potom splňují rovnici (1.6) a tenzor napětí lze popsat rovnicí (1.7).

$$\begin{vmatrix} (\sigma_x - \sigma_i) & \tau_z & \tau_y \\ \tau_z & (\sigma_y - \sigma_i) & \tau_x \\ \tau_y & \tau_x & (\sigma_z - \sigma_i) \end{vmatrix} = 0, \text{ pro } i = 1, 2, 3 \quad (1.6)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3)^T \quad (1.7)$$

Podstatou tváření je vyvolání v tělese takový stav napjatosti, při kterém vznikne plastická deformace, přičemž nesmí dojít k porušení soudržnosti tělesa. Stav napjatosti má významný vliv na tvářitelnost a deformační odpor kovu. Dle kombinace hlavních napětí lze definovat tři stavy napjatosti v tělese.

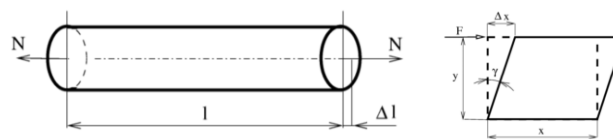
Jednoosý stav napjatosti - právě jedna nenulová složka hlavních napětí

Rovinný stav napjatosti - právě dvě nenulové složky hlavních napětí

Prostorový stav napjatosti - všechny 3 složky hlavních napětí jsou nenulové

1.1.2 Stavy deformace

Pro hodnocení stavu deformace tělesa je nutné definovat poměrné prodloužení a zkos, někdy označováno jako inženýrské přetvoření. Poměrné prodloužení je dáno rovnicí (1.8) a zkos je dán rovnicí (1.9).



Obrázek 2 - Definice prodloužení

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1.8)$$

$$\text{tg } \gamma \doteq \gamma = \frac{\Delta x}{y} \quad (1.9)$$

Pro hodnocení skutečného stavu deformace tělesa je ale nutné definovat prodloužení, respektive zkos na diferenciální úrovni. Při dostatečně malých deformacích jsou rozdíly

v těchto hodnotách zanedbatelné. Toto přetvoření se označuje jako skutečné prodloužení, je definováno vztahem (1.10)

$$\varepsilon_{true} = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (1.10)$$

Lze odvodit vztah (1.11) mezi skutečným a inženýrským přetvořením.

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (1.11)$$

Stav deformace pro jeden bod je pak dán devíti složkami deformace, buď inženýrské, nebo skutečné. Ty lze uspořádat do matice. (1.12), kterou je možné opět vzhledem k symetrii přepsat do tvaru (1.13).

$$\mathbf{T}_\varepsilon = \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \quad (1.12)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \varepsilon_z \ \varepsilon_y \ \varepsilon_x)^T = (\varepsilon_{11} \ \varepsilon_{22} \ \varepsilon_{33} \ \varepsilon_{12} \ \varepsilon_{23} \ \varepsilon_{13})^T \quad (1.13)$$

Obecně se deformace rozděluje na elastickou a plastickou. Proto lze tenzor deformace zapsat jako součet tenzorů těchto složek rovnicí (1.14).

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_{el} + \boldsymbol{\varepsilon}_{pl} \quad (1.14)$$

Identicky jako pro napjatost lze v hlavních rovinách deformace nalézt hlavní deformace a provést rozdělení obdobně. Existují dvě reálné kombinace hlavních deformací: rovinná deformace a prostorová deformace. V praxi ale proces deformace tělesa probíhá nerovnoměrně, a proto je její rozložení v tělese proměnné. Vyhodnocují se však mechanická schémata tváření, která jsou dána kombinacemi převládajících stavů napjatosti a stavů deformace.

1.1.3 Hodnocení stavu napjatosti a deformace

Pro posouzení stavu napjatosti bylo vytvořeno několik hypotéz. Tyto hypotézy se snaží redukovat tenzor napětí v daném bodě na jednu skalární veličinu nazývanou ekvivalentní, nebo redukované napětí. V inženýrské praxi se nejvýznamněji prosadila hypotéza HMM (Huber-Mises-Hencky), často označovaná pouze jako von Mises. Podle této teorie rozhoduje o ekvivalentní napjatosti velikost deformační energie na změnu tvaru. Pomocí hlavních napětí lze ekvivalentní napětí definovat rovnicí (1.15), obecně pak rovnicí (1.16).

$$\sigma_{ekv} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (1.15)$$

$$\sigma_{ekv} = \left[\frac{3}{2} (\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2 + 2\sigma_{12}^2 + 2\sigma_{23}^2 + 2\sigma_{13}^2) \right]^{1/2} \quad (1.16)$$

Dále je možné vyjádřit ekvivalentní napjatost pomocí hypotézy Tresca-Guest, která vychází z maximálního smykového napětí. Pomocí hlavních napětí ji lze definovat rovnicí (1.17).

$$\sigma_{ekv} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (1.17)$$

Pro posouzení stavu deformace se využívá obdobného vztahu. Ten definuje efektivní plastickou deformaci, která závisí pouze na plastických složkách tenzoru deformace. Rovnice (1.18) udává výpočet efektivní plastické deformace pomocí hlavních plastických deformací.

$$\varepsilon_{ekv} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(\varepsilon_1^{pl} - \varepsilon_2^{pl})^2 + (\varepsilon_2^{pl} - \varepsilon_3^{pl})^2 + (\varepsilon_3^{pl} - \varepsilon_1^{pl})^2 \right]^{1/2} \quad (1.18)$$

1.2 Rozdělení tváření

Tváření lze rozdělit z několika hledisek, v této práci bylo uvedeno pouze základní dělení pro možnost patřičného vymezení konkrétního tématu práce.

1.2.1 Rozdělení podle teploty

Tváření za studena

Tváření za studena probíhá jako tváření pod teplotou uzdravovacích procesů, tedy procesů zotavení rekrystalizace materiálu. Pro oceli jsou tyto teploty přibližně 20 – 30% T_{tav} . Při procesu tváření za studena dochází ke změně fyzikálních, elektrických a magnetických vlastností. Pro tento proces je charakteristické zvýšení pevnosti a snížení tažnosti materiálu.

Tváření za tepla

Tváření za tepla probíhá jako tváření nad teplotou uzdravovacích procesů. Teoreticky tedy nad teplotou rekrystalizace, která je přibližně 40% T_{tav} , prakticky ovšem za vyšších teplot nejčastěji 60 – 70% T_{tav} . Při tváření za tepla probíhají dva základní procesy zpevňování a uzdravování. Nedochozí proto k významným změnám mechanických a fyzikálních vlastností materiálu, ale pouze ke změnám struktury.

1.2.2 Rozdělení podle tepelného efektu

Při procesu tváření se obecně přeměňuje část dodané energie na teplo. Dle toho, kam se tato tepelná energie odvede, se tvářecí procesy rozdělují.

Izotermické tváření - tepelná energie je odvedena do okolí

Adiabatické tváření - tepelná energie zůstane v tvářeném materiálu

Polytropické tváření - část tepelné energie je odvedena a část zůstane v tvářeném materiálu

1.2.3 Podle působení vnějších sil

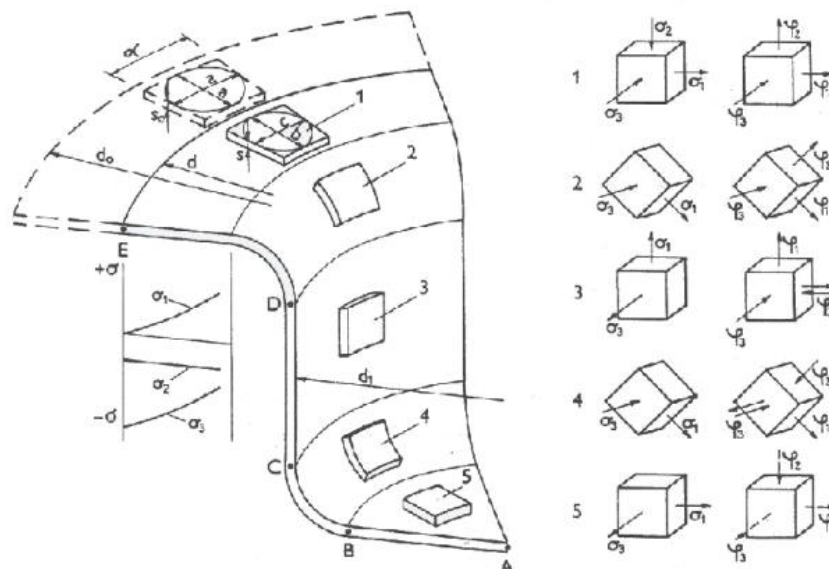
Toto rozdělení vychází z toho, v jakých směrech dochází k deformaci tvářeného materiálu.

Objemové tváření - dochází k deformaci ve směru všech tří os (například volné a zápustkové kování, válcování, tažení drátů a tyčí a protlačování)

Plošné tváření - převládají deformace ve dvou směrech (například stříhání, ohýbání, rovnání a tažení)

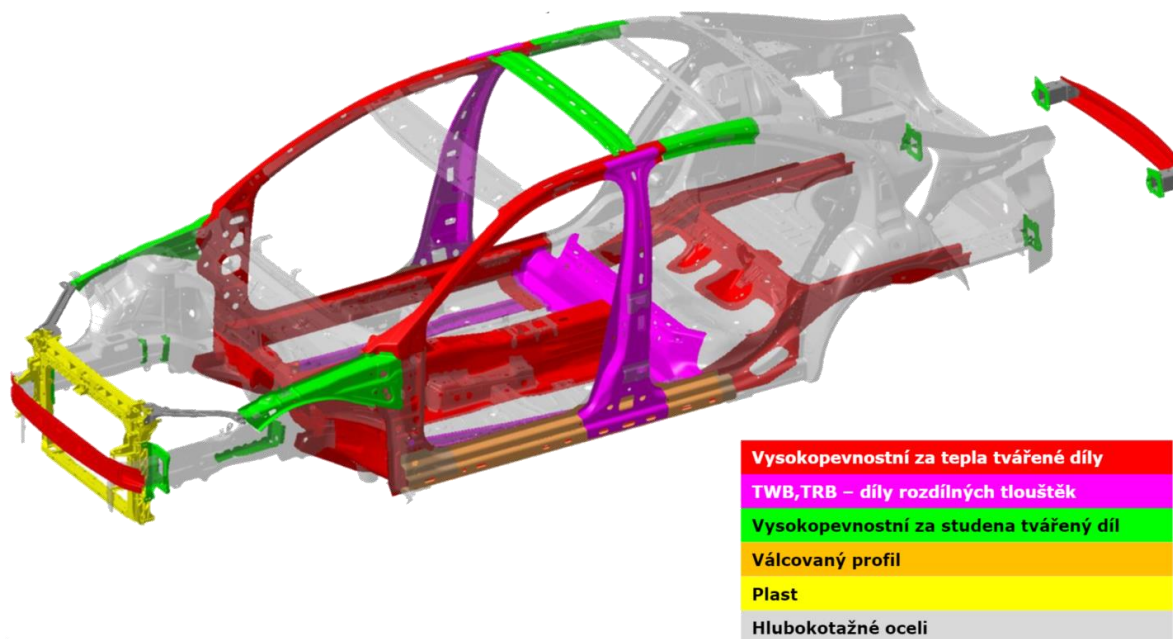
1.3 Plošné tváření za studena

Na obrázku 3 bylo zobrazeno schéma hlubokého tažení plechu za studena s vyznačením charakteristických bodů a jejich stavů napjatosti a deformace.



Obrázek 3 - Napěťový a deformační stav při hlubokém tažení válcového výtažku [2]

Tato výrobní technologie nachází významné uplatnění v automobilovém průmyslu. Na obrázku 4 byla zobrazena kostra vozu Škoda Superb III, kde jsou barevně rozlišeny díly podle použitého materiálu a konceptu technologie výroby. Je patrné, že většina dílů je vyráběna hlubokým tažením plechů ať už za tepla nebo za studena.



Obrázek 4 - Kostra vozu Škoda Superb III [3]

1.3.1 Deformace kovů

Jak bylo popsáno, je podstatou tváření vyvolání plastické deformace materiálu. Plastická deformace je vyvolána vzájemným nevratným pohybem jednotlivých částic vůči sobě. Pohyb jednotlivých částic je dán zatížením, které vychýlí částice z jejich rovnovážné polohy natolik, že se přesunou do jiné rovnovážné polohy. Vznikají tak odchylky rozložení částic od ideální krystalografické mřížky (dislokace), tyto odchylky nezanikají po odeznění zatížení, mohou se však dále pohybovat a interagovat mezi sebou. Naopak při elastické deformaci dochází k pohybům vratným. Zatížení vychýlí jednotlivé částice z ideální polohy, ale není natolik silné, aby jednotlivé částice dokázalo přesunout do jiné rovnovážné polohy. Podle velikosti a tvaru krystalografické neuspořádanosti částic je možné rozdělit tyto poruchy na bodové, čárové, plošné a prostorové. Pro procesy tváření mají největší význam čárové poruchy.

Tvářitelnost materiálu

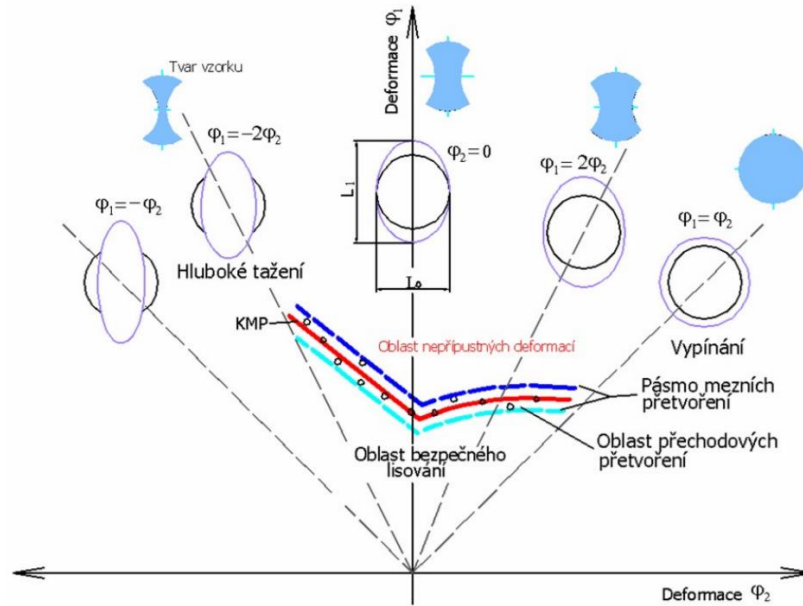
Tvářitelnost je vlastnost materiálu se plasticky deformovat bez makroskopického porušení, pro konkrétní materiál je pak dána těmito vlastnostmi:

- Chemické složení a struktura
- Teplota a rychlost deformace
- Napěťový stav
- Historie napětí a deformace
- Geometrický faktor
- Vnější prostředí

Na mechanické vlastnosti a tvářitelnost hlubokotažných ocelí má velký vliv charakter mikrostruktury. Základní strukturou je ferit a cementit. Na tváření má největší vliv velikost a tvar feritického zrna a množství, tvar a rozložení cementitu a vměstků. Nejpriznivější stav je takový, při kterém je cementit vyloučen ve formě globulí a je co nejrovnoměrněji rozložen v základní feritické fázi. Nejvýhodnější tvar feritických zrn u hlubokotažných uklidněných ocelí je zploštělý tvar zrna. Nerovnoměrná velikost zrn způsobuje nerovnoměrnou deformaci tvářeného plechu. Velikost feritického zrna udává norma ČSN EN ISO 643. [4]

V oblasti plošného tváření za studena se často využívají limitní diagramy. Tyto diagramy se vykreslují v systémech hlavních deformací a stanovují zde oblast mezní deformace, tedy oblast tvářitelnosti. Pomocí těchto diagramů je možné hodnotit deformační stav v jednotlivých bodech, a tedy například i bezpečnost stavu deformace, respektive bezpečnost technologického procesu. Hodnocení deformačního stavu může být provedeno na základě MKP simulace nebo měření.

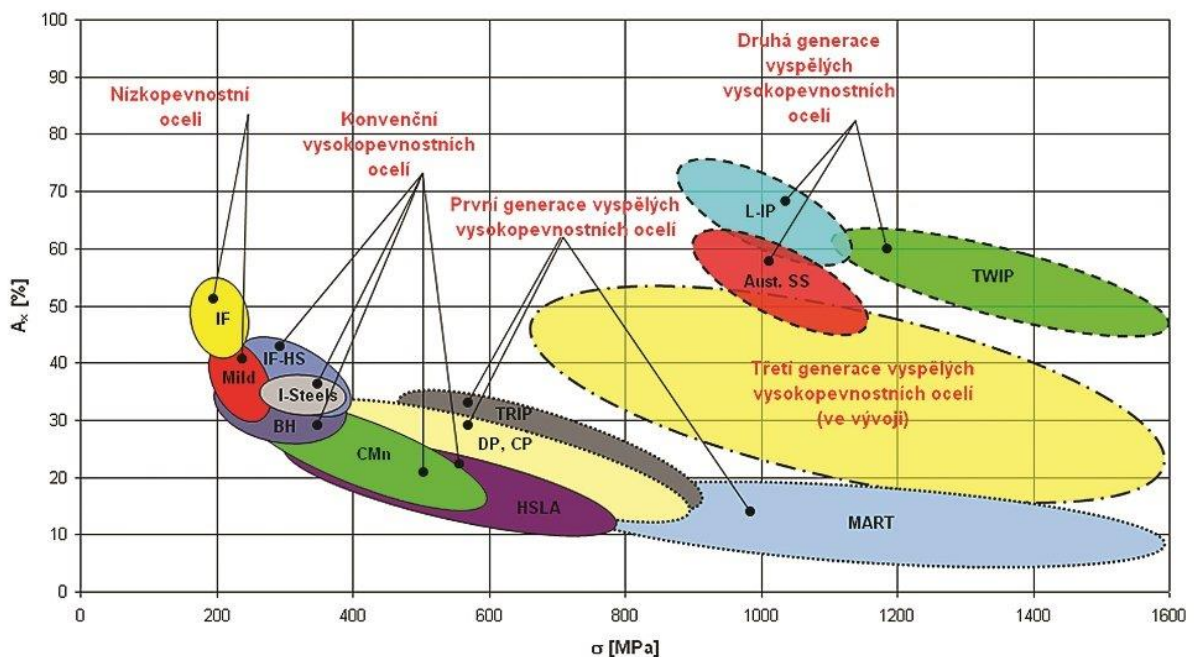
Mezi nejvýznamnější z těchto diagramů v oblasti tváření plechů patří Keeler – Goodwinův diagram, zobrazený na obrázku 5. Na svislé ose byla vynesena hodnota hlavního přetvoření φ_1 , na vodorovné ose pak hodnota vedlejšího přetvoření φ_2 . V diagramu byla identifikována křivka mezní tvářitelnosti (KMP), jejíž tvar je v podstatě stejný pro všechny produkty z plechu pouze s rozdílem její polohy. Ačkoli pro některé konkrétní materiály je křivka značně odlišná, například pro AHSS oceli. Tato křivka rozděluje oblast diagramu na oblast bezpečného lisování a oblast nepřipustných deformací.



Obrázek 5 - Keeler – Goodwinův diagram [5]

1.3.2 Materiály v automobilovém průmyslu

Na materiály používané v automobilovém průmyslu se vztahují nároky na nízkou hmotnost, respektive hustotu, vysokou míru tvářitelnosti a nízkou cenu. I proto se vyvíjejí moderní vysoko-pevnostní ocelové materiály, aby karoserie měla co nejnižší možnou hmotnost při zachování dostatečné pevnosti. Nejčastěji využívané materiály v tomto odvětví byly zobrazeny na obrázku 6, kde jsou jednotlivé skupiny materiálů vyneseny do diagramu tažnost-pevnost. Tyto vlastnosti jsou protichůdné, a proto je v této oblasti prováděn rozsáhlý výzkum a vývoj. V diagramu je tento vývoj zřejmý seskupením materiálů do skupin, generací.



Obrázek 6 - Diagram používaných materiálů [6]

V tabulce 1 bylo uvedeno chemické složení vybraných zástupců za studena válcovaných plechů hlubokotažných uklidněných ocelí, které dodává například firma ArcelorMittal Ostrava a.s., všechny tyto hodnoty podléhají evropské normě EN 10130.

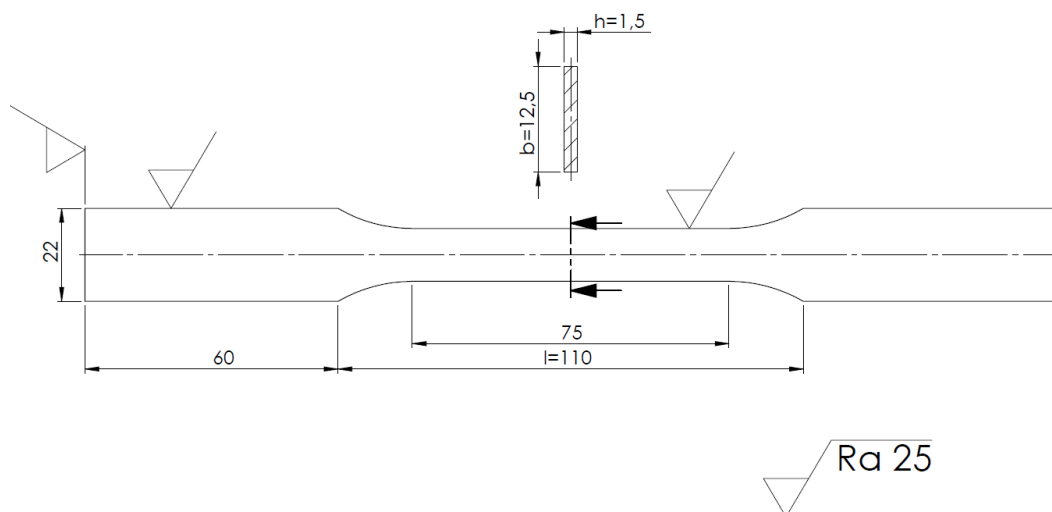
Tabulka 1 - Chemické složení vybraných ocelí

Materiál	C [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Si [%]	Al [%]
DC01	≤ 0,12	≤ 0,6	≤ 0,045	≤ 0,020	≤ 0,020	≤ 0,010
DC04	≤ 0,08	≤ 0,4	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,020
DC05	≤ 0,06	≤ 0,35	≤ 0,020	≤ 0,045	≤ 0,030	≤ 0,020

2 Plasticita materiálu

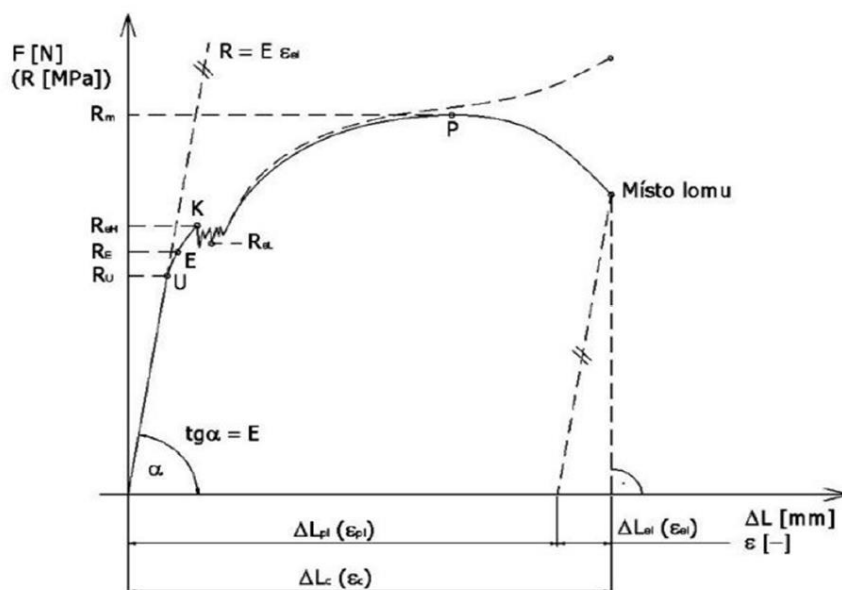
2.1 Experimentální poznatky

Chování materiálu v závislosti na působení vnějších sil se stanovuje pomocí mechanických zkoušek materiálu. Nejvýznamnější z těchto zkoušek je statická zkouška tahem, kde se pro zjištění mechanických vlastností plechů využívají ploché zkušební tyče. Obrázek 7 zobrazuje takovouto normovanou zkušební tyč. Průběh zkoušky i velikost vzorku je předepsána normou EN 10002-1.



Obrázek 7 - Normalizovaná plochá zkušební tyč

Zkouška probíhá tak, že je vzorek upnut do čelistí stroje a je zatěžován osovou silou. Závislost velikosti síly na prodloužení, respektive závislost napětí na poměrné deformaci popisuje diagram zkoušky tahem, zobrazený na obrázku 8.



Obrázek 8 - Diagram získaný ze statické zkoušky tahem [7]

Na základě vyhotoveného diagramu se stanovují následující materiálové parametry.

Napětí na mezi úměrnosti, je napětí, které na pracovním diagramu statické zkoušky vymezuje počáteční přímkový úsek, kde je lineární závislost mezi napětím a deformací.

$$R_U [MPa] \quad (2.1)$$

Napětí na mezi pružnosti je napětí udávající mez, po kterou zůstávají deformace pouze pružné. Vzhledem k různé orientaci krystalů kovů není tato hodnota jednoznačně určena a její stanovení je obtížné. Prakticky se stanovuje jako smluvní hodnota.

$$R_E [MPa] \quad (2.2)$$

Napětí na mezi kluzu je napětí odpovídající výraznému rozvoji plastické deformace. Materiály mohou vykazovat nevýraznou mez kluzu, pak se stanovuje smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ příslušející 0,2 [%] plastické deformace. Napětí na mezi kluzu je dáno vztahem (2.3), kde F_e je síla na mezi kluzu; S_0 je velikost počáteční plochy průřezu.

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} [MPa] \quad (2.3)$$

Napětí na mezi pevnosti, je to maximální hodnota smluvního (inženýrského) napětí dosaženého při zkoušce. Je dáno vztahem (2.4), kde F_m značí maximální naměřenou sílu.

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} [MPa] \quad (2.4)$$

Tažnost je vlastnost charakterizující plasticitu materiálu, je definována vztahem (2.5). Kde L_0 značí počáteční délku zkušební vzorku; L_u pak značí délku vzorku po přetržení.

$$A_{80} = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100[\%] \quad (2.5)$$

Kontrakce určuje zúžení průřezu zkušební tyče po přetržení v procentech. Je dána vztahem (2.6), kde S_0 je počáteční průřez vzorku, S_u je pak průřez po přetržení

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100[\%] \quad (2.6)$$

Plošná anizotropie je hodnota vyjadřující rozdílnost vlastností materiálu v různých směrech, rozhodující je směr válcování plechu. Výpočet plošné anizotropie je dán výsledky tahových zkoušek vzorků provedených na několika zkušebních tyčích odebraných z válcovaného plechu pod různými úhly. Hodnota plošné anizotropie pro smluvní mez kluzu je dána vztahem (2.7), kde $R_{p0,2}(0^\circ)$ je hodnota meze kluzu zjištěná pro vzorek vyhotovený ve směru válcování; $R_{p0,2}(\alpha^\circ)$ je pak hodnota meze kluzu pro vzorek skloněný pod úhlem α° , nejčastěji 45° nebo 90° .

$$A_{Re0,2} = \frac{R_{p0,2}(\alpha^\circ) - R_{p0,2}(0^\circ)}{R_{p0,2}(0^\circ)} [-] \quad (2.7)$$

Plastická anizotropie je hodnota vyjadřující náchylnost plechu ke ztenčení, zjišťuje se opět na vzorcích zhotovených pod různými úhly ke směru válcování. Lze ji vyjádřit vzorcem (2.8), jako podíl skutečné deformace šířky a tloušťky. Ve vztahu značí b_0 velikost šířky vzorku před zkouškou, b pak šířku například při dosažení 20 [%] plastické deformace, t_0 tloušťku vzorku před zkouškou, t pak tloušťku při popsaném stavu.

$$R_\alpha = \frac{\ln\left(\frac{b_0}{b}\right)}{\ln\left(\frac{t_0}{t}\right)} [-] \quad (2.8)$$

Tvářitelnost je určena vzorcem (2.9), tedy jako vážený průměr plastických anizotropií R_α pro jednotlivé směry vyhotovení vzorků plechu $\alpha = \{0; 45; 90\}$ [°].

$$\bar{R} = \frac{1}{4}(R_{0^\circ} + 2 \cdot R_{45^\circ} + R_{90^\circ}) [-] \quad (2.9)$$

Zásoba plasticity je veličina hodnotící schopnost materiálu se plasticky deformovat. Je dána vzorcem (2.10), kde ε_{max} je maximální hodnota poměrného prodloužení, k je pak součinitel závislý od charakteru konkrétního materiálu.

$$ZP = k \cdot (R_m - R_e) \cdot \varepsilon_{max} [MPa] \quad (2.10)$$

2.1.1 Materiálové charakteristiky hlubokotažných ocelí

Pro téma práce mají největší význam plechy hlubokotažných ocelí. Tyto plechy se vyznačují obvykle nízkou hodnotou meze kluzu přibližně ~ 180 [MPa] a vysokou hodnotou tažnosti ~ 35 [%]. To tyto materiály řadí v diagramu na obrázku 6 do oblasti nízko-pevnostních ocelí. V tabulce 2 byly uvedeny mechanické vlastnosti vybraných zástupců za studena válcovaných plechů hlubokotažných ukladných ocelí, které dodává firma Arcelor Mittal Ostrava a.s.

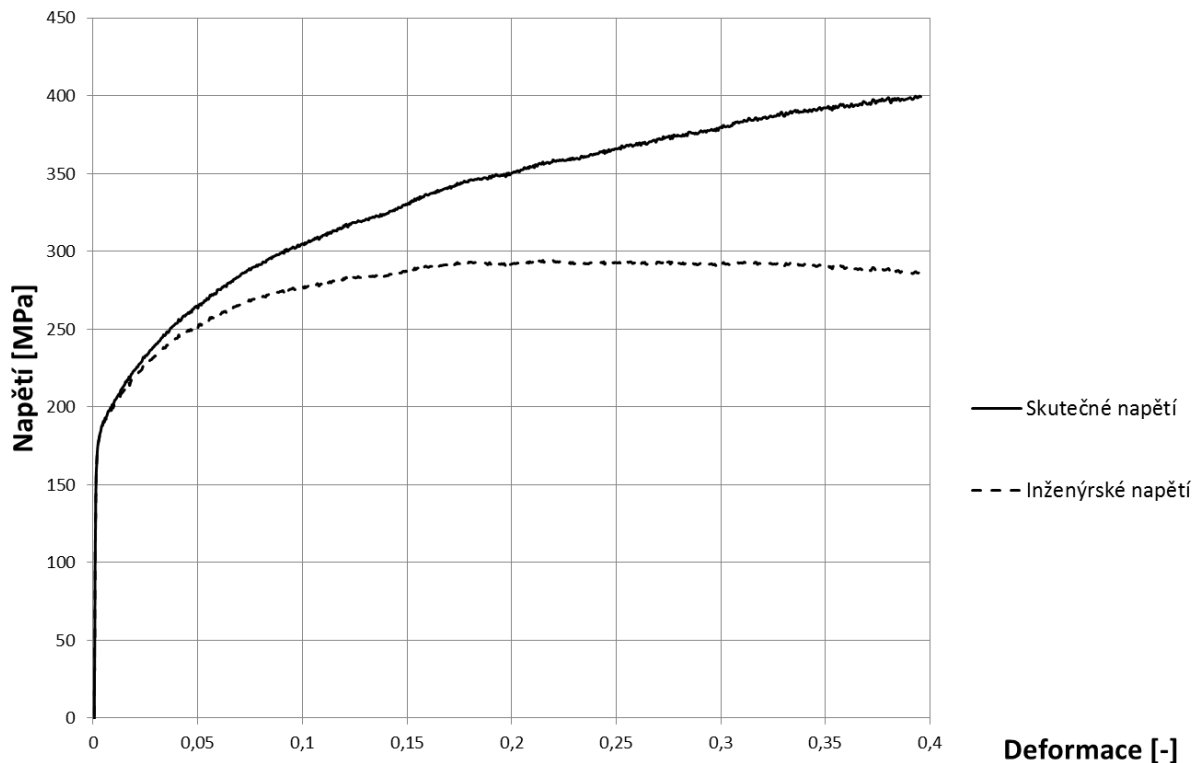
Tabulka 2 - Mechanické vlastnosti vybraných ocelí

Označení oceli		Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tažnost A_{80mm} [%]
Značka oceli	Číselné označení			
DC01	1.0330	280	270 – 410	≤ 28
DC04	1.0338	210	270 – 350	≤ 38
DC05	1.0312	180	270 – 350	≤ 38

2.1.2 Průběh plastické deformace

Plastickou deformaci lze demonstrovat na obrázku 9, kde byla vykreslena závislost napětí-deformace pro skutečné napětí a inženýrské napětí. Tento diagram byl vytvořen na základě statické zkoušky tahem pro hlubokotažnou ocel DC01, provedený společností COMTES FHT. Při popisu plastické složky deformace dochází k odlišnostem mezi inženýrskou a skutečnou deformací. Odlišnost plyne z toho, že při rozvoji plastické deformace dochází ke změnám tvaru, respektive průřezu při jednoosém namáhání. Tuto odlišnost respektuje pouze skutečná deformace, respektive napětí, které je stanoveno z deformovaného průřezu,

zatímco inženýrské napětí je vztaženo k počátečnímu průřezu. Za mezí kluzu je proto obecně nutné uvažovat skutečné nikoli inženýrské napětí.

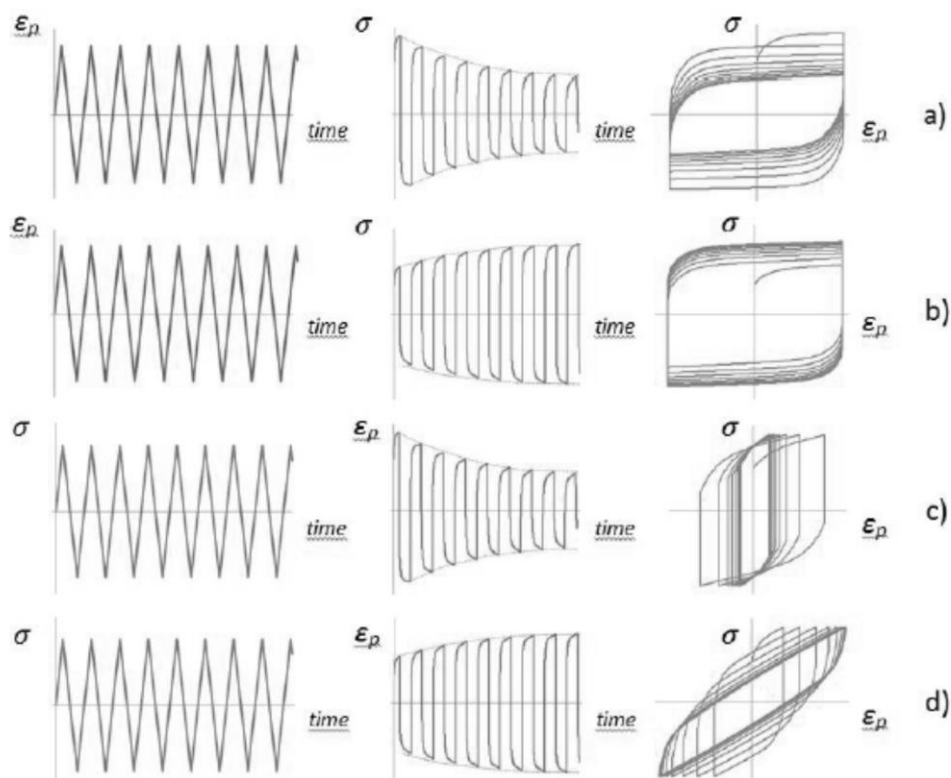


Obrázek 9 - Experimentální křivka napětí-deformace pro ocel DC01

Zpevnění materiálu

Zpevnění materiálu je změna hodnot meze kluzu a meze pevnosti, je obecně dáno několika faktory. Ty lze rozdělit do oblasti deformačního zpevnění, zpevnění příměsemi, precipitační zpevnění a zpevnění hranicemi zrn. Pro téma práce má nejvyšší význam zabývat se právě deformačním zpevněním materiálu.

Deformační zpevnění, pozorované při cyklickém zatěžování, je možné definovat jako nárůst či pokles meze kluzu a meze pevnosti v průběhu cyklického zatěžování materiálu. Při hodnocení tohoto chování je nutné věnovat pozornost průběhu cyklické zkoušky. To může být provedeno pomocí dosažené deformace, nebo napětí. Průběhy napětí-deformace pro různé případy zatěžování byly zobrazeny na obrázku 10. Pro případ a) cyklické změkčování při deformačně řízené zkoušce; b) cyklické zpevňování při deformačně řízené zkoušce; c) cyklické zpevňování při silově řízené zkoušce a d) cyklické změkčování při silově řízené zkoušce



Obrázek 10 - Křivky napětí-deformace při cyklickém zatížení [8]

2.2 Matematický popis materiálu

Pro matematický popis chování materiálu se vychází z uvedeného rozkladu deformace na elastickou a plastickou složku (2.11).

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_{el} + \boldsymbol{\varepsilon}_{pl} \quad (2.11)$$

Elastická složka deformace je popsána Hookovým zákonem, který je možné popsat rovnicí (2.12), kde $\boldsymbol{\varepsilon}_{el}$ představuje tenzor elastických deformací, \mathbf{C} je matice tuhosti a $\boldsymbol{\sigma}$ je tenzor napětí. Matice \mathbf{C} je konstantní, elastická složka deformace je tedy lineárně závislá na napětí.

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{el} = \mathbf{C} \cdot \boldsymbol{\sigma} \quad (2.12)$$

2.2.1 Podmínka plasticity

Plastická složka deformace má nelineární průběh. Její velikost je dána stavem napjatosti, obecně to lze demonstrovat rovnicí (2.13) nebo rovnicí (2.14), kde se funkce f označuje jako podmínka plasticity.

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{\varepsilon}_{pl}) \quad (2.13)$$

$$f(\boldsymbol{\sigma}; \boldsymbol{\varepsilon}_{pl}) = 0 \quad (2.14)$$

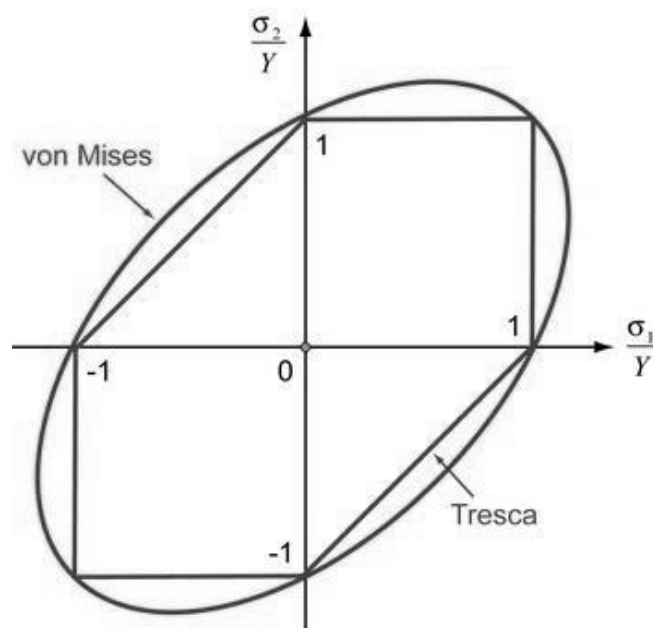
Podmínka plasticity udává informaci o tom, zda dochází při konkrétním stavu napjatosti k plastické deformaci. Pro jednoosou napjatost lze tuto podmínku popsat rovnicí (2.15), kde σ_Y značí mez kluzu.

$$f = \sigma_1 - \sigma_Y = 0 \quad (2.15)$$

Podmínku plasticity pro obecný stav napjatosti a ideálně elasto-plastický materiál lze popsat pomocí rovnice (2.16), kde $f(\boldsymbol{\sigma})$ značí funkci plasticity, která závisí na aktuální hodnotě složek tenzoru napětí $\boldsymbol{\sigma}$; $\bar{f}(\boldsymbol{\sigma})$ představuje funkci plasticity, kterou je možné vyjádřit pomocí ekvivalentní napjatosti hypotézy von Mises, vyjádřené v rovnici (1.16).

$$f(\boldsymbol{\sigma}) = \bar{f}(\boldsymbol{\sigma}) - \sigma_Y = 0 \quad (2.16)$$

Podmínku plasticity lze graficky interpretovat jako plochu v souřadnicovém systému hlavních napětí $\sigma_1; \sigma_2; \sigma_3$. O rozvoji plastické deformace rozhoduje poloha bodu, představujícího daný stav napjatosti, který je určen velikostí jednotlivých složek napětí. Plochou plasticity pro podmínku danou von Misesovou funkcí plasticity je válec, s osou definovanou rovnicí $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. Pro podmínku Tresca-Guest, vycházející z maximálního smykového napětí, se jedná o šestiboký hranol. Pro rovinnou napjatost lze najít, v souřadnicovém systému $\sigma_1; \sigma_2$, křivku reprezentující plochu plasticity. Tato křivka vznikne graficky řezem plochy plasticity. Na obrázku 11 byly zobrazeny tyto křivky reprezentující podmínku plasticity pro rovinnou napjatost, elipsa reprezentuje von Misesovu podmínku plasticity, lomená čára pak představuje podmínku Tresca-Guest.



Obrázek 11 - Reprezentace podmínek plasticity pro rovinnou napjatost [9]

2.2.2 Pravidlo zpevnění

Pro popis reálného chování materiálů musí být zahrnut vliv deformačního zpevnění materiálu v průběhu zatěžování. Toho se dosahuje změnou podmínky plasticity, graficky reprezentované změnou plochy plasticity v závislosti na deformačním stavu.

Izotropní zpevnění

Při modelu izotropního zpevnění dochází ke změně podmínky plasticity podle rovnice (2.17), kdy podmínka plasticity je rozšířena o skalární proměnnou R . Ta v grafickém pojetí

představuje například pro podmínku von Mises změnu poloměru válce plochy plasticity. Plocha plasticity se tedy pouze zvětšuje a to ve všech směrech stejně se zachováním polohy jejího počátku.

$$f(\boldsymbol{\sigma}, Y) = \bar{f}(\boldsymbol{\sigma}) - R = 0 \quad (2.17)$$

Kinematické zpevnění

Při kinematickém zpevnění dochází k posunu plochy plasticity bez změny jejího tvaru a velikosti. Posun plochy je reprezentován kinematickým tenzorem napětí $\boldsymbol{\alpha}$ určující souřadnice polohy počátku plochy. Podmínku plasticity se zahrnutím vlivu kinematického zpevnění lze popsat rovnicí (2.18), kde $f(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\alpha})$ je popis aktuální plochy plasticity, $\bar{f}(\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\alpha})$ je popis původní plochy a parametr $\boldsymbol{\alpha}$ je parametr kinematického zpevnění pro konkrétní materiál.

$$f(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\alpha}) = \bar{f}(\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\alpha}) - \sigma_Y = 0 \quad (2.18)$$

Kombinované zpevnění

Kombinované zpevnění se skládá z izotropní a kinematické složky. Dochází při něm k posunu a zároveň změně velikosti plochy plasticity. Podmínka plasticity je pak formulována rovnicí (2.19).

$$f(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\alpha}, R) = \bar{f}(\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\alpha}) - R = 0 \quad (2.19)$$

2.2.3 Pravidlo plasticity

Protože funkce plasticity je funkcí více proměnných, přírůstek funkce plasticity musí být vyjádřen jako totální diferenciál rovnicí (2.20).

$$df = \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} d\boldsymbol{\sigma} + \frac{\partial f}{\partial R} dR + \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\alpha}} d\boldsymbol{\alpha} \quad (2.20)$$

Podle velikosti členu $\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} d\boldsymbol{\sigma}$ se rozeznávají 3 možné případy stavů, dané rovnicí (2.21), které mohou nastat při zatěžování na aktuální ploše plasticity. Kde člen $\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}}$ udává z geometrické interpretace směr normály k aktuální ploše plasticity.

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} d\boldsymbol{\sigma} &> 0 \\ \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} d\boldsymbol{\sigma} &= 0 \\ \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} d\boldsymbol{\sigma} &< 0 \end{aligned} \quad (2.21)$$

První vyjádření v rovnici (2.21) definuje tzv. aktivní zatížení, zbývající vztahy jsou označovány jako pasivní zatížení. Pravidlo plasticity (flow rule) udává vztah (2.22), který definuje, jak se budou vyvíjet přírůstky plastické deformace pro případ aktivního zatížení, $d\lambda$ je skalární součinitel.

$$d\boldsymbol{\varepsilon}_{pl} = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad (2.22)$$

Pravidlo normality spolu s von Misesovou podmínkou plasticity je implementováno ve většině komerčních MKP software umožňujících řešení úloh s materiálovou nelinearitou. Skalární součinitel $d\lambda$ v případě jednoosého namáhání odpovídá absolutní hodnotě přírůstku axiální plastické deformace $|d\varepsilon_{pl}|$, obecně pak přímo přírůstku akumulované plastické deformace dp , pro který platí vztah (2.23). [8]

$$dp = \sqrt{\frac{2}{3} d\varepsilon_{pl} : d\varepsilon_{pl}} \quad (2.23)$$

2.2.4 Konkrétní matematické modely zpevnění

Pro modelování zpevnění materiálu byly vytvořeny různé matematické modely, které se snaží přiblížit svými výsledky experimentálním poznatkům. Jednotlivé materiálové modely jsou založeny na výše popsaných mechanismech zpevnění, izotropní, kinematické, kombinované. Jednotlivé modely se liší pouze v řídicí rovnici pro změnu kinematického tenzoru napětí α a skalární izotropní proměnné R . Obecně lze rozdělit tyto modely na lineární a nelineární, které se vyznačují nelineární závislostí mezi plastickou deformací a parametry zpevnění $\alpha; R$, respektive parametry posunu plochy plasticity. Různé modely jsou implementovány v různých MKP softwarech.

Modely Hollom, Swift

Nejjednoduššími matematickými modely jsou Hollomonův nebo Swiftův, někdy označovaný Swift-Krupkowsky, zákon zpevnění. Tyto modely jsou založeny přímo na matematické závislosti napětí na deformaci a neuvažují změnu podmínky plasticity, proto nejsou schopny vystihnout deformační zpevnění materiálu pozorované při cyklické deformační zkoušce. Jsou schopny modelovat pouze plastickou deformaci, pozorovanou při statické zkoušce. Hollomonův model zpevnění je pro jednoosou napjatost definován vztahem (2.24), kde K je koeficient deformačního zpevnění; n je exponent deformačního zpevnění. Swiftův model je pro jednoosou napjatost pak dán rovnicí (2.25), kde ε_0 je materiálový parametr označovaný jako počáteční deformace.

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad (2.24)$$

$$\sigma = K \cdot (\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad (2.25)$$

Model Johnson-Cook

Model Johnson-Cook je rozšířením předchozích modelů, rovnice je rozšířena o vliv rychlosti deformace a teploty. To umožňuje použití pro modelování plastické deformace při procesech tváření za tepla. Ve firmě COMTES FHT je tento model často využíván právě pro tyto procesy. Model je možné popsat rovnicí (2.26), kde θ je teplota a $\dot{\varepsilon}_{pl}$ je rychlost deformace, ε_{pl} je ekvivalentní plastická deformace a σ je ekvivalentní napětí. Celkově je materiál definován 5 parametry $A; B; C; n; m$.

$$\sigma(\varepsilon_{pl}; \dot{\varepsilon}_{pl}; \theta) = [(A + B \cdot \varepsilon_{pl})^n] \left(1 + C \cdot \ln(\dot{\varepsilon}_{pl})\right) (1 - \theta^m) \quad (2.26)$$

Prager

Jedná se o nejjednodušší model zpevnění vycházející pouze z kinematické složky mechanismu zpevnění. Změnu kinematického tenzoru napětí α lze popsat rovnicí (2.27), kde C je parametr zpevnění.

$$d\alpha = C \cdot d\varepsilon_{pl} \quad (2.27)$$

Model Armstrong - Frederick

Tento model je jeden z prvních představitelů nelineárních modelů, vyznačuje se hladkým přechodem mezi elastickou a plastickou deformací, jeho princip dostal mnoha rozšířením a inovacím. Model spočívá v rozšíření rovnice (2.27) na rovnici (2.28) o materiálový parametr a , který postihuje akumulaci plastické deformace. Doplnění tohoto členu poskytuje paměťový efekt vedoucí k exponenciálnímu průběhu α , což se více přibližuje experimentálním výsledkům.

$$d\alpha = C \cdot \left(\frac{2}{3} a \cdot d\varepsilon_{pl} - \alpha \cdot dp \right) \quad (2.28)$$

Model Chaboche

Tento model vychází z kombinovaného modelu zpevnění. Model je založen na rozdělení celkové změny funkce plasticity na součet dílčích, celková změna (backstress) je dána rovnicí (2.29), kdy pro každou i -tou složku je uvažován model Armstrong – Frederick, rovnice (2.30). Počet vstupních parametrů C_i ; γ_i je pak dán počtem uvažovaných evolucí přírůstků M , kdy je všeobecně doporučovaný počet $M = 3$.

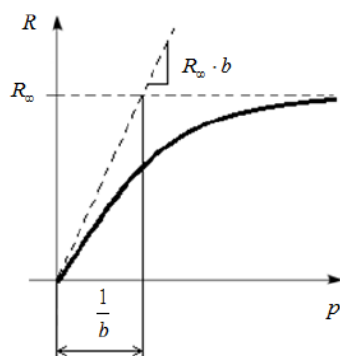
$$\alpha = \sum_{i=1}^M \alpha_i \quad (2.29)$$

$$d\alpha_i = C_i \cdot \frac{2}{3} \cdot d\varepsilon_{pl} - \gamma_i \cdot \alpha \cdot dp \quad (2.30)$$

Modifikovaný model Lemaitre and Chaboche

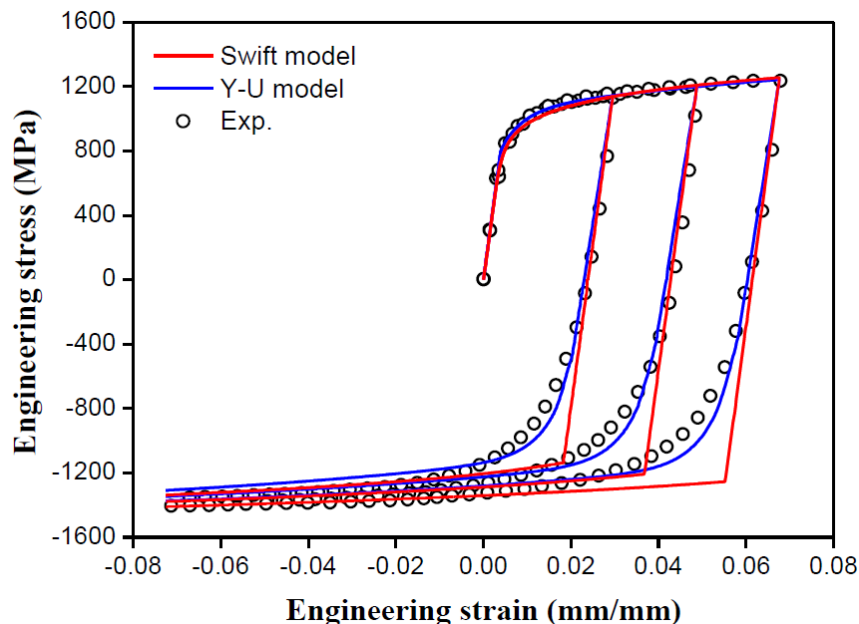
Modifikace předchozího modelu spočívá v rozšíření izotropické složky zpevnění nelineárním průběhem, toho je dosaženo rovnicí (2.31). Kde dp je přírůstek akumulované plastické deformace, R_∞ ; b jsou materiálové parametry. Proměnná R je pak řídicí proměnnou izotropické složky, jejíž takto definovaný průběh lze graficky znázornit na obrázku 12.

$$dR = b(R_\infty - R) \cdot dp \quad (2.31)$$



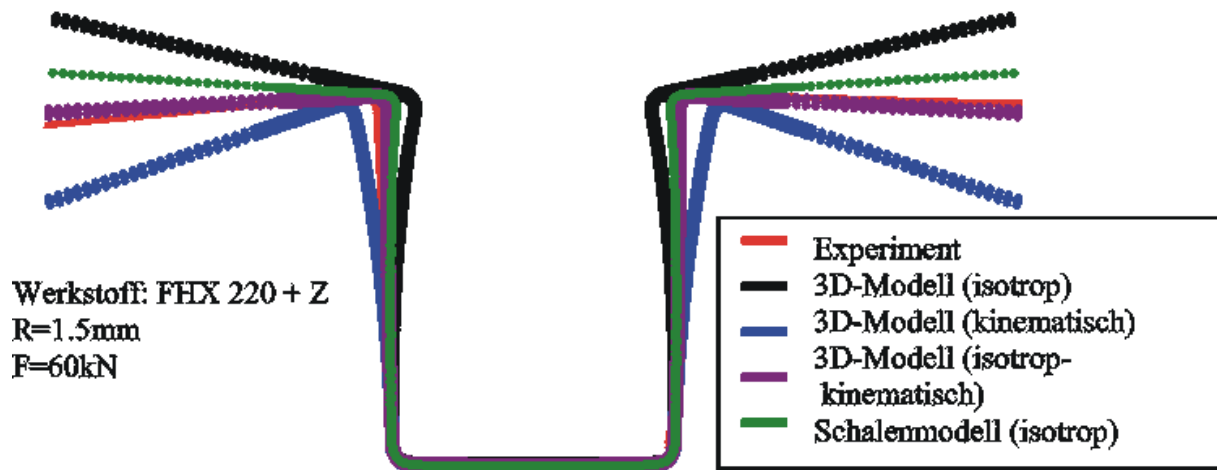
Obrázek 12 - Průběh řídicí proměnné R [10]

Dalšími významnými nelineárními modely zpevnění jsou například model Yoshida–Uemori či model AutoForm, jejich popis lze najít například v literatuře [11]. Modely zpevnění se mezi sebou liší především složitostí a korespondencí s experimenty. Se vzrůstající přesností modelů se zvyšují nároky na věrohodnost a množství vkládaných materiálových dat. Typickou úlohou je pak nalezení parametrů matematických modelů konkrétních materiálů tak, aby se maximálně blížily experimentálním výsledkům. Na obrázku 13 byla zobrazena závislost napětí-deformace pro materiálové modely Swift a Yoshida–Uemori (Y-U model) spolu s experimentálními výsledky pro ocel TRIP1180. Na této závislosti lze demonstrovat značnou rozdílnost popisovaných modelů a jejich korespondenci s experimentálními hodnotami.



Obrázek 13 - Průběhy napětí-deformace pro různé mat. modely [12]

Prakticky lze předcházející ilustrovat na srovnání tvaru plechu po procesu tváření. Na obrázku 14 byla zobrazena predikce odpružení pomocí různých materiálových modelů zpevnění při hlubokém tažení plechu a experimentální výsledky. Je zde patrná značná rozdílnost tvaru po odpružení mezi jednotlivými modely a experimentálními výsledky.



Obrázek 14 - Predikce odpružení materiálu [13]

Na obrázku 15 bylo pak zobrazeno odpružení různých materiálů podrobených stejnému technologickému procesu. Je zde patrná odlišnost chování různých materiálů, a tedy rozdílnost materiálových parametrů zpevnění.



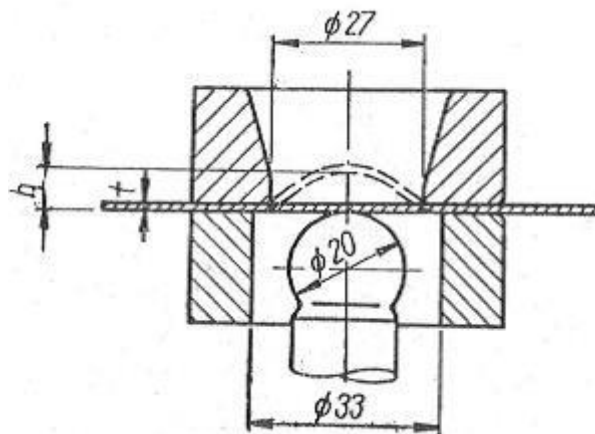
Obrázek 15 - Odpružení u plechů různých materiálů [13]

2.3 Technologické zkoušky plechů

Popsané matematické modely materiálu nabyly použitelnosti až s rozvojem výpočetní techniky a vývojem MKP softwarů. V historii bylo proto vyvinuto množství technologických zkoušek, které napodobují konkrétní technologický proces, ale dnes již nenabývají zvláštního významu. Při těchto zkouškách jsou plechy vystaveny napěťově-deformačním stavům, které odpovídají reálným stavům při tváření. V praxi bylo nutné vybrat takovou zkoušku, která svým charakterem nejvíce napodobuje daný způsob tváření.

2.3.1 Zkouška hlubokotažnosti dle Erichsena

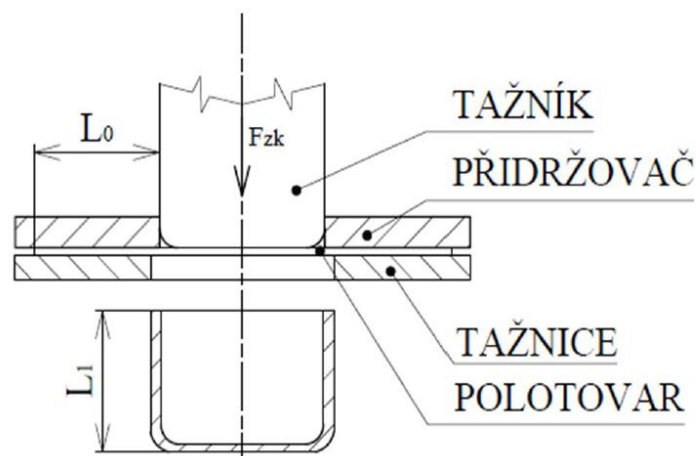
Zkouška hlubokotažnosti podle Erichsena je jednou z nejjednodušších technologických zkoušek a je předepsaná normou ČSN ISO 20482. Používá se k určení vhodnosti určitého plechu k technologickému procesu hlubokého tažení. Zkouška probíhá upnutím plechu mezi přídržovač a tažnici, viz obrázek 16. Kulovitý tažník je pak vtlačován do plechu až do okamžiku objevení trhliny. Při zkoušce se hodnotí velikost prohloubení, ale i tvar trhliny.



Obrázek 16 - Princip Erichsenovy zkoušky [14]

2.3.2 Kalíšková zkouška (Schmiedtova zkouška)

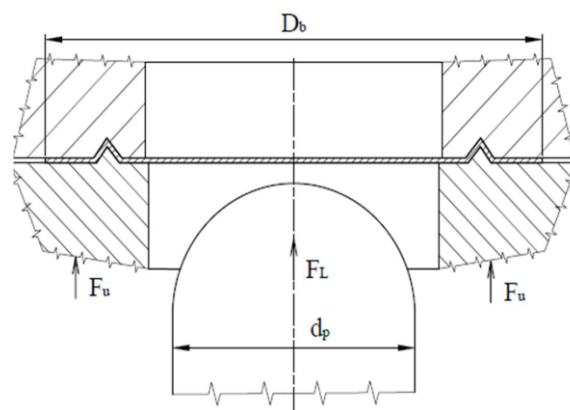
Kalíšková zkouška posuzuje hluboko-tažnost především u rotačně symetrických součástí. Zkouška je prováděna hlubokým tažením kruhového přístříhu. Tažení probíhá opakovaně tak, že velikost průměru polotovaru je při jednotlivých zkouškách zvětšována až do maxima, kdy dojde k tažení se vznikem trhlin. Zkouška se pak kvantifikuje pomocí poměru průměru tažníku a polotovaru, který je možné vytáhnout bez vzniku trhlin. Na obrázku 17 byl zobrazen princip zkoušky.



Obrázek 17 - Princip kalíškové zkoušky [4]

2.3.3 Zkouška LDH (Zkouška Nakajima)

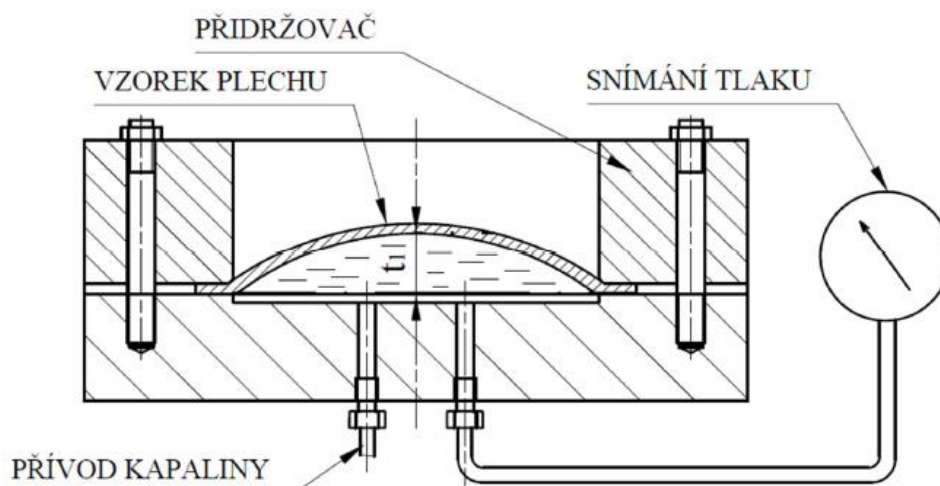
Principem této zkoušky je tažení kruhového polotovaru kulovou tažnicí. Polotovar je upnut pomocí přidržovače a žeber, které brání vtahování plechu dle obrázku 18. Zkouška je ukončena při vzniku trhliny. Zkouška je hodnocena maximální hloubkou výtažku, často se používá pro stanovení Keeler – Goodwinova diagramu a křivky mezní tvárnosti. To se provádí zkouškou na polotovarech různých tvarů, které náleží charakteristickým bodům v diagramu, viz obrázek 5.



Obrázek 18 - Princip LDH zkoušky [4]

2.3.4 Hydraulická zkouška (Tomlenova zkouška)

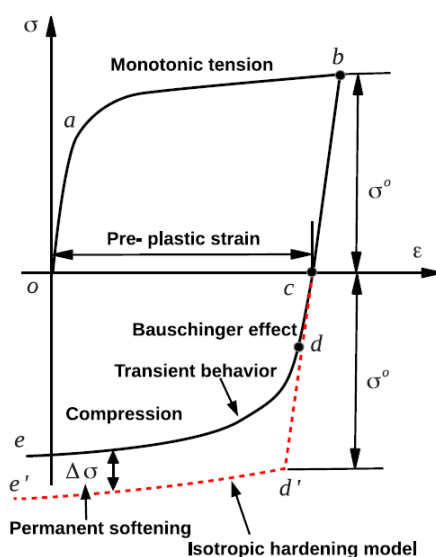
Zkouška je prováděna upnutím kruhového přístřihu do zařízení podle obrázku 19. Po upnutí se do prostoru pod materiálem začne přivádět tlaková kapalina, která způsobí vyboulení plechu. Při zvyšujícím se tlaku kapaliny se zvětšuje prohloubení plechu, zkouška je ukončena v okamžiku vzniku trhliny. Zkouška se vyhodnocuje velikostí prohloubení, kvalitou zdeformovaného povrchu a tvarem praskliny.



Obrázek 19 - Princip hydraulické zkoušky [4]

3 Bauschingerův efekt

V souvislosti s hlubším matematickým popisem plasticity materiálu je nutné se detailně zabývat jeho experimentálně zjištěným chováním. Na obrázku 20 byl zobrazen experimentálně stanovený diagram napětí-deformace při cyklickém namáhání v tahu a v tlaku pro jeden půl-cyklus zatěžování. Je zde patrná závislost průběhu křivky v oblasti tlaku (compression) na plastické deformaci vyvolané prvotním zatížením. Odchyłka této křivky od předpokládaného průběhu (isotropic hardening model) je pak označována jako deformační zpevnění materiálu. V experimentálně pozorované závislosti byly rozeznány dílčí jevy tohoto zpevnění. Ty lze označit jako stagnace vytvrzování (Workhardening stagnation), trvalé změkčení (Permanent softening), Bauschingerův efekt a přechodové chování (Transient behaviour). Na obrázku se tyto jevy projevují jako odlišnost předpokládaného průběhu křivky, bez zpevnění a skutečného průběhu.



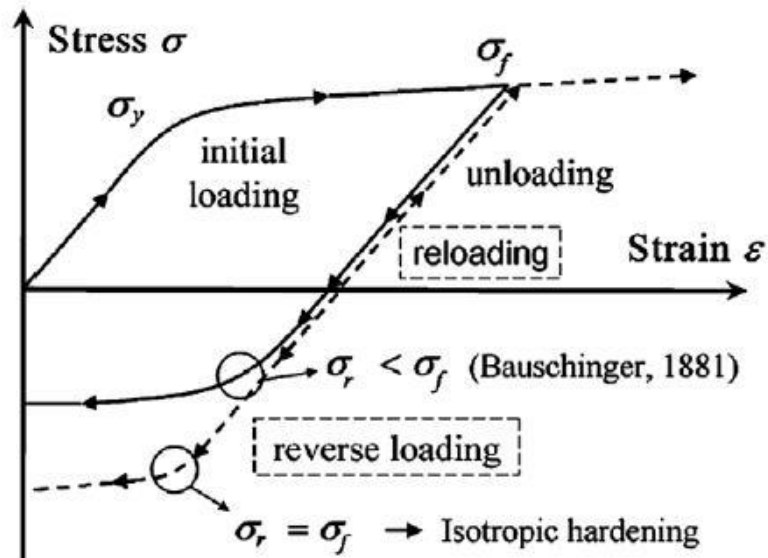
Obrázek 20 - Schéma zpevnění materiálu [15]

Bauschingerův efekt je definován jako snížení meze pružnosti, pozorované během namáhání v určitém směru, v důsledku předchozí plastické deformace ve směru opačném. Jedná se tedy o experimentálně zjištěnou závislost změny plastického chování materiálu v důsledku jeho deformační historie. Byl pojmenovaný podle Johanna Bauschingera, německého profesora aplikované mechaniky, který poprvé popsal tuto problematiku v roce 1881. Protože se jednalo o jeden z prvních jevů popisujících směrovou závislost napětí a deformace, nebyl tento jev v historii definován jednoznačně a bylo vyřčeno několik jeho definic.

3.1 Popis jevu

Na obrázku 21 byla vykreslena závislost napětí-deformace, materiál byl podroben počátečnímu tahovému zatížení σ_f . Při tomto zatížení se vzorek zdeformoval o hodnotu poměrného prodloužení ε , přičemž zatěžování do meze úměrnosti σ_u o hodnotu pružné deformace ε_{el} proběhlo lineárně podle Hookeova zákona. Další nárůst napětí vyvolal plastickou deformaci ε_{pl} . Následovalo odlehčení, reprezentováno přímkou rovnoběžnou

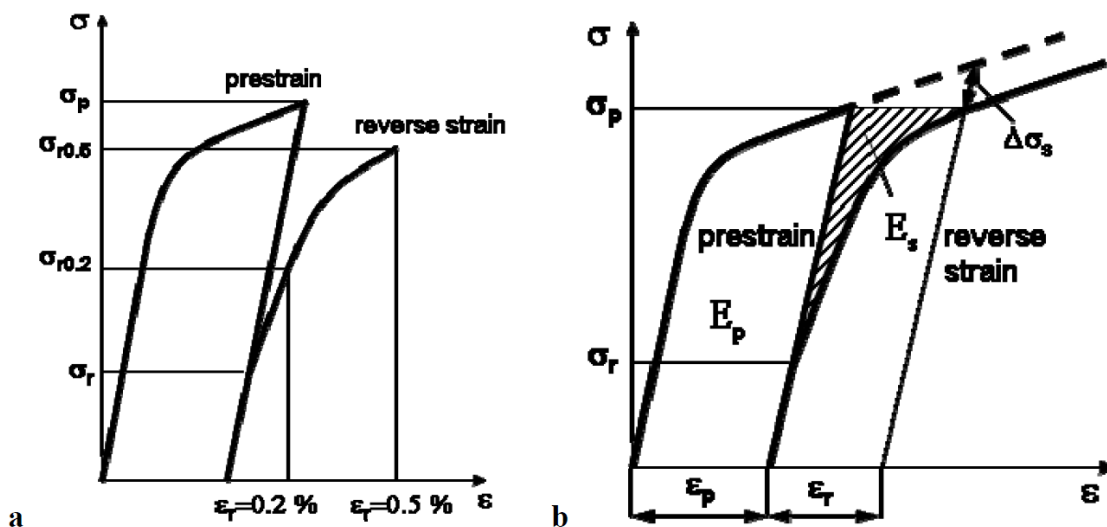
s počáteční částí. V této oblasti dochází k „vyčerpání“ pružné deformace ε_{el} , materiál zůstává deformován pouze plasticky. Při následném zatížení vzorku v tlaku, probíhá počáteční část opět podle Hookeova zákona, ale k dosažení meze pružnosti dojde při nižším zatížení než u vzorku bez této deformační historie. Pro velikosti těchto napětí pak tedy platí $\sigma_r < \sigma_f$, kde σ_r je mez pružnosti materiálu s popsanou deformační historií.



Obrázek 21 - Křivka napětí-deformace [16]

3.2 Hlavní charakteristiky a parametry

Pro posouzení Bauschingerova efektu byly zavedeny tři hlavní parametry. Vyhodnocují se na základě napětí, deformace a energie. Pro jednodušší ilustraci těchto veličin je na obrázku 22 zobrazen diagram napětí-deformace s otočenou větví opačného zatížení do kladných hodnot.



Obrázek 22 - Zjednodušený diagram napětí-deformace [17]

Napěťový parametr

Tento parametr dává do poměrného vztahu různé hodnoty napětí z diagramu napětí-deformace v tahu a tlaku. Vztah (3.1) definuje napěťový parametr podle zdroje [17] jako poměr počátečního napětí v tahu σ_p a napětím na mezi úměrnosti v tlaku σ_r . Nebo obdobně vztah (3.2) jenž do poměru opět počáteční napětí v tahu σ_p a napětí příslušející poměrné plastické deformaci 0,2 [%] $\sigma_{r0,2}$ v tlaku.

$$\beta_\sigma = \frac{\sigma_p - \sigma_r}{\sigma_p} [-] \quad (3.1)$$

$$\beta'_\sigma = \frac{\sigma_p - \sigma_{r0,2}}{\sigma_p} [-] \quad (3.2)$$

Deformační parametr

Deformační parametr je definován vztahem (3.3) jako poměr hodnoty plastické před-deformace ε_p a plastické deformace ε_r při zatížení v opačném směru odpovídající maximálnímu napětí v kladném smyslu. Prodloužení v opačném směru bývá označované také jako Bauschingerovo prodloužení $\beta = \varepsilon_r$.

$$\beta_\varepsilon = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_p} [-] \quad (3.3)$$

Energetický parametr

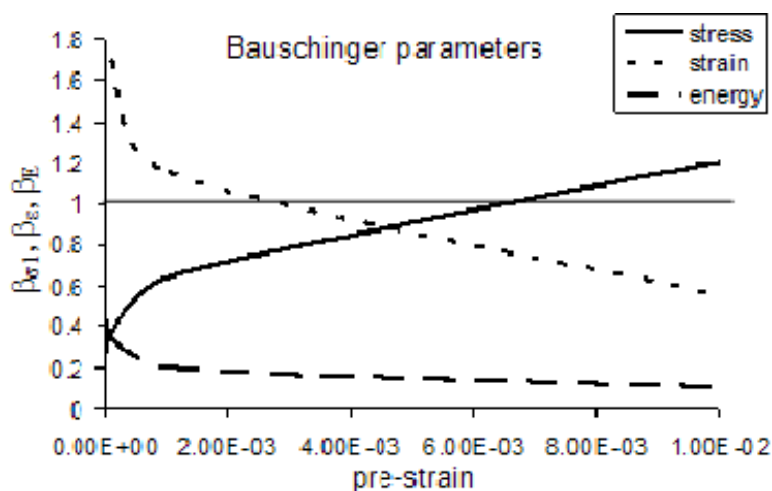
Energetický parametr je definován vztahem (3.4). Vyjadřuje poměr mezi energií vynaloženou na před-deformaci materiálu E_p a uspořenoou energií E_S při opačném namáhání vlivem Bauschingerova efektu. Tato snížená hodnota energie se také označuje jako Bauschingerova energie.

$$\beta_E = \frac{E_S}{E_p} [-] \quad (3.4)$$

Tento parametr znázorňuje vztah mezi kinematickým a izotropním zpevněním, které je pozorováno během deformace. Mimoto nám může poskytnout představu o tom, kolik anizotropie se objeví v materiálu během zpětného zatěžování [18].

Hodnoty parametrů Bauschingerova efektu

Tyto tři parametry slouží ke komplexnímu posouzení vlivu Bauschingerova efektu. Na obrázku 23 byla vykreslena závislost hodnoty těchto parametrů pro ocel s 0,17[%] C v závislosti na hodnotě poměrného prodloužení předdeformace.



Obrázek 23 - Hodnoty parametrů Bauschingerova efektu pro ocel s 0,17[%] C [17]

3.3 Fyzikální podstata jevu

Od prvního popisu Bauschingerova efektu bylo provedeno mnoho studií, které se snažily vysvětlit fyzikální podstatu popsaného jevu. Počáteční myšlenky přisuzovaly příčinu vnitřnímu napětí spolu s makroskopickými zbytkovými napětími vznikajícími v důsledku nehomogenní deformace jednotlivých zrn u polykrystalických kovů. Následně přišla alternativní myšlenka, která byla založena na anizotropii hnací síly pohybu dislokací v důsledku před-deformace. Obecně existují dvě hlavní teorie vysvětlující Bauschingerův efekt, teorie vnitřních napětí a teorie dislokací. Dále lze popsat tento jev také pomocí kompozitního modelu.

3.3.1 Teorie vnitřních napětí

Tuto teorii představil Emil Heyn v roce 1918, vycházela z těchto tří předpokladů

- materiál se skládá z velmi malých částic, které mají ideální křivku napětí-deformace
- meze pružnosti jednotlivých částic si nejsou vzájemně rovny
- absolutní hodnota meze pružnosti jakékoliv částice nezávisí na směru deformace jak v tahu, tak v tlaku

Během zatěžování je deformace homogenní, ale při plastické deformaci není rozložení napětí rovnoměrné, a proto po odlehčení dochází ke vzniku zbytkových napětí, která jsou odpovědná za snížení meze kluzu při zpětném zatěžování. [18]

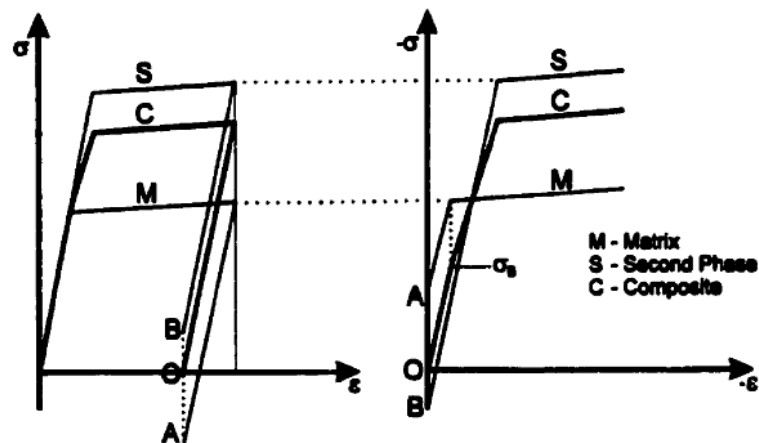
3.3.2 Teorie dislokací

Tato teorie byla výrazně oslabena potvrzením faktu, že Bauschingerův efekt se projevuje i v jediném krystalu kovu, vychází totiž z šíření dislokací uvnitř materiálu. Vlivem prvotního zatížení se pohybují dislokace ve směru napětí. Tyto dislokace interagují s jinými nepohyblivými dislokacemi a tím vznikají pevné překážky zabraňující jejich dalšímu pohybu. Dochází tedy ke zvyšování zátěžných charakteristik a popsané překážky kolem sebe vytváří zpětné napětí. Při působení opačně orientovaného zatížení se toto zpětné napětí podílí

na uvolňování pohyblivých dislokací v jeho směru. Tím přispívá k větší deformaci a tedy poklesu meze kluzu materiálu, respektive meze pružnosti.

3.3.3 Kompozitní model

Popis efektu pomocí kompozitního modelu vychází z představy, že vzorek je tvořen dvěma komponentami, maticí a sekundární fází. Tyto fáze mají stejný modul pružnosti, ale rozdílnou mez pružnosti. Obrázek 24 zachycuje průběh zatěžování vzorku popsaného kompozitním modelem. Při prvotním zatížení $+\sigma$ proběhne pružná deformace matrice (M), druhé fáze (S) a celkového modelu vzorku (C). Po překročení meze elasticity matrice se začne deformovat plasticky, a tedy i kompozitní celek bude vykazovat plastickou deformaci. Při následném odlehčení dojde k vyčerpání veškeré elastické deformace. V jednotlivých komponentách zůstane zbytkové napětí způsobené rozdílnou plastickou deformací. V matici zůstane tlakové a v druhé fázi tahové napětí. Při následném zatížení vzorku v tlaku $-\sigma$ dojde k dosažení plastické deformace v matici při nižší hodnotě napětí než v tahu, a tedy snížení meze pružnosti v tlaku celkového modelu.



Obrázek 24 - Schéma kompozitního modelu [16]

3.4 Význam Bauschingerova efektu

Detailní popis deformačního zpevnění materiálu poskytuje možnost predikce elasto-plastických vlastností součásti po tváření. Nejvýznamnějším projevem právě Bauschingerova efektu v této predikci je odpružení plechů při procesu hlubokého tažení. Odpružení je obecně jeden z nejvýznamnějších zdrojů chyb v těchto procesech.

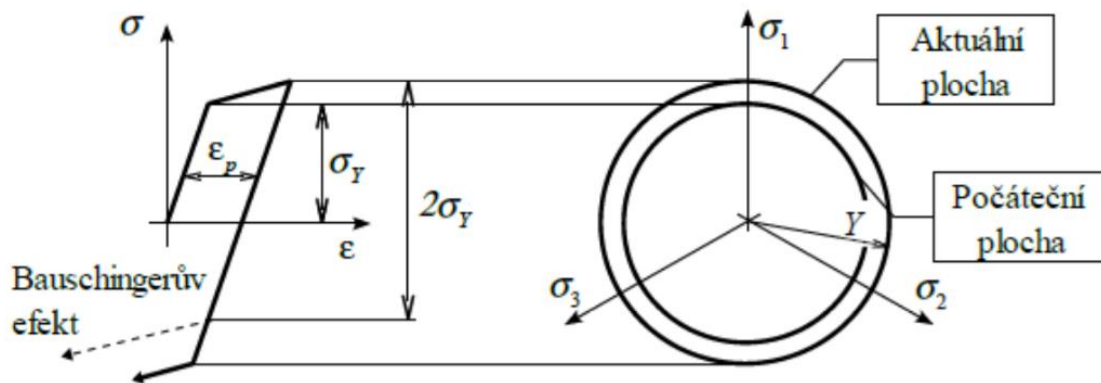
Pomocí matematického popisu plasticity materiálu a numerických simulací je možné předpovědět konečný tvar po odpružení velice přesně, viz obrázek 14. Omezením těchto simulací je především nedostatek experimentálně ověřených dat, respektive parametrů materiálů. Tyto nedostatky jsou dány složitostí získávání těchto parametrů, protože jejich měření vychází z podrobení materiálu specifickým průběhům napěťově deformačních stavů, kterých je konstrukčně velice těžké dosáhnout.

Příkladem praktického využití Bauschingerova efektu je tváření a válcování plechů. Zatímco tváření a válcování může být prováděno v jednom směru, provozní napětí může působit

v opačném směru. Kvůli tomu se v praxi využívá před-deformace součástí ve smyslu orientace hlavního provozního napětí. Díky tomu se získá reverzní napětí, které má schopnost po určitou dobu ovlivňovat odolnost materiálu nebo případně vyvolat počáteční reverzní cyklický creep. Znalost Bauschingerova efektu je důležitým předpokladem pro pochopení cyklického únavového chování kovových materiálů a kompozitů. [18]

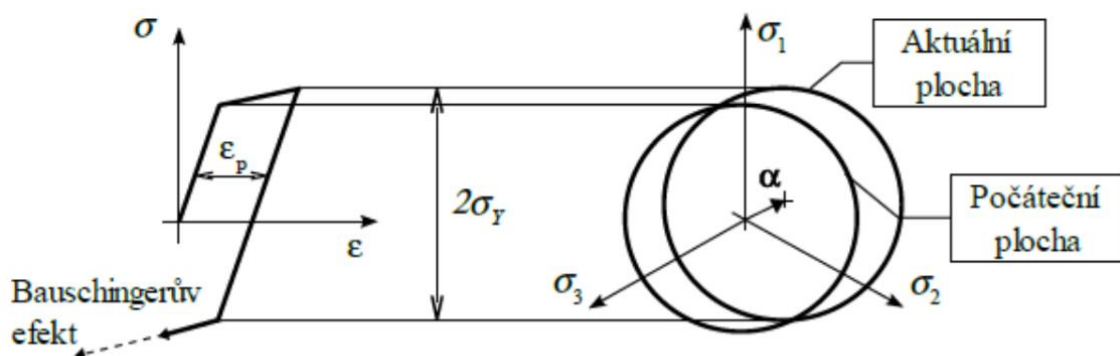
3.5 Modelování Bauschingerova efektu

Pro matematické modelování deformačního zpevnění materiálu je nutné zvolit jeden z matematických modelů, viz kapitola 2.2.4 Konkrétní matematické modely zpevnění. Pro modelování Bauschingerova efektu není možné použít čistě izotropní model zpevnění, to je dáno principem tohoto modelu, který mění elasto-plastické chování materiálu ve všech směrech stejně. Uvedené je demonstrováno na obrázku 25, kde byla zobrazena izotropní změna plochy plasticity.



Obrázek 25 - Změna tvaru plochy podmínky plasticity pro izotropní zpevnění [8]

Na obrázku 26 byla zobrazena změna plochy plasticity popsaná čistě kinematickým modelem zpevnění. Podle schéma je patrné, že čistě kinematickým zpevněním lze modelovat Bauschingerův efekt. Pro řádné modelování tohoto jevu ale není tento přístup dostatečný, především pro nevhodnou lineární závislost napětí na deformaci za mezí plasticity. Z těchto důvodů jsou pro kvalifikovanou simulaci Bauschingerova efektu doporučovány nelineární kombinované modely zpevnění.

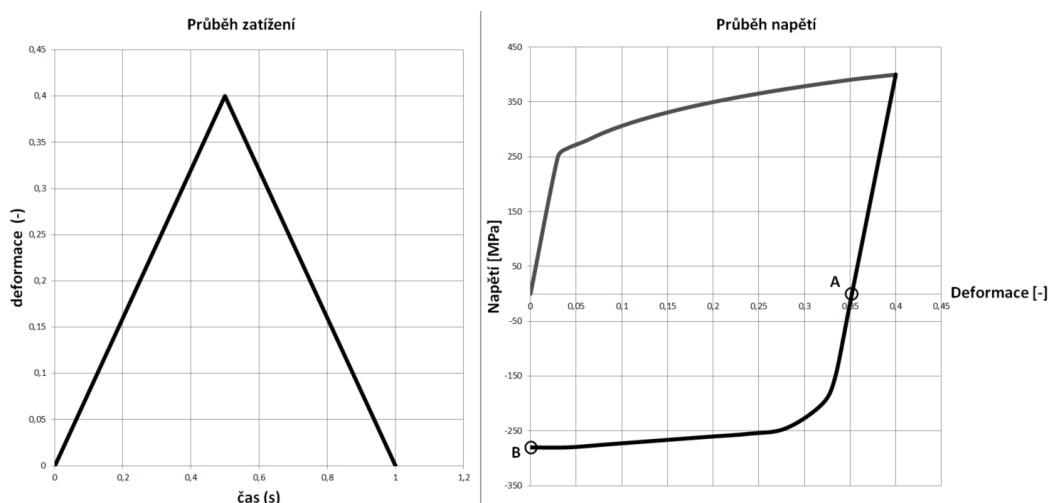


Obrázek 26 - Změna polohy plochy podmínky plasticity pro kinematické zpevnění [8]

4 Analýza požadavků na zařízení

4.1 Základní požadavky na průběh zkoušky

Základním požadavkem na zařízení, které bude sloužit k nalezení materiálových parametrů Bauschingerova efektu, je zajištění zatížení ploché zkušební tyče, střídavě v tahu a v tlaku za mezí kluzu. Vzhledem k použití zařízení je kladen požadavek na detailní popis křivky napětí-deformace v průběhu celého testu. Požadovaný průběh zatížení v závislosti na čase byl zobrazen na obrázku 27, kde byl vykreslen i průběh vzniklého napětí. Při testování standardizované ploché zkušební tyče v tahu a tlaku vyvstává problém při tlakovém zatížení, na diagramu se tato problematická oblast nachází mezi označenými body A; B, to je dáno vzpěrovým namáháním vzorku.



Obrázek 27 - Schéma požadovaného zatěžování

Vzpěrové namáhání je obecně dáno ztrátou stability, o nosnosti rozhoduje stabilní stav rovnováhy, nikoli pevnostní parametry materiálu. Na obrázku 28 byla zobrazena normalizovaná plochá zkušební tyč podrobená tlakovému namáhání v MKP simulaci, kde byly zobrazeny vlastní tvary průhybu tyče. Úloha byla řešena jako lineární úloha vybočení, tedy v souladu s Eulerovou teorií vzpěru.



Obrázek 28 - Vzpěrová deformace standartní zkušební tyče v MKP

Ilustrativní výpočet vzpěrového namáhání

Dle teorie pružnosti a pevnosti byla ilustrativně stanovena velikost kritické síly a napětí pro plochou zkušební tyč zobrazenou na obrázku 7 s tloušťkou 1,5 [mm]. Bylo tak provedeno s předpokladem platnosti Eulerovy teorie, která je omezena platností Hookeova zákona. Jedná se tedy o stanovení kritické síly a napětí s vyvoláním pouze elastických deformací, neodpovídá tedy požadavkům průběhu zkoušky.

Podle okrajových podmínek byl stanoven koeficient $n = 4$. Vzorcem (4.1) byl stanoven minimální kvadratický moment průřezu, s dosazením rozměru $b = 12,5$ [mm]; $h = 1,5$ [mm] dle rozměrů uvedeného vzorku. Pomocí rovnice (4.2) byla vypočtena hodnota kritické síly, s uvážením vzpěrově namáhané délky $l = 110$ [mm] a Youngova modulu pružnosti $E = 210\,000$ [MPa], platným pro hlubokotažnou ocel DC01, viz tabulka 2.

$$J_{min} = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{12,5 \cdot 1,5^3}{12} = 3,52 \text{ [mm}^4\text{]} \quad (4.1)$$

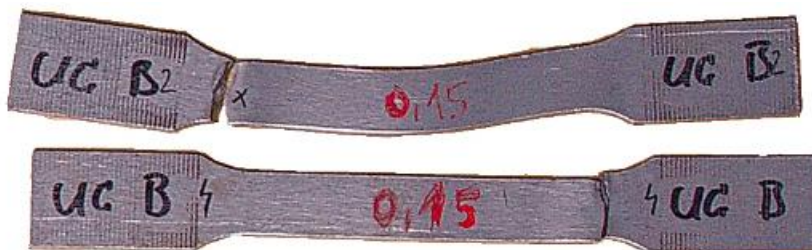
$$F_{krit} = n \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{min}}{l^2} = 4 \frac{\pi^2 \cdot 210\,000 \cdot 3,52}{110^2} = 2\,411,8 \text{ [N]} \quad (4.2)$$

$$\sigma_{krit} = \frac{F_{krit}}{A} = \frac{F_{krit}}{b \cdot h} = \frac{511,8}{12,5 \cdot 1,5} = 128,6 \text{ [MPa]} \quad (4.3)$$

Podle ilustrativního výpočtu je zřejmé, že kritické napětí určené vzorcem (4.3), je nedostatečné pro vyvolání plastických deformací. Je menší než mez kluzu uvažovaného materiálu. Na základě výpočtu lze tedy konstatovat, že dosažitelné namáhání normalizované ploché zkušební tyče bez použití speciálního postupu nedokáže vyvolat v tělese patřičný stav napjatosti bez nebezpečí ztráty stability a vybočení.

Problematika vzpěru v praxi

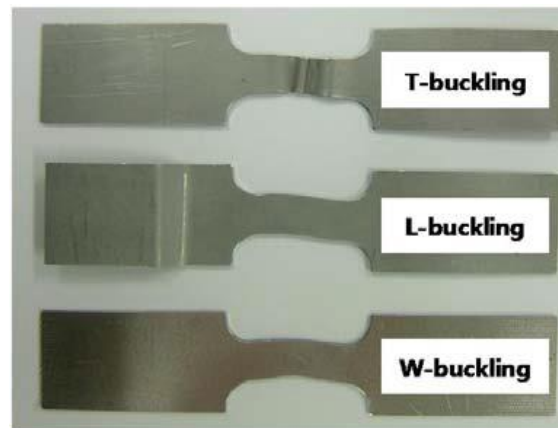
S obdobnou problematikou je nutné se vypořádat v mnohých případech namáhání tah-tlak tenkých plechů. Tato problematika se například vyskytuje při zkouškách nízko-cyklové únavy, pro vysoko-cyklickou únavu je dosahovaná deformace menší, proto tato problematika nenabývá takového významu. Ve firmě COMTES FHT byly provedeny testy s cyklickým zatížením tah-tlak na obyčejných zkušebních tyčích bez použití přípravku. Na obrázku 29 byly zobrazeny některé zkušební vzorky po dokončení testů. Je zřejmé, že se vzorky porušily v nevhodných místech, a nenastal požadovaný cyklus zatížení, proto testy nevedly k použitelným výsledkům.



Obrázek 29 - Nevhodně porušené vzorky

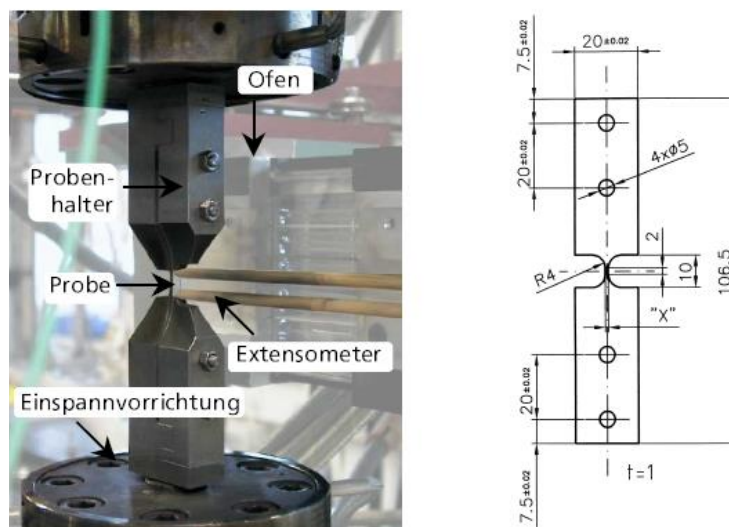
Využívané řešení problematiky vzpěru

Pro vypořádání se s problematikou vzpěru se upravují tvary plochých zkušebních tyčí tak, aby se tento vliv omezil. Lze tak dosáhnout zvýšení dosažené plastické deformace-předpětí. Obrázek 30 zobrazuje vzorky podrobené střídavému namáhání v tahu a v tlaku s upraveným tvarem. Je zřejmé, že tato optimalizace tvaru nezaručuje dosažení patřičného průběhu testu, proto jsou hledány další způsoby jak se s touto problematikou vyrovnat. Vzorky byly v citovaném zdroji označeny podle charakteristického tvaru podlomení, kde autoři uvádějí, že se dalším vývojem podařilo navrhnout zkušební tyč tak, aby nedošlo k dvěma druhým případům (L; W buckling).



Obrázek 30 - Deformace vzorků bez použití přípravku [19]

V práci [13] autor představil možnost úpravy zkušební tyče tak, že bylo možné provádět test bez speciálního přípravku se zaručením funkčnosti. Způsob vycházel z použití velice přesného vzorku a upínacích čelistí vysoké tuhosti, ukazuje tak obrázek 31. Uvedený způsob testování je ale proveditelný v zásadě pouze v laboratorních podmínkách, v praxi je jeho použití nevhodné. Především pro vysokou náročnost výroby vzorků a mimo jiné i náročnou přípravu průběhu testování.



Obrázek 31 - Schéma zkoušky bez použití přípravku [13]

Pro praktické provedení zkoušky, které zamezí problematice ztráty stability zkušební tyče, se využívají speciální přípravky spolu s tvarovou úpravou zkušebních tyčí. Ty mají zajistit, aby k požadovanému cyklu zatížení docházelo v předem známé přesně lokalizované oblasti.

4.2 Požadavky na vyhodnocení zkoušky

Přípravek na provedení zkoušky je nutné přizpůsobit použití moderním možnostem měření deformací. V oblasti použití přípravku, která má vysoké požadavky na přesnost, nacházejí uplatnění především optické metody měření. Obecně se vyznačují několika výhodami. Principiálně se řadí mezi bezkontaktní systémy, proto neovlivňují průběh sledovaného procesu. Při použití těchto měřících metod lze vyhodnocovat lokální deformaci v celém poli bodů a po celý průběh zkoušky až do porušení. Naopak u některých extenzometrů je zapotřebí, poté co vznikne krček, okamžitě tenzometr ze zkušebního vzorku odstranit, aby nedošlo k jeho poškození.

Měřící systém Aramis

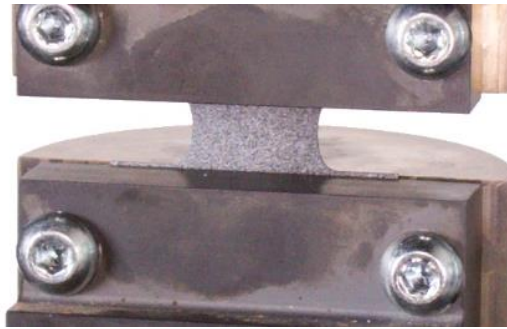
Aramis je bezkontaktní optický systém pracující na principu digitální korelace obrazů. Ta spočívá ve snímání deformovaného tělesa v celém průběhu zatěžování pomocí jedné, častěji ale dvou vysokorychlostních kamer. Pomocí image processingu jsou vypočteny prostorové souřadnice bodů ležících na povrchu objektu. Následně jsou vyhodnoceny posuvy a rozložení hlavní a vedlejší deformace v jednotlivých fázích zatížení. Mezi hlavní výhody tohoto systému patří možnost měření trojrozměrné deformace při statickém i dynamickém zatížení, nezávislé například i na teplotě tělesa. Na obrázku 32 byl zobrazen systém se dvěma kamerami, kterým disponuje firma COMTES FHT.



Obrázek 32 - Příklad měřícího systému Aramis [20]

Pro možnost vyhodnocování výsledků na celém povrchu tímto způsobem je nutné definovat pole bodů, to musí být provedeno pro jejich rozlišení v postprocessingu. To se provádí

nanesením kontrastního vzoru na namáhanou součást. Prakticky se jedná o nanesení matrice bílé barvy a nástřiku černého vzoru, zřejmé je to na obrázku 33, kde byl zobrazen detail takto upravené zkušební tyče.



Obrázek 33 - Vzorek plechu s kontrastním vzorem

4.3 Nežádoucí vlivy na zkoušky

Pro simulaci průběhu zkoušek bude použita metoda konečných prvků MKP. Přesnost takto dosažených výsledků je dána zjednodušením matematického modelu. Tato zjednodušení jsou nutná k dosažení výsledků v reálném čase, ale vnášejí do modelu odchylky od reálného stavu. Zařízení bude fungovat jako testovací, přesnost jeho popisu musí být proto co nejvyšší. Vzhledem k tomu je významné zabývat se možnými neuváženými vlivy v MKP modelu.

Vzorky

Geometrie testovaných vzorků je zatížena výrobními nepřesnostmi, ty jsou závislé na procesu technologie výroby. Pro ploché vzorky mohou vznikat nepřesnosti především na straně polotovaru výroby. Tím bývá svitek plechu, kde mohou být pozorovány mimo jiné odchylky v rovinnosti a nerovnoměrnost tloušťky. Matematický model chování materiálu, především v oblasti plasticity, je pouze zjednodušením skutečnosti. Obecně je nutné tyto úlohy řešit pomocí nelineárních řešičů, vlastnosti materiálu se mění v závislosti na deformačním stavu. Veškeré parametry materiálového popisu jsou pak pouze statistické hodnoty získané z množství testů.

Přípravek

Testovací zařízení je teoreticky zatíženo identickými geometrickými a materiálovými nepřesnostmi modelu, prakticky ale v menší míře než samotný testovaný vzorek. Reálné odchylky modelu a skutečnosti nenastávají v případě materiálového popisu přípravku. Materiálový popis do meze pružnosti, je významně přesnější a jednodušší než popis plasticity. Naopak odchylky v geometrii mohou být významné, různá výrobní technologie může způsobovat například nepravidelnou drsnost povrchu, která není zahrnuta v matematickém popisu kontaktních podmínek.

Zkušební stroj

Testovací stroj může vnést do měření významný vliv. Například chod stroje není ideální, je typicky zprostředkován hydraulickým obvodem. Upínací čelisti mohou být opotřebované a nemusí zabezpečit dostatečnou tuhost upnutí, nebo rovinnost ploch. Firma COMTES FHT je

vybavena certifikovanou laboratoří, kde jsou všechny zkušební stroje podrobovány pravidelným kontrolám. Protože navrhovaný přípravek bude uplatněn pouze v této konkrétní laboratoři, lze předpokládat jen malé odchylky na straně stroje.

Průběh zkoušky

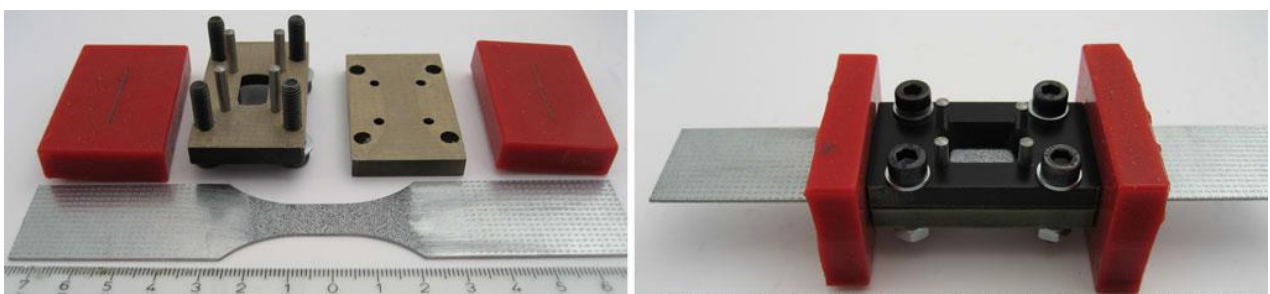
Další nepřesnosti matematického popisu mohou vyplývat z průběhu zatěžování. Pro získávání věrohodných výsledků zkoušky, která je řízena člověkem - obsluhou stroje, je nutné zajistit školení daných pracovníků, předepsání a dodržování závazného postupu zkoušky. Zajistit, aby danou zkoušku prováděli jenom pracovníci, kteří jsou obeznámeni s tímto postupem.

5 Možnosti konstrukčního řešení

5.1 Pevné klemy

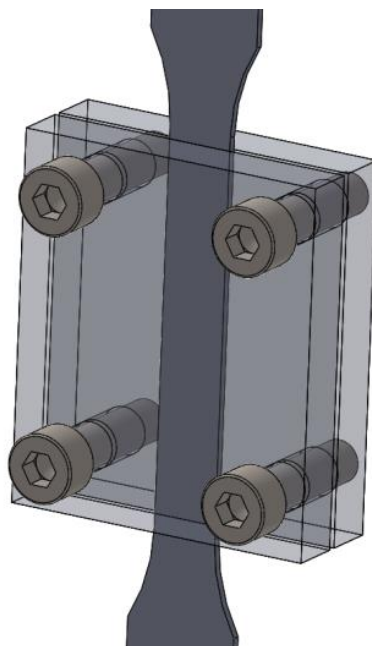
Nejjednodušší možností konstrukčního řešení přípravku na provedení zkoušky ploché zkušební tyče cyklicky v tahu a v tlaku je zhotovení přídržných klem přichycených k vzorku. Tyto klemy mohou mít různou podobu, je ale nutné vypořádat se s vlivem tření přidavných podpěr na vzorek. Další nevýhodou je problematika měření deformace v průběhu zatěžování.

Obrázek 34 zobrazuje kovové klemy s výřezem, který zajišťuje možnost měření optickou metodou. Pro snížení vlivu tření byly vloženy mezi klemy a vzorek tenké pláty z teflonu. Dále byla zkušební tyč vložena do plastových pouzder zabraňující vzpěru tyče mimo oblast přípravku. Toto zařízení bylo použito autory práce [21], pro optimalizaci parametrů modelu zpevnění vhodných pro predikci odpružení.



Obrázek 34 - Pevné klemy s výřezem [21]

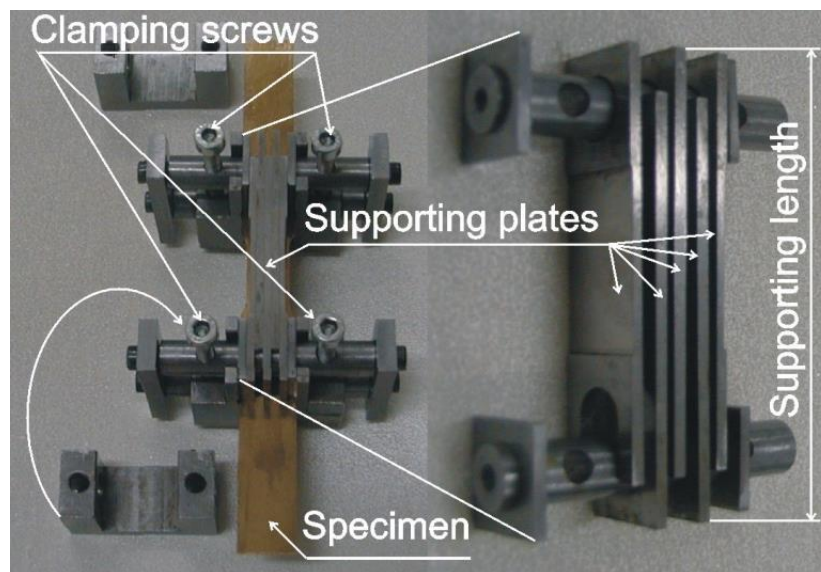
Na obrázku 35 bylo zobrazeno schéma řešení pomocí klem vyrobených z plexiskla, které umožňovalo přímé použití optické metody měření. Materiál plexiskel vykazuje velmi malou drsnost, přesto byl vliv tření snížen nanesením minerálního oleje mezi klemy a vzorek.



Obrázek 35 - Schéma pevných klem z broušeného plexiskla

5.2 Posuvné přídržné pláty

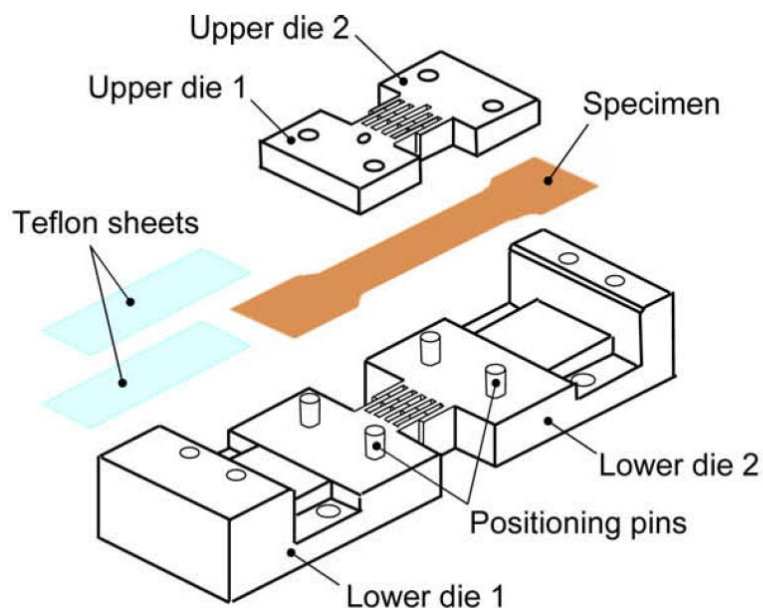
Autoři práce [22] prezentovali způsob měření nízko cyklové únavy tenkých plechů. Toto zařízení, zobrazené na obrázku 36, se skládá ze dvou svěrek upnutých na dva konce zkušební tyče (specimen) pomocí šroubů (clamping screws). Na pomocnou osu svěrek byly usazeny plechové součásti (supporting plates) podélně dosedající na plochu vzorku. Tyto součásti jsou uchyceny v párech, kdy daný přídržný plech je na jednu svěrku uchycen pevně, a v protilehlé může konat posuvný pohyb. V průběhu zatěžování se na přípravku mění vzdálenost svěrek a je tím dosaženo podepření vzorku v průběhu celého zatěžovacího cyklu. U popisovaného zařízení není možné měření lokálních deformací. To vychází z použití tohoto přípravku, tedy testování nízko cyklové únavy. Pro testování Bauschingerova efektu by bylo tedy nutné upravit stávající konstrukci tak, aby umožňovala měření lokálních deformací.



Obrázek 36 - Zařízení s posuvnými přídržnými pláty [22]

5.3 Posuvné klemy s tvarovými výběžky

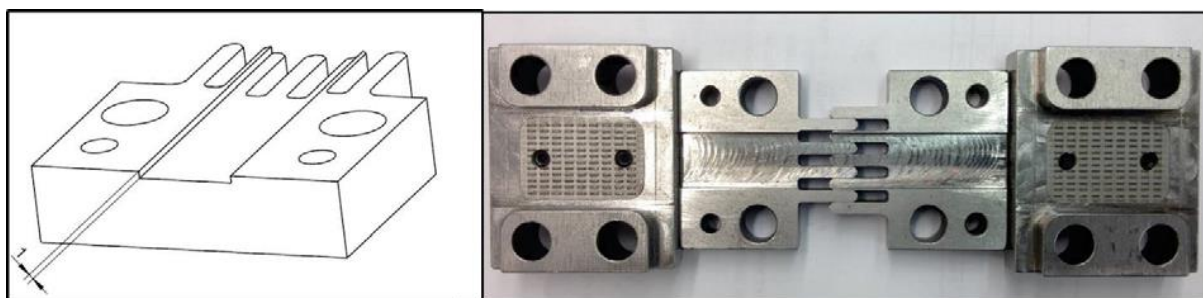
V literatuře [23] bylo prezentováno testovací zařízení, zobrazené na obrázku 37. Skládá se z pevné části (lower die 1) a pohyblivé části (lower die 2), které je umožněn pohyb ve vodorovném směru. Tyto části do sebe zapadají rovnoběžnými tvarovými výběžky. Na vzniklou plochu je ustaven vzorek (specimen), který je pevně uchycen k jednotlivým koncům pomocí dosedajících součástí (upper die 1; 2). Pro zamezení zadírání vzorku do tvarových výběžků byly na obě dosedací plochy vloženy pláty vyrobené z teflonu a aplikováno mazání vazelínou. Autoři práce uvádí, že tento postup snížil koeficient tření na hodnotu $f = 0,02$. I přes toto snížení je tření na vzorku největším nedostatkem tohoto zařízení. Měření podélné deformace vzorku bylo provedeno upevněním extenzometru na vzorek skrze otvor v horní části zařízení (upper die 1).



Obrázek 37 - Klemy s tvarovými výběžky [23]

5.3.1 Inovace zařízení

Možnost inovace předchozího zařízení představili autoři v literatuře [24]. Inovace zařízení spočívala v použití jiného způsobu měření deformace, ta byla vyhodnocena pomocí DIC kamery měřícím systémem Aramis. Dalším nedostatkem původního řešení byl vliv tření na experiment. Bylo totiž zjištěno, že dochází primárně k deformaci vzorku v oblasti poblíž vodicích výběžků, což negativně ovlivňuje výsledky. Autoři inovovali stávající řešení obrobením drážky v klemách, je tak vidět na obrázku 38. Tato drážka umožňuje vzorku volně se deformovat v průběhu prvotního tahového zatížení bez vlivu tření a zároveň úspěšně zabraňuje ztrátě stability při tlakovém zatížení.

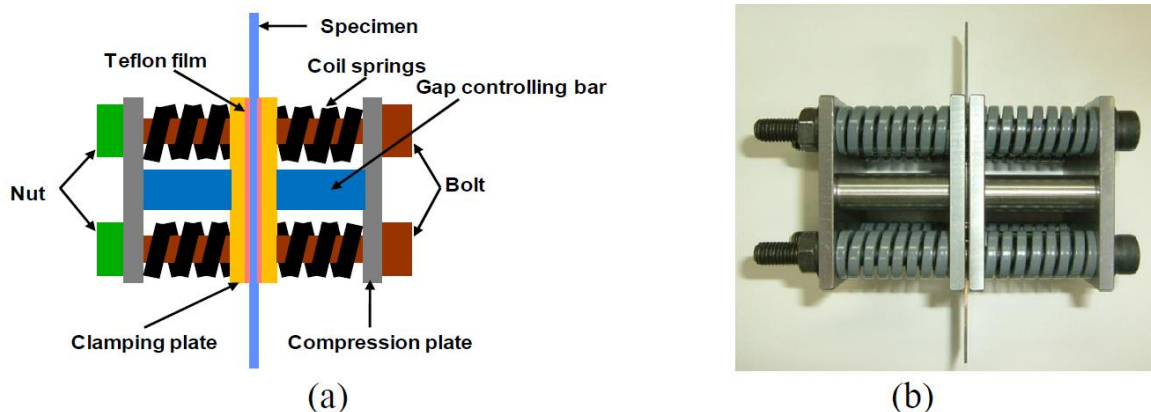


Obrázek 38 - Inovované klemy s tvarovými výběžky [24]

5.4 Zařízení využívající přítlačné síly pružin

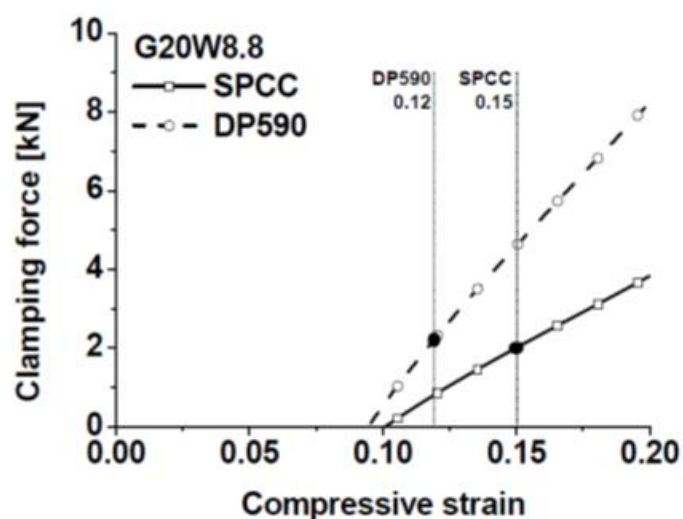
Principiálně podobnou konstrukci zařízení pro zkoušku Bauschingerova efektu představili například autoři publikace [25]. V tomto zařízení bylo využito tlačných pružin na obou stranách vzorku, vyvolávající sílu, respektive tlak na vzorek zabraňující vzpěru. Přípravek je poměrně jednoduchý, lehký a síla pružin je dobře nastavitelná. Na obrázku 39 bylo zobrazeno

schéma a konkrétní použitý přípravek. Skládá se z přitlačných desek (Clamping plate), na které je vyvolávána síla čtyřmi tlačnými pružinami (Coil springs). Poloha pružin byla zajištěna pomocí průchozích šroubů (Bolt) a přídržných desek (Compression plate). Pro snížení tření mezi vzorkem a tlačnými deskami byly opět použity tenké fólie z teflonu (Teflon plate). Pro nastavení předepnutí pružin byla umístěna mezi desky tyč vymezující vzdálenost pružin (Gap controlling bar) a tedy předepnutí, respektive sílu na vzorek. Tato tyč byla použita pouze pro nastavení přípravku, před zkouškou byla odebrána. Pro měření deformace byla použita optická metoda, její použití bylo umožněno otvorem v přídržných a tlačných deskách.



Obrázek 39 - Zařízení využívající přitlačné síly pružin [25]

Při použití přípravku bylo nutné zabývat se stanovením síly vyvozené pružinami, tedy dotažení šroubů. Příliš vysoká síla negativně ovlivní test, ale nedostatečná síla nezabrání vzpěru vzorku. Pro stanovení síly autoři vyšli z analytického výpočtu kritické síly s použitím Swiftova modelu zpevnění. Diagram závislosti dosažitelné deformace vzorku a přitlačné síly pružin byl zobrazen na obrázku 40 pro materiály DP590 a SPCC.



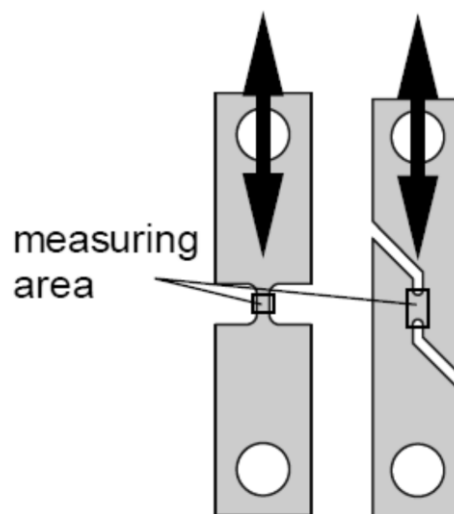
Obrázek 40 - Diagram pro stanovení síly na pružinách [25]

Pro vyhodnocení zkoušky provedené uvedeným postupem musel být zahrnut vliv přídavné síly. Od naměřené síly ze zkušebního stroje byla odečtena třecí síla vypočtená pomocí Colombova zákona tření z přídavné síly pružin.

5.5 Zařízení využívající smykové napětí

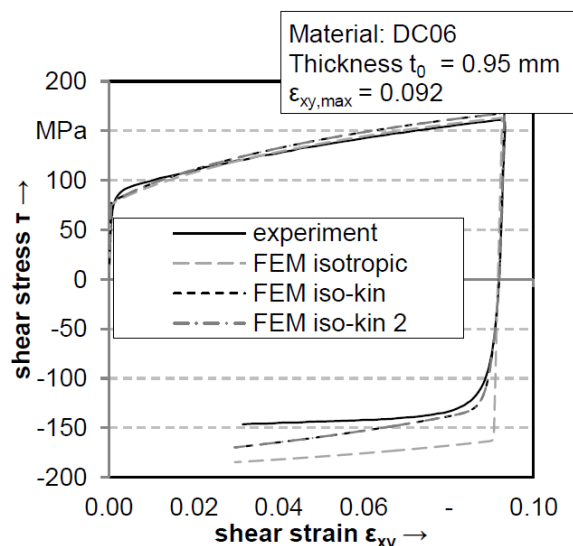
Odlišný způsob zkoušky Bauschingerova efektu vychází z použití jiného způsobu namáhání zkušební vzorku. Experimentálně bylo prokázáno, že podobné chování jako v případě zatížení tah-tlak vykazuje materiál i při zatížení cyklickým střídavým smykovým napětím. Při zkoušce lze hledat vztah mezi smykovým napětím a zkosem. V popisovaném postupu testování nedochází ke vzpěrové problematice, a proto nedochází k ovlivnění testu třecími účinky přípravku a je umožněno snadné měření deformované oblasti optickými metodami.

Bylo tak provedeno například v literatuře [26], kde autoři prezentovali tvar zkušební tyče, zobrazený na obrázku 41. Na tento vzorek bylo aplikováno zatížení tah-tlak standardním zkušebním strojem. V zúžené oblasti vzorku bylo pozorováno majoritní smykové napětí a minoritní tahové napětí. Proto byla v uvedené práci věnována pozornost tomu, kde bude test vyhodnocován a s přihlédnutím k tomu, kde lze předpokládat nejmenší ovlivnění tahovou složkou napětí. Měření na tomto zařízení probíhalo optickou metodou, která umožnila přímo vyhodnocení smykové deformace.



Obrázek 41 - Upravené zkušební tyče [26]

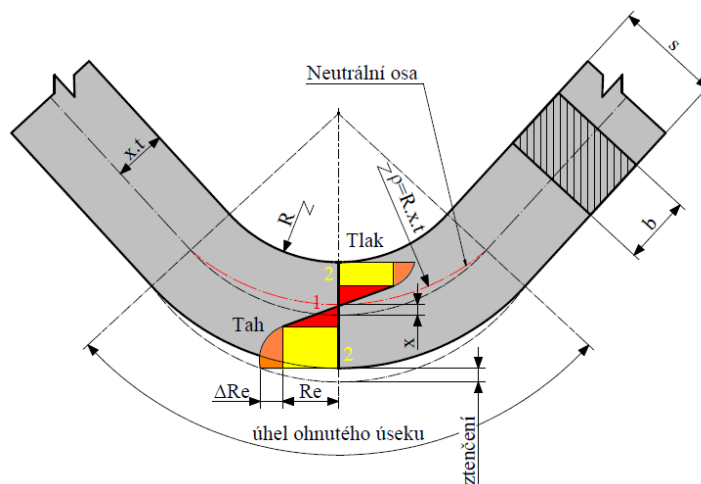
Jeden z experimentů v uvedené práci byl proveden na vzorku v oceli DC06 o tloušťce $t = 0,95 [mm]$ s plastickou deformací ve smyku $\varepsilon_{xy} = 0,092 [-]$. Výsledky ze zkoušky byly porovnány s numericky získanými výsledky dosažené pomocí různých modelů zpevnění, bylo tak zobrazeno na obrázku 42.



Obrázek 42 - Výsledky experimentu provedeného na zař. využívající smyk napětí [26]

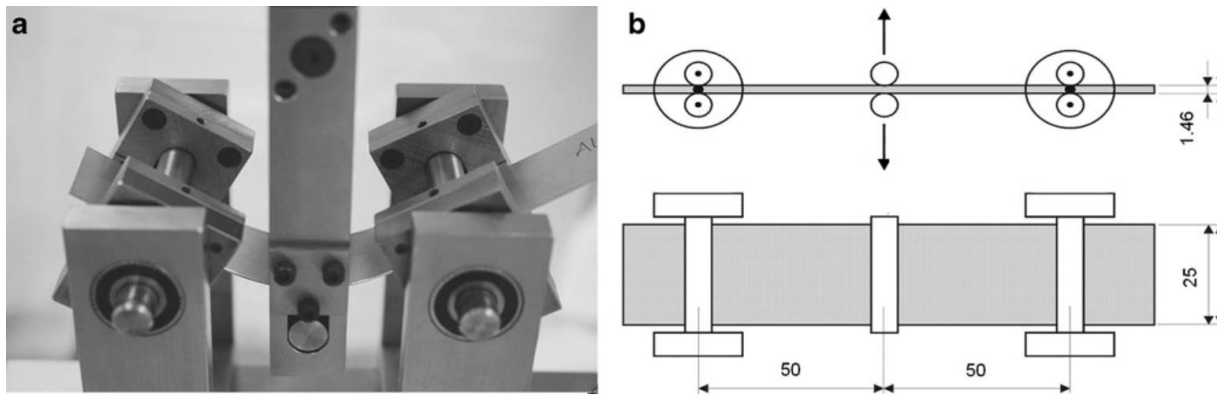
5.6 Zařízení založené na principu třibodového ohybu

Podobně jako předcházející řešení vychází ze smykového zatížení vzorku, lze vycházet i z ohybového namáhání. Ohybové namáhání způsobuje jednoosé napětí rozložené po tloušťce průřezu podle polynomu 3. řádu, viz obrázek 43. Spodní oblast průřezu je zatížena tahem, horní pak tlakem. Mezi těmito oblastmi se nachází neutrální osa, kde je napětí nulové.



Obrázek 43 - Rozložení napětí při ohybu [4]

Zkouška probíhá cyklickým zatížením ploché zkušební tyče s opačným směrem ohybového momentu. Pro vnější krajní vlákno průřezu je pak dosaženo zátěžného cyklu jednoosým napětím v tahu, následně v tlaku. Prakticky to lze provést na upraveném zkušebním zařízení na prostý ohyb zobrazeném na obrázku 44, kde jsou zřejmé zátěžné trny upevněné z obou stran vzorku. Opačný ohybový moment je pak zprostředkován opačným směrem pohybu těchto trnů.



Obrázek 44 - Zařízení založené na principu třibodového ohybu [21]

Popisované zařízení bylo použito v literatuře [21], kde byly optimalizovány parametry několika modelů zpevnění na základě shodnosti s výsledky simulací. V odkazované zkoušce byly testy provedeny na plechu tloušťky 1,46 [mm] a zařízení se vzdáleností podpor 100 [mm]. Zde činila poměrná plastická deformace krajního vlákna 2 – 3 [%] a představovala průhyb vzorku 20 [mm].

Při zkoumaném zatěžování, tedy při cyklickém namáhání ohybem, dochází vlivem deformačního zpevnění ke změnám zátěžových charakteristik. K těmto změnám dochází po celé tloušťce, bez uvážení elasticky deformovaného okolí neutrální osy. Zátěžové charakteristiky se tedy liší pro jednotlivá vlákna materiálu. Na celkové velikosti naměřeného průhybu se ale podílí celý průřez, a proto z naměřených hodnot nelze přímo sestrojít závislost napětí-deformace. Pro stanovení požadovaných materiálových parametrů pomocí tohoto testu je využíván odlišný přístup. Po provedení zkoušky se vytvoří úplný MKP model průběhu zkoušky, kde jsou materiálové parametry podrobeny optimalizaci s optimalizačním cílem naměřené závislosti. Popisovaný optimalizační proces představuje složitý nelineární výpočet, výhodou postupu je však jeho konstrukční jednoduchost.

6 Variantní řešení přípravku

Zadavatel práce požaduje od zařízení mimo jiné nízkou náročnost provedení testu a snadno zpracovatelné výsledky, získané bezkontaktními měřicím systémem Aramis. S uvažováním těchto požadavků, byly pro praktickou část práce vybrány dvě varianty konstrukčního řešení přípravku. Prvním řešením je Zařízení využívající přitlačné síly pružin, druhým pak Zařízení využívající smykové napětí.

6.1 Zařízení využívající přitlačné síly pružin

6.1.1 Popis zařízení

Na základě dostupných informací o testovacím přípravku v literatuře [27] byla vyhotovena výrobní dokumentace, která byla upravena ve spolupráci s výrobním oddělením COMTES FHT pro možnost použití na konkrétním stroji. Náhled sestavy modelu zařízení a výkres vzorku byl vložen jako příloha č. 1. Konkrétní vyrobené zařízení společností zadavatele bylo zobrazeno na obrázku 45.



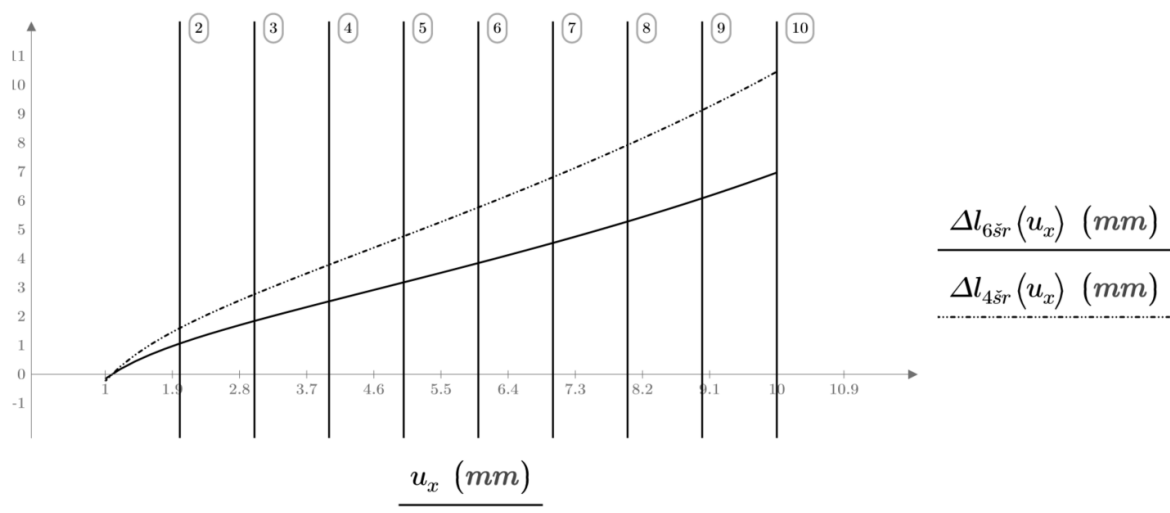
Obrázek 45 - Vyrobené zařízení, varianta 1

Zařízení se skládá z dvojice kontaktních plátů přímo dosedajících na plochu vzorku, které zajišťují přenos požadovaného kontaktního tlaku na vzorek. Skrze přitlačný plát je pomocí tlačných pružin vyvozena síla, kterou lze regulovat dotažením čtveřice šroubů M6. V jednom z dvojice kontaktních plátů byl vyroben oválný otvor pro možnost měření deformací vzorku v průběhu testu pomocí optické metody měření Aramis. Zkušební vzorek má tvar zabezpečující požadované rozložení napětí, byl usazen na obou stranách do dvojice čelistí umožňující upnout zařízení do požadovaného stroje.

Výpočet přitlačné síly

Pro výpočet potřebného stykového tlaku mezi kontaktními pláty a vzorkem byl použit upravený analytický výpočet uvedený v literatuře [28]. Výpočet vychází z materiálových dat, geometrie vzorku a požadované plastické deformace. Materiálová data byla určena hodnotou

tvářitelnosti a parametry zpevnění Swiftova modelu. Tento model je dán 3 parametry, které lze nalézt pomocí grafického hodnocení křivek napětí-deformace pro matematický model a experimentálně získaná data. V příloze č. 2 byly nalezeny tyto hodnoty uvedeným způsobem na diagramu standardní zkoušky tahem pro hlubokotažnou ocel DC01. Vlastní výpočet byl uveden v příloze č. 3 a byl rozšířen o výpočet potřebného zašroubování šroubů na přípravku, kde byly použity standardní nakupované tlačné pružiny. Výpočet byl proveden pro 2 konstrukční varianty s použitím 6 pružin a s použitím 4 pružin. Na obrázku 46 byl vykreslen graf nalezené závislosti mezi deformací konkrétního vzorku $u_x(mm)$ a stlačením pružin $\Delta l_{6\check{s}r}(mm)$; $\Delta l_{4\check{s}r}(mm)$ pro zajištění dostatečného kontaktního tlaku.



Obrázek 46 - Závislost deformace a předpětí přípravku

6.1.2 MKP model průběhu testu

Pro modelování průběhu zkoušky byl použit výpočtový program Abaqus/CAE 2017, který je používán ve společnosti zadavatele práce. Průběh zkoušky bude spojen s velkými materiálovými nelinearitami, proto byl použit explicitní algoritmus metody konečných prvků. Obecně je tento algoritmus právě pro simulaci technologických postupů doporučován.

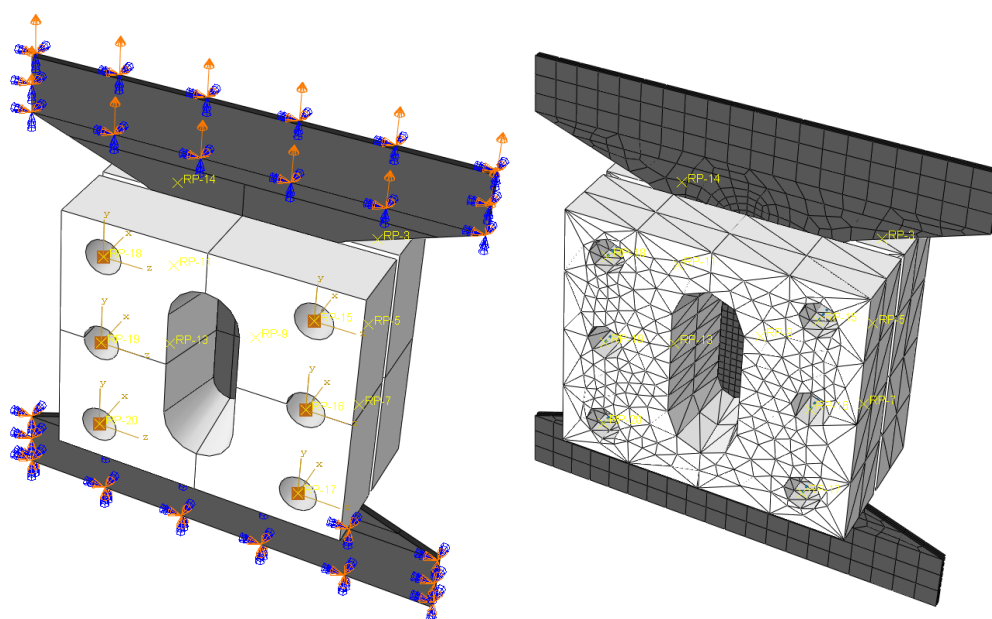
Popis MKP modelu

Pro modelování průběhu testu byla uvažována pouze exponovaná část vzorku, tím byla tuhost přídržných čelistí zanedbána. V MKP modelu také nebyl modelován přídržný plát s pružinami, pouze kontaktní pláty sepnuté 1D prvky typu axial. Mezi kontaktními příložkami a vzorkem byl definován kontakt s uvážením třecího součinitele $f = 0,1 [-]$. Tělesům příložek byl přiřazen lineárně pružný materiálový model určený konstantami $E = 210\,000 [MPa]$; $\mu = 0,3 [-]$. Materiálu tělesa zkušební vzorku byl definován modifikovaný model Lemaitre and Chaboche, viz kapitola 2.2.4 Konkrétní matematické modely zpevnění. Parametry tohoto modelu, uvedené v tabulce 3, byly odečteny z odborné literatury pro hlubokotažnou ocel DC01.

Tabulka 3 - Použité parametry modelu zpevnění

	Parametr	Hodnota	Jednotka
Isotropická složka	R_{∞}	6,26e7	[Pa]
	b	25	[–]
Kinematická složka	C_1	7,2e9	[Pa]
	γ_1	158	[–]

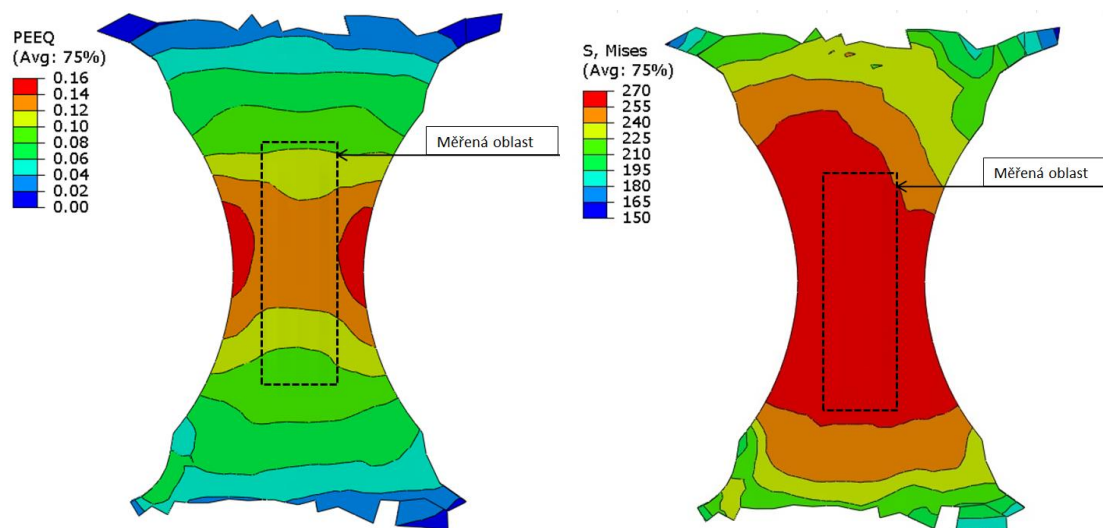
Simulace byla rozdělena na dva časové kroky, v prvním byl vzorek podroben tahu, v druhém tlaku. To bylo provedeno nastavením příčných okrajových podmínek v jednotlivých krocích, kdy pro popisovanou simulaci byla zvolena deformační amplituda 2 [mm]. Uvedené bylo zobrazeno na obrázku 47, kde byla pro spodní část stanovena podmínka fixace ve všech směrech po celý průběh testu. Pro horní část byla definována podmínka posuvu o +2 [mm] v prvním kroku, respektive –2 [mm] v druhém kroku. Na modelu sestavy byla vygenerována síť konečných prvků se zahuštěním prvků v měřené oblasti. Ve vlastnostech 1D spojovacích prvků byla definována elasticita, respektive tuhost korespondující s tuhostí použitých pružin $k = 200[N/mm]$. Dále bylo těmto prvkům stanoveno předepjetí, které bylo vypočteno na základě požadované deformace $\Delta l(2mm) = 1,1 [mm]$ v příloze č. 3.



Obrázek 47 - MKP model sestavy (vlevo) a síť prvků (vpravo) zařízení varianta 1

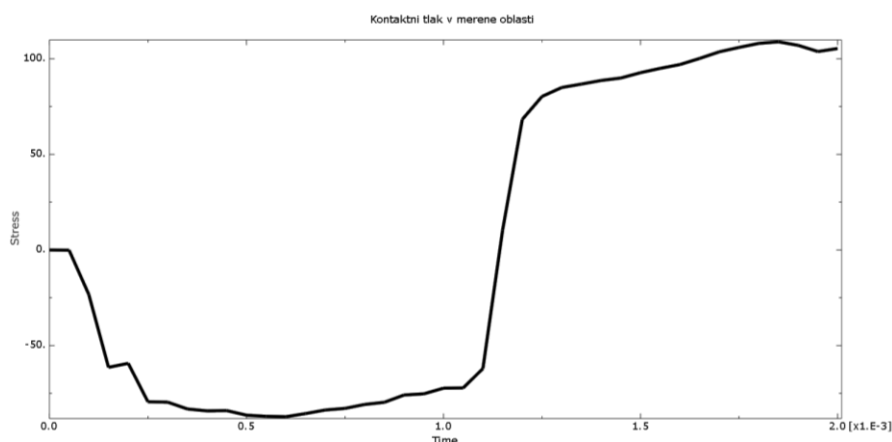
Výsledky simulace

Na obrázku 48 bylo zobrazeno pole výsledků ekvivalentní plastické deformace vzorku a pole redukovaného napětí podle hypotézy von Mises. Rozložení těchto výsledků je v měřitelné oblasti relativně rovnoměrné, není třeba věnovat pozornost přesné lokalizaci umístění vyhodnocovacích bodů.



Obrázek 48 - Pole ekvivalentní pl. def. [%] (vlevo), pole napětí Von Mises [MPa] (vpravo)

Významným vlivem na průběh testování, kterému bylo nutné věnovat pozornost, byla míra ovlivnění výsledků příložkami. Jak je zřejmé z obrázku 49, kde byl zobrazen průběh průměrné hodnoty kontaktního tlaku v měřené oblasti v závislosti na čase. K ovlivnění hodnot napětí dochází pouze ve fázi tlakového zatěžování, k nejvýraznějšímu pak dochází na samotném konci zkoušky.



Obrázek 49 - Vývoj kontaktního tlaku [MPa] v čase

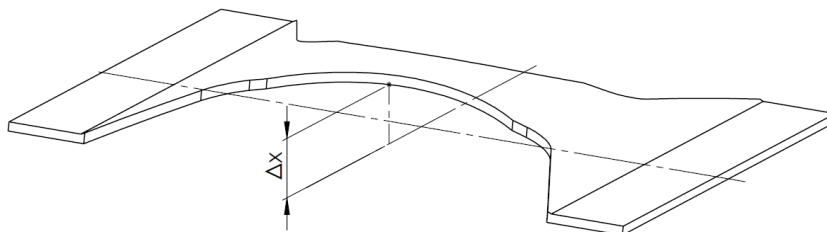
6.1.3 Význam poškozujících vlivů

Pro zkoušku, provedenou pomocí zařízení využívající přitlačné síly pružin, je třeba zabývat se vlivy, které mohou mít za následek ovlivnění testu, tedy nevěrohodné výsledky. Vysoký význam lze pro tento přípravek přiložit vlivům plynoucím z vlastností vzorku a nastavení přípravku.

Prohnutý vzorek

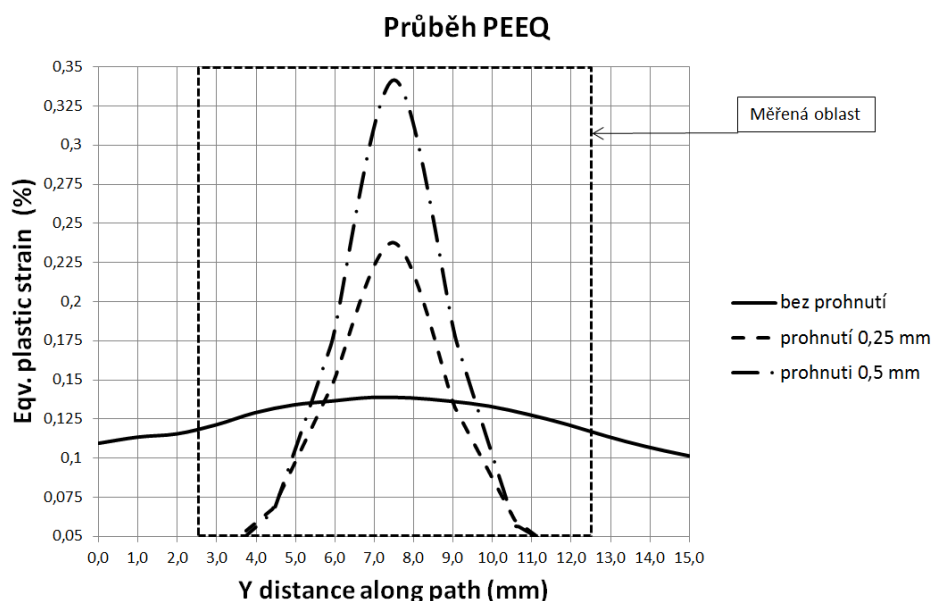
Významný vliv na průběh zkoušky může mít nepravidelnost vzorku. Jedna z možností toho, jak by mohl být vzorek odchýlen od ideálního tvaru, je prohnutí vzorku v příčném směru. Na obrázku 50 bylo vyznačeno toto prohnutí kótou Δx . Reálně může takovéto poškození

vzniknout jako vada při manipulaci se zkušební vzorkem, nebo jako vada polotovaru výroby. Ve firmě COMTES FHT je výrobě, polotovarům i manipulaci se zkušebními vzorky, přikládán náležitý důraz, a proto lze předpokládat, že velikost této hodnoty může být maximálně 0,5 [mm].



Obrázek 50 - Zobrazení poškozeného vzorku prohnutím

Pro posouzení vlivu prohnutí vzorku na zkoušku byla provedena série MKP simulací na poškozených modelech různými hodnotami deformace Δx . Vzhledem ke složitosti tvaru vzorků musela být upravena síť konečných prvků a simulace byla náročnější, proto byly provedeny pouze 3 výpočty. Tento počet ale dostačuje k vytvoření představy o tendenci vlivu tohoto poškození na vyhodnocení zkoušky. Při simulacích byl sledován průběh ekvivalentní plastické deformace prvků středové úsečky měřené oblasti, při závěrečné fázi zatěžování. Tyto průběhy byly pro hodnoty prohnutí vyneseny do grafu na obrázku 51 s vyznačením měřené oblasti.



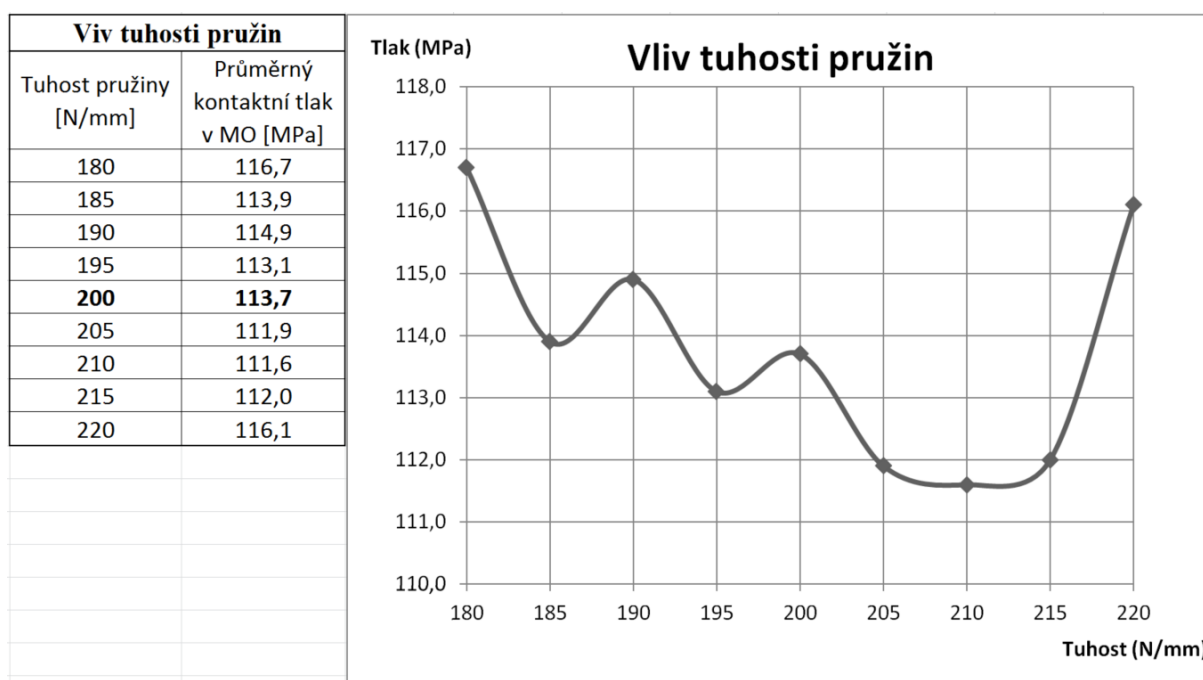
Obrázek 51 - Průběh ekvivalentní plastické deformace [%]

Z průběhů ekvivalentní plastické deformace je patrné, že se vzrůstajícím poškozením vzorku roste nerovnoměrnost rozložení plastické deformace a klesá tak věrohodnost získaných výsledků. Zkouška na vzorku s prohnutím vyšším než 0,15 [mm] se stává těžko měřitelnou a je zatížena chybou. Při reálném průběhu zkoušky je tedy nutné zajistit příslušnou rovinnost

vzorku. To lze provést kontrolou vzorku například jeho usazením do čelistí a vizuální kontrolou, nebo obecněji jednou ze zkoušek rovinnosti.

Nesprávně stanovená tuhost pružin

Tuhost pružiny byla v analytickém výpočtu stanovena na základě rozměrových a materiálových parametrů. Prakticky je především materiálový parametr Youngův modul pružnosti ve smyku zatížen značnou nepřesností. Pro průběh zkoušky má tedy význam se zabývat dosahovanými výsledky s přihlédnutím k odchylkám v této hodnotě. Pro posouzení vlivu tuhosti pružin byla provedena série MKP simulací s nastavením různých hodnot tuhosti 1D prvků spojujících příložky. Při každé simulaci byla zaznamenána hodnota tlakového napětí v měřené oblasti, vzniklá od kontaktního tlaku příložek. Tyto výsledky byly zobrazeny ve formě tabulky a grafu na obrázku 52.



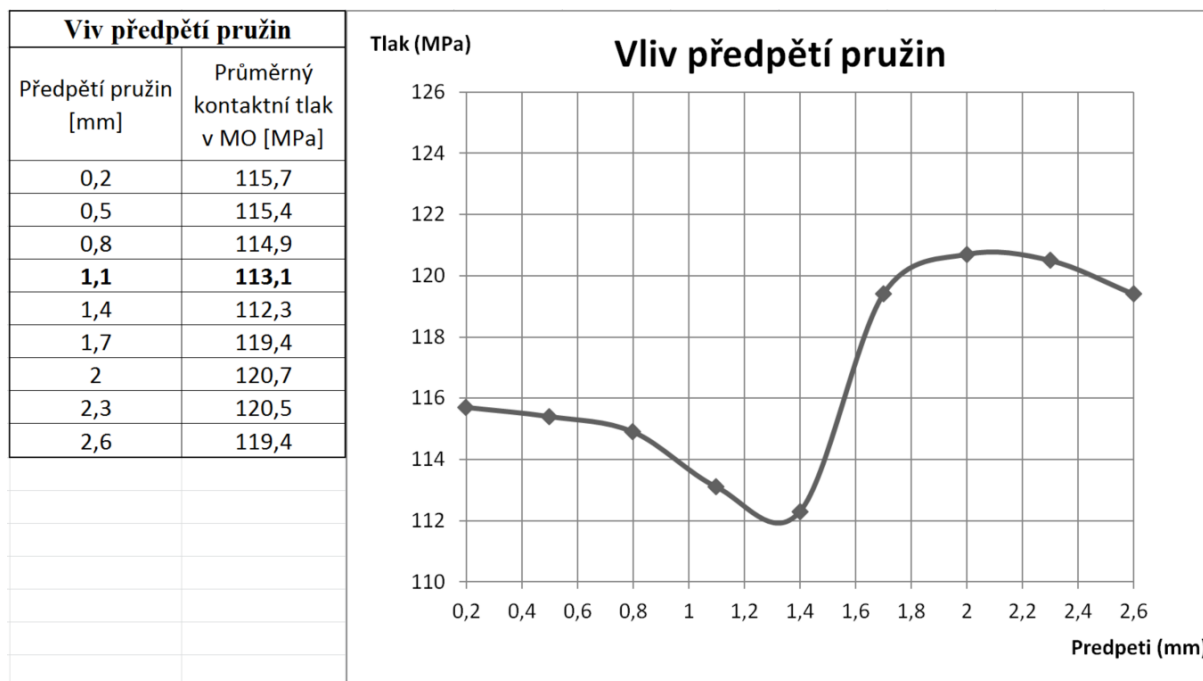
Obrázek 52 - Vliv tuhosti pružin na tlak

Ze zjištěných závislostí lze usuzovat, že nedochází k významnému ovlivnění testu při odchylce v hodnotě tuhosti menší než 15 [N/mm]. Proto lze konstatovat, že při provádění zkoušky Bauschingerova efektu je třeba věnovat pozornost používaným pružinám. Prakticky je vhodné pružiny nakupovat u ověřených výrobců, kteří zabezpečí dodržení materiálových vlastností drátu, není tak nutné zvláště se zabývat experimentálním stanovením tuhosti pružin.

Nesprávně nastavené předpětí pružin

Potřebné předpětí pružin bylo stanoveno na základě analytického výpočtu, viz příloha č 3. Tento výpočet vycházel z několika zjednodušení, například rovnoměrného rozložení napětí a Swiftova modelu zpevnění. Pro posouzení skutečného vlivu nastavení předpětí pružin je třeba se zabývat mírou ovlivnění průběhu testu těmito zjednodušeními. Nesprávně nastavené předpětí pružin tedy nemusí znamenat pouze chybu v nastavení $\Delta l_{6\dot{s}r}$ nebo $\Delta l_{4\dot{s}r}$ (v diagramu

na obrázku 46), ale vystihuje celkové ovlivnění zjednodušením analytického výpočtu v nastavení pružin. Pro posouzení vlivu nesprávného nastavení předpětí pružin byla provedena série MKP simulací s nastavením různých hodnot předpětí 1D prvků spojujících příložky. Při jednotlivých výpočtech byla opět sledována hodnota tlakového napětí v měřené oblasti, vzniklá od kontaktního tlaku příložek. Tyto výsledky byly zobrazeny ve formě tabulky a grafu na obrázku 53.



Obrázek 53 - Vliv nastavení předpětí

Ze zjištěné závislosti lze usuzovat, že nedochází k významnému ovlivnění testu, při odchylce v hodnotě předpětí směrem do nižších hodnot. Je ale patrný značný nárůst tlaku a tedy míry ovlivnění, při odchýlení hodnoty předpětí ve smyslu vyššího předpětí. Je zřejmé, že při odchylce nastavení předpětí $\Delta l \geq +0,4 [mm]$ což představuje 36 [%] předepínací vzdálenosti, dochází k významnému ovlivnění a testování je zatíženo chybou. Lze konstatovat, že při provádění zkoušky Bauschingerova efektu je třeba věnovat pozornost nastavení pružin. Při praktickém provádění testu je vhodné dbát nepřekročení stanovených hodnot předpětí. Pro usnadnění tohoto nastavování pro různé materiály, je vhodné používat několik sérií pružin s různou počáteční délkou. Proto, aby se nastavovaná vzdálenost pohybovala ve snadno měřitelných hodnotách. V případě reálného testování materiálu DC01, pro něž byly stanoveny předepínací vzdálenosti, tedy není vhodné použití konkrétních pružin použitých pro simulaci, protože se nastavovaná vzdálenost pohybuje v řádech 0,1 [mm], což představuje v tomto případě těžko měřitelné hodnoty.

6.1.4 Vyplyvající vlastnosti přípravku

Z vlastností vycházejících z konstrukce a ze zjištěných závislostí poškozujících vlivů na průběh zkoušky prováděné na tomto zařízení byly stanoveny klíčové vlastnosti pro použití přípravku ve společnosti COMTES FHT. Tyto vlastnosti byly zaznamenány do tabulky 4.

Tabulka 4 - Vyplývající vlastnosti přípravku

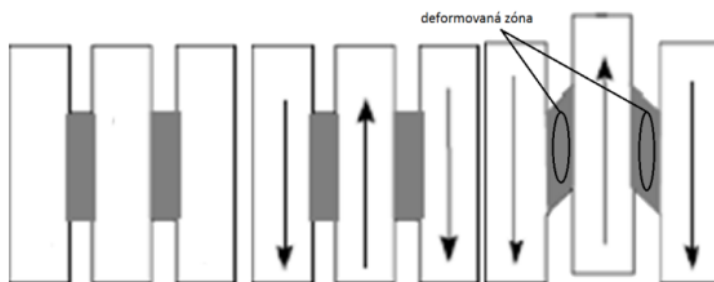
+	Rozložení deformace je rovnoměrné
-	Pro provedení zkoušky je nutné znát materiálové parametry, popřípadě je nutné provést a vyhodnotit minimálně 3 statické zkoušky v tahu
-	Je nutné provést analytický výpočet pro stanovení předpětí pružin
-	Pro každý vzorek je nutné přesné nastavení předpětí pružin
-	Náchylnost k přetažení pružin
+	Není nutné experimentálně ověřovat tuhost pružin
-	Je vhodné opatřit zařízení několika sadami pružin a šroubů
-	Kontrola rovinnosti každého vzorku

6.2 Zařízení využívající smykové napětí

Jak bylo popsáno, zkoušku Bauschingerova efektu lze provést vyvozením cyklického střídavého smykového napětí. Teoreticky popsané chování při normálovém napětí je podobné jako při smykovém napětí. Tato podobnost je ale pouze předpokládaná a je těžko prokazatelná, jedná se o jiný stav napjatosti.

6.2.1 Popis zařízení

V literatuře [29] se autoři zabývali návrhem testu pro stanovení cyklického chování materiálu s použitím zařízení využívající smykové napětí. Jejich práce vycházela z již dříve známého řešení. To se ale významněji neprosadilo, protože měření bylo s použitím konvenčních měřidel obtížné. Zařízení bylo schematicky zobrazeno na obrázku 54, s vyznačením deformované zóny v jednotlivých fázích testu.



Obrázek 54 - Schematické zobrazení původního testovacího zařízení [29]

Autoři provedli optimalizaci rozměrových parametrů zařízení a zkušební vzorku tak, aby dosáhli především rovnoměrného rozložení smykového napětí v měřené oblasti. Optimalizovanými rozměrovými parametry vzorku byly především délka, šířka a rádius zaoblení drážky vzorku. Na základě dostupných informací o parametrech testovacího zařízení a vzorku byla vyhotovena výrobní dokumentace, která byla upravena ve spolupráci s výrobním oddělením COMTES FHT pro možnost použití na konkrétním stroji. Konkrétně byly například upraveny upínací prvky vzhledem k strojům, na kterých bude zařízení provozováno. Náhled sestavy modelu zařízení a výkres vzorku byl vložen jako příloha

práce č. 4. V rámci diplomové práce byl přípravek firmou zadavatele vyroben, zařízení bylo zobrazeno na obrázku 55.



Obrázek 55 - Vyrobené zařízení, varianta 2

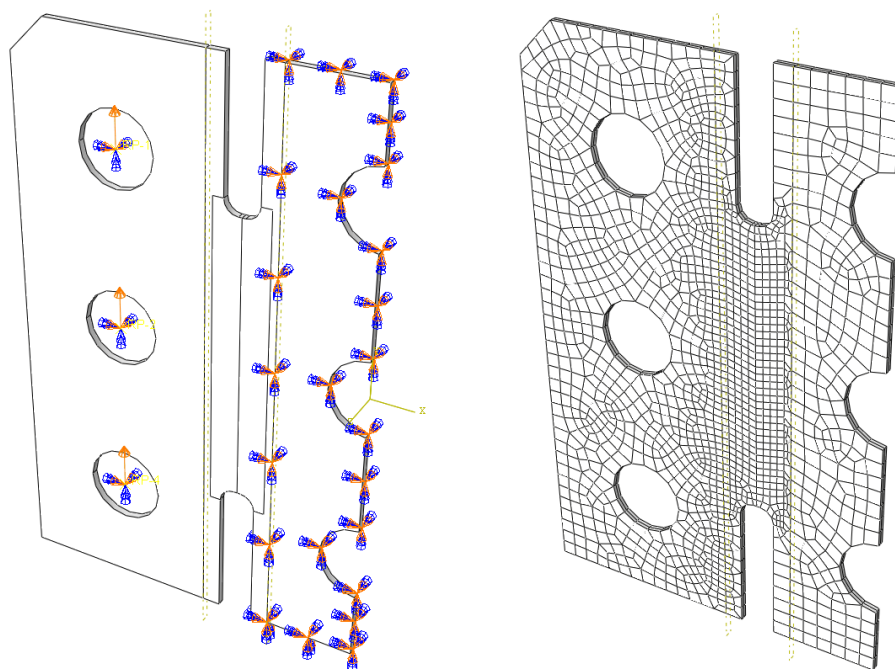
Zařízení se skládá ze tří částí pevné čelisti, posuvné čelisti a příložek. Pevné čelisti jsou upnuty do stroje a nebudou se pohybovat. Posuvná čelist bude vykovávat posuv, kterým bude vyvozeno převládající smykové zatížení v deformovaných zónách podle obrázku 54. Vzorek plechu bude upnutý na obě tyto čelisti pomocí příložek,

6.2.2 MKP model průběhu tesu

Pro modelování průběhu zkoušky byl použit explicitní algoritmus metody konečných prvků. S přihlédnutím k vysoké tuhosti dílů upínajících vzorek a jejich zatížení, byla pro modelování zkoušky poddajnost těchto součástí zanedbána. Model průběhu zkoušky byl proto zjednodušen pouze na zatížení vzorku.

Popis MKP modelu

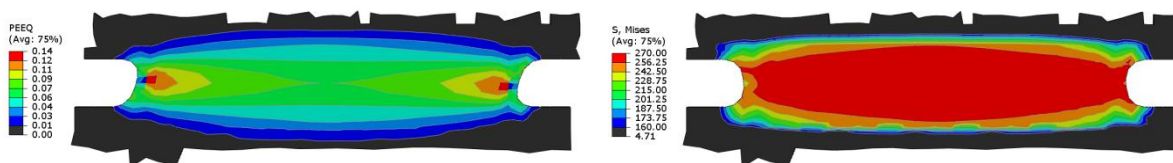
Vzhledem k symetrii geometrie i zatížení byla uvažována pouze polovina vzorku s definováním patřičné okrajové podmínky. Materiálu tělesa zkušební vzorku byl definován modifikovaný model Lemaitre and Chaboche, viz kapitola 2.2.4 Konkrétní matematické modely zpevnění. Parametry tohoto modelu, uvedené v tabulce 3, byly odečteny z odborné literatury pro hlubokotažnou ocel DC01. Simulace byla rozdělena na dva časové kroky, v prvním byl vzorek podroben kladnému tahovému zatížení, v druhém tlakovému zatížení. To bylo provedeno nastavením patřičných okrajových podmínek v jednotlivých krocích. Pro popisovanou simulaci byla zvolena deformační amplituda ± 2 [mm]. Model vzorku byl rozdělen na statickou (pravou) část, pohyblivou (levou) část a deformační zónu uprostřed. Uvedené bylo zobrazeno na obrázku 56, kde byla pro pravou část vzorku stanovena podmínka fixace ve všech směrech po celý průběh testu. Pro levou část byla definována podmínka posuvu 2 [mm] v prvním kroku, respektive -2 [mm] v druhém kroku. Na modelu vzorku byla vygenerována síť konečných prvků se zahuštěním prvků v měřené oblasti, zobrazená na obrázku 56.



Obrázek 56 - MKP model sestavy (vlevo) a síť prvků (vpravo) zařízení varianta 2

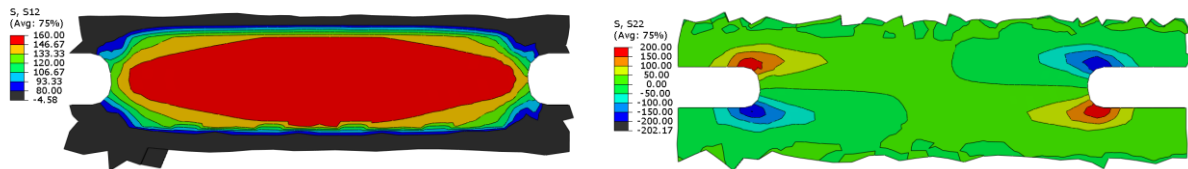
Výsledky simulace

Na obrázku 57 bylo zobrazeno pole ekvivalentního napětí von Mises a pole ekvivalentní plastické deformace pro zvolené deformační zatížení vertikální posuv čelisti 2 [mm]. V deformační zóně vzorku byla vyvolána ekvivalentní plastická deformace 0,09 – 0,14 [%] a redukované napětí podle hypotézy von Mises 240 – 250 [MPa].



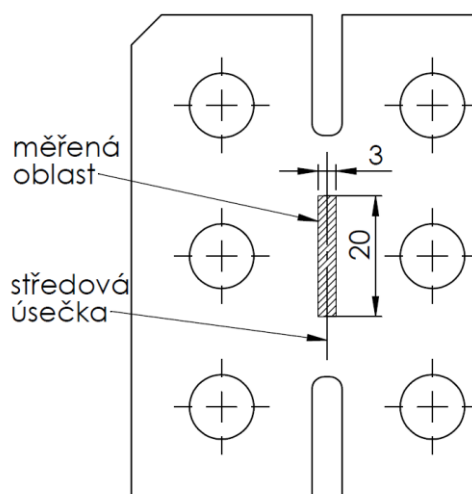
Obrázek 57 - Pole ekvivalentní pl. def. [%] (vlevo), pole napětí Von Mises [MPa] (vpravo)

Jak bylo popsáno v teoretické části, jedním z hlavních nedostatků této metody je kombinované zatížení měřené oblasti. Oblast je zatížena nejen smykovým zatížením, ale i tahovým, proto výsledná deformace není dána pouze smykovým namáháním, ale kombinovaným. Tato problematika se řeší vyhodnocováním jen části deformované oblasti. Při zmenšení oblasti klesá věrohodnost dosahovaných výsledků. Na obrázku 58 bylo zobrazeno pole napětí v měřené oblasti. Na první části bylo zobrazeno pouze smykové zatížení a na druhé pouze tahové. Je zřejmé, že největší vliv má tato problematika v okolí drážek.



Obrázek 58 - Pole napětí čistého smyku [MPa] (vlevo) a čistého tahu [MPa] (vpravo)

S ohledem na zjištěné napěťové pole, byla zvolena měřená oblast pro tuto zkoušku podle obrázku 59. V této oblasti dochází k relativně rovnoměrnému rozložení smykového napětí a ekvivalentní plastické deformace, zároveň tato oblast není zvláště zatížena tahovou složkou napětí.



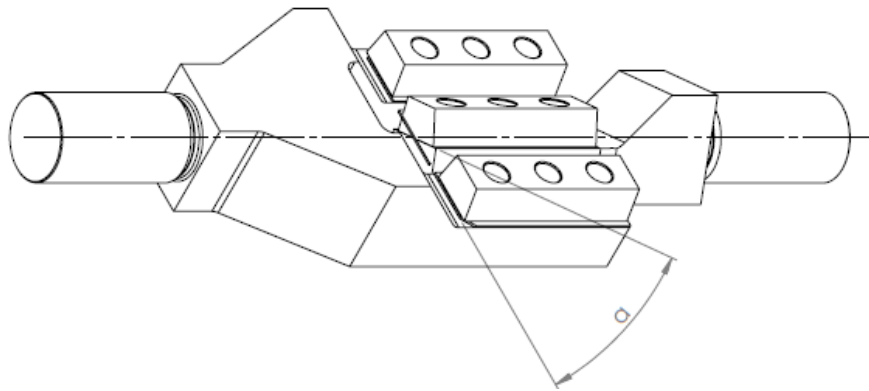
Obrázek 59 - Vyznačení měřené oblasti na vzorku

6.2.3 Význam poškozujících vlivů

Pro zkoušku, provedenou pomocí zařízení využívající smykové napětí, byla opět věnována pozornost vlivům, které mohou mít za následek ovlivnění testu. Protože přípravek je jednoduchý, byl přikládán význam především vlivům plynoucím z použití přípravku.

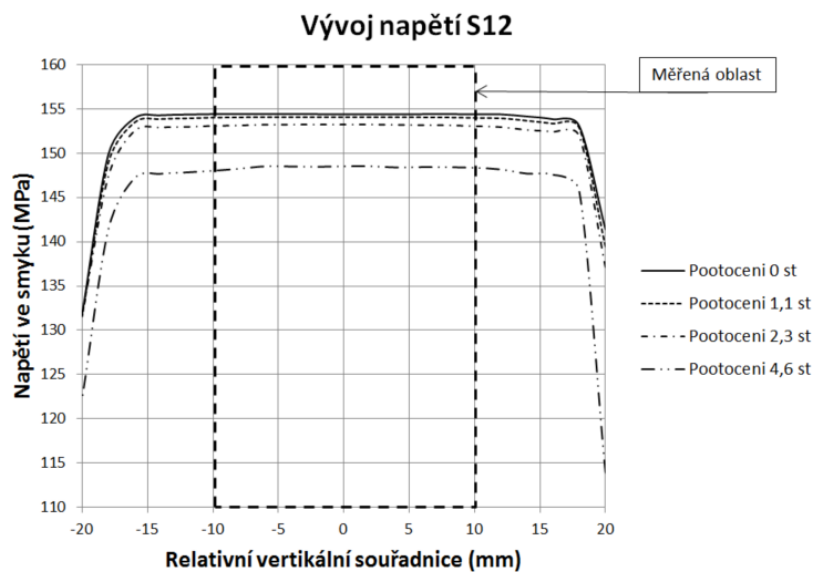
Odchylka v nastavení rovinnosti čelistí přípravku

Jako významný vliv, který může ovlivnit průběh zkoušky, lze uvažovat nastavení rovinnosti čelistí přípravku před vlastním upnutím vzorku. Při nedodržení této polohy může být do vzorku vneseno nežádoucí neuvažované předpětí. Odchylka polohy může být způsobena nesprávným založením čelistí přípravku do stroje. Tato chyba by se projevila jako systematická chyba, znehodnocující výsledky celé pro série zkoušek. Odchylka nastavení čelistí byla znázorněna na obrázku 60.



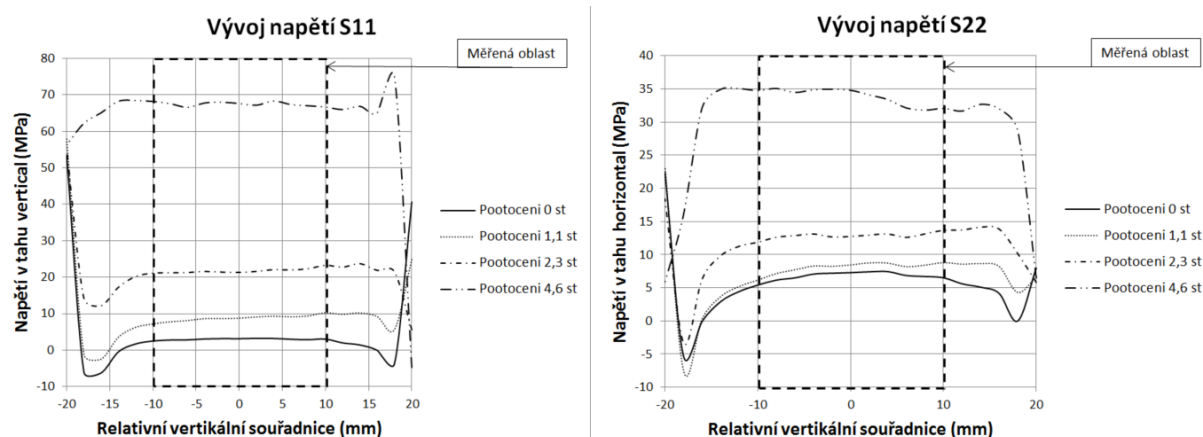
Obrázek 60 - Schéma odchylky v nastavení rovinnosti čelistí

Pro posouzení náchylnosti zkoušky provedené na tomto zařízení vůči této chybě byla provedena série MKP simulací s definováním vzájemného pootočení čelistí. Pro velikost úhlu pootočení čelistí byla stanovena série hodnot $\alpha = \{0,02; 0,04; 0,08\}[\text{rad}]$, respektive $\alpha = \{1,1; 2,3; 4,6\}[\text{°}]$. Tyto hodnoty byly zvoleny s ohledem na velikost zařízení, kdy maximální hodnota $\alpha = 4,6 [\text{°}]$ se projeví jako odchylka souběžných hran jednotlivých čelistí $\Delta l_{rad} = 1,2 [\text{mm}]$. Pro jednotlivé simulace byly zaznamenány výsledky rozložení napětí po délce středové úsečky měřené oblasti. Rozložení smykového napětí (S12) po délce úsečky bylo zobrazeno na obrázku 61.



Obrázek 61 - Smykové napětí S12 [MPa] po délce středové úsečky

Ze zjištěných závislostí je patrné, že ani při nejvyšším modelované pootočení čelistí nedochází ke koncentraci smykového napětí v měřené oblasti. Při těchto simulacích byly sledovány průběhy nejen smykového napětí, ale i průběhy tahové složky napětí a to v axiálním (S11) i radiálním (S22) směru, to bylo zobrazeno na obrázku 62.

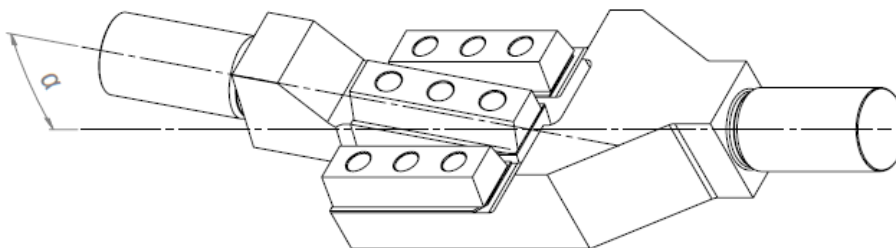


Obrázek 62 - Tahové napětí S11 [MPa]; S22 [MPa] po délce středové úsečky

Z pozorovaných závislostí tahových složek napětí je patrný nárůst tohoto namáhání s velikostí úhlu pootočení čelistí. Pro náležitou simulaci Bauschingerova efektu je v tomto případě silně nežádoucí zatížení měřené oblasti přídavným namáháním. Pro náležitý průběh zkoušky je tedy nutné důrazně dbát nastavení rovinnosti čelistí před upnutím vzorku. Prakticky to lze provést upnutím pomocného tělesa vysoké tuhosti do závitů čelistí před prováděním zkoušky. V rámci diplomové práce bylo navrženo jednoduché pomocné těleso pro srovnání rovinnosti, jeho technický výkres byl vložen jako příloha práce č. 5.

Odchylka v rovnoběžnosti upínacích čelistí

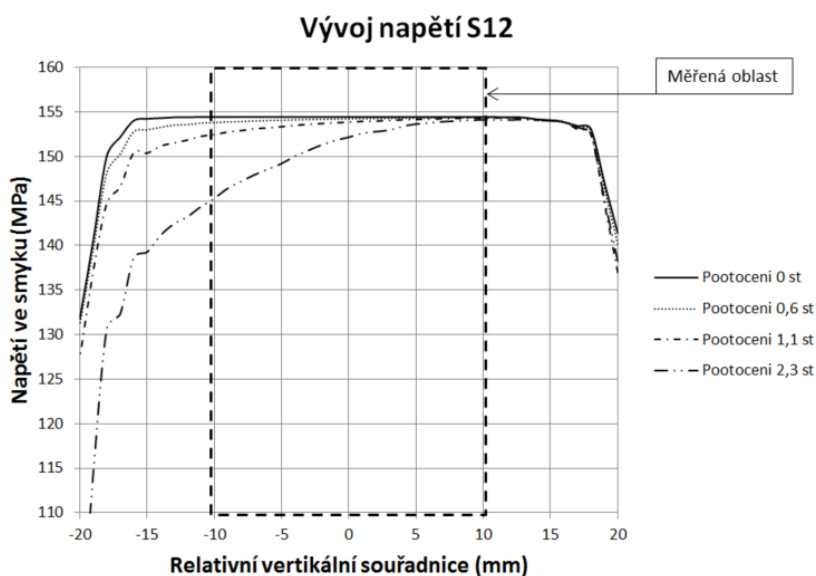
Jako další vliv, který může ovlivnit průběh zkoušky, byla uvažována odchylka v rovnoběžnosti upínacích čelistí přípravku. Tuto odchylku zobrazuje obrázek 63, kde je vyznačený úhel vychýlení. Tato odchylka může být způsobena chybou stroje, velikostí vůle ve vedení jeho upínacích čelistí, může se projevit vnesením nežádoucí nevažované předpětí do vzorku. Ve společnosti COMTES FHT jsou zkušební stroje, na kterých budou probíhat zkoušky, podrobovány pravidelným kontrolám. Proto lze velikost této odchylky označit za velice malou.



Obrázek 63 - Schéma odchylky v nastavení rovnoběžnosti upínacích čelistí

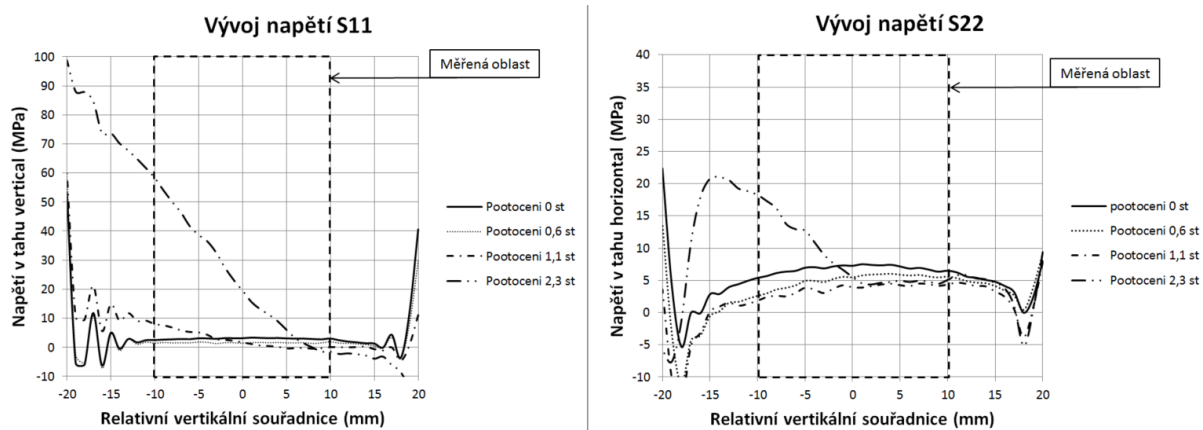
Pro posouzení náchylnosti zkoušky provedené na tomto zařízení vůči této chybě byla provedena série MKP simulací s definováním pootočení pohyblivé části přípravku. Pro velikost úhlu pootočení čelistí byla uvažována série hodnot úhlu pootočení $\alpha = \{0,01; 0,02; 0,04\}$ [rad], respektive $\alpha = \{0,6; 1,1; 2,3\}$ [°]. Tyto hodnoty byly stanoveny s ohledem na velikost zařízení, kdy maximální hodnota $\alpha = 2,3$ [°] se projevuje jako odchylka

souběžných hran $\Delta l_{rad} = 1,6 [mm]$. Pro jednotlivé simulace byly zaznamenány výsledky rozložení napětí po délce středové úsečky měřené oblasti. Rozložení smykového napětí (S12) po délce úsečky bylo pro jednotlivé úhly pootočení zobrazeno na obrázku 64.



Obrázek 64 - Smykové napětí S12 [MPa] po délce středové úsečky

Ze zjištěné závislosti smykového napětí na pootočení je zřejmý pokles napětí ve spodní polovině měřené oblasti s rostoucí velikostí úhlu pootočení. Značná nerovnoměrnost smykového napětí byla sledována pouze pro hodnoty úhlu $\alpha \geq 1 [^\circ]$. Vzhledem k reálným hodnotám úhlu α lze ale považovat tyto jeho hodnoty za extrémní. Při těchto simulacích byly opět sledovány průběhy i průběhy tahových složek napětí v axiálním (S11) i radiálním (S22) směru, bylo tak zobrazeno na obrázku 65.



Obrázek 65 - Tahové napětí S11 [MPa]; S22 [MPa] po délce středové úsečky

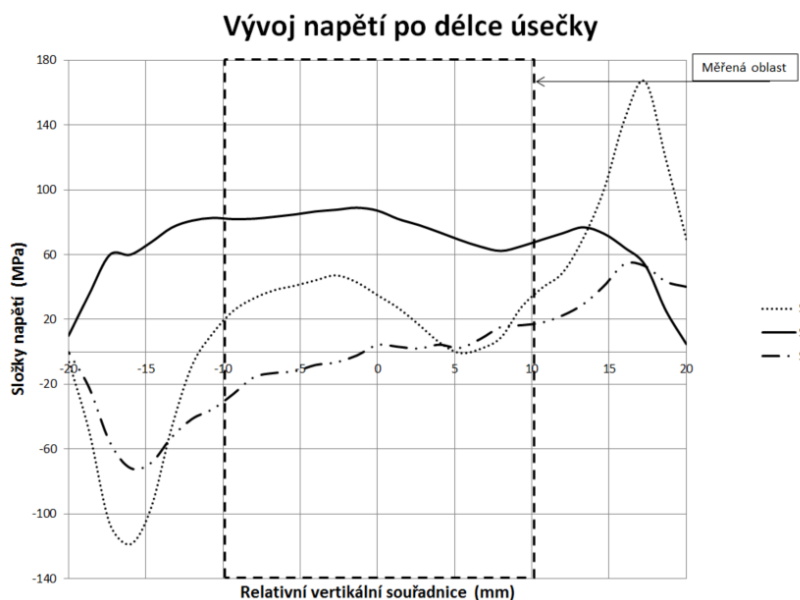
Z těchto výsledků je patrný významný nárůst přídatných tahových zatížení v měřené oblasti, opět pouze pro hodnoty pro hodnoty úhlu $\alpha \geq 1 [^\circ]$. Jde tedy o potvrzení, že k ovlivnění testu prakticky nedochází pro hodnoty úhlu $\alpha < 1 [^\circ]$. Pro náležitý průběh zkoušky Bauschingerova efektu je nutné zajistit, aby odchylka vedení upínacích čelistí stroje byla ve stanoveném

rozsahu. Společnost COMTES FHT je vybavena certifikovanou zkušební laboratoří, proto lze tyto hodnoty úhlu natočení na uvažovaných strojích zaručit komplexně. Není tedy nutné se zvláště zabývat kontrolou konkrétního stroje před provedením této zkoušky.

Uvážení vlivu síly šroubů na vzorek a tuhosti příložek

Dalším vlivem, který může vnést do testování chyby, je upnutí vzorku na čelist. Konkrétně je to velikost utahovacího momentu šroubů, upevňující příložku se vzorkem k samotné čelisti. Velikost tohoto momentu může ovlivnit rozložení namáhání ve vzorku a tím změnit napjatost v měřené oblasti nežádoucím přídavným zatížením. Pro stanovení potřebného utahovacího momentu byl v příloze č. 6 proveden výpočet předepnutého šroubového spoje. Tento výpočet vycházel z maximální síly, kterou musí šroub přenést $F_T = 5950 [N]$. Ta byla odečtena jako maximální síla na čelisti z MKP simulace řízené deformací. Výpočtem byl stanoven potřebný utahovací moment šroubu jako $M_U = 70,4 [N.m]$ a předepínací síla šroubu $F_p = 37,7 [kN]$. Výpočet byl proveden na pohyblivé čelisti, kde stanovenou sílu přenáší 3 šrouby M10. Prakticky je ale velikost této síly, respektive momentu zatížena značnou nejednoznačností, to je dáno především aproximací třecích součinitelů.

Pro diskusi stavu, kdy je šroubový spoj nedostatečně předepnut, byla vytvořena MKP simulace průběhu zkoušky se zatížením zkušební vzorku modelem jednoho tělesa, jehož tvar vychází z tvaru čelisti a šroubů. Tímto postupem lze modelovat upnutí vzorku nedostatečně předepnutými šrouby, kdy je zatížení přenášeno tvarem šroubu nikoli jeho předepjetím. Na obrázku 66 bylo zobrazeno rozložení jednotlivých složek napětí po délce středové úsečky měřené oblasti.

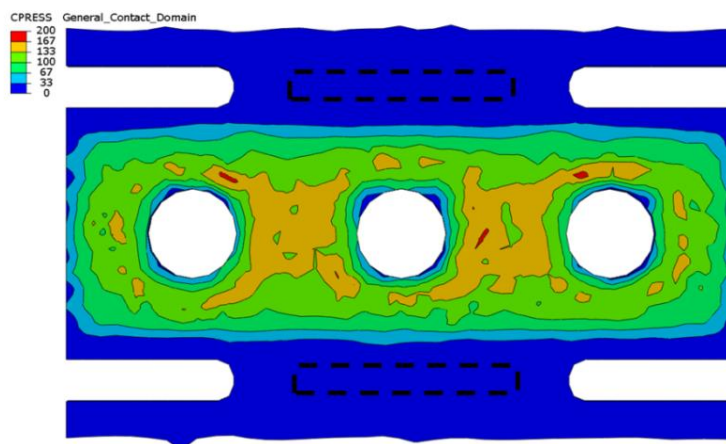


Obrázek 66 - Rozložení složek napětí S_{11} ; S_{12} ; S_{22} [MPa] po délce středové úsečky

Z rozložení složek napětí je patrná značná nerovnoměrnost rozložení čistě smykového napětí (S_{12}). Rozložení tahových složek napětí (S_{11} ; S_{22}) značí, zatížení měřené oblasti nežádoucím přídavným namáháním. Takto zatížená oblast nepostihuje požadovaný napěťový

stav pro zkoušku Bauschingerova efektu. Prakticky je tedy nutné zajistit utažení šroubů minimálním utahovacím momentem.

Pro uvážení stavu překročení doporučeného utahovacího momentu byla provedena série MKP simulací s variací zátěžné síly od šroubů na příložku $F_1 = \{37,7; 50; 60\}$ [kN]. Při jednotlivých výpočtech byla sledována pole kontaktního tlaku na vzorku s důrazem na ovlivnění měřené oblasti. Tato simulace byla provedena pouze staticky, bez zátěžného cyklu zkoušky. Pro posouzení rozložení tlaku mezi součástmi tak lze provést. Na obrázku 67 bylo zobrazeno pole kontaktního tlaku při zatížení příložky silou od šroubů $F_1 = 60$ [kN].



Obrázek 67 - Pole kontaktního tlaku [MPa]

Z rozložení kontaktního tlaku je patrné, že vzniklé namáhání není lokalizováno uvnitř měřených oblastí, a tedy nedochází k jejich ovlivnění přidavným zatížením. A to ani při navýšení síly šroubů, respektive překročení utahovacího momentu. Lze konstatovat, že překročení doporučeného utahovacího momentu nezatěžuje výsledky chybovostí.

6.2.4 Vyplyvající vlastnosti přípravku

Z vlastností vycházejících z konstrukce a ze zjištěných závislostí poškozujících vlivů na průběh zkoušky prováděné na tomto zařízení byly stanoveny klíčové vlastnosti pro použití přípravku ve společnosti COMTES FHT. Tyto vlastnosti byly zaznamenány do tabulky 5.

Tabulka 5 - Vyplyvající vlastnosti přípravku

-	Je sledováno chování při jiném zatížení
-	Měřená oblast je z principu zatížena přidavným namáháním
-	Měřená oblast není přesně lokalizovaná
+	Nastavení přípravku je jednoduché
+	Nastavení přípravku je možné provádět pro sérii vzorků
+	Není nutné provádět analytické výpočty nastavení
+	Pro provedení zkoušky není nutné znát materiálové parametry
-	Zkoušku je nutné provádět pouze na certifikovaných strojích
-	Je nutné zajistit minimální utahovací moment šroubů
+	Není nutné striktně dodržovat maximum předepsaného utahovacího momentu

7 Provedení zkoušky

7.1 Výběr vhodné varianty řešení přípravku

Pro kvalifikovaný výběr řešení přípravku pro zkoušku Bauschingerova efektu bylo nutné určit sledovaná kritéria jednotlivých variant. Hodnocením těchto kritérií lze pak porovnat vhodnost vybrané varianty jako celku. Přípravek bude provozován ve specializované laboratoři, kde bylo nutné stanovení specifických kritérií. Klíčová kritéria hodnocení právě pro společnost COMTES FHT byla určena na základě předpokládaných podmínek provozování přípravku. Tato kritéria byla rozdělena do 4 oblastí, pro každé kritérium byla stanovena váha reprezentující jeho významnost.

Kritéria pro zavedení zařízení, představují jednorázové náklady

- K1 – Složitost výroby zařízení (možnost výroby vlastními kapacitami); váha 3
- K2 – Nákladnost výroby zařízení (výrobní čas); váha 3
- K3 – Náklady nakupovaných komponent; váha 2
- K4 – Náklady na výrobu dalšího přídavného zařízení; váha 2
- K5 – Nároky na skladovatelnost zařízení; váha 1
- K6 – Nároky na skladování (zabezpečení teploty, vlhkosti ...); váha 1

Kritéria při přípravě na sérii testování, představují opakované náklady

- K7 – Náročnost výpočtu nastavení přípravku; váha 4
- K8 – Náročnost výpočtu nastavení stroje; váha 4
- K9 – Náročnost ustavení přípravku do stroje; váha 6
- K10 – Náročnost kontroly ustavení zařízení ve stroji; váha 4
- K11 – Náročnost kontroly nastavení zařízení; váha 3

Kritéria při provádění zkoušky, představují opakované náklady

- K12 – Složitost výroby vzorku (možnost výroby vlastními kapacitami); váha 8
- K13 – Nákladnost výroby vzorku (výrobní čas); váha 8
- K14 – Náročnost kontroly vzorku; váha 6
- K15 – Náročnost přípravy vzorku před zkouškou (označení kontrolních bodů); váha 7
- K16 – Náročnost upnutí vzorku; váha 7
- K17 – Náročnost nastavení zařízení; váha 7
- K18 – Složitost vyjmutí vzorku; váha 7

Principiální vlastnosti

- K19 – Přídavné zatížení měřené oblasti; váha 10

Z těchto kritérií byla sestavena tabulka 6, kde byla pro jednotlivé varianty řešení tato kritéria bodově ohodnocena. Toto hodnocení bylo provedeno negativně, vyšší bodové ohodnocení představuje horší vlastnosti přípravku.

Tabulka 6 - Hodnocení vnějších vlastností variant přípravku

Označení kritéria	Váha kritéria [1-10]	Zařízení využívající přitlačné síly pružin		Zařízení využívající smykové napětí		Ideální řešení	
		Absolutní hodnota [1-10]	Relativní hodnota	Absolutní hodnota [1-10]	Relativní hodnota	Absolutní hodnota [1-10]	Relativní hodnota
K1	3	2	6	5	15	1	3
K2	3	3	9	5	15	1	3
K3	2	1	2	2	4	1	2
K4	2	0	0	2	4	1	2
K5	1	2	2	4	4	1	1
K6	1	1	1	2	2	1	1
K7	4	4	16	1	4	1	4
K8	4	2	8	2	8	1	4
K9	6	6	36	1	6	1	6
K10	4	1	4	1	4	1	4
K11	3	4	12	1	3	1	3
K12	8	2	16	2	16	1	8
K13	8	1	8	1	8	1	8
K14	6	5	30	1	6	1	6
K15	7	3	21	3	21	1	7
K16	7	6	42	2	14	1	7
K17	7	6	42	1	7	1	7
K18	7	8	56	2	14	1	7
K19	10	6	60	2	20	1	10
		Σ	371	Σ	175	Σ	93

Na základě rozboru vnějších vlastností přípravku byla vyhodnocena první varianta řešení, zařízení využívající přitlačné síly pružin jako méně vhodná. Má vyšší bodové ohodnocení než varianta zařízení využívající smykové napětí. I přes to byl tento přípravek doporučen. Především proto, že respektuje požadovaný napěťový stav, který je nejvýznamnějším pro požadované použití predikce odpružení plechů. Toto doporučení se vztahuje pouze k uvažovanému povozu společnosti zadavatele a předpokládané oblasti používání. Nejedná se o všeobecně platné srovnání, respektive vyhodnocení.

7.2 Popis provedených zkoušek

Ve společnosti COMTES FHT bylo v rámci diplomové práce provedeno několik sérií zkoušek na vyrobeném zařízení. Cílem těchto experimentů byla verifikace procesních parametrů zkoušky. Zkoušky byly prováděny se zařízením využívající přitlačné síly pružin na stroji MAYES DM100 s měřícím zařízením Aramis na vzorcích z hlubokotažné oceli DC 01.

Vzorky

Pro možnost srovnání naměřených dat s numericky získanými výsledky byly sestaveny 3 materiálové modely materiálu. Ty se skládají z elastického chování, určené Hookovým zákonem, a plastického chování definované deformačním zpevněním. Parametry těchto 3 materiálových modelů byly uvedeny v tabulce 7. Parametry izotropního a kinematického modelu deformačního zpevnění byly definovány tabulkou, určenou podle statické zkoušky tahem. Hodnoty parametrů modifikovaného modelu Lemaitre and Chaboche byly odečteny z odborné literatury.

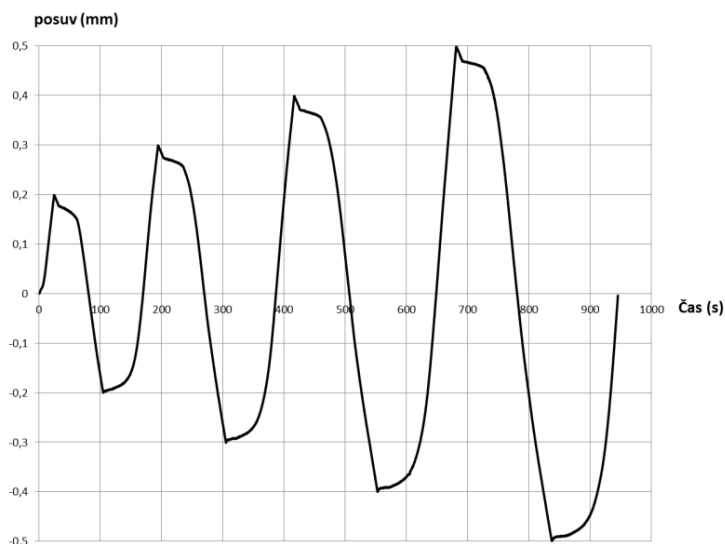
Tabulka 7 - Parametry použitých materiálových modelů

Chování	Mat. model		Parametr	Hodnota
Elastické	Hookeův zákon		E	210 000 [MPa]
			μ	0,3 [-]
Plastické	Čistě izotropní zpevnění		R_e	150 [MPa]
			$R_{p\ 0,04}$	265 [MPa]
	Čistě kinematické zpevnění		R_e	150 [MPa]
			$R_{p\ 0,04}$	265 [MPa]
	Modifikovaný model Lemaitre and Chaboche	Izotropní složka	R_∞	62,6 [MPa]
			b	25 [-]
		Kinematická složka	C_1	7 200 [MPa]
γ_1	158 [-]			

Experimentálně bylo prokázáno, že analyticky stanovené nastavení přípravku – předepjetí pružin není dostatečné pro náležité provedení zkoušky. To je dáno značným zjednodušením analytického výpočtu, stanovené předepjetí tedy nezajišťuje zamezení ztráty stability a vybočení. Předepjetí pružin bylo tedy určeno empiricky z několika zkoušek.

Zatížení

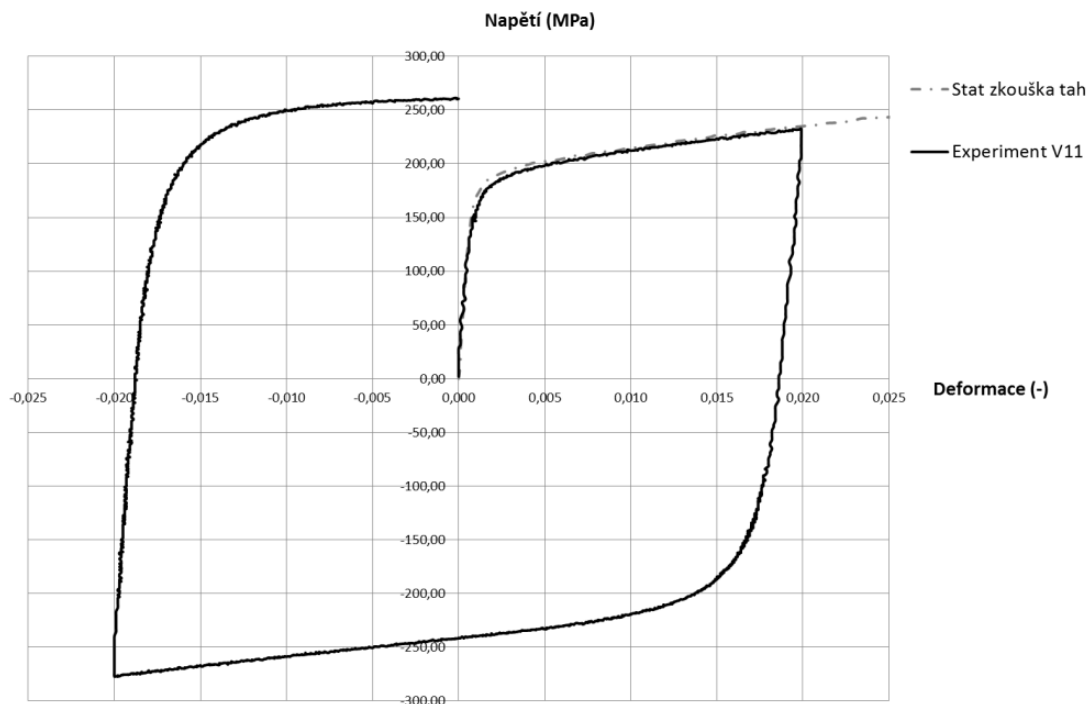
Z množství zkoušek byly pro popis vybrány zkoušky provedené na vzorcích V11 a V12 o tloušťce 1,5 [mm], které byly podrobeny cyklickému zátěžnému cyklu řízeného posuvem uvnitř měřené oblasti. Pro náležité vyhodnocení zkoušky by dostačovalo provedení pouze 1 půl-cyklu zatěžování, zadavatel ale požaduje toto zatěžování, protože zajišťuje vyšší dosažitelnou přesnost. Rychlost zatěžování byla stanovena na 1 [mm/min]. Záznam o řídicím posuvu v závislosti na čase uvnitř měřené oblasti byl zobrazen na obrázku 68.



Obrázek 68 - Průběh posuvu v závislosti na čase

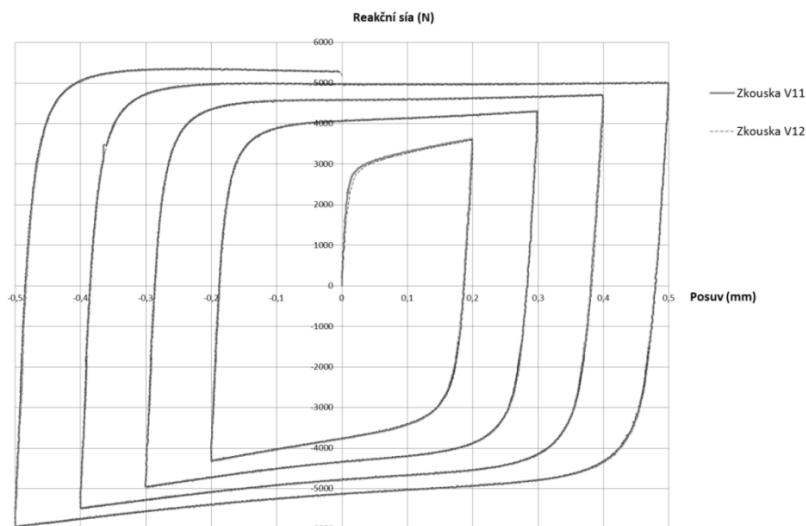
Výsledky

Na obrázku 69 byla zobrazena experimentálně získaná závislost napětí- deformace pro první cyklus zatěžování. Napětí bylo stanoveno jako podíl reakční síly a plochy průřezu vzorku. Reakční síla byla stanovena jako rozdíl zatěžující a třecí síly. Třecí síla byla určena podle shody křivek napětí-deformace v prvním půl-cyklu zatěžování s křivkou získanou standartní zkouškou tahem. Stanovená třecí síla odpovídá hodnotě třecího součinitele $f = 0,15 [-]$.



Obrázek 69 - Diagram napětí-deformace pro první cyklus zatížení

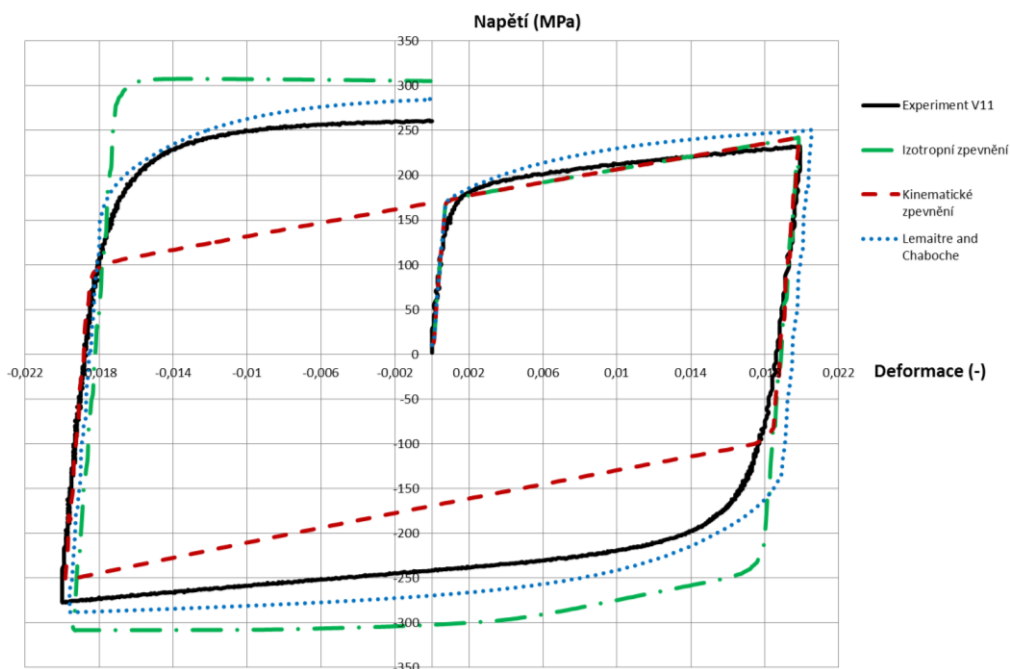
Experimentálně získaná závislost síla-posuv pro oba vzorky byla zobrazena na obrázku 70, je zde patrná podobnost a byla tak potvrzena opakovatelnost zkoušky.



Obrázek 70 - Diagram síla-posuv pro celý průběh zkoušky

Nalezení parametrů

Pro srovnání dosažených výsledků zkoušek s modelem určeným počátečními parametry deformačního zpevnění byl sestaven jednoduchý MKP model, který byl vystaven stejnému zatížení. Na obrázku 71 byla zobrazena křivka napětí-deformace stanovená experimentem společně s křivkami z MKP simulací pro 3 různé materiálové modely dle tabulky 7.



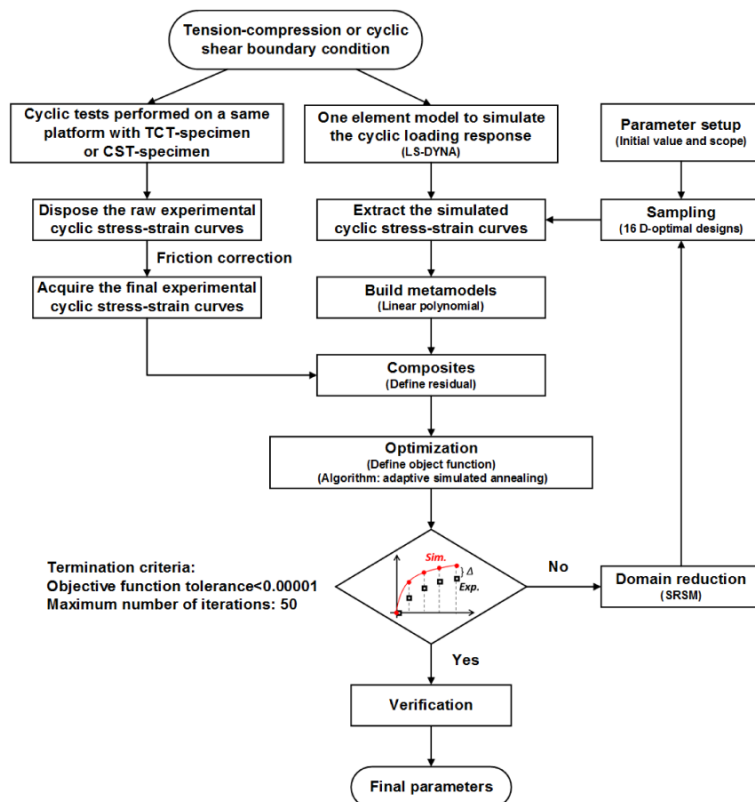
Obrázek 71 - Diagram napětí-deformace pro experiment a model

Základní model izotropního zpevnění neodpovídá svojí tendencí naměřené závislosti a nelze jím patřičně modelovat Bauschingerův efekt. Průběh křivky kinematického zpevnění postihuje tento efekt, ale nereflektuje další průvodní jevy. Tyto základní modely tedy nejsou dostatečné pro náležitou zkoušku. Modifikovaný model Leimar a Chabokey odpovídá svojí

tendencí naměřené závislosti a je vhodný pro modelování. Odchylka mezi modelem a experimentem je způsobena hodnotami parametrů, ty představují počáteční hodnoty pro optimalizační proces. Výsledkem optimalizace pak bude vektor parametrů deformačního zpevnění, který zajistí shodu těchto křivek s dostatečnou přesností.

7.3 Doporučení o praktickém provádění

Pro praktické provedení zkoušky na vybraném zařízení je nutné věnovat pozornost vlastnostem stanoveným na základě parametrické studie MKP modelu v této práci, viz tabulka 4. Nalezení parametrů deformačního zpevnění pozorované v průběhu cyklického zatěžování bude provedeno jejich optimalizací tak, aby maximálně odpovídaly naměřeným datům. Experimentálními daty budou síla-posuv, síla odečtena ze zkušebního stroje, posuv stanoven z měřicího systému Aramis. Optimalizovanými daty budou síla-posuv získané na základě výsledků jednoduchého MKP modelu, který bude podroben zátěžnému cyklu odpovídajícího zatížení. Optimalizací hodnot parametrů deformačního zpevnění bude pak graficky dosaženo podobnosti křivek síla-posuv modelu a experimentu. Graficky lze tento postup znázornit pomocí vývojového diagramu na obrázku 72, kde byl ilustrován postup iteračního postupu řešení.



Obrázek 72 - Vývojový diagram optimalizace parametrů def. zpevnění [30]

Ve společnosti COMTES FHT je standardně používán modifikovaný model Lemaitre and Chaboche, proto bude hledán vektor 8 hodnot $C_1; \gamma_1; C_2; \gamma_2; C_3; \gamma_3; R_\infty; b$. Pro praktické nalezení těchto hodnot je vhodné vyhotovit optimalizační skript podle popsání algoritmu řešení.

Závěr

Diplomová práce byla zaměřena na testování specifických vlastností kovových materiálů projevujících se zejména při procesu tváření. Blíže byly specifikovány procesy a materiály, pro které má vysoký význam se touto problematikou zabývat. Hodnocení těchto specifických vlastností slouží k náležité simulaci tváření pomocí metody konečných prvků. Byla proto věnována pozornost principům matematických modelů ve výpočetních softwarech používaných pro tyto simulace, s důrazem na modely používané společností zadavatele práce. Experimentální stanovení parametrů těchto modelů je konstrukčně složité, proto bylo v této oblasti vyvinuto množství speciálních zkušebních přípravků a postupů. Konkrétní přípravky se vyznačují specifickými vlastnostmi, které se mohou v určitých konkrétních provezech projevit jako značně omezující. Pro ucelenou představu o možnostech konstrukčního řešení byla provedena rešerše těchto zařízení. Na jejím základě s uvážením požadavků zadavatele byly vybrány dvě možnosti konstrukce. Pro tyto varianty byla na základě dostupné literatury vytvořena výrobní dokumentace a přípravky byly společností zadavatele vyrobeny.

Pro jednotlivé varianty byly sestaveny MKP simulace průběhu zkoušek a do simulací byly vneseny nežádoucí vlivy, které by mohly v praktickém používání přípravků nastat. Parametrickou studií těchto vlivů byly stanoveny klíčové vlastnosti pro používání. Na základě vyplývajících vlastností přípravků bylo provedeno hodnocení přípravků s ohledem na provoz zkušební laboratoře zadavatele práce a byla doporučena vhodná varianta řešení. Bylo prokázáno, že vnější vlastnosti používání zařízení využívající přitlačné síly pružin jsou méně vhodné, ale pro provoz zadavatele nejsou omezující. Proto byl pro provoz doporučen tento přípravek, který se principiálně podobá reálným stavům napjatosti technologických procesů nejčastěji zkoumaných zadavatelem práce.

Na tomto zařízení byla provedena série zkoušek, pomocí kterých byly prakticky upraveny teoreticky navržené procesní parametry. Pro získané výsledky zkoušek byl doporučen postup jejich dalšího zpracování pro stanovení parametrů deformačního zpevnění konkrétních materiálů. Pomocí MKP simulací tvářecích procesů s implementací takto nalezených materiálových parametrů pak bude možné lépe predikovat chování kovových materiálů. Bude dosaženo zvýšení kvality simulací, a tedy navrhovaných tvářecích procesů, pro snížení chybovosti tvářecích procesů.

Seznam použitých zdrojů

1. BENEŠOVÁ, S. a V. BERNÁŠEK. *Technologie tváření*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014. ISBN 978-80-261-0449-0.
2. *Technická univerzita v Liberci Katedra strojírenské technologie Oddělení tváření kovů a plastů* [online]. 2014 [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/09.htm
3. ŠIMON, P. *Karosérie osobního automobilu Ing. Petr Šimon Škoda Auto a.s* [online]. 2015, verze 04.03.2015 [cit. 2018-01-12]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/18241549-Karoserie-osobniho-automobilu-ing-petr-simon-skoda-auto-a-s-04-03-2015.html>
4. DVOŘÁK, M. F. GAJDOŠ a K. NOVOTNÝ. *Technologie tváření plošné a objemové*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o. 2007. ISBN 978-80-214-3425-7.
5. *Technická univerzita v Liberci Katedra strojírenské technologie Oddělení tváření kovů a plastů* [online]. 2014 [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/spt.htm>
6. FOREJTOVÁ, L. et al. Svařitelnost ocelí pro automobilové karoserie. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2017, verze 170343 Vyšlo v MM : 2017 / 3, 08.03.2017 v rubrice Komerční příloha / Věda, Výzkum, Inovace, Strana 90 [cit. 2018-01-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-oceli-pro-automobilove-karoserie.html>
7. PLUHAŘ, J. *Nauka o materiálech*. Praha: SNTL, 1989.
8. HALAMA, R. a J. SEDLÁK. *Zaklady inkrementální teorie plasticity*. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, Fakulta strojní, Katedra pružnosti a pevnosti, 2012.
9. Yield criteria for metals. *University of Cambridge* [online]. 2018 [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/metal-forming-1/yield_criteria.php
- 10 HALAMA, R. J. SEDLÁK a M. ŠOFER. ResearchGate. *Phenomenological Modelling of Cyclic Plasticity* [online]. 2012 [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/221928011_Phenomenological_Modelling_of_Cyclic_Plasticity
- 11 BANABIC, D. *Sheet Metal Forming Processes*. Berlin: Springer, 2010. ISBN 978-3-540-88112-4.
- 12 KIM, B. et al. Researchgate. *Effect of Constitutive Equations on Springback Prediction Accuracy in the TRIP1180 Cold Stamping* [online]. 2017 [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/322241631_Effect_of_Constitutive_Equations_on_Springback_Prediction_Accuracy_in_the_TRIP1180_Cold_Stamping
- 13 KRASOVSKYY, A. *Verbesserte Vorhersage der Rückfederung bei der Blechumformung durch weiterentwickelte* Freiburg: Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe, 2005.
- 14 NEUMANN, K. a J. ŠIMÁČEK. ELUC. *Zkouška hlubokotažnosti* [online]. 2015 [cit. 2017-11-01]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1568>
- 15 KIM, J. et al. Measurement of the Bauschinger behavior of sheet metals by three-point

- . bending springback test with Shaanxi, China: 2014, č. Volume 59, August 2014, Pages 84-107, s. International Journal of Plasticity. ISSN 0749-6419.
- 16 YAN, J. *Study of Bauschinger Effect in Various Spring Steels*. Toronto: University of Toronto, 1998. ISBN 0-612-45601-3.
- 17 KOSTRYZHEV, A. M. STRANGWOOD a C. DAVIS. *Bauschinger effect in Nb and V alloyed line-pipe steels*. Birmingham: College of Engineering and Physical Sciences The University of Birmingham, 2009.
- 18 HOLAS, J. *Bauschingerův efekt a cyklická plasticita u konstrukčních slitin hořčíku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. Bakalářská práce.
- 19 BAE, G. a H. HUH. Cyclic tension/compression test of auto-body steel sheets with the variation of the strain rate. Daejeon: WIT Transactions on Engineering Sciences, 2011, č. Vol 72, s. 213. ISSN 1743-3533.
- 20 GOM Precise Industrial 3D Metrology. *ARAMIS Adjustable* [online]. 2017 [cit. 2017-11-15]. Dostupné z: <https://www.gom.com/metrology-systems/aramis/aramis-adjustable.html>
- 21 EGGERTSEN, P. a K. MATTIASSON. On the identification of kinematic hardening material parameters for accurate springback predictions. Göteborg, Sweden: International Journal of Material Forming, 2010, č. June 2011, Volume 4, Issue 2, s. 103–20. ISSN 1960-6206.
- 22 DIETRICH, L. Z. KOWALEWSKI a G. SOCHA. Experimental investigation of thin metal sheets under tension-compression cyclic loading. Warsaw, Poland: Journal of theoretical and applied mechanics, 2015, č. 53, s. 757-62.
- 23 KUROSAKI, I. et al. Tension–compression asymmetry of phosphor bronze for electronic parts and its effect on bending Tokyo: International Journal of Plasticity, 2009, č. Volume 25, Issue 9, s. 1759-76. ISSN: 0749-6419.
- 24 ILLGEN, C. M. HÄRTEL a F. WAGNER. *Experimental evaluation of Bauschinger effects during tension-compression in-plane deformation of* Chemnitz, Germany: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016. 181 012024.
- 25 BAE, G. a H. HUH. Tension/compression test of auto-body steel sheets with the variation of the pre-strain and the Kaist, Republic of Korea: WIT Transactions on Engineering Sciences, 2011, č. Vol 72. ISSN 1743-3533.
- 26 MERKLEIN, M. a S. SUTTNER. Characterization of the Bauschinger effect and identification of the kinematic Chaboche model by Nürnberg: Institute of Manufacturing Technology LFT, FAU Erlangen-Nürnberg, 2014.
- 27 MOHR, D. a J. STÉPHANE. Effect of compression-tension loading reversal on the strain to fracture of dual phase steel sheets. Cambridge MA, USA: International Journal of Plasticity, 2015, č. Volume 72, September 2015, s. 21-43. ISSN 0749-6419.
- 28 CAO, J. a X. WANG. An analytical model for plate wrinkling under tri-axial loading and its application. 2145 Sheridan Road, Evanston, IL 60208, USA: International Journal of Mechanical Sciences, 2000, č. Volume 42, Issue 3, s. 617-33. ISSN 0020-7403.
- 29 SANKER, S. *Development of a shear test to determine the cyclic behaviour of sheet materials*. Electronic Theses and Dissertations. Windsor, Ontario, Canada: University of

Windsor, 2011.

- 30 GU, B. et al. Cyclic Sheet Metal Test Comparison and Parameter Calibration for Springback Prediction of Shanghai, China: Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2017, č. 139(9). DOI 10.1115/1.4037040.
- 31 Dassault Systèmes, 2015. In: *Abaqus 2016 Online Documentation* [online]. 5. 7. 2015, verze 2015_07_02-15.44.29 46006 [cit. 18-02-2018]. Dostupné z: <http://abaqus.software.polimi.it/v2016/books/stm/default.htm?startat=ch03s01.html>
- 32 AUSPERGER, A. Technická univerzita v Liberci. *Katedra strojírenské technologie* [online]. [cit. 2017-10-27]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/mtk/MTK3.pdf
- 33 JURČIŠIN, M. MM Spektrum. *Experimentální měření křivky mezních deformací* [online]. 9. 10. 2015 [cit. 2017-10-28]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/experimentalni-mereni-krivky-meznich-deformaci.html>
- 34 COLGAN, M. a J. MONAGHAN. Deep drawing process: analysis and experiment. Dublin, Ireland: Journal of Materials Processing Technology, 2003, č. Volume 132, Issues 1–3, 10 January 2003, s. 35-41. ISSN 0924-0136.
- 35 GOM Precise Industrial 3D Metrology. *GOM at CIMT from 17-22 April 2017 in Beijing* [online]. 2017 [cit. 2017-11-15]. Dostupné z: <https://www.gom.com/events/exhibitions/cimt-2017.html>
- 36 TOROS, S. Parameters Determination of Yoshida Uemori Model Through Optimization Process of Cyclic Rio de Janeiro: Latin American Journal of Solids and Structures, 2016, č. vol.13 no.10 Rio de Janeiro. ISSN 1679-781.
- 37 BARLAT, F. et al. An application of homogeneous anisotropic hardening to springback prediction in pre-strained Gyeongbuk, Republic of Korea: International Journal of Solids and Structures, 2012, č. Volume 49, Issue 25, s. 3562-72. ISSN 0020-7683.
- 38 SEDLÁK, J. a R. HALAMA. *Identifikace materiálových parametrů Vybraných modelů plasticity*. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, Fakulta strojní, Katedra pružnosti a pevnosti, 2012.

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Napětí působící na prostorový element [1]	12
Obrázek 2 - Definice prodloužení	13
Obrázek 3 - Napěťový a deformační stav při hlubokém tažení válcového výtažku [2].....	16
Obrázek 4 - Kostra vozu Škoda Superb III [3].....	16
Obrázek 5 - Keeler – Goodwinův diagram [5].....	18
Obrázek 6 - Diagram používaných materiálů [6].....	18
Obrázek 7 - Normalizovaná plochá zkušební tyč.....	20
Obrázek 8 - Diagram získaný ze statické zkoušky tahem [7]	20
Obrázek 9 - Experimentální křivka napětí-deformace pro ocel DC01.....	23
Obrázek 10 - Křivky napětí-deformace při cyklickém zatížení [8]	24
Obrázek 11 - Reprezentace podmínek plasticity pro rovinnou napjatost [9].....	25
Obrázek 12 - Průběh řídicí proměnné R [10].....	29
Obrázek 13 - Průběhy napětí-deformace pro různé mat. modely [12].....	29
Obrázek 14 - Predikce odpružení materiálu [13]	30
Obrázek 15 - Odpružení u plechů různých materiálů [13].....	30
Obrázek 16 - Princip Erichsenovy zkoušky [14]	31
Obrázek 17 - Princip kalíškové zkoušky [4]	31
Obrázek 18 - Princip LDH zkoušky [4]	32
Obrázek 19 - Princip hydraulické zkoušky [4].....	32
Obrázek 20 - Schéma zpevnění materiálu [15]	33
Obrázek 21 - Křivka napětí-deformace [16]	34
Obrázek 22 - Zjednodušený diagram napětí-deformace [17].....	34
Obrázek 23 - Hodnoty parametrů Bauschingerova efektu pro ocel s 0,17[%] C [17]	36
Obrázek 24 - Schéma kompozitního modelu [16]	37
Obrázek 25 - Změna tvaru plochy podmínky plasticity pro izotropní zpevnění [8]	38
Obrázek 26 - Změna polohy plochy podmínky plasticity pro kinematické zpevnění [8]	38
Obrázek 27 - Schéma požadovaného zatěžování	39
Obrázek 28 - Vzpěrová deformace standartní zkušební tyče v MKP	39
Obrázek 29 - Nevhodně porušené vzorky	40
Obrázek 30 - Deformace vzorků bez použití přípravku [19]	41
Obrázek 31 - Schéma zkoušky bez použití přípravku [13]	41
Obrázek 32 - Příklad měřicího systému Aramis [20].....	42
Obrázek 33 - Vzorek plechu s kontrastním vzorem.....	43
Obrázek 34 - Pevné klemy s výřezem [21]	45
Obrázek 35 - Schéma pevných klem z broušeného plexiskla	45
Obrázek 36 - Zařízení s posuvnými přídržnými pláty [22].....	46
Obrázek 37 - Klemy s tvarovými výběžky [23]	47
Obrázek 38 - Inovované klemy s tvarovými výběžky [24].....	47
Obrázek 39 - Zařízení využívající přitlačné síly pružin [25]	48
Obrázek 40 - Diagram pro stanovení síly na pružinách [25]	48
Obrázek 41 - Upravené zkušební tyče [26].....	49
Obrázek 42 - Výsledky experimentu provedeného na zař. využívající smyk napětí [26]	50

Obrázek 43 - Rozložení napětí při ohybu [4]	50
Obrázek 44 - Zařízení založené na principu třibodového ohybu [21].....	51
Obrázek 45 - Vyrobené zařízení, varianta 1	52
Obrázek 46 - Závislost deformace a předpětí přípravku	53
Obrázek 47 - MKP model sestavy (vlevo) a síť prvků (vpravo) zařízení varianta 1	54
Obrázek 48 - Pole ekvivalentní pl. def. [%] (vlevo), pole napětí Von Mises [MPa] (vpravo)	55
Obrázek 49 - Vývoj kontaktního tlaku [MPa] v čase	55
Obrázek 50 - Zobrazení poškozeného vzorku prohnutím	56
Obrázek 51 - Průběh ekvivalentní plastické deformace [%].....	56
Obrázek 52 - Vliv tuhosti pružin na tlak	57
Obrázek 53 - Vliv nastavení předpětí.....	58
Obrázek 54 - Schématické zobrazení původního testovacího zařízení [29]	59
Obrázek 55 - Vyrobené zařízení, varianta 2.....	60
Obrázek 56 - MKP model sestavy (vlevo) a síť prvků (vpravo) zařízení varianta 2	61
Obrázek 57 - Pole ekvivalentní pl. def. [%] (vlevo), pole napětí Von Mises [MPa] (vpravo)	61
Obrázek 58 - Pole napětí čistého smyku [MPa] (vlevo) a čistého tahu [MPa] (vpravo)	62
Obrázek 59 - Vyznačení měřené oblasti na vzorku.....	62
Obrázek 60 - Schéma odchylky v nastavení rovinnosti čelistí.....	63
Obrázek 61 - Smykové napětí S12 [MPa] po délce středové úsečky.....	63
Obrázek 62 - Tahové napětí S11 [MPa]; S22 [MPa] po délce středové úsečky	64
Obrázek 63 - Schéma odchylky v nastavení rovnoběžnosti upínacích čelistí.....	64
Obrázek 64 - Smykové napětí S12 [MPa] po délce středové úsečky.....	65
Obrázek 65 - Tahové napětí S11 [MPa]; S22 [MPa] po délce středové úsečky	65
Obrázek 66 - Rozložení složek napětí S11; S12; S22 [MPa] po délce středové úsečky.....	66
Obrázek 67 - Pole kontaktního tlaku [MPa].....	67
Obrázek 68 - Průběh posuvu v závislosti na čase	71
Obrázek 69 - Diagram napětí-deformace pro první cyklus zatížení	71
Obrázek 70 - Diagram síla-posuv pro celý průběh zkoušky	72
Obrázek 71 - Diagram napětí-deformace pro experiment a model	72
Obrázek 72 - Vývojový diagram optimalizace parametrů def. zpevnění [30]	73

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Chemické složení vybraných ocelí	19
Tabulka 2 - Mechanické vlastnosti vybraných ocelí	22
Tabulka 3 - Použité parametry modelu zpevnění	54
Tabulka 4 - Vyplývající vlastnosti přípravku	59
Tabulka 5 - Vyplývající vlastnosti přípravku	67
Tabulka 6 - Hodnocení vnějších vlastností variant přípravku	69
Tabulka 7 - Parametry použitých materiálových modelů	70

Seznam použitého software

Abaqus/CAE 2017. Build ID: 2016_09_27-23.54.59 126836. Dassault Systèmes Simulia Corp.. Johnston RI USA

SolidWorks Premium 2015 x64 Edition, SP 5.0. Dassault Systèmes Simulia Corp.. Johnston RI USA

PTC Mathcad. Prime 3.1 64-bit. F000 /2015.02.25.001/3.0.0.266. PTC Inc., 140 Kendrick Street, Needham, MA 02494 USA

Microsoft Excel. Verze 14.0.4760.1000 (64 bitová verze). 2010. Microsoft Corporation. Redmond, Washington, USA

Microsoft Word. Verze 14.0.4760.1000 (64 bitová verze). 2010. Microsoft Corporation. Redmond, Washington, USA

Seznam příloh

Příloha č. 1 - Výkresová dokumentace přípravku varianta 1

Příloha č. 2 - Nalezení materiálových parametrů deformačního zpevnění

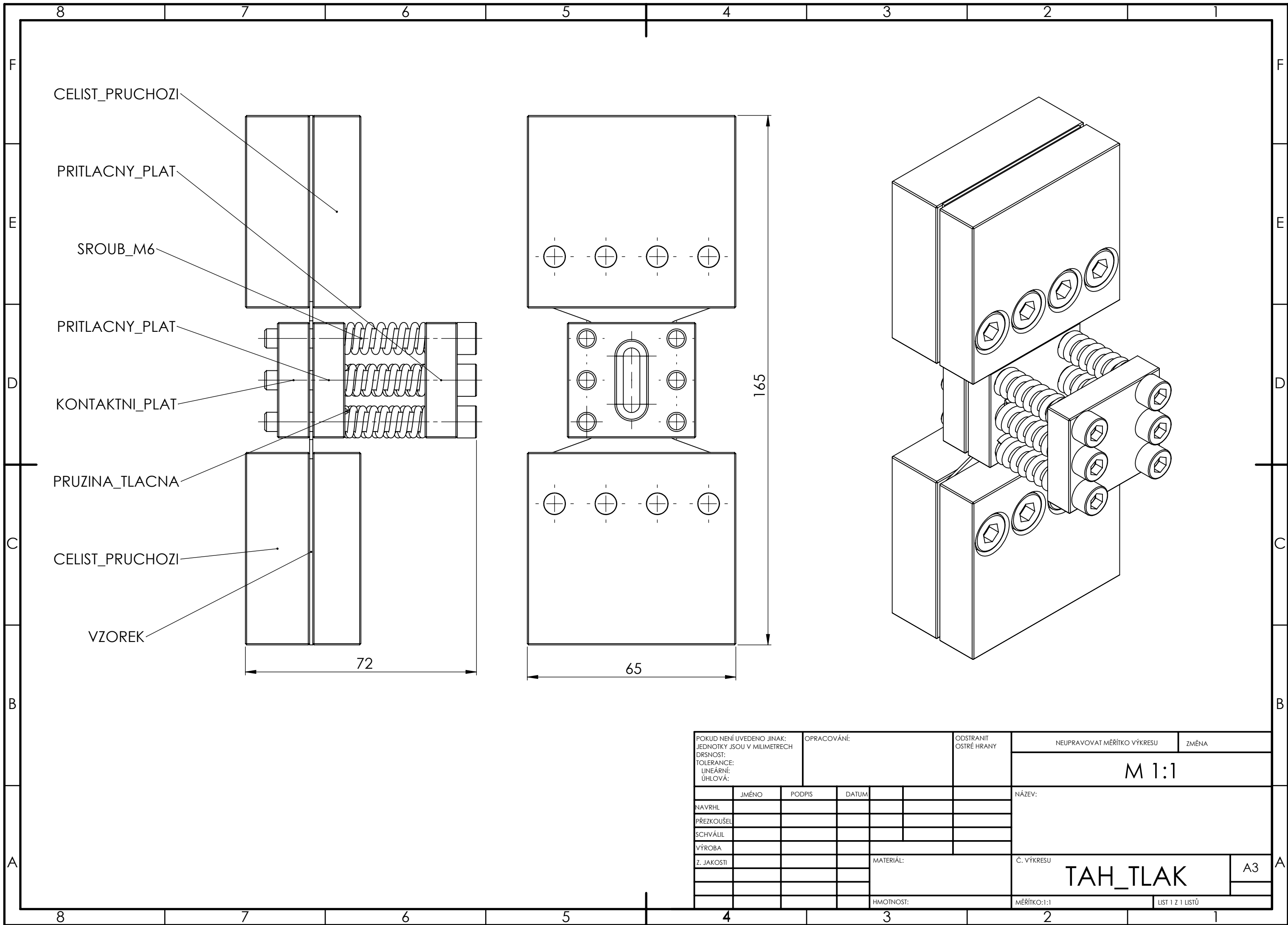
Příloha č. 3 - Analytický výpočet nastavení přípravku

Příloha č. 4 - Výkresová dokumentace přípravku varianta 2

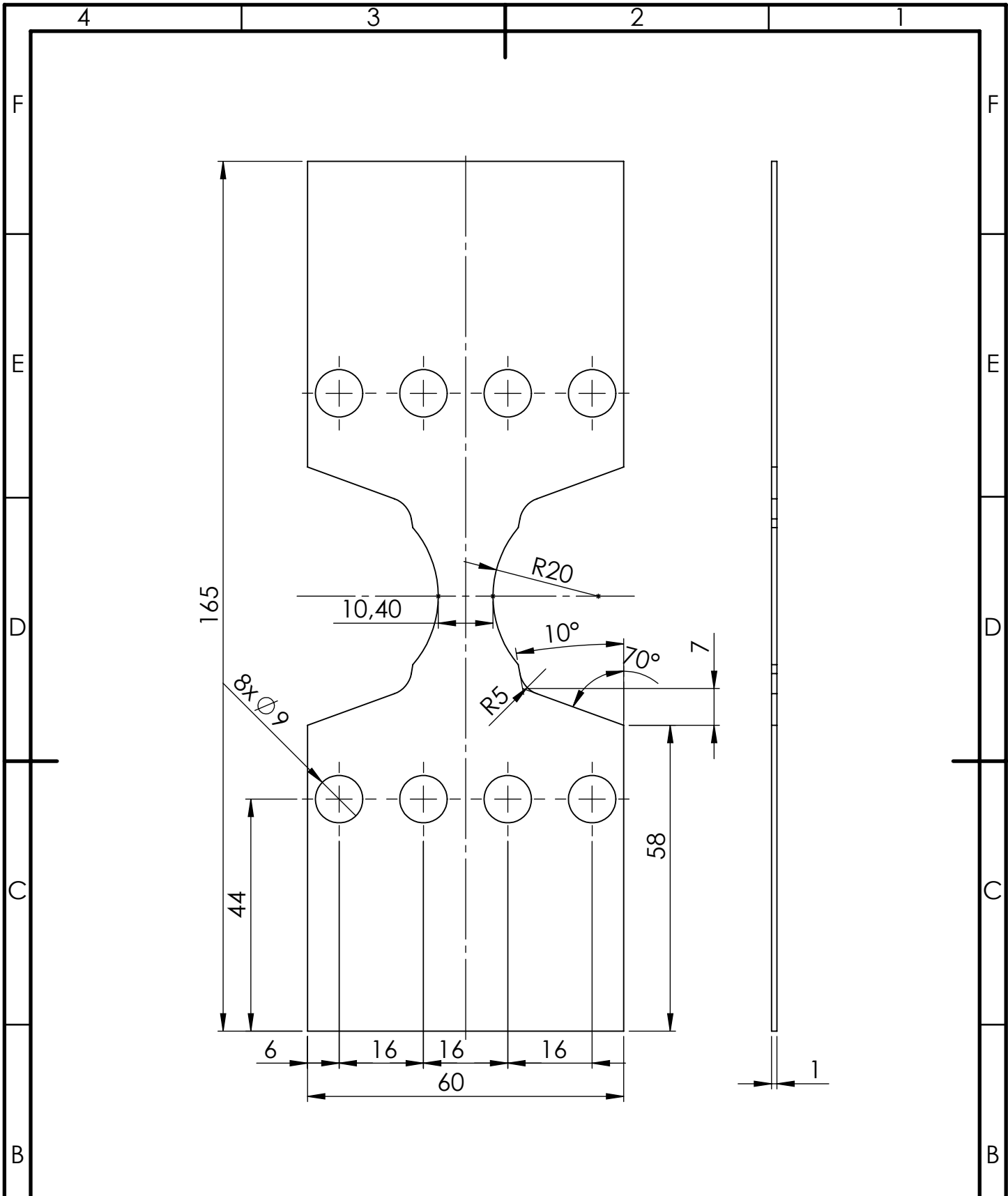
Příloha č. 5 - Výkresová dokumentace pomocného tělesa přípravku – SROVNÁVACÍ TĚLESO

Příloha č. 6 - Analytický výpočet předepnutého šroubového spoje

Příloha č. 1 – Výkresová dokumentace přípravku varianta 1



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTRÉ HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU		ZMĚNA	
DRSNOST:						M 1:1			
TOLERANCE:								NÁZEV:	
LINEÁRNÍ:									
ÚHLOVÁ:									
	JMÉNO	PODPIS	DATUM						
NAVRHL									
PŘEZKOUŠEL									
SCHVÁLIL									
VÝROBA									
Z. JAKOSTI					MATERIÁL:			Č. VÝKRESU	
								TAH_TLAK	
								A3	
					HMOTNOST:			MĚŘÍTKO: 1:1	
								LIST 1 Z 1 LISTŮ	



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:
 JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH
 DRSNOST:
 TOLERANCE:
 LINEÁRNÍ:
 ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNÍ:

ODSTRANIT
 OSTRÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

ZMĚNA

M 1:1

	JMÉNO	PODPIS	DATUM
NAVRHL			
PŘEZKOUSEL			
SCHVÁLIL			
VÝROBA			
Z. JAKOSTI			

NÁZEV:
 ZKUSEBNI_TYC

Č. VÝKRESU
 TAH_TLAK

A4

HMOTNOST:

MĚŘÍTKO:1:1

LIST 2 Z 1 LISTŮ

Příloha č. 2 - Nalezení materiálových parametrů deformačního zpevnění

1. NALEZENÍ MATERIÁLOVÝCH PARAMETRŮ MODELU DEFORMAČNÍHO ZPEVNĚNÍ

Výpočet nastavení přípravku vychází z použití jednoduchého swiftova modelu deformačního zpevnění. Tento model je dán rovnicí, uvedenou níže, konkrétní materiál je pak definován pomocí 2 parametrů.

Materiálové parametry byly ilustrativně nalezeny pro materiál DC01. Z experimentálně zjištěné závislosti napětí-deformace (modrá křivka) a křivky modelu zpevnění (červená křivka).

$$K := 480 \text{ MPa}$$

koefficient deformačního zpevnění swiftova modelu pro ocel DC 01

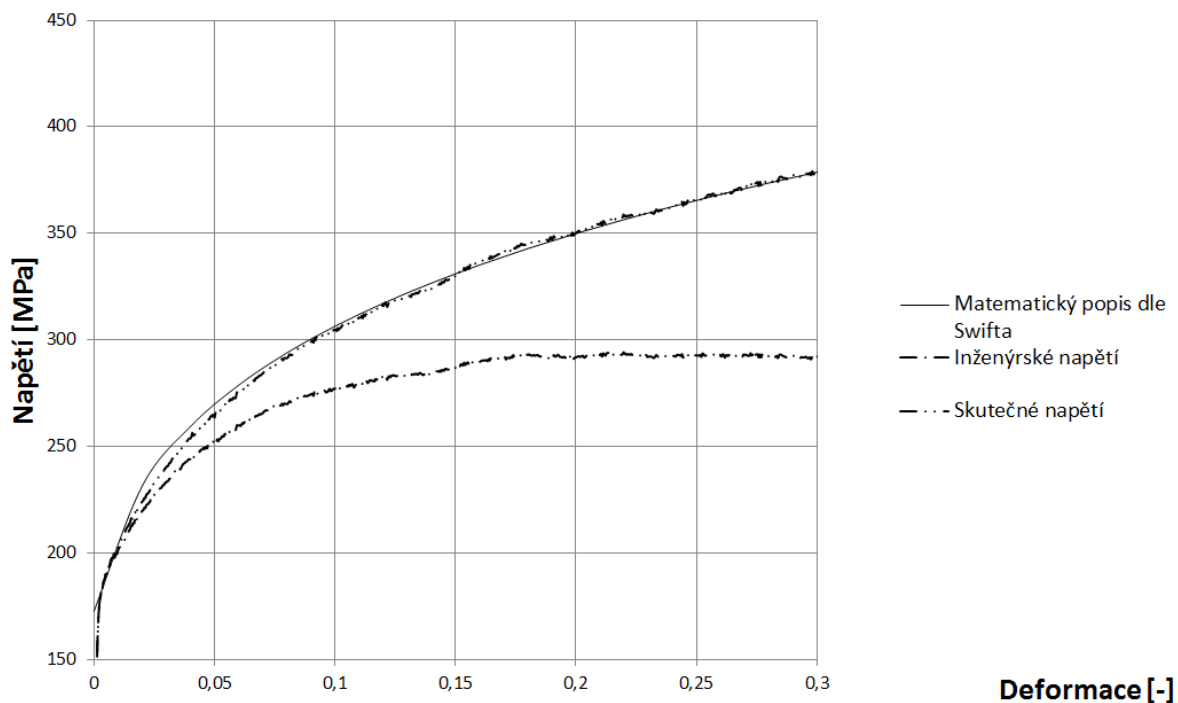
$$n := 0.2$$

exponent deformačního zpevnění swiftova modelu pro ocel DC 01

$$\varepsilon_0 := 0.006$$

počáteční zatížení swiftova modelu pro ocel DC 01

Matematický popis v oblasti plasticity



Příloha č. 3 - Analytický výpočet nastavení přípravku

1. VSTUPNÍ PARAMETRY

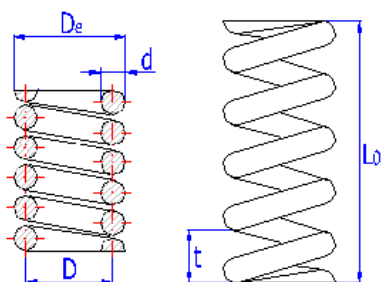
1.1. VSTUPNÍ PARAMETRY - MATERIÁL

$K := 480 \text{ MPa}$	<i>koeficient deformačního zpevnění pro ocel DC 01</i>
$n := 0.2$	<i>exponent deformačního pro ocel DC 01</i>
$\varepsilon_0 := 0.006$	<i>počáteční zatížení pro ocel DC 01</i>
$r_0 := 0.8$	<i>hodnota anizometrie zjištěné ve směru 0°</i>
$r_{45} := 0.8$	<i>hodnota anizometrie zjištěné ve směru 45°</i>
$r_{90} := 0.8$	<i>hodnota anizometrie zjištěné ve směru 90°</i>
$R := \frac{1}{4} \cdot (r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90}) = 0.8$	<i>hodnota normálové anizotropie</i>

1.2. VSTUPNÍ PARAMETRY - PRŮBĚH TESTU

$S := 430 \text{ mm}^2$	<i>styková plocha příložek a vzorku</i>
$u_x := 1 \text{ mm}, 1.2 \text{ mm} \dots 10 \text{ mm}$	<i>zatížení vlivem posunutí</i>
$L := 45 \text{ mm}$	<i>vzdálenost mezi čelistmi stroje</i>
$t := 1 \text{ mm}$	<i>tloušťka vzorku</i>

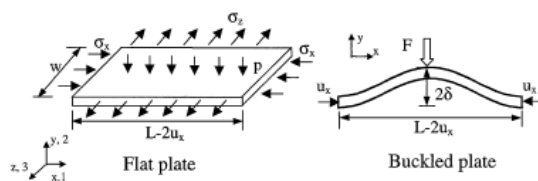
1.3. VSTUPNÍ PARAMETRY - PARAMETRY POUŽITÝCH PRUŽIN



$G := 80000 \text{ MPa}$	<i>modul pružnosti ve smyku pro materiál pružiny</i>
$D := 10 \text{ mm}$	<i>průměr šroubovice pružiny</i>
$d := 2 \text{ mm}$	<i>průměr vinutí pružiny</i>
$n_{zav} := 8 \cdot \text{mm}$	<i>počet činných závitů pružiny</i>
$k := \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot n_{zav} \cdot D^2} = 200 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$	<i>tuhost pružiny</i>

2. VÝPOČET NASTAVENÍ PŘÍPRAVKU

2.1. VÝPOČET ZATÍŽENÍ



$$\sigma_z := 0 \text{ MPa}$$

zatížení ve směru z / zjednodušující předpoklad
zatížení ve směru x

$$\sigma_x := 100 \text{ MPa}$$

$$\alpha := \frac{\sigma_z}{\sigma_x} = 0$$

faktor zatížení

$$\varepsilon_{10}(u_x) := \ln\left(1 - \frac{2 \cdot u_x}{L}\right)$$

počáteční deformace ve směru 1

$$\varepsilon_{20}(u_x) := -\frac{1 + \alpha}{1 + R - \alpha \cdot R} \cdot \varepsilon_{10}(u_x)$$

počáteční deformace ve směru 2

$$\varepsilon_{30}(u_x) := \frac{(1 + R) \cdot \alpha - R}{1 + R - \alpha \cdot R} \cdot \varepsilon_{10}(u_x)$$

počáteční deformace ve směru 3

$$\Delta\varepsilon_3(u_x) := \frac{\alpha \cdot (1 + 2R)}{(1 + R - \alpha \cdot R) \cdot (1 + R)} \cdot \varepsilon_{10}(u_x)$$

přírůstek deformace ve směru 3

$$c_1 := -\sqrt{\frac{1 + R}{1 + 2R} \left(1 + \frac{R \cdot (1 + \alpha)^2 + (\alpha + \alpha \cdot R - R)^2}{(1 + R - \alpha \cdot R)^2}\right)} = -1$$

pomocný parametr výpočtu

$$c_2 := \frac{1 + R}{\sqrt{1 + 2R}} = 1.116$$

pomocný parametr výpočtu

$$c_3(u_x) := \frac{R}{\sqrt{1 + 2R}} \cdot \Delta\varepsilon_3(u_x)$$

pomocný parametr výpočtu

$$m(u_x) := \frac{2 \pi}{L - 2 \cdot u_x}$$

frekvence módu vybočení

$$\delta(u_x) := \frac{1}{\sqrt{2} \pi} \cdot \sqrt{\left(\frac{L}{1 + \Delta\varepsilon_3(u_x)}\right)^2 - (L - 2 u_x)^2}$$

maximální hloubka vybočení

$$p(u_x) := \frac{3K \cdot t}{4(n+1)\delta(u_x)} \left(\left(\varepsilon_0 + c_1 \cdot \ln\left(1 - \frac{2u_x}{L}\right) \right)^{n+1} - \frac{2}{L} \left(\frac{c_2 \cdot t}{2} + (\varepsilon_0 + c_3(u_x)) \cdot \left(\frac{1}{m(u_x)^2 \cdot \delta(u_x)} \right)^{n+1} \cdot \left(\frac{1}{m(u_x)^2 \cdot \delta(u_x)} + \frac{t}{2} \right)^{-n} \cdot \tan(m(u_x) \cdot \delta(u_x))^{-1} \right) \right)$$

kritický stykový tlak

2.2. VÝPOČET NASTAVENÍ PRUŽIN

2.1.1. KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ SE 6 ŠROUBY

$$n_{\text{šr}} := 6$$

počet šroubů/ pružin (varianta sestavení 1)

$$F_{\text{šr}}(u_x) := p(u_x) \cdot S \cdot \frac{1}{n_{\text{šr}}}$$

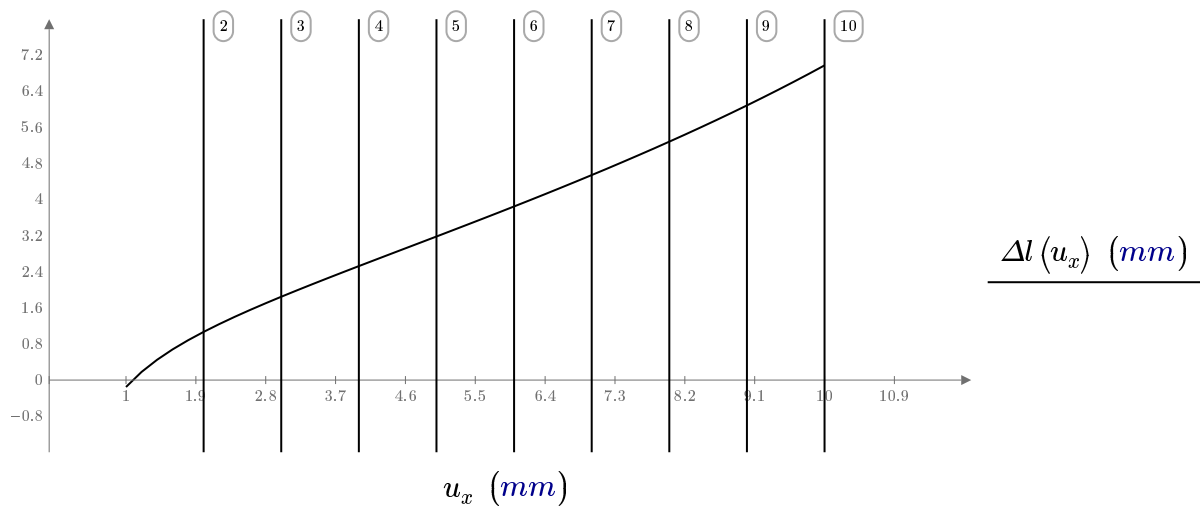
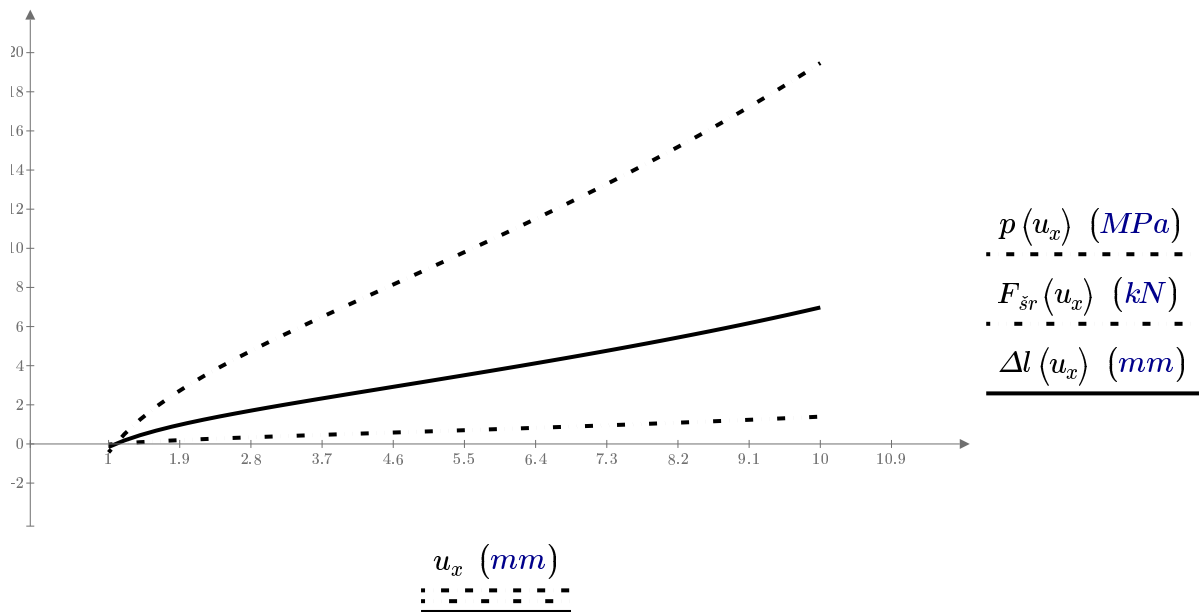
síla v jednom šroubu

$$\Delta l(u_x) := \frac{F_{\text{šr}}(u_x)}{k}$$

délka zašroubování šroubů

$$\Delta l(2 \text{ mm}) = 1.068 \text{ mm}$$

délka zašroubování pro konkrétně simulovaný test



2.1.2. KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ SE 4 ŠROUBY

$$n_{\text{šr}} := 4$$

počet šroubů/ pružin (varianta sestavení 2)

$$F_{\text{šr}}(u_x) := p(u_x) \cdot S \cdot \frac{1}{n_{\text{šr}}}$$

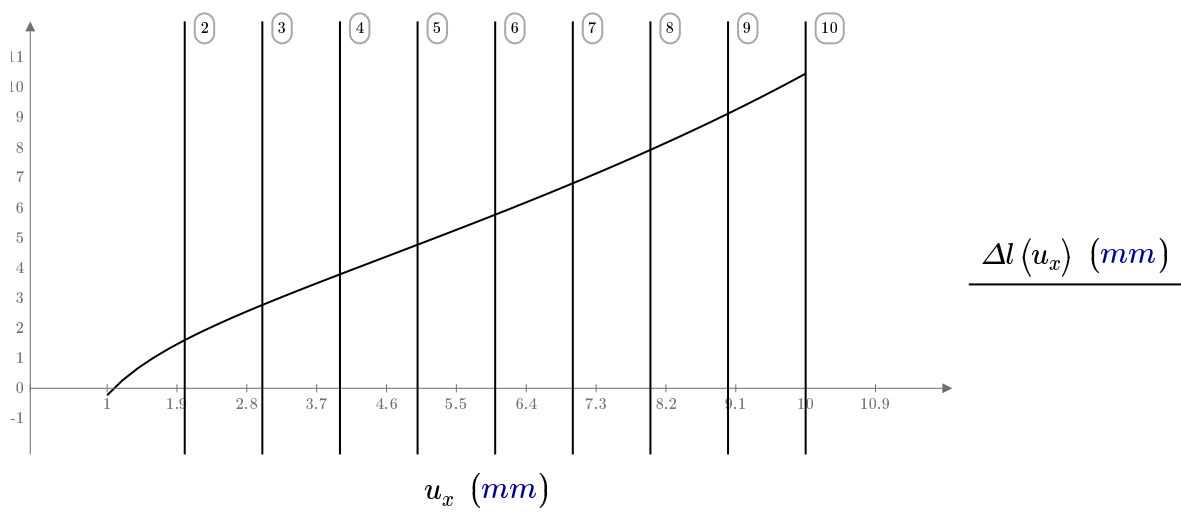
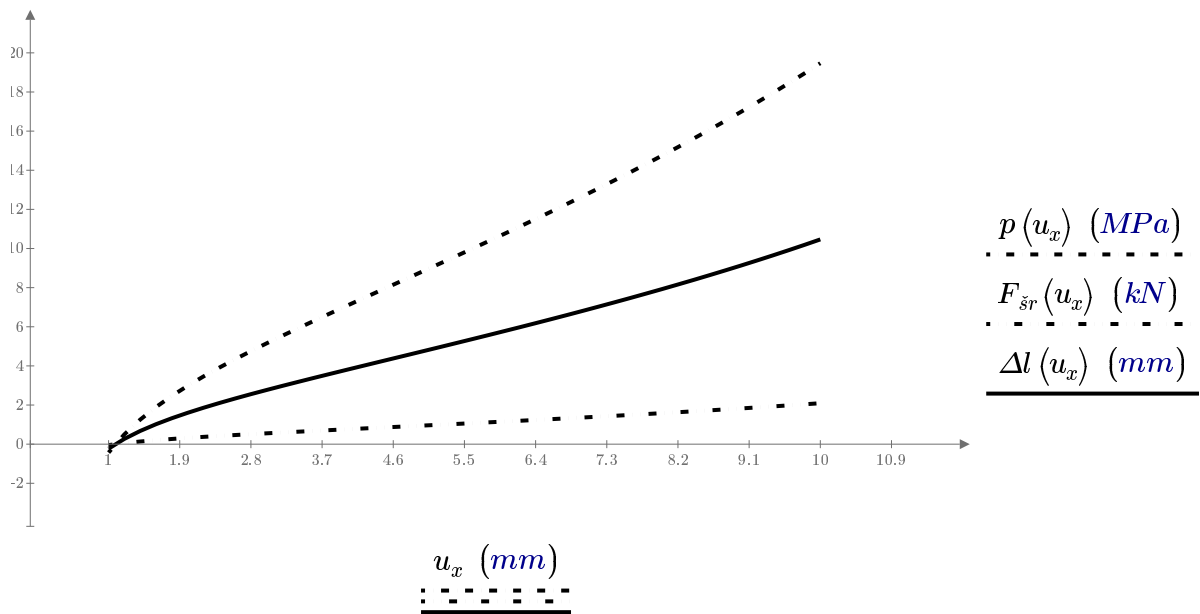
síla v jednom šroubu

$$\Delta l(u_x) := \frac{F_{\text{šr}}(u_x)}{k}$$

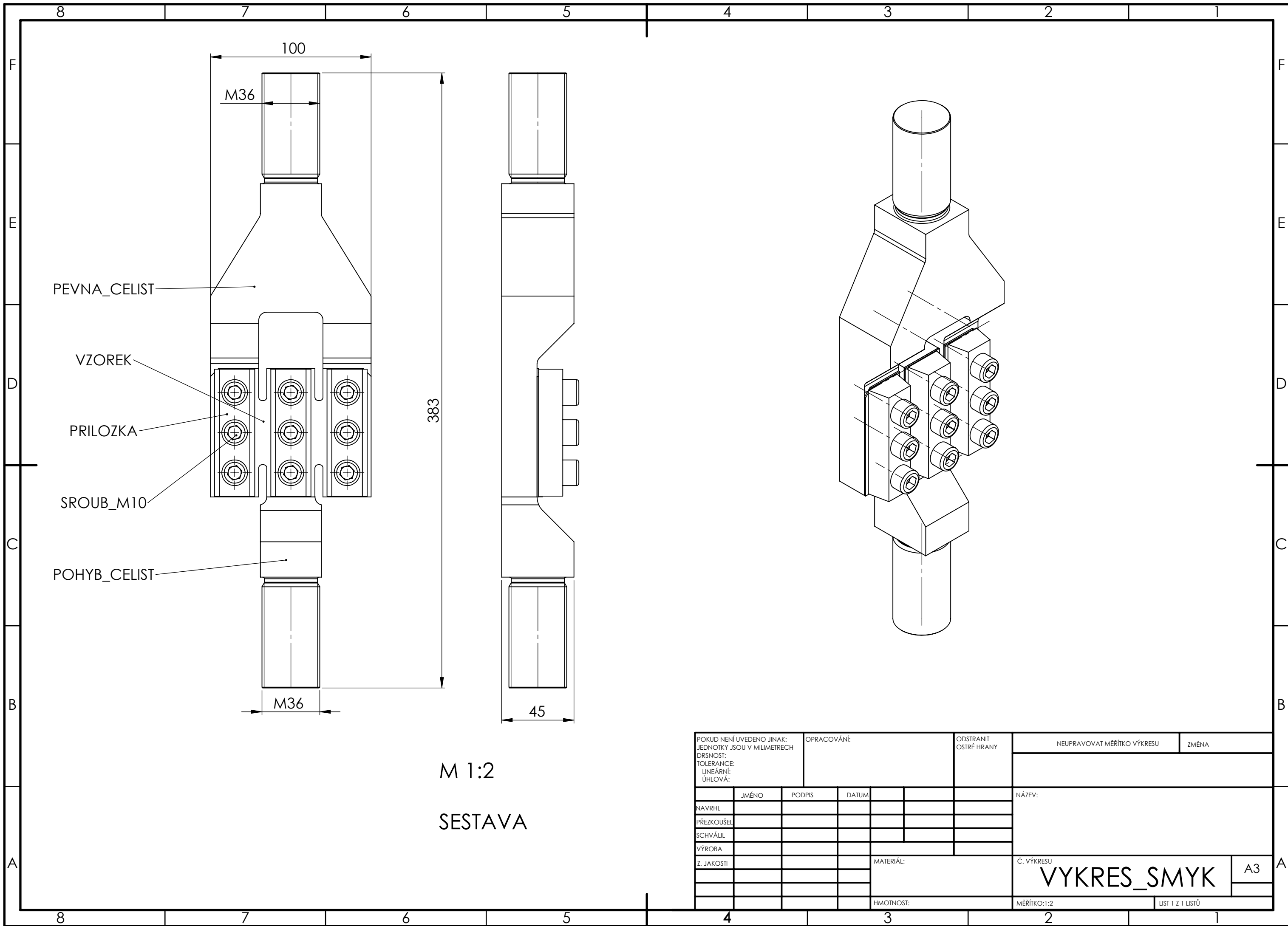
délka zašroubování šroubů

$$\Delta l(2 \text{ mm}) = 1.602 \text{ mm}$$

délka zašroubování pro konkrétně simulovaný test



Příloha č. 4 – Výkresová dokumentace přípravku varianta 2



PEVNA_CELIST

VZOREK

PRILOZKA

SROUB_M10

POHYB_CELIST

M 1:2

SESTAVA

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTRÉ HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU		ZMĚNA	
NAVRHL	JMÉNO	PODPIS	DATUM			NÁZEV:			
PŘEZKOUSEL						Č. VÝKRESU VYKRES_SMYK A3			
SCHVÁLIL									
VÝROBA									
Z. JAKOSTI					MATERIÁL:				
					HMOTNOST:				
						MĚŘÍTKO:1:2		LIST 1 Z 1 LISTŮ	

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

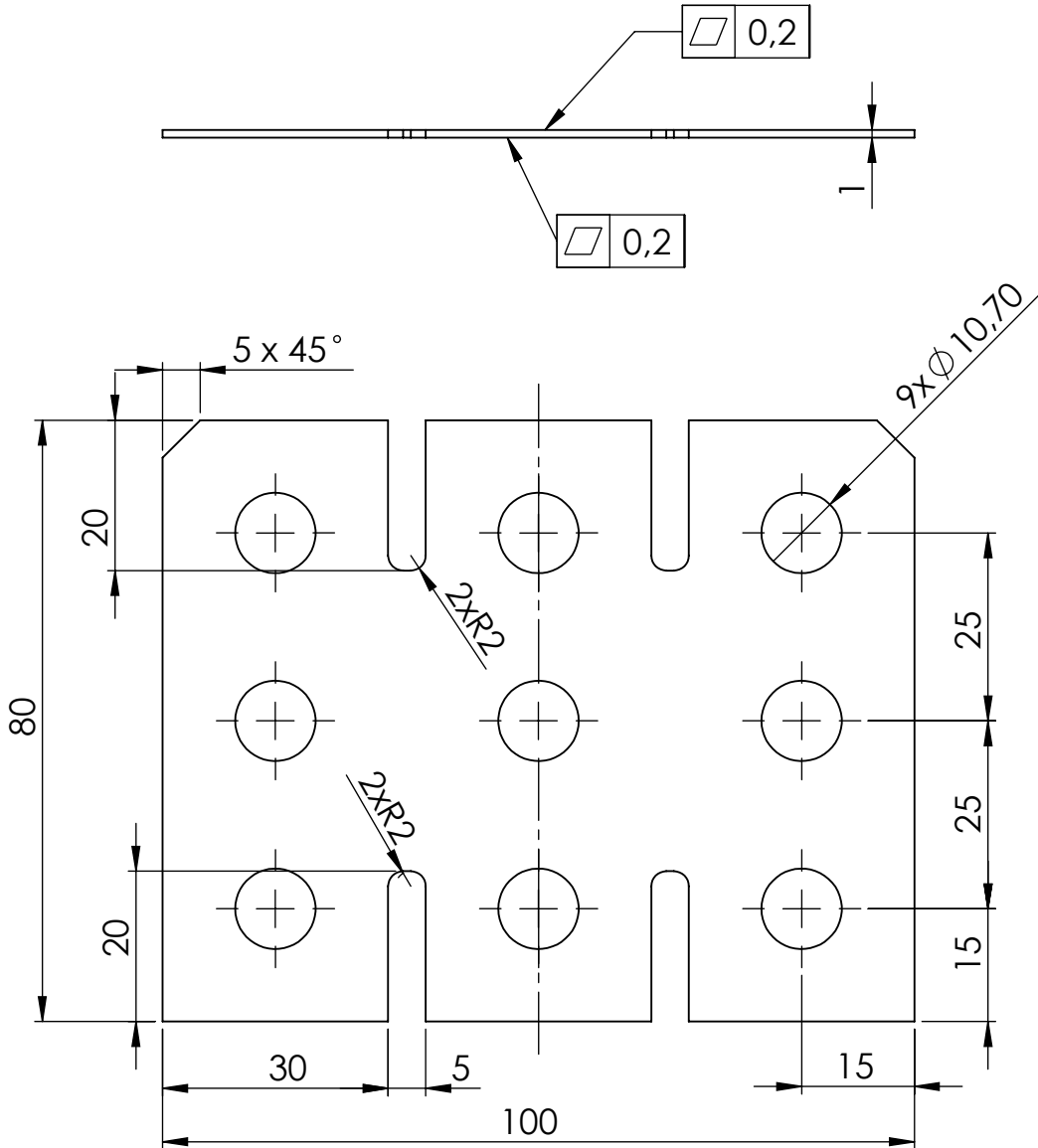
C

B

B

A

A



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:
 JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH
 DRSNOST:
 TOLERANCE:
 LINEÁRNÍ:
 ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNÍ:

ODSTRANIT
OSTŘE HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

ZMĚNA

M 1:1

	JMÉNO	PODPIS	DATUM		
NAVRHL					
PŘEZKOUSEL					
SCHVÁLIL					
VÝROBA					
Z. JAKOSTI				MATERIÁL:	
				HMOTNOST:	

NÁZEV:

VZOREK

Č. VÝKRESU

VYKRES_SMYK

A4

MĚŘÍTKO: 1:1

LIST 2 Z 1 LISTŮ

4

3

2

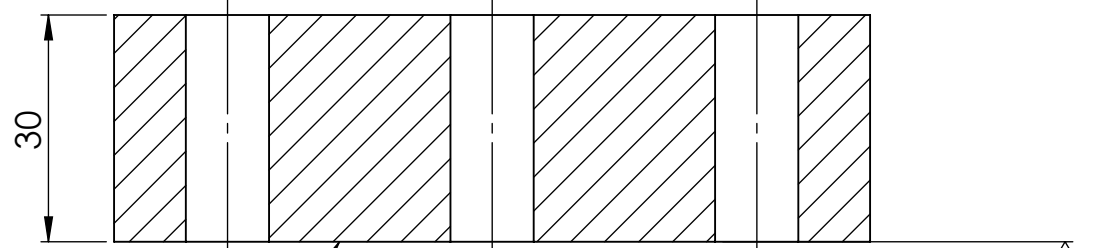
1

**Příloha č. 5 – Výkresová dokumentace přípravku pomocného
tělesa – SROVNÁVACÍ TĚLESO**

4 3 2 1

F

F



0,2

ŘEZ A-A

Ra 6,3

E

E

100

25
A

A

80

25

15

15

35

35

9 x ϕ 11 SKRZ

D

D

C

C

B

B

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:	OPRACOVÁNÍ:	ODSTRANIT OSTŘE HRANY	NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU	ZMĚNA

	JMÉNO	PODPIS	DATUM		
NAVRHL					
PŘEZKOUSEL					
SCHVÁLIL					
VÝROBA					
Z. JAKOSTI					

NÁZEV:	SROVNAVACI_TELESO	Č. VÝKRESU	A4
MĚŘÍTKO: 1:1		LIST 1 Z 1 LISTŮ	

A

A

4

3

2

1

**Příloha č. 6 - Analytický výpočet utahovacího momentu šroubů
přípravku**

1. VSTUPNÍ PARAMETRY

1.1. VSTUPNÍ PARAMETRY - ŠROUBY

M10x30 - DIN 912 - 8.8	označení šroubu
$d := 10 \text{ mm}$	jmenovitý průměr šroubu
$p := 1.25 \text{ mm}$	rozteč šroubu
$d_2 := 9.188 \text{ mm}$	roztečný průměr šroubu
$d_3 := 8.446 \text{ mm}$	malý průměr závitu šroubu
$D_0 := 16 \text{ mm}$	průměr hlavy šroubu

$$S_j := \left(\frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 61.056 \text{ mm}^2 \quad \text{zátěžná plocha šroubu}$$

$$l := 30 \text{ mm} \quad \text{celková délka šroubu}$$

$$l_z := 30 \text{ mm} \quad \text{délka závitové části šroubu}$$

$$R_m := 800 \text{ MPa} \quad \text{mez pevnosti mat. šroubu}$$

$$R_{e02} := 640 \text{ MPa} \quad \text{mez kluzu mat. šroubu}$$

$$E_{\text{šr}} := \frac{R_{e02}}{0.002} = (3.2 \cdot 10^5) \text{ MPa} \quad Y. \text{ modul pružnosti v tahu mat šroubu}$$

1.2. VSTUPNÍ PARAMETRY - ZATÍŽENÍ

$$F_T := 5950 \text{ N} \quad \text{maximální síla přenášená čelistí, stanovená z průběhu síly v MKP modelu}$$

$$f_{vz} := 0.1 \quad \text{součinitel tření mezi vzorkem a čelistí}$$

1.3. VSTUPNÍ PARAMETRY - PŘÍPRAVEK

$$i := 3 \quad \text{počet šroubů}$$

$$E_{př} := 210000 \text{ MPa} \quad Y. \text{ modul pružnosti v tahu mat. příložky}$$

$$b := 25 \text{ mm} \quad \text{výška příložky}$$

2.1. VÝPOČET - ZATÍŽENÍ ŠROUBU

$$F := \frac{F_T}{i \cdot f_{vz}} = 19.833 \text{ kN} \quad \text{max. síla přenášená jedním šroubem}$$

$$s_f := 1.9 \quad \text{součinitel bezpečnosti}$$

$$F_{pp} := F \cdot s_f = 37.683 \text{ kN} \quad \text{předepínací síla na šroubu}$$

2.2. VÝPOČET - STANOVENÍ UTAHOVACÍHO MOMENTU

$$f_h := 0.15$$

součinitel tření pod hlavou

$$M_H := \frac{1}{2} \left(\frac{D_0 + d}{2} \right) F_{pp} \cdot f_h = 36.741 \text{ N} \cdot \text{m}$$

utahovací moment pod hlavou

$$f_z := 0.15$$

součinitel tření v závitě

$$\varphi_z := \text{atan}(f_z) = 0.149$$

třecí úhel v závitě

$$\alpha := \text{atan}\left(\frac{p}{d_2 \cdot \pi}\right) = 0.043$$

úhel stoupání závitu

$$M_Z := \frac{1}{2} \cdot d_2 \cdot F_{pp} \cdot \tan(\alpha + \varphi_z) = 33.683 \text{ N} \cdot \text{m}$$

utahovací moment v závitě

$$M_U := M_H + M_Z = 70.424 \text{ N} \cdot \text{m}$$

celkový utahovací moment