

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B0715A270013 – Strojní inženýrství
Studijní specializace: Konstruování strojů a technických zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Přípravek pro pokročilé testování plechů - Bulge test

Autor: Jakub ŠLEGL
Vedoucí práce: Doc. Ing. Václav KUBEC, Ph.D.

Akademický rok 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jakub ŠLEGL**
Osobní číslo: **S20B0256P**
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**
Specializace: **Konstruování strojů a technických zařízení**
Téma práce: **Přípravek pro pokročilé testování plechů – Bulge test**
Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

Zásady pro vypracování

Bakalářská práce se zaměřuje na možnosti modelování plasticity materiálu v prostředí MKP softwaru. Pozornost je věnována charakteristikám deformačního zpevnění v oblasti velkých deformací. Teoretické poznatky jsou následně využity v parametrické studii zkušebních přípravků pro testování plechů. Součástí práce je pak doporučení konkrétního typu zkušebního zařízení včetně konstrukčních úprav pro společnost zadavatele práce, provedení zkoušek na vybraném zařízení a návrh zpracování naměřených dat.

Osnova bakalářské práce:

1. Analýza stávajícího stavu
2. Definice podmínek průběhu zkoušky Bulge test
3. Realizace referenčních zkoušek
4. Variantní návrh konstrukčních úprav přípravku
5. Virtuální testování optimální varianty
6. Zpracování návodu pro provedení zkoušky

Konzultant: Ing. Danuše Jánská

Rozsah bakalářské práce: **30-40**
Rozsah grafických prací: **podle potřeby**
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] KOH, C. W. *Design of a hydraulic bulge test apparatus*. Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Mechanical Engineering., 2008. Thesis. Massachusetts Institute of Technology. Vedoucí práce Tomasz Wierzbicki.
- [2] MARTÍNEZ PALMETH, L. H. a kol. Design and Analysis of a Bulge Test Device. *Ingeniería e Investigación* [online]. 2021, 41(3), 1-9 [cit. 2022-09-23]. ISSN 2248-8723. Dostupné z: doi:10.15446/ing.investig.v41n3.85756

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Václav Kubec, Ph.D.**
Katedra konstruování strojů

Datum zadání bakalářské práce: **30. listopadu 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2023**

L.S.

Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.
děkan

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

V Plzni dne 30. listopadu 2022

Prohlášení o autorství

Akademický rok: 2022/2023
Jméno a příjmení studenta: Jakub Šlegl
Název bakalářské práce: Přípravek pro pokročilé zpracování plechů – Bulge test

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma „Přípravek pro pokročilé zpracování plechů – Bulge test“ vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....
Podpis studenta

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce doc. Ing. Václavu Kubecovi, Ph.D. za ochotu věnovat mi čas při tvorbě této práce. Dále bych rád poděkoval firmě COMTES FHT a.s. za umožnění provedení veškerých experimentů a nabídky brigády úzce spjaté s touto prací, jmenovitě pak Ing. Antonínu Prantlovi, CSc. a Ing. Danuši Jánské za podmětné rady, připomínky a za trpělivost projevenou v těžkých chvílích, díky které vedla tato práce k úspěšnému konci. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Danielu Melzerovi za pomoc při experimentech. Závěrem bych rád poděkoval rodině za podporu při dosavadním studiu.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Šlegl	Jméno Jakub	
STUDIJNÍ PROGRAM	B0715A270013 Strojní inženýrství		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) doc. Ing. Kubec, Ph.D.	Jméno Václav	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST – KKS		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Přípravek pro pokročilé testování plechů - Bulge test		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2023
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	78	TEXTOVÁ ČÁST	78	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>V rámci této práce bylo cílem rozšíření platnosti křivky zpevnění oceli DP1000. Zkoušky byly provedeny ve spolupráci s firmou COMTES FHT a.s. Základní diagram závislosti napětí a deformace byl určen za pomoci jednoosé tahové zkoušky. Tento diagram byl dále prodloužen pomocí dat z bulge testu provedeného dle normy ČSN EN ISO 16808. Druhým hlavním cílem této práce pak bylo porovnání experimentálních dat z bulge testu a výsledků numerických simulací. Pro numerické simulace byl vytvořen MKP model s předpokladem izotropie materiálu. Při průběhu zkoušek byly napětí a deformace vyhodnocovány za využití optického systému. Dále byly také provedeny konstrukční úpravy měřeného tlaku a siloměru.</p>
<p>KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Zkouška tahem, Bulge test, Počítačová simulace, Skutečné napětí, Skutečná deformace, Křivka zpevnění</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Šlegl	Name Jakub
STUDY PROGRAMME	B0715A270013 Mechanical Engineering	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) doc. Ing. Kubec, Ph.D.	Name Václav
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR
TITLE OF THE WORK	Delete when not applicable	
	Advanced metal sheet testing tool – Bulge test	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KKS	SUBMITTED IN	2023
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	78	TEXT PART	78	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>The aim of this bachelor thesis was to extend the validity of DP1000 steel hardening curve. The tests were performed in cooperation with COMTES FHT a.s. company. The basic stress and strain dependence diagram was defined using a uniaxial tensile test. This diagram was further extended with the use of data from the bulge test carried out according to the ČSN EN ISO 16808 standard. The other objective of the thesis was the comparison of experimental data from the bulge test and the results of numerical simulations. An FEM model was created with the assumption of material isotropy for numerical simulations. During the tests, stress and strain were evaluated using an optical system. Furthermore, structural modifications of the measured pressure and force gauge were also carried out.</p>
KEY WORDS	<p>Tensile test, Bulge test, Computer simulation True stress, True strain, Hardening curve</p>

Obsah

1	Úvod	14
2	Statická zkouška tahem	18
2.1	Zkušební vzorek	18
2.2	Vyhodnocení zkoušky tahem.....	19
2.2.1	Mez kluzu	20
2.2.2	Mez pevnosti	21
2.2.3	Tažnost	21
2.2.4	Kontrakce	21
2.3	Měření zkoušky tahem.....	21
3	Zkouška vyboulením (bulge test)	23
3.1	Popis metody	23
3.2	Teoretický základ bulge testu	25
3.3	Zkušební vzorek	27
3.4	Měřicí zařízení	28
3.5	Měření deformace bulge testu	30
3.6	Měření tlaku bulge testu	31
3.7	Stanovení křivky zpevnění z bulge testu pomocí systému ARAMIS	31
4	Vyhodnocení materiálových zkoušek	32
4.1	Hard_2022	32
4.2	ABAQUS Plug-in Plastic curve generator (PCG).....	33
4.3	Určení jednoosé křivky napětí a deformace z bulge testu na základě normy ČSN EN ISO 16808	33
4.4	MaterialModeler	35
5	Numerická simulace	37
5.1	Metoda konečných prvků	37
5.2	Simulace v softwaru ABAQUS	38
5.2.1	Abaqus CAE.....	38
5.2.2	Tvorba modelu	39
5.2.3	Tvorba sítě konečných prvků	39
5.2.4	Zadání podmínek zatížení a okrajových podmínek.....	39
5.2.5	Výsledky simulace	39
6	Měření	40
6.1	Materiál.....	40
6.2	Statická zkouška tahem	40

6.3	Bulge test	45
6.3.1	Konstrukční úpravy	45
6.3.2	Vlastní měření	49
7	Vyhodnocení křivky zpevnění	54
7.1	Hard_2022	54
7.2	ABAQUS Plug-in Plastic curve generator (PCG).....	58
7.3	Norma ČSN EN ISO 16808.....	59
7.4	MaterialModeler	60
7.5	Porovnání vyhodnocení křivky zpevnění pro tahovou zkoušku.....	61
7.6	Výpočet MKP a porovnání s experimentem.....	64
7.6.1	Výpočtový model	64
3.5.1.	Interpretace výsledků	68
8	Závěr.....	69

Přehled použitých zkratk a symbolů

ČSN	Česká technická norma
EN	European Standards
ISO	International Organization for Standardization
MKP	Metoda konečných prvků
MKD	Metoda konečných diferencí
MOP	Metoda oddělených prvků
MKO	Metoda konečných objemů
MHP	Metoda hraničních prvků
FEM	Finite element method
AHSS	Advanced High-Strength Steel
DIC	Digital Image Correlation
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
PCG	Plastic curve generator
RD	Rolling direction

Seznam obrázků

Obrázek 1- Řez karosérií automobilu [1]	14
Obrázek 2- AHSS v diagramu závislosti pevnosti na tažnosti [2]	15
Obrázek 3 - Numerické modelování tváření plechů [3]	15
Obrázek 4 - Oblasti důležité při tváření materiálu [3]	16
Obrázek 5 - Přehled extrapolovaných křivek podle různých matematických přístupů [4]	16
Obrázek 6 - Přehled používaných zkoušek a jejich rozsahů [6]	17
Obrázek 7 – Ukázka vzorku pro zkoušku tahem.....	18
Obrázek 8- Diagram statické zkoušky tahem [8]	20
Obrázek 9 - Schéma měření deformace [9].....	22
Obrázek 10 - Vývoj poškození ve vzorku v závislosti na zatížení [9].....	22
Obrázek 11- Princip testu Bulge[10].....	23
Obrázek 12- Návrh zkušebního zařízení (základní výkres) [11].....	24
Obrázek 13- Rovnováha napětí pro membránový prvek [12].....	25
Obrázek 14 -Ukázka vzorku včetně patternu	27
Obrázek 15- Snímací aparát systému Aramis [13].....	28
Obrázek 16- Příklad patternu	29
Obrázek 17 – Znázornění transformace sítě [14]	29
Obrázek 18- Výběr r_1 a r_2 pro výpočet skutečného napětí a skutečné deformace pro každou fázi tváření [11]	30
Obrázek 19 - Nejlepší fit koule na základě obrysových hodnot oblastí vymezené R1 kolem vrcholu kopule [15]	30
Obrázek 20 - Kalibrační procedura systému Hard_2022	32
Obrázek 21- Princip ekvivalentní plastické práce [18]	33
Obrázek 22- Příklad závislosti jednoosého napětí-deformace a dvouosého napětí-deformace materiálu, včetně výpočtu dvouosého napětí referenčního bodu a křivky deformačního zpevnění vycházejícího z výsledků zkoušky bulge[10]	34
Obrázek 23 - Ukázka prostředí MaterialModeleru	36
Obrázek 24 – Ukázka z programu ABAQUS. Jsou zde zobrazeny stavy vzorku v průběhu bulge testu s barevnou mapou napětí.	37
Obrázek 25 – Základní typy prvků [20]	38
Obrázek 26- Kótované schéma vzorku pro zkoušku tahem.....	41
Obrázek 27 - Trhací stroj Zwick/Roell Z250	42
Obrázek 28 - Porušený vzorek pro zkoušku tahem.....	42
Obrázek 29 - Smluvní diagram napětí a deformace pro měření RD_1	43
Obrázek 30 - Diagram skutečného napětí a skutečné deformace pro měření RD_1	44

Obrázek 31 – a) Sestava bulge testu bez siloměru b) Sestava bulge testu se siloměrem.....	45
Obrázek 32 - Návrh siloměru	46
Obrázek 33 - Deformovaný model siloměru se zobrazenou ekvivalentní napjatostí.....	47
Obrázek 34 - Deformovaný model siloměru se zobrazenou deformací.....	48
Obrázek 35 - Bulge test se siloměrem a přechodkami	49
Obrázek 36 – Kótované schéma vzorku pro bulge test.....	50
Obrázek 37 - Bulge test.....	50
Obrázek 38 - Porušený vzorek pro bulge test.....	51
Obrázek 39 – Proložení vybouleného vzorku pomocí ideální koule	52
Obrázek 40 - Diagram průběhu tlaku zjištěný přímou metodou pro měření Bulge_test_1	52
Obrázek 41 - Diagram průběhu tlaku zjištěný nepřímou metodou pro měření Bulge_test_1 ..	53
Obrázek 42 - Diagram závislosti napětí a deformace pro měření Bulge_test_1	53
Obrázek 43 – Hodnoty určené meze pro daný posuv deformace 0,2%	55
Obrázek 44 – Bod vzniku krčku.....	56
Obrázek 45 – Experimentální a extrapolované hodnoty závislosti skutečného napětí na skutečné deformaci.....	56
Obrázek 46 - Srovnání křivek zpevnění pro první a druhou iteraci	57
Obrázek 47 - Úvodní tabulka programu PCG	58
Obrázek 48 - Extrapolace podle Hollomona, Ludwika, Swifta a Krupskowskiho	58
Obrázek 49 - Křivka výsledných hodnot z tahové zkoušky a křivka výsledky z bulge testu extrapolovány do jedné výsledné křivky jednoosé napjatosti	59
Obrázek 50 - Grafy získané z MaterialModeleru	60
Obrázek 51 – Křivka zpevnění stanovená programem MaterialModeler	61
Obrázek 52 – Model tahové zkoušky	62
Obrázek 53 - Křivky zpevnění	62
Obrázek 54 - Diagram závislosti síly na posunutí.....	63
Obrázek 55 – Vybrané křivky zpevnění.....	64
Obrázek 56 - Zjednodušený model sestavy Bulge testu se sítí	65
Obrázek 57 - Různé sítě pro vzorek	66
Obrázek 58 - Závislost působícího tlaku na fázi měření	66
Obrázek 59 – Deformovaný model sestavy bulge testu	67
Obrázek 60 - Porovnání závislosti tlaku na posuvu pro simulaci a experiment.....	68

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Chemické složení oceli DP1000	40
Tabulka 2 - vstupní parametry zkouška tahem.....	43
Tabulka 3 - Výsledky tahové zkoušky	43

Seznam příloh

PŘÍLOHA č. 1	i
PŘÍLOHA č. 2	iii
PŘÍLOHA č. 3	v

1 Úvod

V dnešní době jsou kladeny vysoké nároky na dodržování emisních norem, dále pak na bezpečnost a snižování hmotnosti veškerých výrobků. Tyto aspekty se vyskytují například v automobilovém průmyslu. Redukce hmotnosti automobilu ovlivňuje řadu vlastností vozidla. Jednou z těchto vlastností je snížení spotřeby paliva automobilu, s čímž je spojeno snížení emisí. Dalším faktorem je zvyšování bezpečnosti vozidel. Z těchto požadavků vyplývá snaha o snížení hmotnosti za současného zvětšení pevnosti, to by ale nebylo možné bez znalosti mechanických vlastností materiálu. Mezi základní vlastnosti charakterizující materiál patří křivka zpevnění, tvar plochy plasticity a anizotropie.

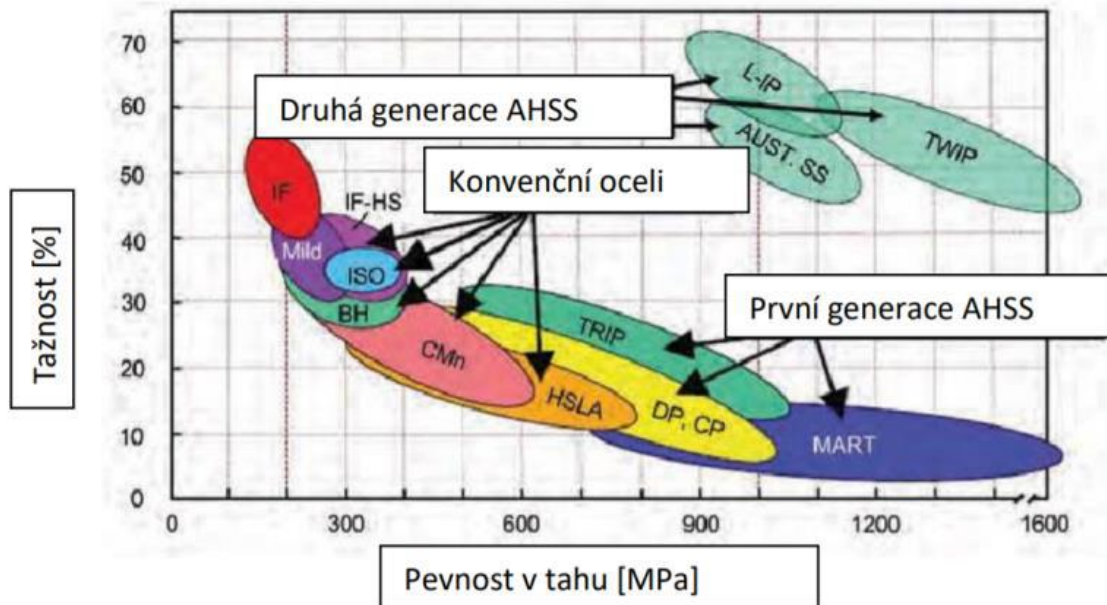


Obrázek 1- Řez karosérií automobilu [1]

Tato práce je převážně zaměřena na získání informací o křivce zpevnění oceli DP1000. Informace o zpevnění této oceli je možné získat několika zkouškami. Hlavními z těchto zkoušek jsou zkouška tahem, zkouška vyboulením (jinak také nazývána bulge test), vícevrstvý kompresní test (stack test) či zkouška smykem (shear test). Nejčastěji používanou metodou pro získání elasto-plastických vlastností materiálu je zkouška tahem. Ta ale omezuje získané informace o plastickém chování materiálu do deformace kolem 30% u materiálů disponujících vysokou tažností a zároveň dobrou pevností takzvaných pokročilých vysoko pevnostních ocelí AHSS (viz Obrázek 2). Nicméně pro správný návrh procesu tváření kovů a následně pro vyhodnocení deformačního chování při bariérové zkoušce (crash test) musí být k dispozici informace až do plastické deformace kolem 80%. Proto jsou používány i další zkoušky jako je například bulge test či stack test. U těchto zkoušek je možné sledovat plastickou deformaci i pro oblast kolem 60% deformace, což nabízí více informací o plastickém chování materiálu.

Obrázek 1 znázorňuje řez karosérií automobilu a důležitost znalosti vlastností materiálu. Barevně jsou zde odlišeny použité materiály s různými mechanickými vlastnostmi. Žlutě jsou zobrazeny materiály s nejvyšší pevností naopak modře jsou označené materiály s pevností,

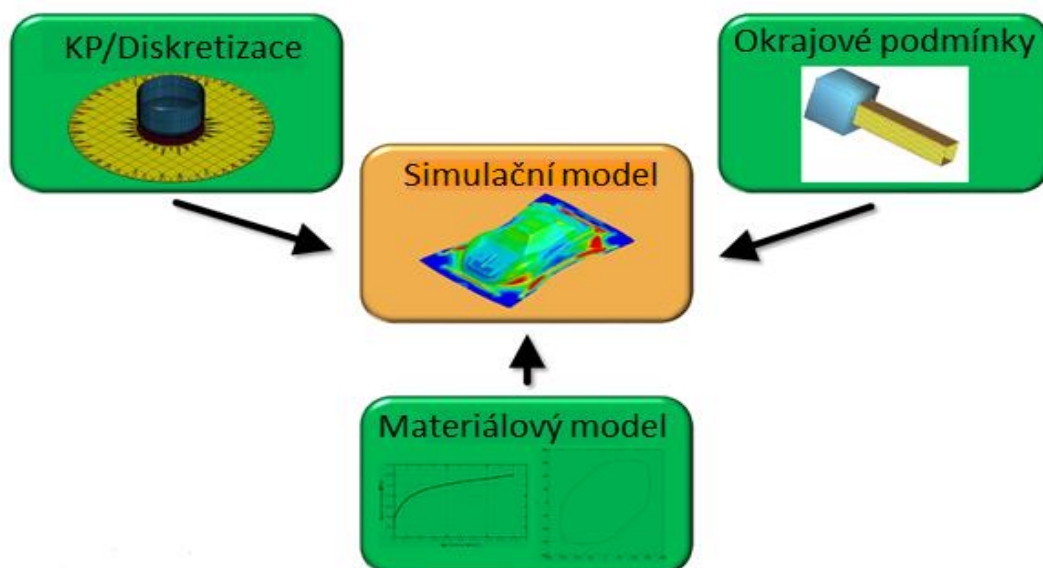
nejnižší a spolu s materiály znázorněnými modrou barvou jsou tvořeny takzvané deformační zóny.



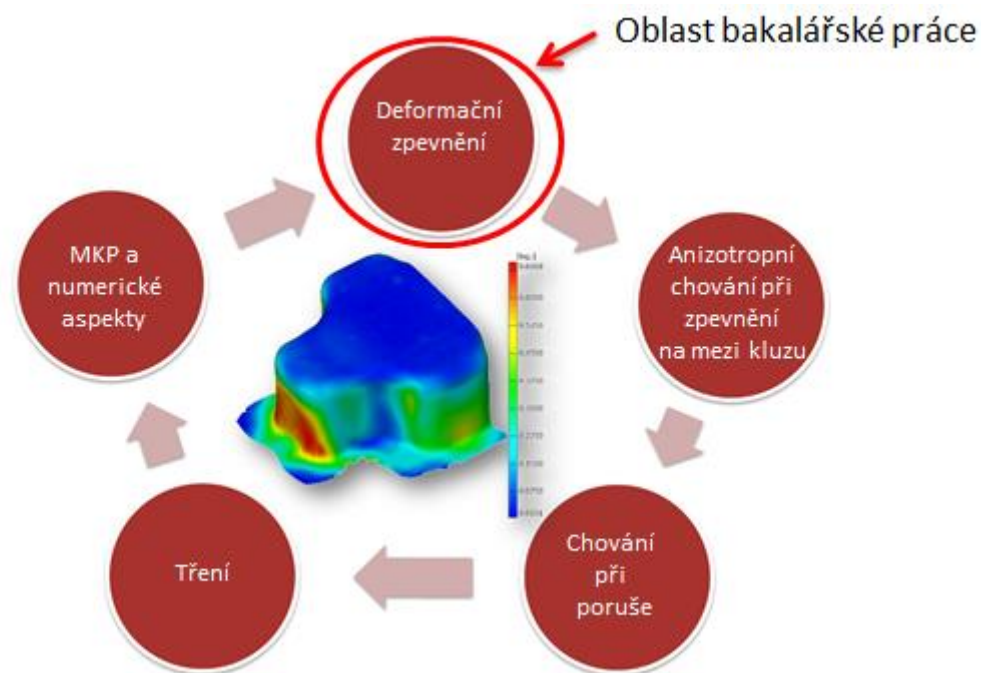
Obrázek 2- AHSS v diagramu závislosti pevnosti na tažnosti [2]

Analýza metodou konečných prvků (MKP) se stala nepostradatelnou pro efektivní navrhování tváření plechů a simulaci bariérových zkoušek. Pro plné využití potenciálu metody konečných prvků je třeba realistický matematický popis chování materiálu. Matematické modely musí být parametrizovány prostřednictvím experimentů, jak je vysvětleno v práci [3]. Postup numerického modelování je popsán viz Obrázek 3. Obrázek 4 znázorňuje oblasti důležité při tváření materiálu a zdůrazňuje zaměření této bakalářské práce právě na deformační zpevnění.

Numerické modelování tváření plechů



Obrázek 3 - Numerické modelování tváření plechů [3]

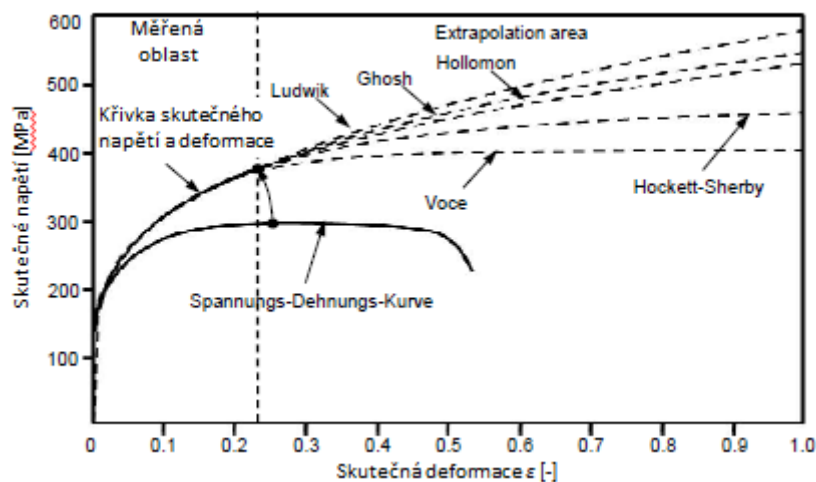


Obrázek 4 - Oblasti důležité při tváření materiálu [3]

Jedním z klíčových parametrů je křivka skutečné napětí - skutečná deformace, která popisuje tzv. deformační zpevnění materiálu (hardening).

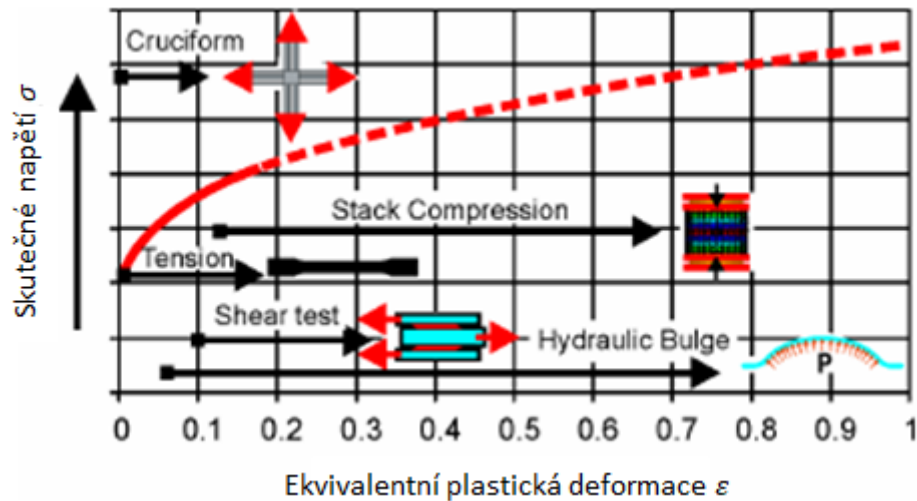
Přijatá a standardizovaná jednoosá tahová zkouška pro zkoušení plechů umožňuje stanovit deformační popis zpevnění. Tato zkouška však poskytuje experimentální údaje pouze do oblasti rovnoměrného prodloužení.

Za bodem rovnoměrného prodloužení se křivka zpevnění obvykle extrapoluje pomocí matematických přístupů. Vzhledem k různým matematickým přístupům vykazují extrapolované křivky zpevnění odlišné tvary, jejich přehled viz Obrázek 5.



Obrázek 5 - Přehled extrapolovaných křivek podle různých matematických přístupů [4]

Přesnější extrapolace lze dosáhnout pomocí testu vyboulení, který umožňuje experimentální stanovení dvouosých křivek skutečné napětí - skutečná deformace při vyšších hodnotách deformace. Přehled používaných zkoušek je uveden (viz [5]) a Obrázek 6 uvádí rozsah použitelnosti jednotlivých typů zkoušek s ohledem na maximální hodnotu plastické deformace, kterou lze daným testem určit (viz [6]).



Obrázek 6 - Přehled používaných zkoušek a jejich rozsahů [6]

Cílem této bakalářské práce je rozšíření platnosti křivky zpevnění. K tomuto rozšíření došlo pomocí spojení křivky tahové zkoušky a extrapolované křivky testu bulge, které byly získány zkouškami. Hodnoty získané měřením s použitím složené křivky deformace bulge testu budou následně porovnány s hodnotami získanými numerickou simulací v softwaru Abaqus. Pro stanovení křivky vzniklé použitím normy ČSN EN ISO 16808, bude sloužit metodika uvedená v normě a software MaterialModeler, který je používán ve firmě COMTES FHT a.s.. Chování materiálu je předpokládáno bez vlivu anizotropie tedy s použitím plochy plasticity von Mises. Tento předpoklad vychází z Diplomové práce Ing. Jiřího Hlavničky [7].

Tato bakalářská práce je rozdělena do několika kapitol. Druhá až pátá kapitola se věnuje teoretickému pozadí za jednotlivými zkouškami a softwary, které byly použity pro vyhodnocení výsledků. Druhá kapitola je zaměřena na zkoušku tahem a třetí kapitola se zabývá bulge testem. Následující kapitola je zaměřena na softwary použité pro vyhodnocení výsledků a poslední teoreticky zaměřená kapitola je věnována numerické simulaci (řešení modelu pomocí metody konečných prvků). Další kapitoly jsou zaměřené více prakticky. Jedná se o kapitolu zaměřenou na vlastní měření zkoušky tahem a bulge testu. V kapitole měření je uvedena vlastní konstrukční úprava (konstrukční úprava měření tlaku a siloměru). Poslední kapitola se zabývá jednotlivým vyhodnocením výsledků a vyhodnocení numerické simulace pro bulge test.

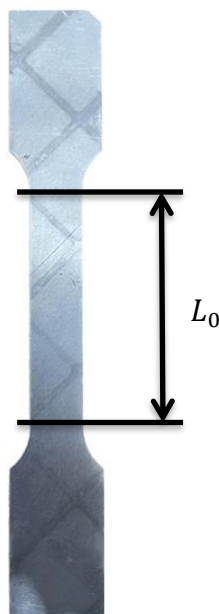
2 Statická zkouška tahem

Statická zkouška tahem je jednou z nejzákladnějších a nejrozšířenějších normalizovaných experimentálních zkoušek. Tato zkouška podléhá normě ČSN EN ISO 6892-1, která popisuje podmínky zkoušky za pokojové teploty. Statická zkouška tahem je zkouškou mechanických vlastností, podle kterých jsou určeny základní mechanické charakteristiky k hodnocení kvality materiálu, dále se pak používá pro výpočet různých konstrukcí, nebo k určení vhodnosti technologických operací.

Statická zkouška tahem spočívá v deformaci zkušební vzorku tahovým zatížením, jedná se o jednoosé namáhání. Při deformaci zkušební vzorku jsou měřeny dvě veličiny: Působící zatížení F , které je obvykle měřeno siloměrem, a prodloužení L , které je měřené extenzometrem. Během této zkoušky na vzorek působí plynule se měnící síly bez rázů. Toto zatížení působí na vzorek rovnoměrně až do okamžiku jeho přetržení.

2.1 Zkušební vzorek

Pro zkoušku tahem jsou používány zkušební vzorky, které mohou mít různé rozměry a tvary odvozené od rozměrů zkoušeného objektu. Zkušební vzorky pro zkoušku tahem jsou normalizované dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Pro tahové zkoušky plechů jsou nejčastěji používány zkušební vzorky ploché s obdélníkovým průřezem (viz Obrázek 7). Na konci zkušební vzorku se nachází část se zvětšeným průřezem ve srovnání s vnitřní měřenou částí vzorku. Tato část vzorku se nazývá hlava a jejím účelem je snadné upnutí vzorku do čelistí trhačího stroje a zároveň zajišťuje, aby lom proběhl v měřené části vzorku L_0 .



Obrázek 7 – Ukázka vzorku pro zkoušku tahem

2.2 Vyhodnocení zkoušky tahem

Diagram tahové zkoušky je dán závislostí prodloužení zkušebního Δl vzorku na zatěžující síle F . Tento diagram však neumožňuje vzájemné srovnání mechanických vlastností různých materiálů. Z tohoto důvodu je tato závislost přepočtena na funkci smluvního napětí σ , které je vypočteno ze vztahu (1), a poměrného přetvoření ε , které získáme ze vorce (2). Tato závislost je následně graficky vyjádřena pomocí takzvaného smluvního diagramu (viz Obrázek 8). Tento diagram je nazýván smluvním, neboť napětí je počítáno stále z původního průřezu vzorku S_0 a není zde uvažováno vytvoření takzvaného krčku, zmenšení průřezu vlivem zaškrcování vzorku před jeho porušením (lomem).

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2)$$

Při deformaci, ale dochází ke změně průřezu vzorku. Abychom tuto skutečnost zohlednili, je zavedena veličina skutečné napětí σ_{true} a skutečná deformace ε_{true} . K hodnotám skutečného napětí je zapotřebí znát okamžitý průřez zkušebního vzorku (3).

$$\sigma_{true} = \frac{F}{S} \quad (3)$$

Tato plocha se během zkoušky zmenšuje, a dokonce se mění i její tvar. Pak je tedy vztah mezi smluvním a skutečným napětím (4).

$$\sigma_{true} = \sigma \cdot \frac{S_0}{S} \quad (4)$$

Za předpokladu, že přírůstky měřených délek jsou velmi malé a že je lze vyjádřit pomocí $\Delta L_1, \Delta L_2, \Delta L_3$ atd. a nově změřené délky jsou L_1, L_2, L_3 atd., tak je celková deformace vypočítána z těchto přírůstků jako (5).

$$\varepsilon_{true} = \frac{\Delta L_1}{L_1} + \frac{\Delta L_2}{L_2} + \frac{\Delta L_3}{L_3} + \dots = \sum \frac{\Delta L_j}{L_j} \quad (5)$$

Pokud je záznamová frekvence ΔL_j dost rychlá, je možné součet nahradit integrálem. Vzorec pro skutečnou deformaci je (6),

$$\varepsilon_{true} = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad (6)$$

kde $L = L_0 + \Delta L$ je okamžitá deformovaná délka vzorku. Z tohoto vyplývá, že vztah mezi smluvní a skutečnou deformací je

$$\varepsilon_{true} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln\left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right) = \varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (7)$$

Aby bylo možné vyjádřit skutečné napětí z výstupů tahové zkoušky (smluvního napětí), je třeba vzorec (4) přepsat jako funkci zatížení a prodloužení. To je provedeno za předpokladu, že změna tvaru při plastické deformaci je způsobena pouze přenosem hmoty v prostoru (změna tvaru při plastické deformaci), ale objem zůstává konstantní. Objem vzorku tedy zůstává po celou dobu trvání zkoušky v oblasti plastické deformace konstantní. Z toho to důvodu lze odvodit vorce (8) a (9), ze kterých vzniká výsledný vztah (10).

$$A_0 L_0 = A L \quad (8)$$

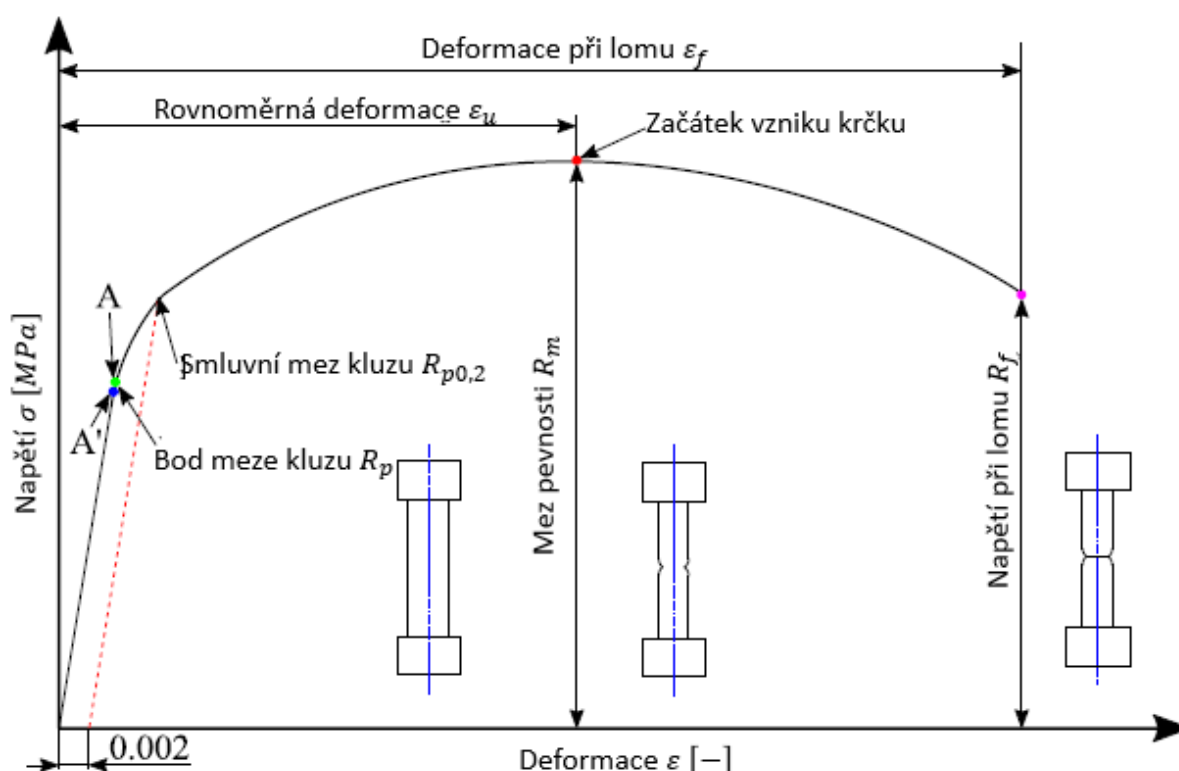
$$\frac{A_0}{A} = \frac{L}{L_0} = \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} = 1 + \varepsilon \quad (9)$$

$$\sigma_{true} = \sigma \cdot (1 + \varepsilon) \quad (10)$$

Vzorce (7) a (10) jsou používány pro přepočítání smluvního napětí a smluvní deformace na skutečné napětí a skutečnou deformaci pouze do vzniku krčku. Po vzniku krčku se z jednoosé napjatosti stává napjatost prostorová a uvedené rovnice již neplatí.

První část tohoto diagramu je popsána Hookovým zákonem. V této téměř lineární části diagramu se zkušební těleso deformuje elasticky. Hookovým zákonem je vyjádřen vztah mezi napětím a prodloužením (11). Sklon deformační křivky vůči ose x je určen Youngovým modulem pružnosti v tahu E .

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (11)$$



Obrázek 8- Diagram statické zkoušky tahem [8]

Mezi základní mechanické charakteristiky, které jsou použité k vyhodnocení zkoušky tahem, patří mez kluzu a smluvní mez pevnosti, které jsou souhrnně nazývané napěťové charakteristiky. Tyto napěťové charakteristiky lze určit ze záznamu napětí a deformace vytvořeného během zkoušky. Dalšími mechanickými vlastnostmi materiálu jsou tažnost a kontrakce (deformační charakteristiky), které jsou určeny pouze na základě rozměru zkušebního vzorku před a po provedení zkoušky.

2.2.1 Mez kluzu

Mezi kluzu je označováno napětí, při kterém dojde k přechodu elastické deformace v plastickou. V diagramu napětí a deformace lze mez kluzu určit jako bod. V tomto bodě dochází k odklonu křivky od lineární části grafu a končí oblast platnosti Hookova zákona. Tímto postupem získaná hodnota by byla výrazně ovlivněna citlivostí použitého snímače

prodloužení. Z tohoto důvodu se v praxi používá smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$. Hodnota smluvní meze kluzu je dána rovnicí (12), kde $F_{p0,2}$ je síla na smluvní mezi kluzu a S_0 označuje velikost plochy počátečního průřezu vzorku.

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

2.2.2 Mez pevnosti

Mez pevnosti R_m je maximální smluvní napětí dosažené v průběhu zkoušky tahem. Lze ji vypočítat dle vztahu (13), kde F_m je maximální síla dosažená při zkoušce a S_0 označuje velikost plochy počátečního průřezu vzorku.

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (13)$$

Hlavní výhodou meze pevnosti je zejména její reprodukovatelnost a možnost srovnání kovových a kompozitních materiálů. Také ji lze využít ke kontrole kvality materiálu a k výpočtu tvrdosti, meze únavy apod..

2.2.3 Tažnost

Tažnost udává trvalé prodloužení měřené délky zkušební vzorku po přetržení v procentech. U oceli tažnost určuje její tvářitelnost, u litin definuje křehkost. Tažnost lze měřit pomocí průtahoměru, ale častěji je tažnost vypočtena pomocí konečné délky vzorku po zkoušce tahem L_u . Za pomoci této hodnoty je tažnost vypočtena dle rovnice (14), kde L_0 je původní délka vzorku.

$$A = \frac{100 \cdot (L_u - L_0)}{L_0} \quad (14)$$

Tažnost je vyhodnocována až po odpružení materiálu, takže zkušební vzorek již není zatížen vnitřním pnutím. Srovnání tažností u stejných materiálů je možné jen v tu chvíli, kdy je měřená délka, tvar i velikost vzorku stejná, nebo když je shodný součinitel proporcionality.

2.2.4 Kontrakce

Jako kontrakce Z je označována maximální hodnota změny plochy příčného průřezu zkušební vzorku po tahové zkoušce. Kontrakce je vypočtena dle vztahu (31), kde S_0 je velikost počátečního průřezu zkoušené délky a S_u je nejmenší plocha průřezu po lomu.

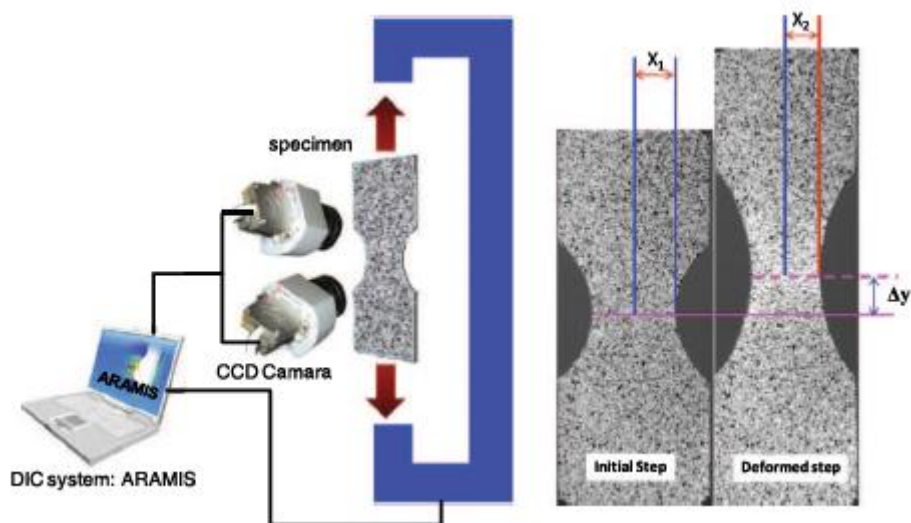
$$Z = \frac{100 \cdot (S_0 - S_u)}{S_0} \quad (15)$$

V praxi je kontrakce určována pro vzorky s kruhovým průřezem, jelikož plocha krčku po lomu je stále přibližně kruhového tvaru. U jiných tvarů vzorku je plocha krčku velmi odlišná od původního tvaru průřezu.

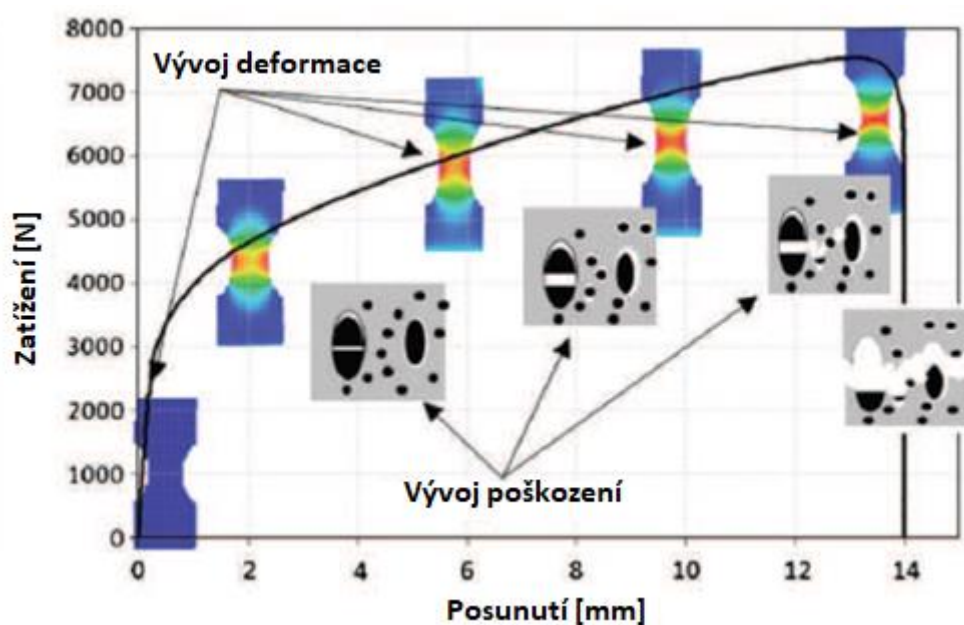
2.3 Měření zkoušky tahem

Měření diagramu tahové zkoušky, který je dán závislostí prodloužení zkušební vzorku na zatěžující síle F , bylo provedeno na trhacím stroji Zwick/Roell Z250. Záznam síly byl snímán siloměrem a velikost prodloužení délky L_0 pomocí digitální korelace obrazu (DIC) systémem ARAMIS od firmy GOM. Tento postup byl zvolen proti klasickému použití mechanického extenzometru z důvodu návaznosti na měření bulge testu. Schéma a postup měření deformace je znázorněn viz Obrázek 9. Obrázek 10 vyobrazuje rozvoj poškození za

mezi pevnosti, vznik krčku (mikro trhlinek), které vedou až k přetržení vzorku. Podrobný popis postupu měření pomocí DIC je popsán v kapitole 3.4.



Obrázek 9 - Schéma měření deformace [9]



Obrázek 10 - Vývoj poškození ve vzorku v závislosti na zatížení [9]

3 Zkouška vyboulením (bulge test)

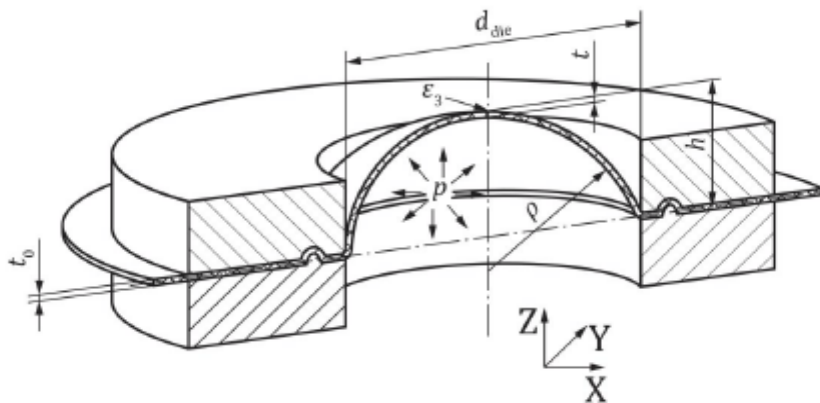
Bulge test je metoda používaná k rozšíření platnosti křivky zpevnění. Tato metoda umožňuje použití mnohem většího rozsahu deformace při dvousosém zatěžování.

Při bulge testu se tedy jedná o metodu využívající dvousosou napjatost, která je téměř bez tření. Při znalosti skutečné tloušťky vzorku v kopuli vydutí, zakřivení vydutí a tlaku kapaliny lze zjistit křivku skutečného napětí v závislosti na skutečné deformaci. K určení zakřivení kopule se využívá optických měřicích systémů.

Bulge test oproti klasické tahové zkoušce umožňuje získat více informací o plastickém chování materiálu, a to zejména o ekvivalentní plastické deformaci. Tahová zkouška neumožňuje získání takovýchto informací kvůli elasto-plastickému chování materiálu a vytváření takzvaného lokalizovaného krčku. U bulge testu se tento jev nevyskytuje, proto lze dosáhnout daleko větších hodnot ekvivalentní plastické deformace.

3.1 Popis metody

Bulge test spočívá v upnutí vzorku kruhového tvaru mezi zápustku a držák vzorku. Na vzorek je následně z jedné strany aplikován tlak kapalinou, obvykle olejem, dokud nedojde k trvalé deformaci vzorku, případně k prasknutí. Tlak kapaliny je během testu neustále měřen pomocí manometru, zatímco deformace se po celou dobu zkoušky zaznamenává optickým měřicím systémem. Sledováním a měřením zaznamenané deformace je zjišťováno místní zakřivení a skutečná hlavní deformace na vrcholu kopule. Celý tento postup podléhá normě ČSN EN ISO 16808 Kovové materiály – Plechy a pásy – Stanovení závislosti dvojosého napětí-deformace zkouškou vyboulením s optickými měřicími systémy.

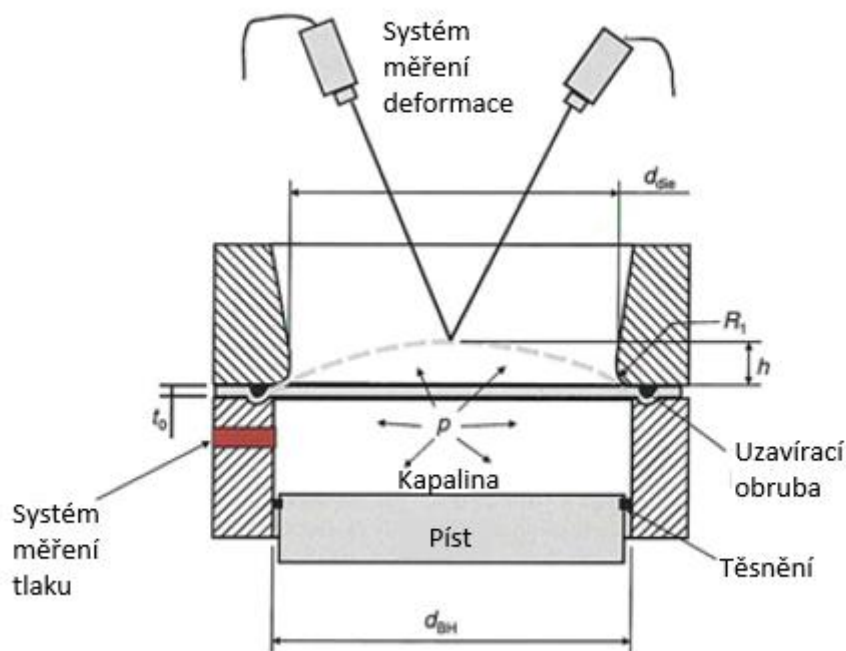


Legenda

h	výška vytaženého výstřihu (vnější povrch)	ρ	poloměr zakřivení
p	tlak v komoře	t_0	počáteční tloušťka plechu (výstřihu)
ϵ_3	skutečná deformace tloušťky (na vrcholu vyboulení)	t	skutečná tloušťka plechu
d_{die}	průměr zápustky (vnitřní)		

Obrázek 11- Princip testu Bulge[10]

Během testu optický systém bezkontaktně zaznamenává souřadnice X, Y a Z bodů sítě na vypouklém povrchu zkušební vzorku. Na základě těchto souřadnic je vypočtena hlavní skutečná deformace ϵ_1 a ϵ_2 pro každý bod vybrané plochy a také poloměr zakřivení ρ pro vrchol koule. Při této zkoušce je nutné zabránit jakémukoliv pohybu vzorku mezi zápustkou a držákem vzorku.



Obrázek 12- Návrh zkušebního zařízení (základní výkres) [11]

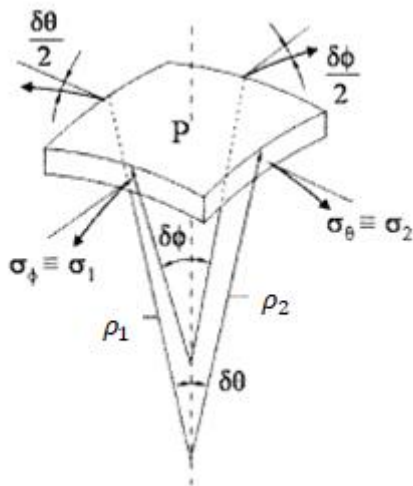
Během zkoušky je na část držáku polotovaru vyvíjen tlak, který držák současně nadlehčuje, a tím snižuje efektivní přitlačnou sílu držáku. To je nutné vzít v úvahu při definování potřebné síly držáku polotovaru. Jako další je nutné zabezpečit, aby byla kapalina v kontaktu s povrchem bez zbytků vzduchu. To proto, aby během zkoušky bylo zabráněno koncentrování energie pomocí stlačení vzduchu. Tento jev by měl za následek uvolnění vyšší energie a tím i větší rozstřík kapaliny při konečném porušení vzorku a zároveň i nepřesnost při určení tlaku p . Vzorek je mezi zápustkou a držákem zajištěn pomocí šroubů. Vzorek je proto navržen se speciálními otvory pro šrouby.

Za předpokladu nestlačitelnosti materiálu zkušebního plechu během plastické deformace je deformace tloušťky ε_3 a skutečná tloušťka polotovaru vypočtena z naměřených hodnot hlavního napětí ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$). Dále je za předpokladu napěťového stavu tenkostěnné kulové tlakové nádoby v horní části kopule vypočítáno skutečné napětí z měřeného tlaku, skutečné tloušťky a poloměru zakřivení vybouleného vzorku.

K ochraně optického měřicího systému před rozstříkem kapaliny při konečném porušení vzorku jsou použity skleněné desky umístěné před čočkami a světelnou jednotkou měřicího systému.

3.2 Teoretický základ bulge testu

Pro stanovení napětí u bulge testu je použita membránová teorie pro axisymetrickou tenkou skořepinu pod rovnoměrným tlakem (viz Obrázek 13). Tato teorie je založena na předpokladu, že skořepina přenáší jen membránové síly, kterými je vyvoláno napětí rovnoměrně rozložené po tloušťce skořepiny. Napjatost je tedy dvouosá neboli membránová. Současně je uvážen předpoklad izotropie materiálu.



Obrázek 13- Rovnováha napětí pro membránový prvek [12]

Napětí v rovině, tlak a geometrie tvoří takzvanou Laplaceovu rovnici (16).

$$\frac{\sigma_1}{\rho_1} + \frac{\sigma_2}{\rho_2} = \frac{p}{t} \quad (16)$$

Za předpokladu izotropního materiálu jsou rovinná napětí ve středu kulové plochy skořepiny stejná (17) a jsou stejné i poloměry zakřivení (18).

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_B \quad (17)$$

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho \quad (18)$$

Výsledkem těchto zjednodušení je výpočet skutečného dvouosého napětí dle následující rovnice (19), kde p je tlak kapaliny, ρ je poloměr zakřivení a t je současná tloušťka vzorku. Tloušťka vzorku je vypočtena dle vzorce (20).

$$\sigma_B = \frac{\rho \cdot p}{2t} \quad (19)$$

$$t = t_0 \cdot \exp(\varepsilon_3) \quad (20)$$

Při předpokladu nestlačitelné plastické deformace materiálu a při zanedbání pružných deformací lze celkovou deformaci tloušťky ε_3 pro výpočet aktuální tloušťky aproximovat celkovou hlavní a vedlejší skutečnou deformaci pomocí rovnice (21).

$$\varepsilon_3 = -(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (21)$$

Na základě principu plastické práce je křivka dvouosého napětí a deformace funkcí plastické deformace tloušťky:

$$\sigma_B(-\varepsilon_3^{pl}) \quad (22)$$

Plastická deformace tloušťky je za předpokladu izotropního lineárního chování materiálu a plastické nestlačitelnosti vypočtena dle vztahu (23).

$$\varepsilon_3^{pl} = -\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + 2 \frac{1 - \nu}{E} \sigma_B \quad (23)$$

Poměr průměru zápusťky k tloušťce by měl být přiměřeně vysoký, aby byl zajištěn stav membránové napjatosti v blízkosti vrcholu zkušebního vzorku a zanedbatelný stav ohybu. Při poměru zápusťky k tloušťce menší než 100 je doporučováno kontrolovat, zda jsou ohybové deformace ve srovnání se skutečnými výsledky deformace tloušťky ε_3 relativně malé. To je provedeno pomocí odhadu ohybových deformací (24).

$$\varepsilon_{bending} = -\ln \left(1 - \frac{t_0}{2\rho} \exp(\varepsilon_3) \right) \quad (24)$$

Pokud jsou tyto ohybové deformace významné, může integrovaná korekce výrazně zlepšit výsledky.

3.3 Zkušební vzorek

Kruhový plochý zkušební vzorek je upnut pevně mezi držák polotovaru a zápustkou, aby se zabránilo vytahování z oblasti šroubového spoje. Příprava vzorku nemá vliv na výsledky, pokud tedy není povrch zkušebního vzorku poškozen poškrábáním či leštěním. Pro vyhodnocení optickým systémem je nutné před vlastním měřením vytvořit na zkoumaném povrchu mřížku, která slouží k vyhodnocení deformace vzorku. Vlastní popis použitého optického systému je v kapitole 3.4.



Obrázek 14 -Ukázka vzorku včetně patternu

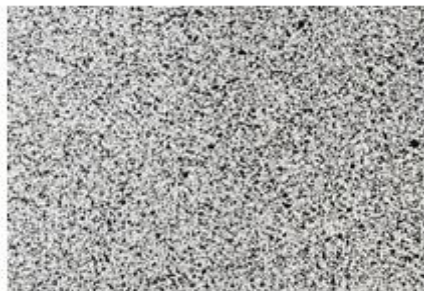
3.4 Měřicí zařízení

Jako měřicí DIC zařízení byl použit systém ARAMIS. ARAMIS od firmy GOM je optický (DIC) měřicí systém používaný ve firmě COMTES FHT a.s. ARAMIS dokáže zaznamenávat zkoušky s vysokým časovým i místním rozlišením, dále pak statické a dynamické testy.



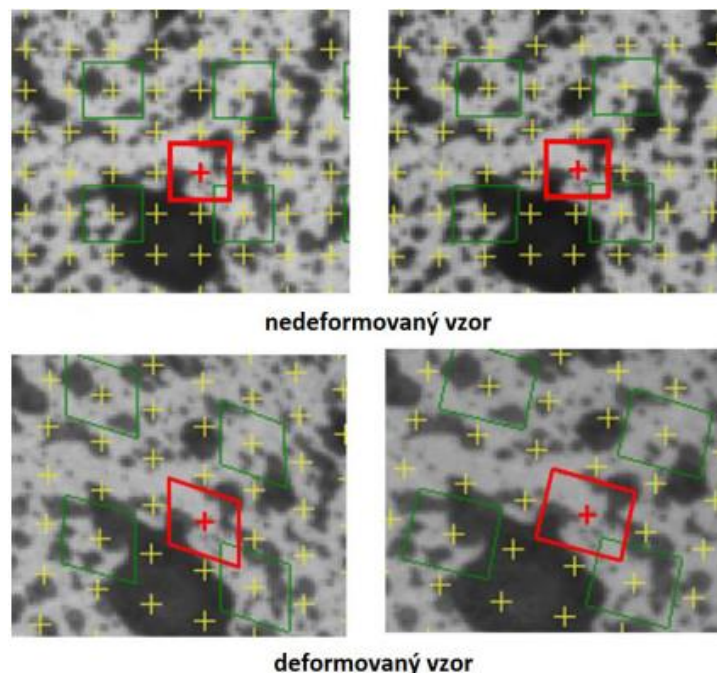
Obrázek 15- Snímací aparát systému Aramis [13]

Postup digitální korelace lze rozdělit do tří kroků. V prvním kroku je příprava vzorku a experimentu, další je pak pořízení digitálních obrazů zvolené plochy vzorku v průběhu zatěžování. Třetím a posledním krokem je zpracování pořízených obrazů počítačovým programem a získání posunutí, případně i dalších informací. Pro nejpřesnější vyhodnocení deformace je při užití digitální korelace obrazu nutné, aby se na povrchu vzorku nacházel kontrastní stochastický vzor (pattern). Tento pattern musí vykazovat izotropní charakter, nesmí se pravidelně opakovat a měl by vykazovat co největší kontrast. Mezi běžné techniky aplikace mřížky patří elektrochemické leptání, fotochemické leptání, ofsetový tisk nebo nástřik stochastického (skvrnitého) vzorku. Mřížka musí být nanesena černou a bílou barvou. V praxi se to provádí odmaštěním zkušebního vzorku a nástřikem bílé barvy na očištěný vzorek, poté se vzorek „popráší“ černou barvou, aby vznikla výše uvedená deformační síť černo-bílé barvy se stochastickým rozložením barev (pattern – černobílý nástřik). Při deformaci se tedy deformuje nejen vzorek, ale i tento vzor, právě díky tomu jsou získány informace o posunutí, která vznikají na vzorku. Proto tato vrstva musí mít velkou přilnavost, aby byla deformována spolu se zatěžovaným vzorkem. Vzorek s tímto vzorem je připraven pro upnutí do zatěžovacího stroje. Jednou z nejdůležitějších částí experimentu je optické zařízení k pořízování obrazu, které je nutné správně nastavit (viz Obrázek 15) s ohledem na neměnnost pozice a kalibrovat. Snímací aparát systému ARAMIS je tvořen dvěma kamerami, které jsou uloženy na jednom rameni, a reflektorem (zdroj světla), který je umístěn mezi nimi. Kamery snímají povrch vzorku, na který je předem nanesen tzv. pattern – černobílý nástřik (viz Obrázek 16).



Obrázek 16- Příklad patternu

Jak již bylo zmíněno výše, sekvence digitálních snímků je pořizována v průběhu zatěžování. Díky tomuto principu je získán postupný průběh posunutí a deformací. Jedná se o porovnání dvou obrazů, které byly pořízeny v určitém časovém intervalu, přičemž obraz před zatěžováním se nazývá referenční obraz a obraz po zatěžování deformovaný obraz. Pro další zpracování pořízených digitálních obrazů je nutné nejdříve definovat takzvanou výpočetní oblast v referenčním obrazu. V této oblasti je vygenerována mřížka bodů, kterou je představována množina bodů, u kterých je vyhodnocováno posunutí (viz Obrázek 17). V podstatě se jedná o porovnání polohy stejného pixelu v referenčním a deformovaném obrazu. Podoblasti musí mít dostatečnou velikost, aby v nich byly obsáhlé unikátní vzory a posunutí tak šla správně rozpoznat, ale zároveň se zvyšující se podobností také stoupá doba výpočtu.



Obrázek 17 – Znázornění transformace sítě [14]

System provádí velmi přesné zachycení obrazu jednotlivých stavů deformace nezávislé na velikosti testovacích objektů (od 10^{-4} až do 10^2m), přičemž se rozsah deformace pohybuje od 0,05% do stovek procent. ARAMIS také umožňuje měření při vysokých snímacích frekvencích až 200 MHz.

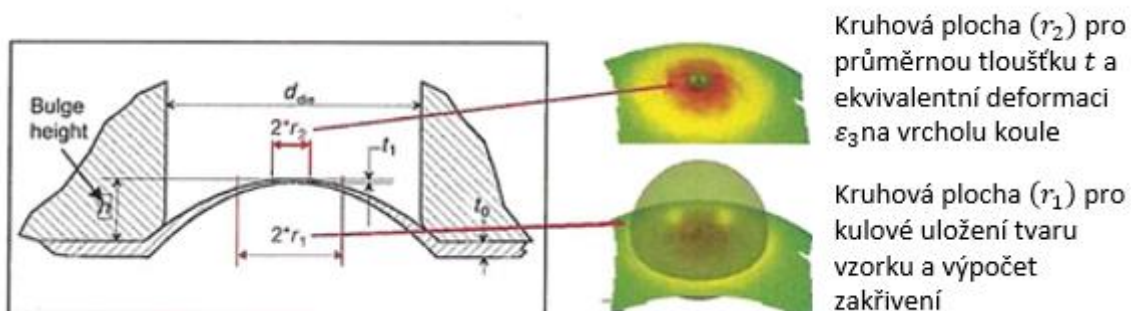
3.5 Měření deformace bulge testu

K určení poloměru zakřivení ρ a skutečných hlavních deformačních napětí ε_1 a ε_2 je používán optický měřicí systém DIC – Aramis.

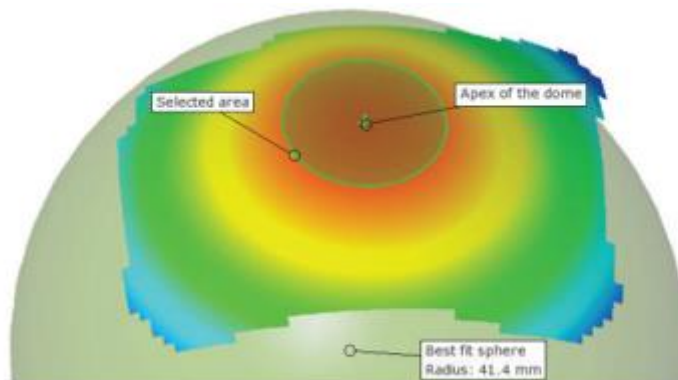
Optický měřicí systém zaznamená posloupnost jednotlivých stavů deformace v daných časových intervalech. Na posledním snímku před prasknutím vzorku je vybrána oblast kopule s největší deformací a toto místo je definováno jako místo, v němž bude určeno skutečné dvouosé napětí a skutečná deformace tloušťky ε_3 . Pro získání rozměru poloměru zakřivení kopule je na základě vybrané oblasti bodů vypočten nejlépe vyhovující rozměr koule d_{die} . Pro tento výběr je definován poloměr kolem vrcholu kopule r_1 . Sledované hodnoty jsou pak určeny pro tuto oblast pro všechny snímky jednotlivých stavů deformace (viz Obrázek 18). Pro co nejpřesnější hodnoty skutečné deformace a ztenčení ve vrcholu kopule je vzata průměrná hodnota vybraných bodů. Druhá oblast pro vyhodnocení je vymezena poloměrem r_2 podobným způsobem jako r_1 (viz Obrázek 18). Na základě tohoto postupu je pro každou fázi deformace vzorku vypočten poloměr zakřivení, průměrná deformace tloušťky, dále i odpovídající hodnoty tloušťky a napětí v kopuli a vrcholu kopule (viz Obrázek 19). Tohle celé vyhodnocení lze provést pro různé hodnoty r_1 a r_2 . Pro dobré pokrytí a získání kvalitních hodnot je doporučen rozsah r_1 a r_2 dle vzorců (25) a (26).

$$r_1 = (0,125 \pm 0,025) \cdot d_{die} \quad (25)$$

$$r_2 = (0,05 \pm 0,01) \cdot d_{die} \quad (26)$$



Obrázek 18- Výběr r_1 a r_2 pro výpočet skutečného napětí a skutečné deformace pro každou fázi tváření [11]



Obrázek 19 - Nejlepší fit koule na základě obrysových hodnot oblasti vymezené R1 kolem vrcholu kopule [15]

3.6 Měření tlaku bulge testu

Tlak kapaliny v komoře lze měřit nepřímou nebo přímo. Při nepřímém měření je tlak zjišťován za pomoci siloměru umístěného u razníku. Na tento siloměr působí síla při pohybu razníku. Tlak je tedy vypočten vydělením působící síly F plochou razníku S viz (31). Tento tlak se ale od skutečného tlaku liší kvůli nižší účinnosti těsnění přibližně o 5%. V praxi je proto doporučována přímá metoda měření tlaku v komoře. Důležité je však zajistit, aby rozsah snímače tlaku byl v souladu s měřeným tlakem. Díky tomuto opatření dojde ke snížení chybovosti měření.

$$p = \frac{F}{S} \quad (27)$$

3.7 Stanovení křivky zpevnění z bulge testu pomocí systému ARAMIS

Křivka zpevnění dvojosého napětí je stanovena na základě těchto hodnot:

- Tlak
- Poloměr křivosti (ARAMIS)
- Okamžitá tloušťka (ARAMIS)
- Poměrná deformace (ARAMIS)

Takto získaná závislost popisuje zpevnění v oblastech vyšší deformace. Pro oblast malých deformací je přesnější křivka zpevnění získaná z tahového testu. Proto je tato křivka dále upravena složením obou závislostí na základě energetické ekvivalence, jak je uvedeno v kapitole 4.3.

4 Vyhodnocení materiálových zkoušek

Pro vyhodnocení materiálových zkoušek a pro stanovení křivek zpevnění pro hodnoty ekvivalentní plastické deformace nabývající hodnoty až $\varepsilon^{pl} = 1$ [-], se využívají ve firmě COMTES FHT a.s. následující programy:

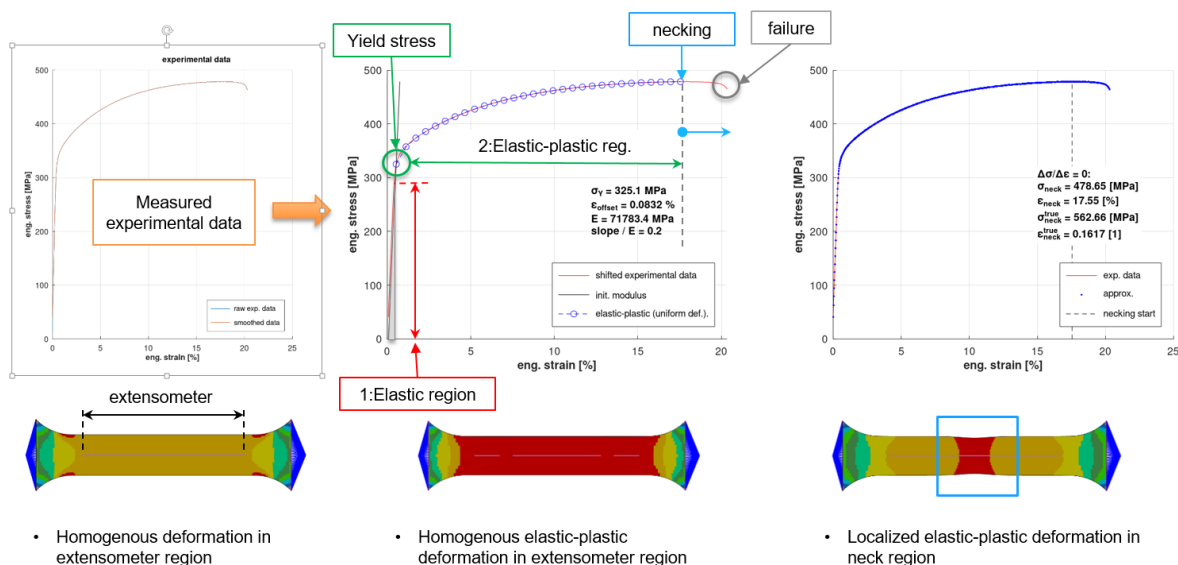
- HARD_2022
- PLASTIC CURVE GENERATOR (PCG)
- MaterialModeler

Tyto programy byly k dispozici během tvorby této bakalářské práce.

4.1 Hard_2022

Na základě naměřených dat posuvu (mm) pomocí extenzometru a síly (N) pomocí siloměru se provede programem HARD_2022 kalibrace elasto-plastického modelu materiálu za předpokladu izotropní elasticity a izotropní plasticity řídicí se zákonem von Mises.

Vlastní kalibrační proceduru lze graficky znázornit viz následující Obrázek 20.



Obrázek 20 - Kalibrační procedura systému Hard_2022

Program je napsán v prostředí OCTAVE a hlavní funkcionality jsou:

- Vyhlazení dat pomocí kubického splinu
- Identifikace Youngova modulu
- Charakterizace plastické oblasti křivky zpevnění do vzniku krčku
- Extrapolace křivky zpevnění v oblasti lokalizovaného plastického tečení
- Export materiálových dat do programu ABAQUS

Detailní popis programu je součástí manuálu včetně doporučení pro nastavení jednotlivých parametrů [16]

Popis a ukázka výstupů je součástí kapitoly 7.1 pro testovaný materiál DP1000

4.2 ABAQUS Plug-in Plastic curve generator (PCG)

PCG je Plug-in, což je program napsaný v jazyce PYTHON v prostředí softwaru ABAQUS, který na základě vstupních dat (smluvní napětí- smluvní deformace) provede vyhodnocení a extrapolaci dat podle zvolených vztahů, a to podle Hollomona (28), Ludwika (29), Swifta (30) nebo Krupskowskiho (31) viz [17].

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad (28)$$

$$\sigma = \sigma_0 + K \cdot \varepsilon_p^n \quad (29)$$

$$\sigma = K \cdot (\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad (30)$$

$$\sigma = K \cdot (\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n \quad (31)$$

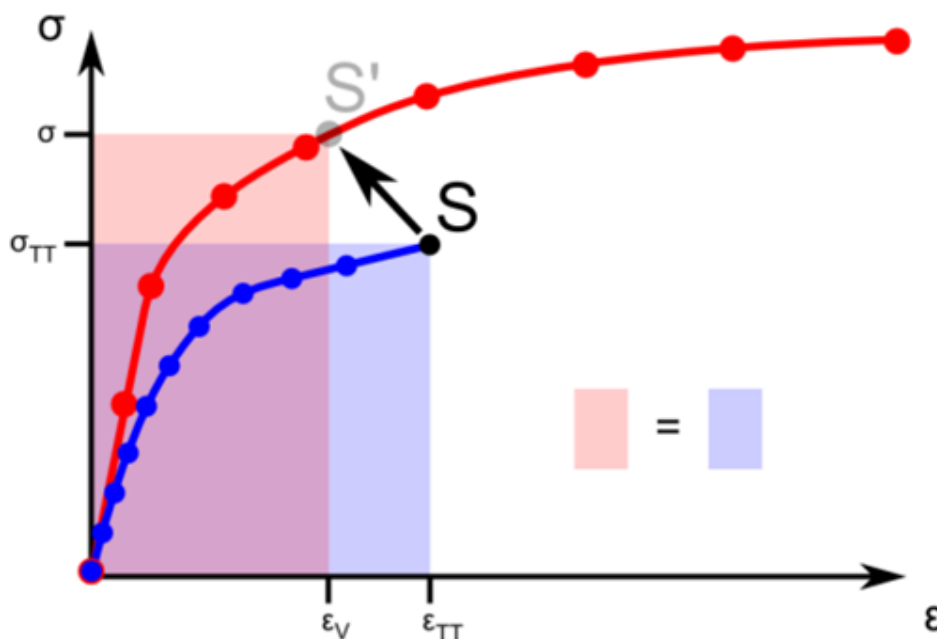
Po vytvoření příslušných křivek následuje export do programu ABAQUS

Popis a ukázka výstupů je součástí kapitoly 7.2 pro testovaný materiál DP1000.

4.3 Určení jednoosé křivky napětí a deformace z bulge testu na základě normy ČSN EN ISO 16808

Ze zkoušky bulge je získána křivka dvouosého napětí a deformace, kde je hlavní a vedlejší napětí (ε_1 a ε_2) vyneseno proti absolutní hodnotě skutečné plastické deformace tloušťky (ε_3). Obvykle je jako referenční hodnota pro výpočet napětí v místě kluzu použita křivka skutečného napětí a skutečné deformace získaná z jednoosé tahové zkoušky, která je prováděna ve směru válcování vzorku. Za pomoci normy ČSN EN ISO 16808 je možné porovnáním křivek napětí a deformace dvouosého namáhání s referenční jednoosou křivkou vypočítat bod dvouosého namáhání.

Pro získání ekvivalentní jednoosé křivky z naměřené dvouosé křivky plasticity je použit princip ekvivalentní plastické práce viz Obrázek 21.



Obrázek 21- Princip ekvivalentní plastické práce [18]

Cílem této metody je najít optimální hodnotu poměru dvousóho napětí f_{bi} (32), kde σ_{f-ref} je referenční napětí získané z tahové zkoušky a σ_{B-ref} referenční napětí získané z bulge testu.

$$f_{bi} = \frac{\sigma_{B-ref}}{\sigma_{f-ref}} \quad (32)$$

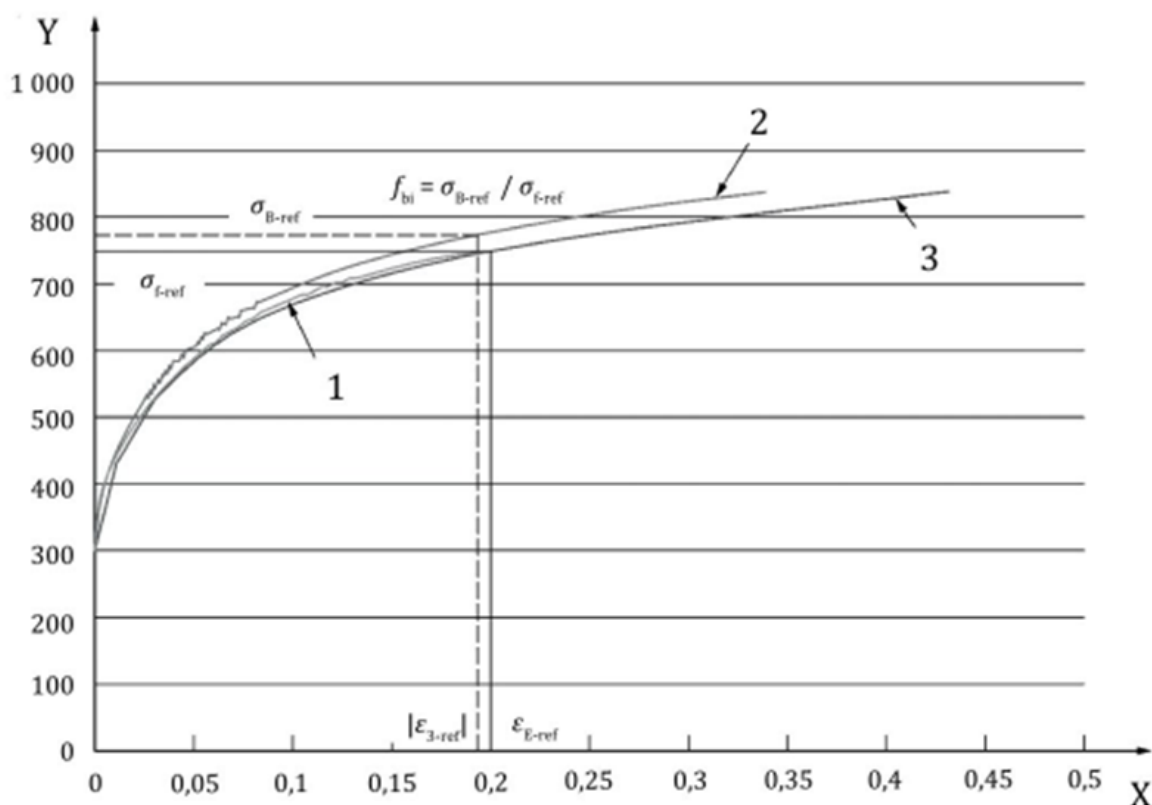
Vzhledem k tomu, že křivka bulge testu je udávána v diskretních hodnotách, neexistuje dvojice napětí a deformace, která by dokonale splňovala podmínku rovnosti. Proto je zavedeno omezení (33) a (34), kde ε_{E-ref} je referenční ekvivalentní deformace a m je index u sloupců napětí a deformace, při kterých musí být splněno dané omezení.

$$\sigma_{B,m} \cdot |\varepsilon_{3,m}| \leq \sigma_{f-ref} \cdot \varepsilon_{E-ref} \quad (33)$$

$$\sigma_{B,m+1} \cdot |\varepsilon_{3,m+1}| \geq \sigma_{f-ref} \cdot \varepsilon_{E-ref} \quad (34)$$

Požadované referenční napětí z bulge testu je vypočítáno pomocí lineární interpolace podle rovnice (31).

$$\sigma_{B-ref} = \sigma_{B,m} + \frac{\sigma_{B,m+1} - \sigma_{B,m}}{\sigma_{B,m+1}|\varepsilon_{3,m+1}| - \sigma_{B,m}|\varepsilon_{3,m}|} (\sigma_{f-ref}\varepsilon_{E-ref} - \sigma_{B,m}|\varepsilon_{3,m}|) \quad (35)$$



Legenda

X $\varepsilon_E, |\varepsilon_3|$

Y σ (MPa), σ_B (MPa)

1 σ z jednoosé zkoušky

2 σ_E ze zkoušky bulge

3 σ ze zkoušky bulge

Obrázek 22- Příklad závislosti jednoosého napětí-deformace a dvousóho napětí-deformace materiálu, včetně výpočtu dvousóho napětí referenčního bodu a křivky deformačního zpevnění vycházejícího z výsledků zkoušky bulge[10]

S hodnotou poměru dvouosého napětí f_{bi} lze křivku bulge testu transformovat na ekvivalentní křivku napětí a deformace (viz Obrázek 22). V kombinaci s jednoosou křivkou napětí a deformace z tahové zkoušky lze transformovanou křivku použít k vytvoření křivky zpevnění s extrapolovanými údaji mimo deformace při rovnoměrném prodloužení.

Tento postup, který vychází z normy ČSN EN ISO 16808, byl naprogramován v prostředí EXCEL.

Popsaná metoda umožňuje zpracování údajů o napětí a deformaci z bulge testu za předpokladu izotropního zpevnění. Existují obecnější metody, například metody od Kuwabara et al., Barlat et al., Yoon a Singvant et al., které vycházejí z celkové plastické práce a neomezují se na čistě izotropní zpevnění.

Popis a ukázka výstupů bude součástí kapitoly 7.3 pro testovaný materiál DP1000.

4.4 MaterialModeler

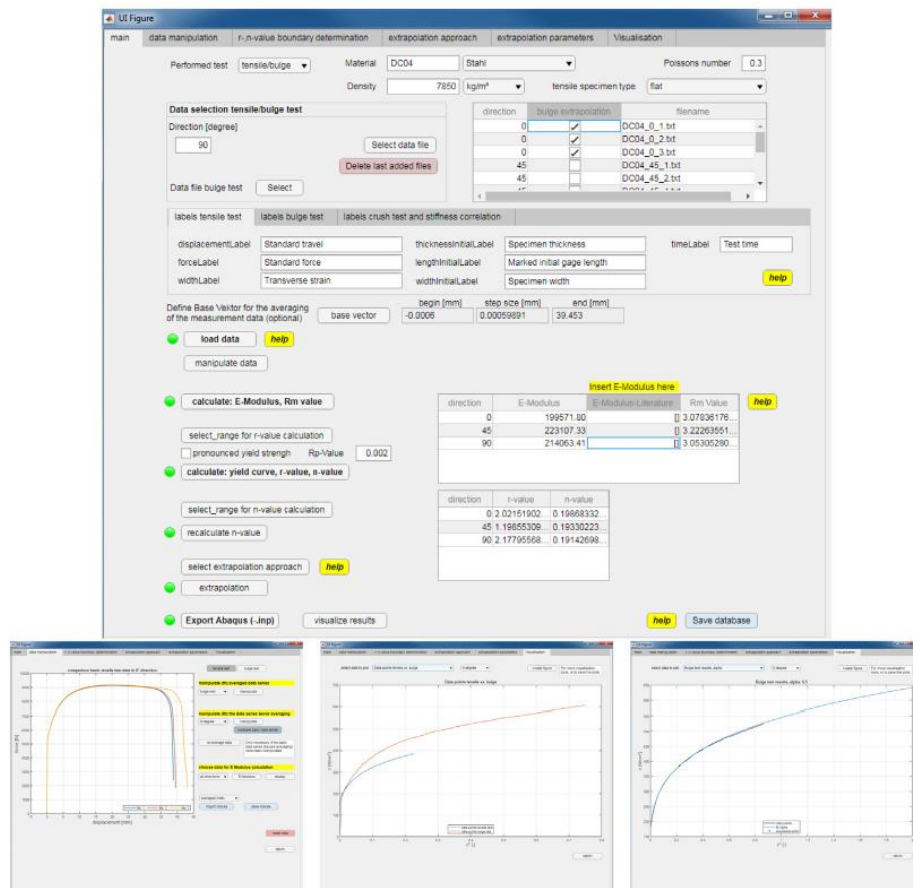
MaterialModeler je software, který je schopen zpracovat více vstupních dat z tahových zkoušek, bulge testu a tlakových zkoušek, které jsou nejčastěji používané experimenty pro charakterizaci kovových materiálů. Vychází z daného souboru zkušebních dat a lze z něj získat materiálové parametry pro různé materiálové modely a exportovat pro přímé použití, např. v programu ABAQUS.

MaterialModeler obsahuje čtyři hlavní moduly:

- Vstupní modul
- Modul výpočtu
- Modul exportu
- Modul vizualizace

Zprůměrovaná data se používají pro všechny výpočty. První vypočtený materiálový parametr je Youngův modul (E-Modulus). Vzhledem k tomu, že E-Modulus slouží v následujících krocích jako vstupní parametr, je možno jeho hodnotu definovat také uživatelem. Nakonec se zadají další parametry pro charakterizaci vybraných materiálových modelů.

MaterialModeler je vytvořen v prostředí Matlab a je distribuován jako exe modul (viz [19]).



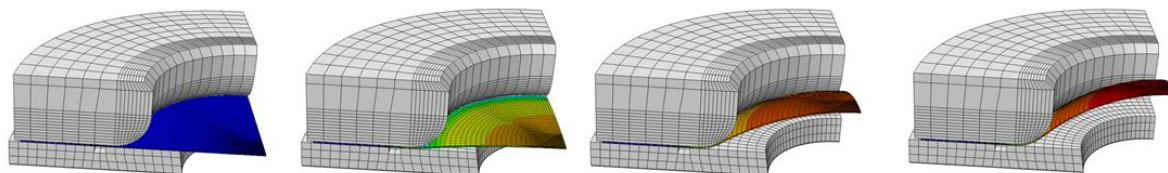
Obrázek 23 - Ukázka prostředí MaterialModeleru

Ukázka grafického prostředí včetně vstupních dat, vypočtená data pro tahovou zkoušku a konečný materiálový model se zahrnutím zkoušky vyboulení.

Popis a ukázka výstupů je součástí kapitoly 7.4 pro testovaný materiál DP1000.

5 Numerická simulace

Numerické simulace nacházejí stále větší uplatnění při konstrukci lisovacího nářadí či návrhu technologie lisování. Cílem těchto počítačových simulací je dosáhnout výsledků blížících se co možná nejvíce realitě. Největší výhodou je provádění dílčích zkoušek bez nutnosti výroby složitých experimentálních prototypů.



Obrázek 24 – Ukázka z programu ABAQUS. Jsou zde zobrazeny stavy vzorku v průběhu bulge testu s barevnou mapou napětí.

Simulace jsou založeny na principu experimentování s matematickým modelem. Pod pojmem numerická simulace je většinou rozuměna aplikace metody konečných prvků (MKP). Dále je ale možné používat i jiné metody například metodu konečných diferencí (MKD), metodu oddělených prvků (MOP), metodu konečných objemů (MKO) nebo metodu hraničních prvků (MHP). Většina těchto metod potřebuje ke své správné funkci zadání odpovídajících působících sil a posuvových či kontaktních okrajových podmínek. Dalším důležitým krokem pro získání spolehlivých výsledků je zadání materiálových dat. Tato materiálová data jsou obvykle získána z tahové zkoušky, která je dostatečně jednoduchá a zároveň udává informace o plastickém anizotropním chování daného materiálu. Matematické modely lze chápat jako zjednodušené modely reálných systémů, přičemž míra zjednodušení výrazně ovlivní výsledky dané simulace.

Simulace v současné době napomáhá celé řadě výrobních oborů a umožňuje provádět širokou škálu analýz například napěťové a deformační analýzy statických a dynamických stavů, teplotní analýzy, simulace výrobních procesů či simulace diskrétních událostí.

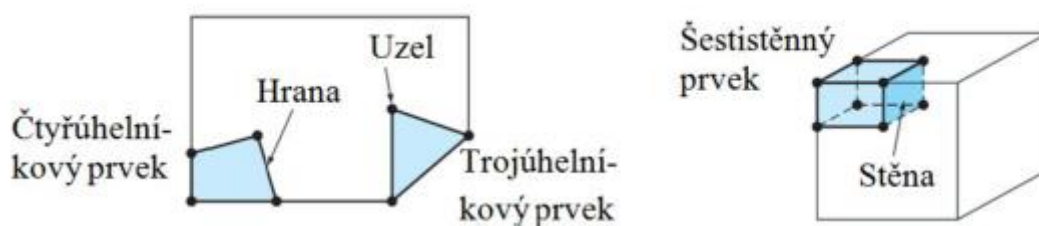
V oblasti tváření jsou simulace využívány za účelem popisu tvářecích dějů na základě materiálových, geometrických a výpočetních modelů. Za pomoci různých analýz lze zohlednit různé faktory jako závislost na teplotě, stupeň a rychlost přetvoření, závislost na třecích stykových podmínkách, fyzikálních a mechanických vlastností tvářeného tělesa i nástroje. Nejčastěji je řešen rozbor tvářecí síly a přetvárné práce, deformační a napěťové analýzy, průběh zatížení, kritéria porušení nebo optimalizace tvarů či rozměrů tvářecích těles či nástrojů.

5.1 Metoda konečných prvků

Jak již bylo zmíněno, tato výpočtová metoda (anglicky „finite element method“ – FEM) je v praxi zdaleka nejpoužívanější. Metoda konečných prvků je považována za nejvýkonnější a nejuniverzálnější metodu matematického modelování v simulačním procesu. Tato metoda je všeobecně známa jako zobecněná varianta Ritzovy metody se speciální bází, neboli metoda variační. Tato metoda má velmi široké využití lze ji uplatnit při řešení mechaniky neformovatelných těles. Z toho vyplývá že pomocí metody konečných prvků lze řešit úlohy statiky a dynamiky konstrukcí a jiných aplikacích téměř ve všech odvětvích průmyslu. Kromě toho je metoda konečných prvků uplatněna při řešení fyzikálních jevů jako proudění, dále je využita i při řešení úloh biomechaniky a dalších.

Metoda konečných prvků je přibližnou numerickou metodou řešení rovnic popisujících chování deformovaného materiálu. Tato metoda je použita k řešení velkého množství různých úloh bez omezení, které by vyplynuly z geometrie součástí. Materiálové modely mohou být velmi komplikované a odrážejí danou studovanou fyzikální strukturu. Pro výpočet je použita soustava rovnic teorie plasticity, rovnice kontinuity toku a dále konstituční rovnice.

Princip této metody spočívá v nahrazení spojité oblasti s nekonečným počtem bodů takzvanými konečnými prvky (neboli jednoduchými geometrickými útvary). Základem metody konečných prvků je rozdělení tělesa na takové prvky, které se dají snadno matematicky popsat. U rovinné oblasti se jedná zejména o trojúhelníkové nebo čtvercové prvky, u prostorové oblasti se jedná o čtyřstěnné prvky, pětistěnné prvky atd. (viz Obrázek 25). Tyto prvky jsou následně spojeny konečným počtem uzlů. Každému z těchto prvků je následně přiřazena soustava aproximačních funkcí s konstantními parametry, jimiž jsou nejčastěji polynomy, jejichž stupeň je určen počtem uzlů. Na hranicích jednotlivých prvků je požadována spojitost. Tomuto rozdělení se říká diskretizace a je tím vytvářena síť konečných prvků. Jedná se o převod tělesa indiskrétního na těleso diskrétní. Nastavení této sítě mohou být různá podle potřeby například nastavení hustoty sítě, závislost na geometrii zkoumaného tělesa a dalších parametrech. Po zavedení okrajových podmínek lze v jednotlivých uzlových bodech vypočítat požadované hodnoty řešením soustavy lineárních algebraických rovnic.



Obrázek 25 – Základní typy prvků [20]

Jedinou nevýhodou metody konečných prvků jsou vysoké požadavky na hardware a vysoká cena softwarů, využívajících tuto metodu. Mezi nejčastěji používané simulační obecné softwary patří například ANSYS, ABAQUS a další. Existují i speciální softwary pro řešení dané aplikace jako je objemové nebo plošné tváření. Příkladem takových softwarů je DEFORM či ATOFORM.

5.2 Simulace v softwaru ABAQUS

ABAQUS je specializovaný program pro řešení metody konečných prvků. Samotný ABAQUS je složen z několika základních programů, jimiž jsou Abaqus CAE, Abaqus Standart, Abaqus Explicit a další doplňkové programy.

5.2.1 Abaqus CAE

Tento základní program je grafické prostředí sloužící k vytvoření modelu, nastavení jeho materiálových vlastností, zatěžovacích kroků, zatížení, vytvoření sítě konečných prvků (rozdělení tělesa na jednotlivé konečné prvky) a nastavení okrajových podmínek úlohy. Z tohoto nastavení je následně vygenerován soubor, který je poté načten do řešiče („solver“), ve kterém proběhne vlastní výpočet metody konečných prvků. Po dokončení tohoto výpočtu je do této části programu načten výsledek, který slouží k vizualizaci výsledků ve formě deformovaného tvaru, barevných map, rozložení sledovaných veličin, animací a grafů.

5.2.2 Tvorba modelu

V programu ABAQUS má uživatel mnoho možností jak vytvořit model pro simulaci. Jednou z možností je importování modelu z CAD systémů. Abaqus podporuje převedení modelu z různých CAD systémů. Mimo obecné CAD formáty (jako step, iges...) je v Abaqusu podporováno rozhraní z CATIA V4 i V5, SolidWorks a Pro Engineer. Převedení modelu z CAD systémů je vhodné pro další simulace prováděné s modelem. Hlavním nárokem je převedení modelu bez deformace či ztráty doplňujících parametrů potřebných pro simulaci. Dále lze také vytvořit geometrii modelu přímo v prostředí programu Abaqus.

5.2.3 Tvorba sítě konečných prvků

Tvorba sítě je v prostředí Abaqus zjednodušená a značně urychlená použitím řady přístupů. Příkladem může být typologie sady nástrojů, které jsou použity k vytvoření přesné a čisté sítě převedeného modelu z CAD systému.

5.2.4 Zadání podmínek zatížení a okrajových podmínek

Pro definování konkrétních podmínek zatížení je nutné zadávat zatížení a okrajové podmínky. Lze také nastavit použití jednoho nebo více případů statických zatížení anebo ustálené dynamické zatížení. Podmínky zatížení lze definovat přímo podle zatížení a okrajové podmínky, nebo v podobě kombinací dříve definovaných zatížení. K dispozici mohou být například posunutí, souměrnost, definice vnitřního tlaku či rychlost daného bodu na modelu.

5.2.5 Výsledky simulace

Po zadání všech potřebných dat a dokončení řešení je ve výsledcích k dispozici vizualizace a vykreslení výsledků, které jsou dostupné jen v programu Abaqus. Mezi tyto výsledky patří výsledný zdeformovaný model, barevné mapy zobrazující napětí, deformaci či působící síly, dále pak grafy a animace procesu deformace. Veškeré tyto poznatky jsou následně využity pro interpretaci a zhodnocení výsledků analýzy.

6 Měření

6.1 Materiál

Materiálem, který byl použit pro všechny zkoušky a testy v této bakalářské práci, byla ocel DP1000 přesněji CR700Y980T-DP. Hlavními prvky obsaženými v této oceli jsou mangan, chrom, křemík a uhlík viz Tabulka 1. Tato ocel byla dodána ve formě vzorků, které byly vyříznuty z pásu plechu o tloušťce 0,8 mm ve směru válcování RD.

Tabulka 1 – Chemické složení oceli DP1000

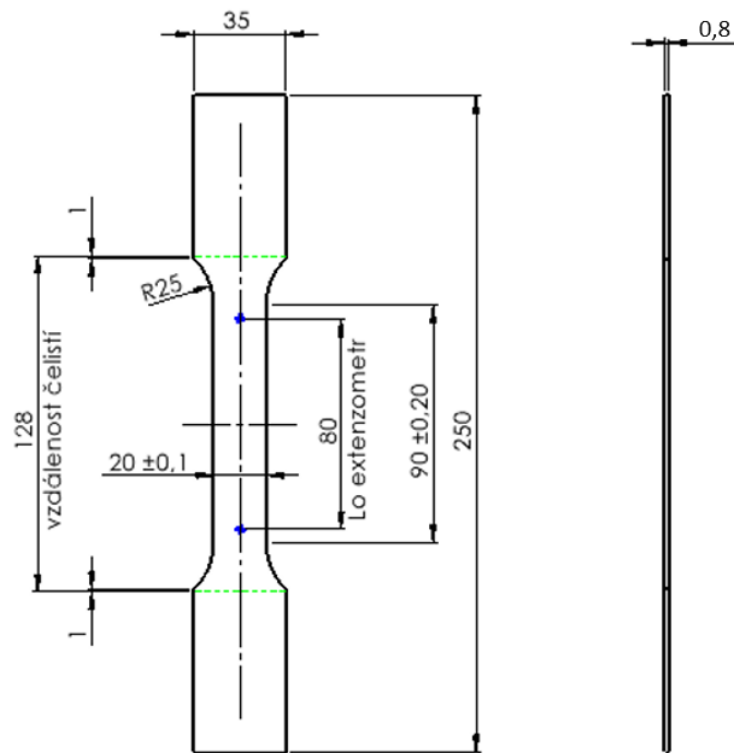
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
0,16	0,20	2,27	0,012	<0,001	0,48	0,008	0,018	0,014

Al	B	Nb	Ti	V	W
0,057	0,0010	0,023	0,002	0,007	0,005

Literatura udává mez pevnosti v tahu $R_m = 980 \div 1130 \text{ MPa}$ a smluvní mez kluzu v tahu $R_{p0,2} = 700 \div 850 \text{ MPa}$. Na základě předchozího měření (Diplomová práce Ing. Jiřího Hlavničky [7]) je materiál bez výrazné anizotropie.

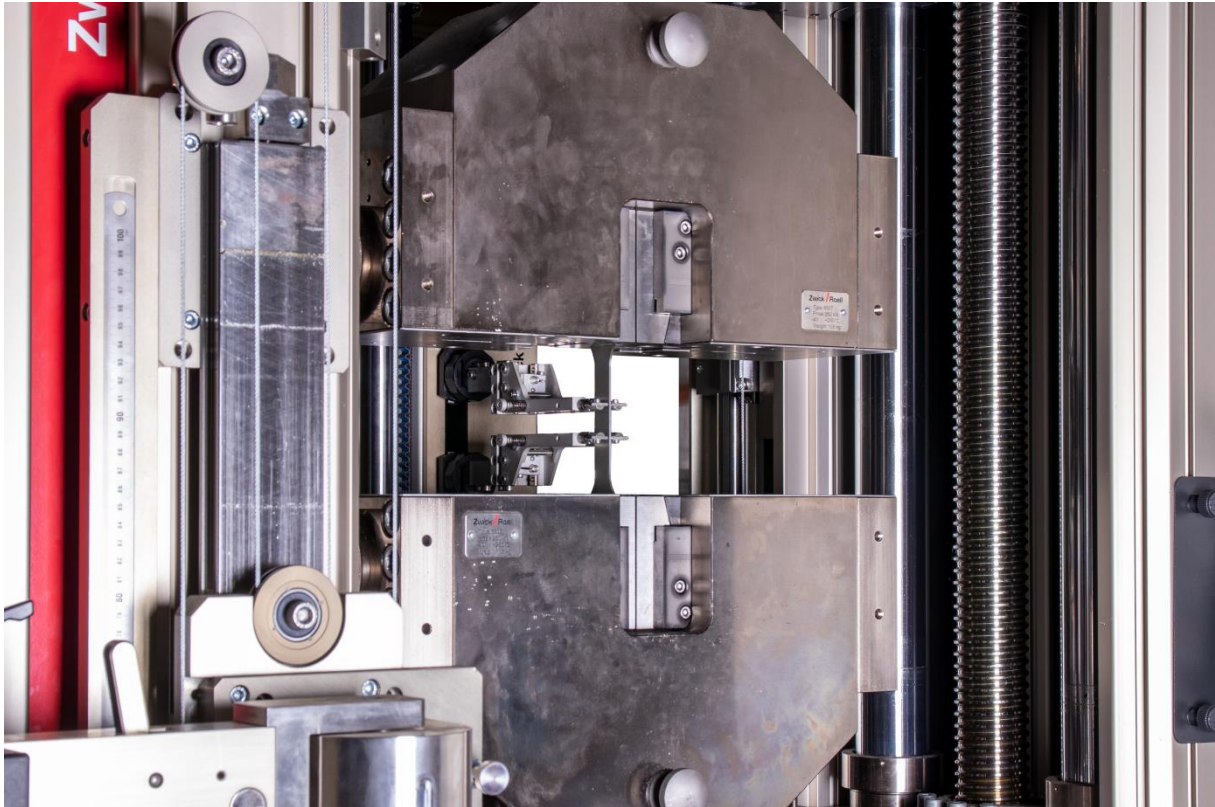
6.2 Statická zkouška tahem

Statická zkouška tahem je prováděna dle normy ČSN EN ISO 6892-1 Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty dostupné z [21]. Pro tuto zkoušku je jako první nutné připravit vzorky, na kterých bude tato zkouška realizována. Při zkouškách, které byly provedeny, se jednalo o ploché zkušební vzorky vystřižené z pásu plechu. Rozměry vzorků jsou dány viz Obrázek 26.



Obrázek 26- Kótované schéma vzorku pro zkoušku tahem

Tyto vzorky jsou nyní připraveny pro statickou zkoušku tahem. Statická zkouška tahem je prováděna na trhacím stroji Zwick/Roell Z250 (viz Obrázek 27). Zkušební vzorky jsou upnuty do čelistí trhacího stroje a následně zatíženy tahovou silou.



Obrázek 27 - Trhací stroj Zwick/Roell Z250

Statická zkouška tahem je zakončena porušením zkušebního vzorku. Toto porušení vzniká v místě zúžení, vytvořením takzvaného krčku.



Obrázek 28 - Porušený vzorek pro zkoušku tahem

Statická zkouška tahem je vyhodnocována pomocí softwaru testXpert III, který přímo náleží ke stroji Zwick/Roell Z250. Tento software zaznamenává a zároveň vyhodnocuje průběh zkoušky. Dále je pak zkouška prvotně vyhodnocována pomocí EXCEL maker firmy COMTES FHT a.s. Výsledkem statické zkoušky tahem jsou základní mechanické vlastnosti zkoušeného materiálu. Mezi tyto vlastnosti patří mez pevnosti R_m , smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$, tažnost A , kontrakce Z a Youngův modul pružnosti v tahu E . Problémem však je, že hodnoty skutečné deformace platí pouze do deformace 0,08 [-].

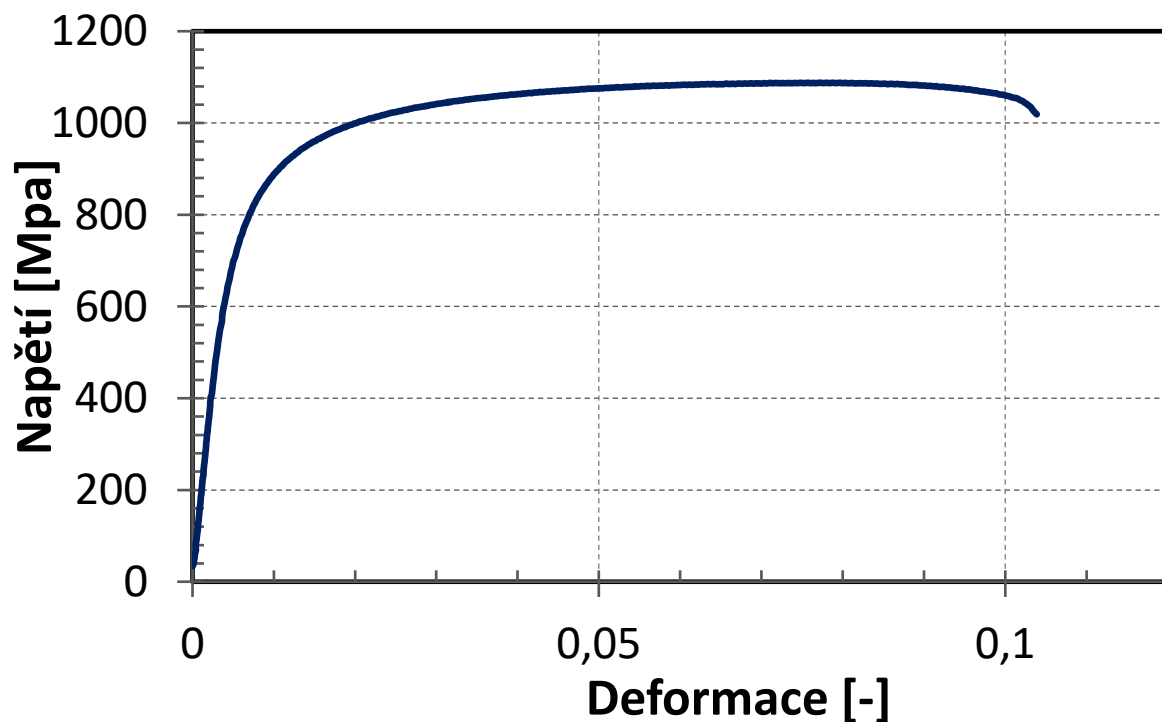
Pro statickou zkoušku tahem byla provedena právě tři měření a z těchto měření bylo vybráno měření RD_1, které je pro tuto práci bráno jako výchozí (viz Tabulka 3 a Obrázek 29).

Tabulka 2 - vstupní parametry zkouška tahem

Vstupní parametry					
Report					
Specimen		RD_1			
Temp.	(°C)	23			
a	(mm)	0,8117			
b	(mm)	20,0323	L_0 _ posun pístu (mm)		80
	(mm)		L_0 _ extenzometr (mm)		80,00
S_0	(mm ²)	16,2596	L_0	(mm)	80,0
a_u	(mm)	0,6500	L_u	(mm)	87,95
b_u	(mm)	18,7000			
S_u	(mm ²)	12,1550			

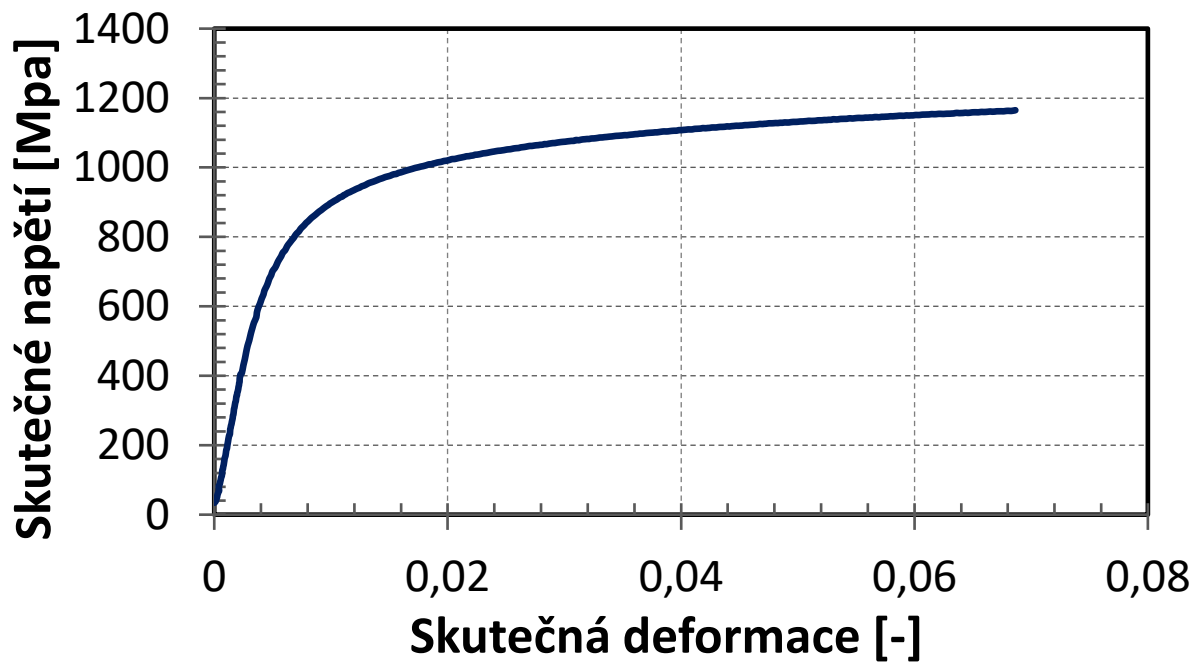
Tabulka 3 - Výsledky tahové zkoušky

Výsledky								
E	$R_{p0,2}$	$R_{t0,5}$	R_{eH}	R_{el}	R_m	A_g	A	Z
GPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	%	%	%
178,9	777,8	686,5	665,3	255,7	1087,9	7,1	9,93	25,2



Obrázek 29 - Smluvní diagram napětí a deformace pro měření RD_1

Smluvní hodnoty, naměřené při měření RD_1, jsou dále převedeny na hodnoty skutečného napětí a skutečné deformace použitím již dříve zmíněných rovnic (7) a (10) viz Obrázek 30.

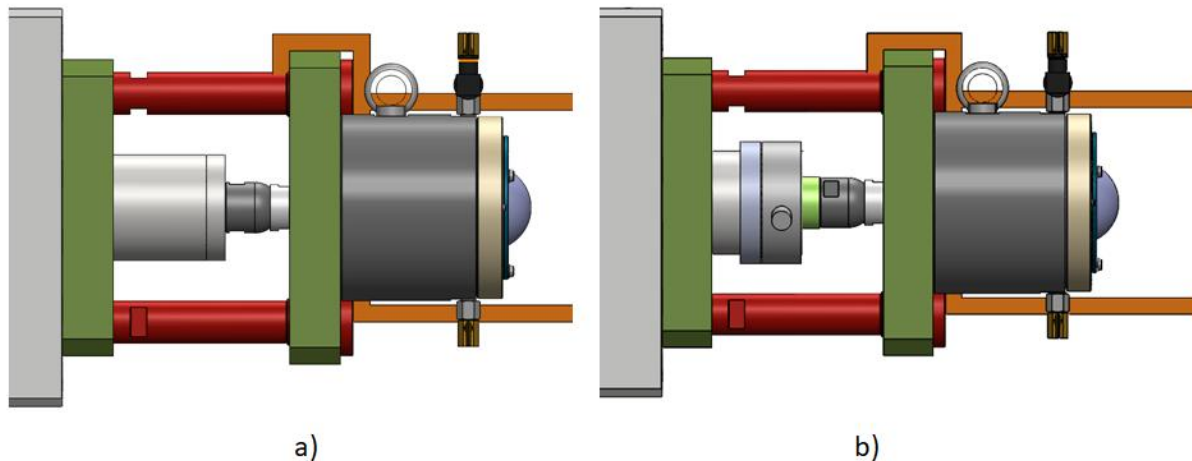


Obrázek 30 - Diagram skutečného napětí a skutečné deformace pro měření RD_1

6.3 Bulge test

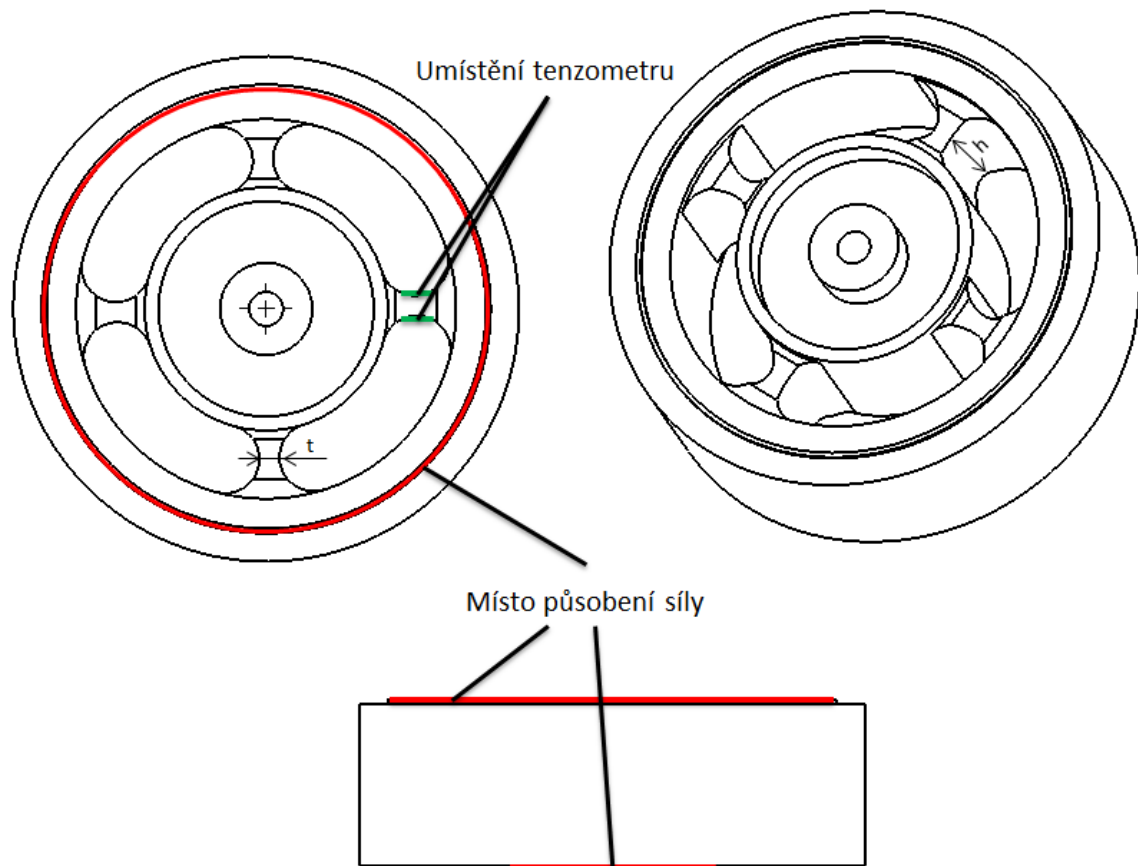
6.3.1 Konstrukční úpravy

Od firmy COMTES FHT a.s. byl pro tento test zadán požadavek na přidání siloměru. Ve stávající sestavě bylo možné přidání siloměru, jak je znázorněno viz Obrázek 31.



Obrázek 31 – a) Sestava bulge testu bez siloměru b) Sestava bulge testu se siloměrem

Pro snímání síly byl navrhnout tenzometrický snímač síly kruhového typu (pancake type). Tento snímač byl umístěn mezi pístem a samotným přípravkem pro bulge test. Snímač je tedy z jedné strany opřen o jeho periferní část a z druhé strany o jeho středovou část. Tlaková síla, která na siloměr působí, se projevuje určitou smykovou deformací krčku. V části, kde se projevuje deformace, jsou umístěny tenzometry a za pomoci změn odporů v těchto tenzometrech vlivem natahování či zkracování tenzometrů je následně odvozena působící síla (viz [22] a [23]). Důležité rozměry pro návrh siloměru tak, aby odolal působícímu napětí a aby poměrná deformace v místě měření vyhovovala parametrům běžných tenzometrů (viz Obrázek 32).



Obrázek 32 - Návrh siloměru

Navržený siloměr je schopen měřit působící sílu až do 160 kN. Firma COMTES FHT a.s. si je schopna tento siloměr vyrobit na svém pracovišti s nižšími výrobními náklady, než je pořizovací cena dostupných snímačů. Siloměr byl vyroben z materiálu ČSN 16 640 s mezí kluzu $\sigma_k = 735 \text{ MPa}$.

Cílem je získání maximální deformace v elastické oblasti pro dané silové zatížení, a tím dosažení maximální citlivosti navrhovaného siloměru. Vzhledem k charakteru napjatosti v oblasti měření, kde je převládající smykové namáhání, vycházíme při úvodním návrhu tloušťky místa, kde jsou umístěny tenzometry, z dovoleného smykového namáhání, které je vypočteno dle vztahu (36).

$$\tau_D = \frac{\sigma_k}{2} = \frac{735}{2} = 367,5 \text{ MPa} \quad (36)$$

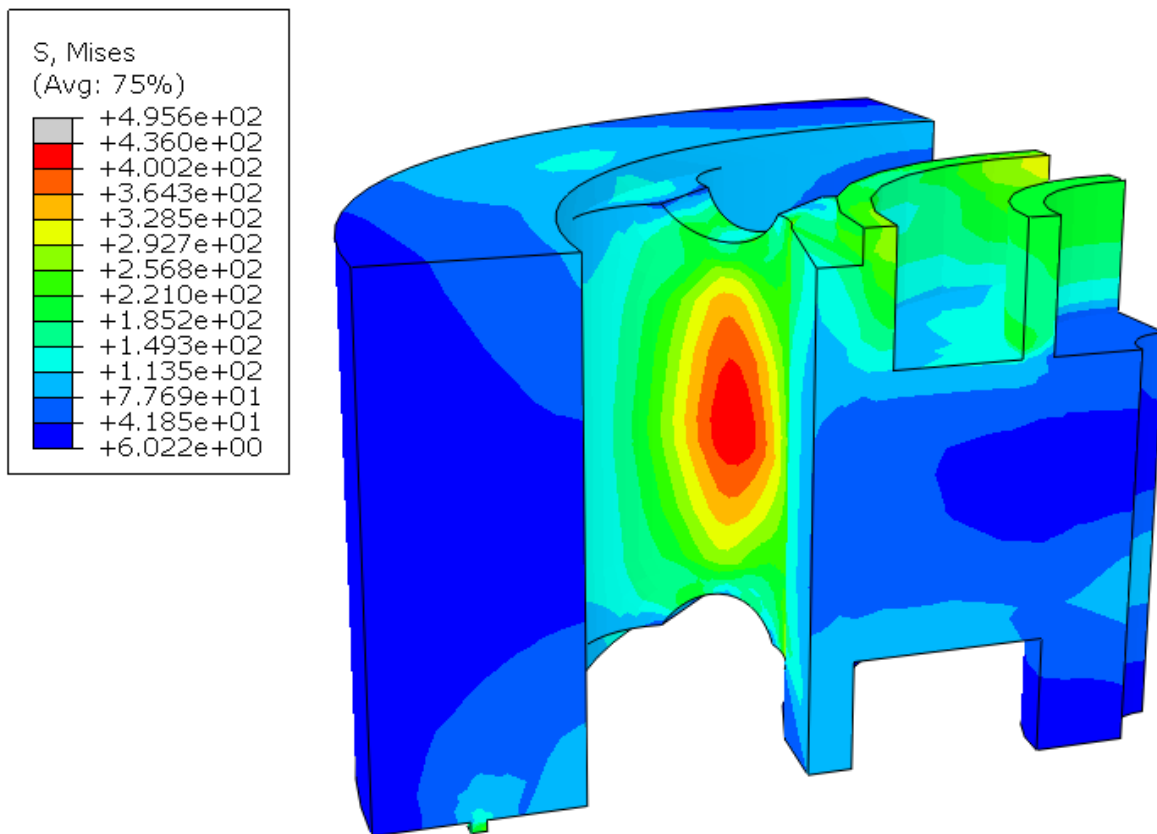
Za pomoci dovoleného smykového napětí τ_D lze ze vzorce (37) získat tloušťku stěny pomocí rovnice (38), kde F je maximální působící síla, S je průřez měřených míst a h je výška měřeného místa.

$$\tau_D = \frac{F}{S} = \frac{F}{4 \cdot h \cdot t} \quad (37)$$

$$t = \frac{F}{4 \cdot h \cdot \tau_D} = \frac{160 \cdot 10^3}{4 \cdot 28 \cdot 10^{-3} \cdot 367,5 \cdot 10^6} = 3,89 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (38)$$

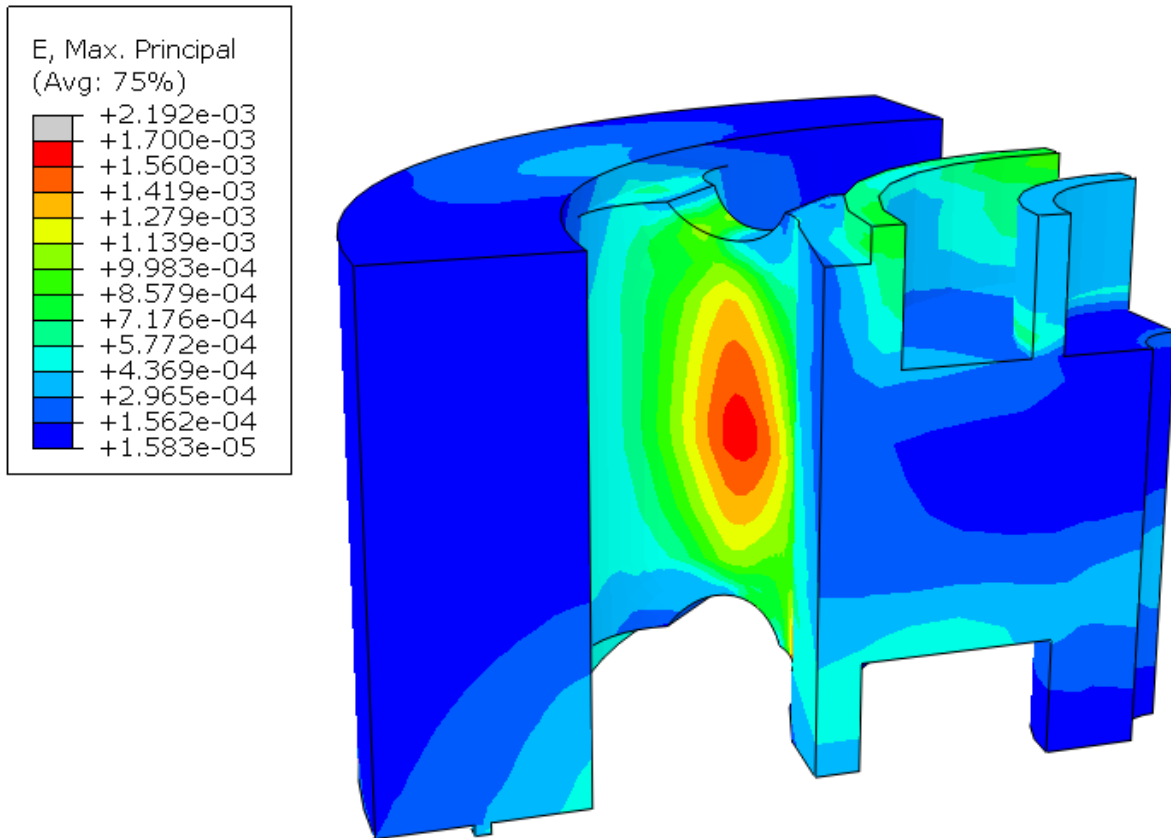
Vypočtená tloušťka stěny byla $3,89 \text{ mm}$, proto byla pro jistotu zvolena tloušťka stěny $t = 6 \text{ mm}$.

Pro místo, kde byly umístěny tenzometry, bylo nejdůležitější, aby zde nedošlo k trvalé deformaci. Jinými slovy, aby zde působící napětí nepřekročilo mez kluzu ($\sigma_k = 735 \text{ MPa}$). Napětí v tomto místě získané numerickou simulací bylo $431,987 \text{ MPa}$ (viz Obrázek 33)



Obrázek 33 - Deformovaný model siloměru se zobrazenou ekvivalentní napjatostí

Pro poměrnou deformaci zjištěnou pomocí numerické simulace v místě umístění tenzometru (viz Obrázek 34) platí rovnice (39), kde pro běžné tenzometry platí $\varepsilon_{kmin} = 0,000001$ a $\varepsilon_{kmax} = 0,005$.



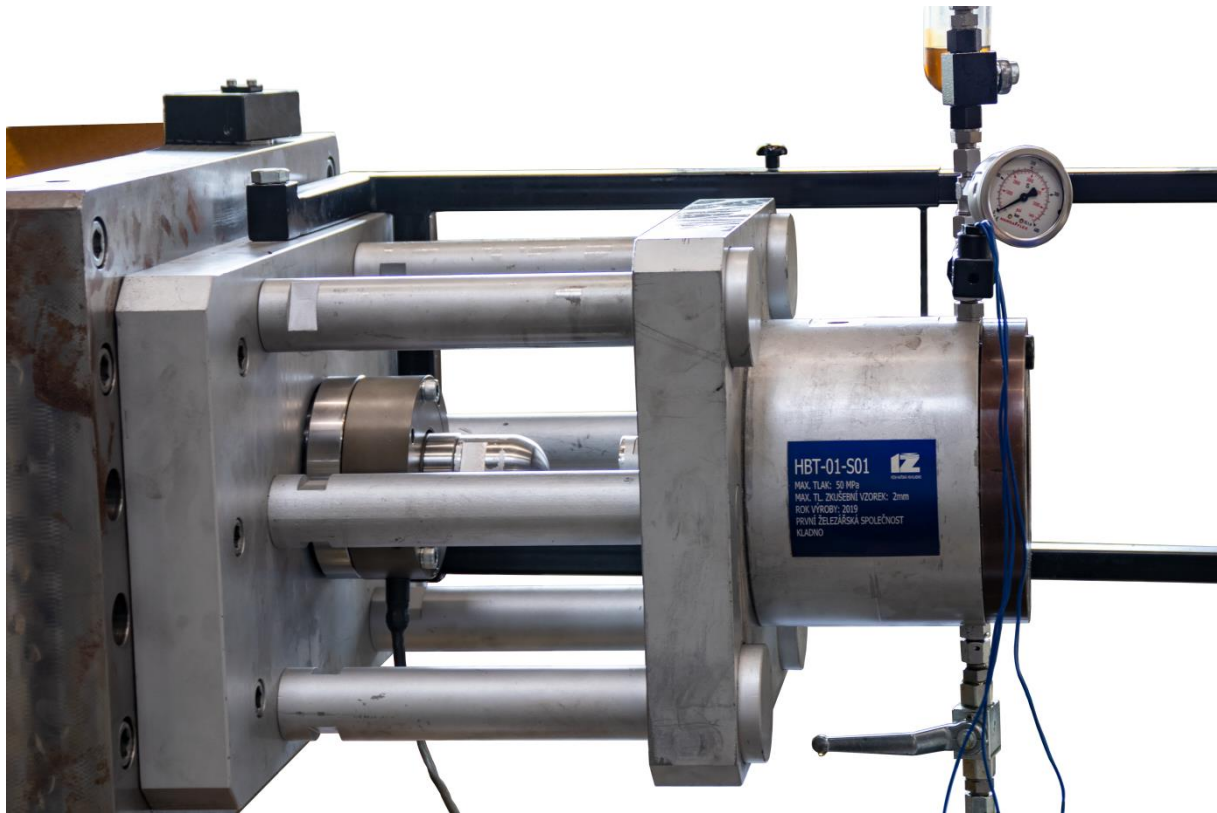
Obrázek 34 - Deformovaný model siloměru se zobrazenou deformací

$$\varepsilon_{kmin} < \varepsilon_k = 0,00162527 < \varepsilon_{kmax} \quad (39)$$

Jako poslední byla vypočtena rovnice (40) pro změnu elektrického odporu na tenzometru s nominálním odporem $R = 120 \Omega$ a vodičem s konstantou citlivosti $k = 2$.

$$\Delta R = R \cdot k \cdot \varepsilon_k = 120 \cdot 2 \cdot 0,00162527 = 0,39 \Omega \quad (40)$$

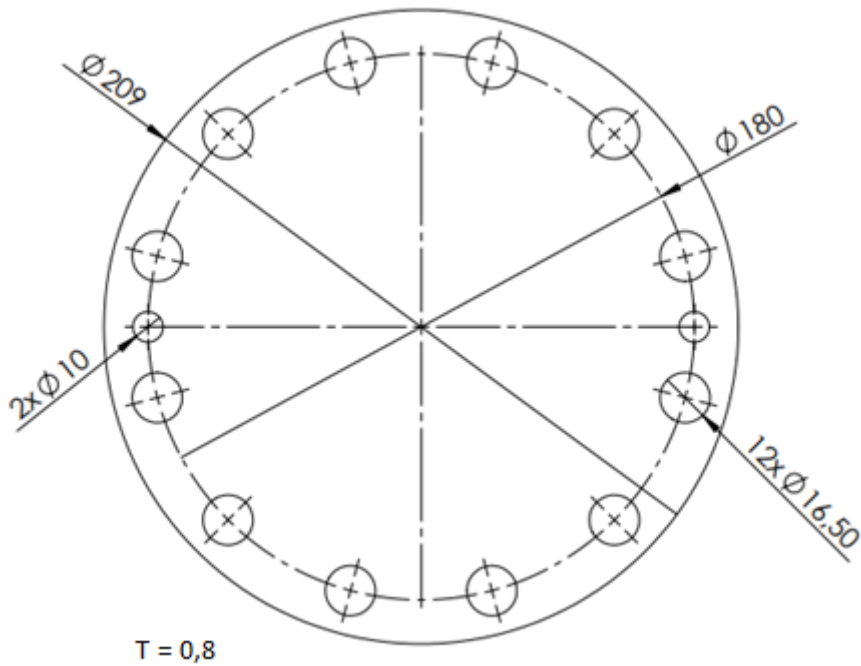
Pro přidání siloměru do sestavy bylo také nutné vytvoření přechodek (výkresy přechodek viz PŘÍLOHA č. 3). Tyto přechodky byly vyrobeny z materiálu ČSN 19 663. Konečné uspořádání je zobrazeno viz Obrázek 35.



Obrázek 35 - Bulge test se siloměrem a přechodkami

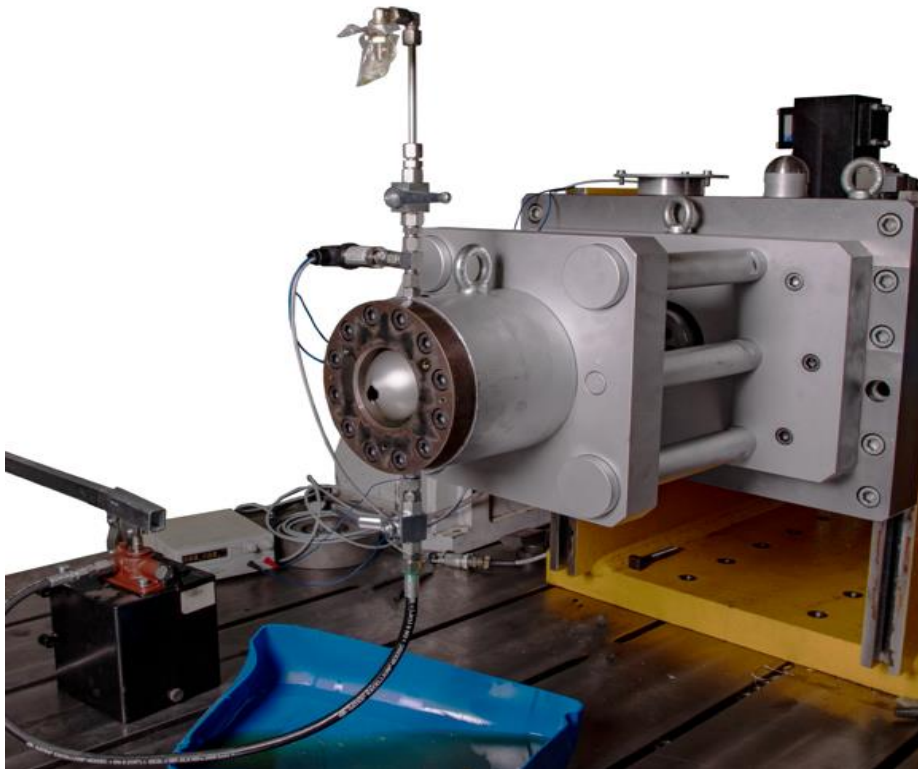
6.3.2 Vlastní měření

Bulge test je prováděn dle normy ČSN EN ISO 16808 Kovové materiály – Plechy a pásy – Stanovení závislosti dvojosého napětí-deformace zkouškou vyboulením s optickými měřicími systémy dostupné z [1]. Příprava této zkoušky probíhá dle postupu uvedeného, viz PŘÍLOHA č. 2. Pro tuto zkoušku je potřeba připravit sadu plných kruhových vzorků, jejichž rozměry jsou dány, viz Obrázek 36. Na takto připravené vzorky je nanesen kontrastní nástřík (pattern), aby bylo možné správně identifikovat pohyb materiálu při následné deformaci. Nejprve je na vzorek nanesen bílý nástřík, který se nechá uschnout. Pro urychlení procesu schnutí je použita horkovzdušná pistole. Poté je na bílý podklad nanesen přerušovaný černý kropenatý nástřík. Po usušení tohoto nástříku je stochastický vzorek připraven pro bulge test.



Obrázek 36 – Kótované schéma vzorku pro bulge test

Bulge test je proveden na multiaxiálním zařízení Inova AH 250 V2 (viz Obrázek 37) a průběh zkoušky je zaznamenáván optickým měřicím systémem ARAMIS.



Obrázek 37 - Bulge test

Vzorek pro bulge test je upnut mezi zápustku a držák vzorku na pracovním stole hydraulického lisu. Šrouby, kterými je vzorek upnut, jsou utaheny momentovým klíčem na $258 N \cdot m$. Dále je za pomoci ruční pumpy načerpán olej do pracovního prostoru hydraulického válce tak, aby zde nezbyl žádný vzduch. Před kamerou je umístěn ochranný štít se skleněnými okny, aby nedošlo ke kontaktu oleje a kamer při vzniku trhliny na vzorku. Po těchto operacích je současně spuštěn hydraulický lis a systém ARAMIS, který pomocí kamer snímá povrch vzorku a vytváří snímky zvolenou frekvencí. Tlak oleje na vzorek se postupně zvyšuje až do porušení vzorku (viz Obrázek 38).

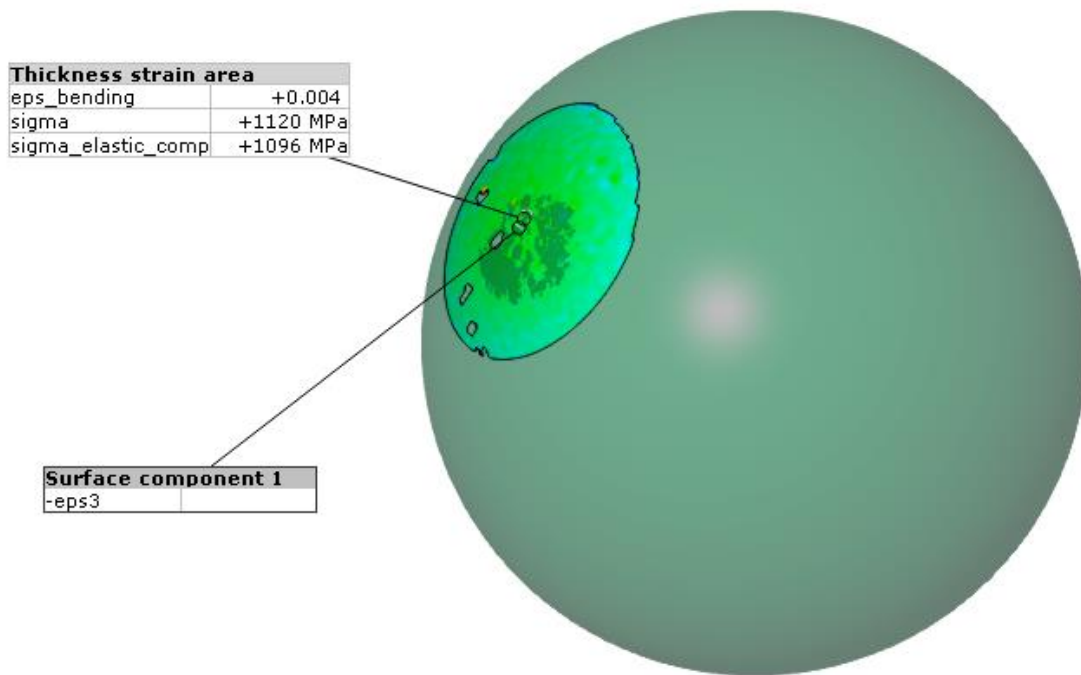


Obrázek 38 - Porušený vzorek pro bulge test

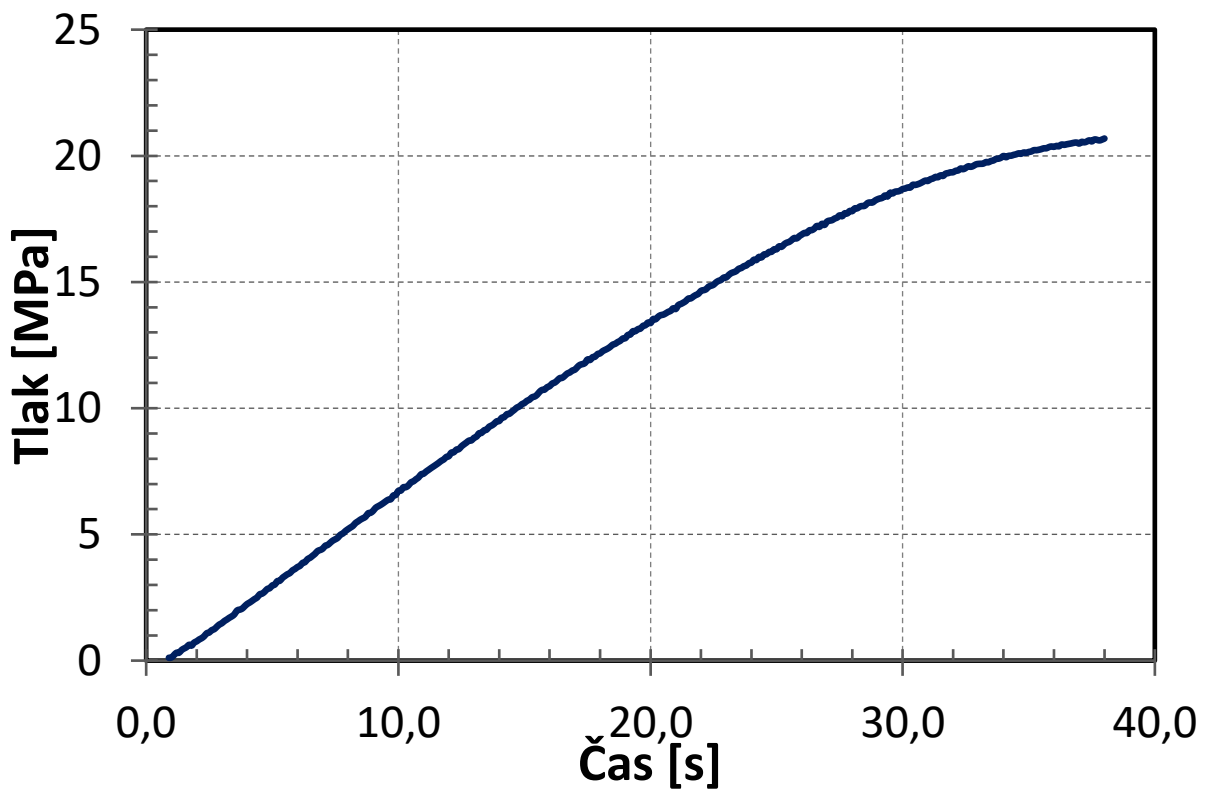
Bulge test je vyhodnocován pomocí systému ARAMIS. Ten zaznamenává snímky během testu zvolenou časovou frekvencí (v našem případě 10 Hz).

Pro bulge test byly provedena právě tři měření (viz PŘÍLOHA č. 1) a z těchto měření bylo vybráno měření Bulge_test_1, které je pro tuto práci bráno jako výchozí.

Systém ARAMIS zaznamenává během testu hlavní a vedlejší deformace (ε_1 a ε_2), ze kterých pomocí rovnice (21) vypočte celkovou deformaci ε_3 . Dále zaznamenává poloměr zakřivení vzorku ρ (viz Obrázek 39) a průběh tlaku závislého na čase během bulge testu (viz Obrázek 40).



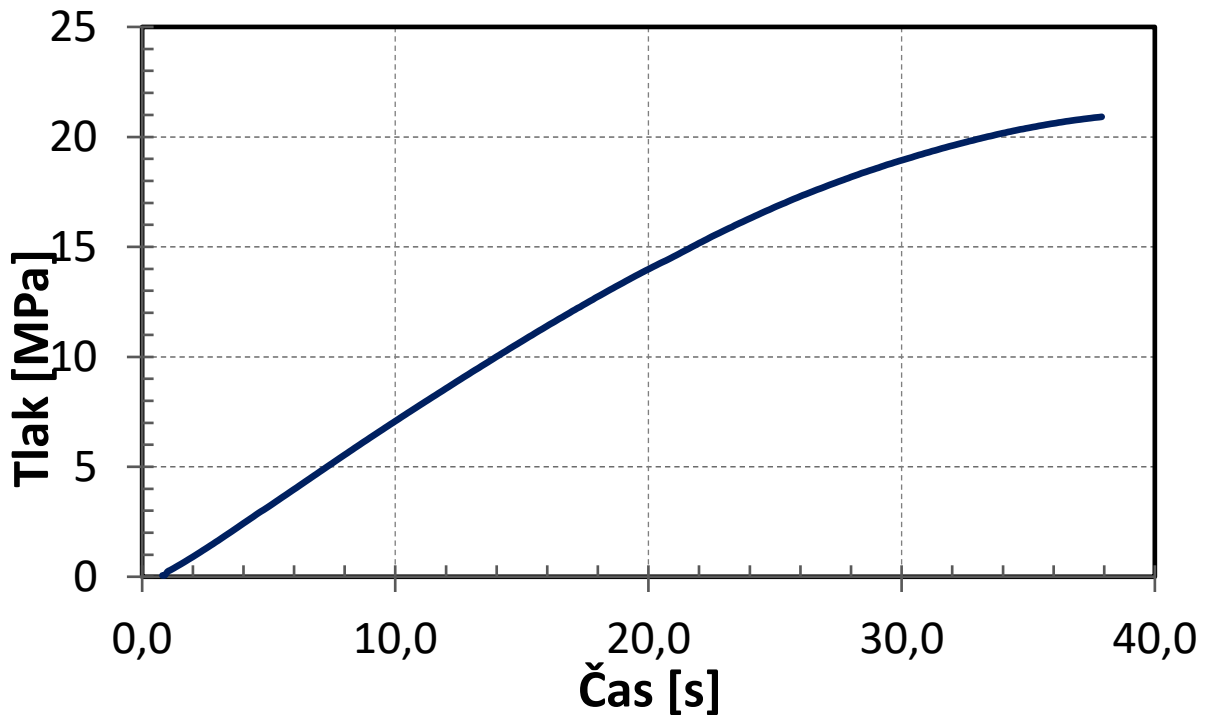
Obrázek 39 – Proložení vybouleného vzorku pomocí ideální koule



Obrázek 40 - Diagram průběhu tlaku zjištěný přímou metodou pro měření Bulge_test_1

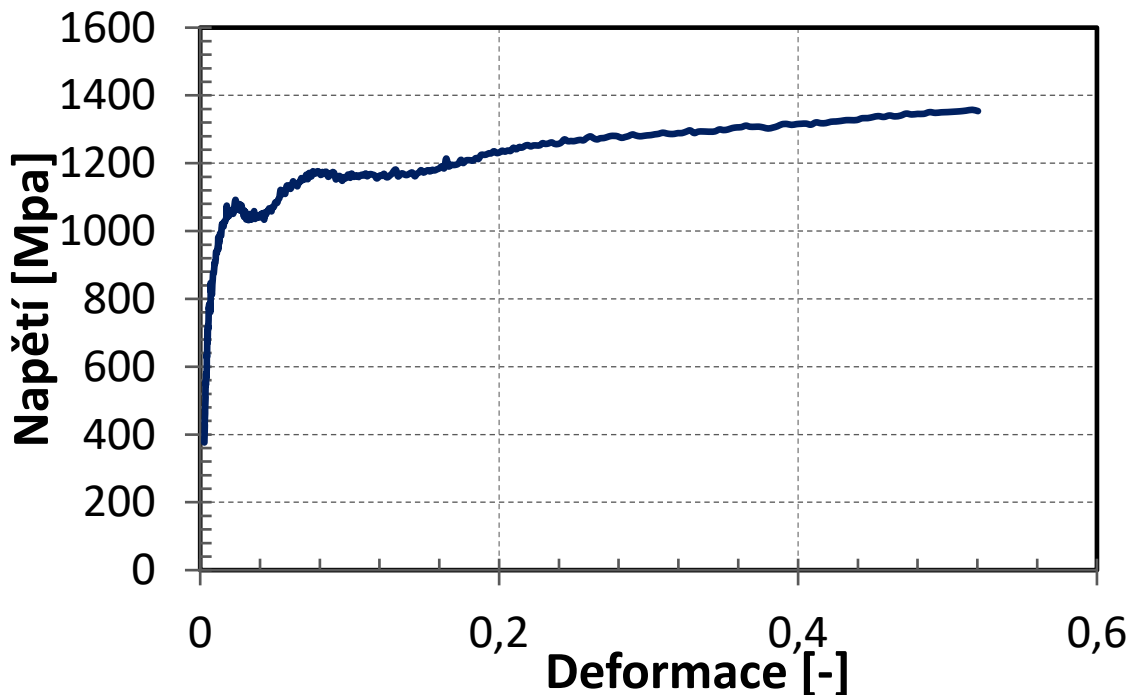
Tlak byl získán i nepřímou metodou, a to pomocí síly změřené siloměrem. Síla je na tlak přepočtena podle rovnice (27), kde je plocha razníku $S = 3848,451001 \text{ mm}^2$. Tímto

způsobem vypočtený tlak je ale větší než tlak zjištěný přímou metodou, a to přibližně v rozmezí 5%, a to z důvodu účinnosti těsnění, která se při nepřímém výpočtu tlaku neuvažují viz Obrázek 41.



Obrázek 41 - Diagram průběhu tlaku zjištěný nepřímou metodou pro měření Bulge_test_1

Z naměřených hodnot je následně vypočtena aktuální tloušťka vzorku t dle rovnice (20) a dále pak i napětí σ pomocí rovnice (19). Z hodnot celkové deformace a napětí je následně vytvořen diagram závislosti napětí na deformaci viz Obrázek 42.



Obrázek 42 - Diagram závislosti napětí a deformace pro měření Bulge_test_1

7 Vyhodnocení křivky zpevnění

7.1 Hard_2022

Pro zadané hodnoty aktuální geometrie vzorku tahové zkoušky:

- Šířka vzorku – 20,032 mm
- Tloušťka vzorku – 0,817 mm
- Délka měřené části (extenzometru) – 80 mm

Vyhodnocení probíhá na základě zvoleného algoritmu pro stanovení Youngova modulu a to podle normy ČSN ISO 527, podle metodiky uvedené v článku podle Merklein [16] nebo zadáním zvolené hodnoty. Následně je zvolena metodiky pro stanovení meze kluzu (například offset R_p 0,2). Pro stanovení chování v oblasti po vzniku krčku je implementován a nejčastěji používán algoritmus podle Linga [16].

Použití tohoto přístupu vyžaduje iterační postup založený na metodě „pokus-omyl“ s následným řešením MKP úlohy tahové zkoušky porovnání změřené a vypočtené závislosti Síla-Deformace.

V našem případě byly zvoleny tyto hodnoty:

- Youngův modul = Merklein
- Offset $R_{p0,2} = 0,2\%$
- Koeficient zpevnění 0,3 stanovený z rozměru vzorku po přetržení a maximální naměřené síly při testu

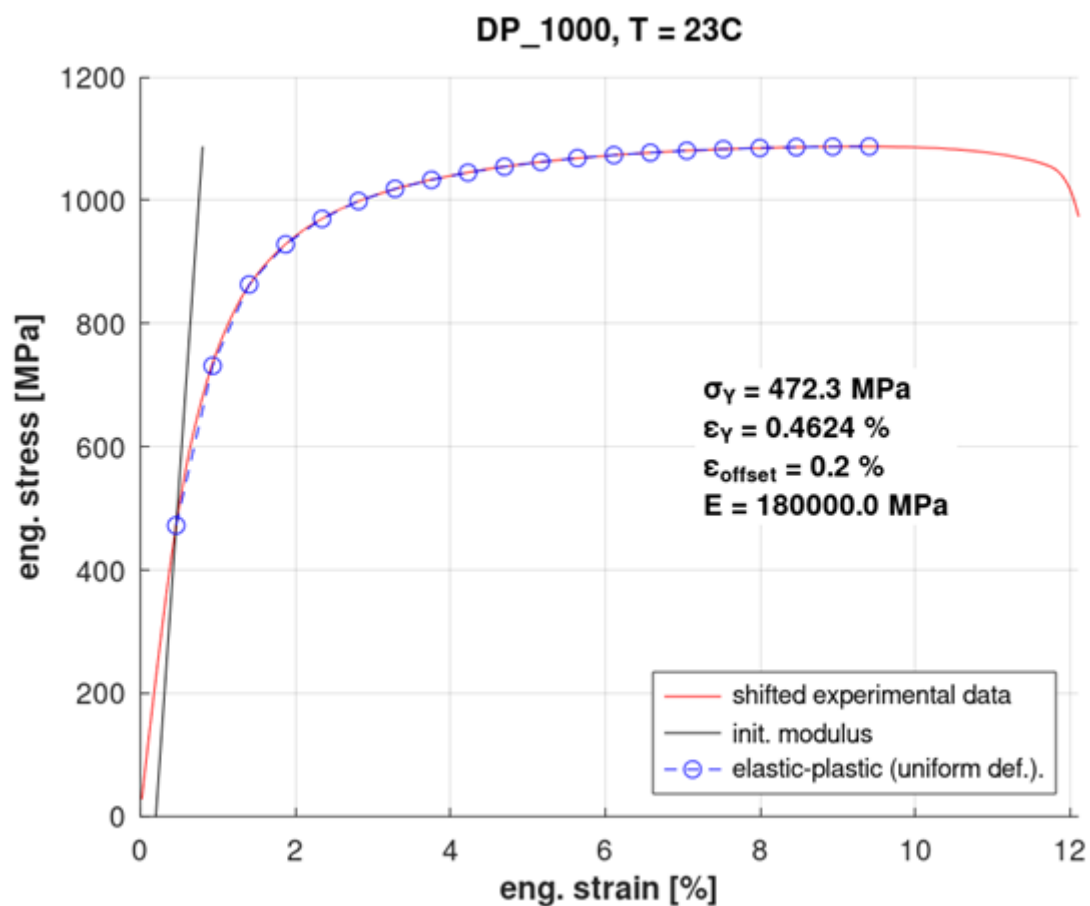
Pro druhou iteraci pak hodnoty

- Youngův modul = 180 000 MPa
- Offset $R_{p0,2} = 0,2\%$
- Koeficient zpevnění 0,8 stanovený z rozměru vzorku po přetržení a maximální naměřené síly při testu

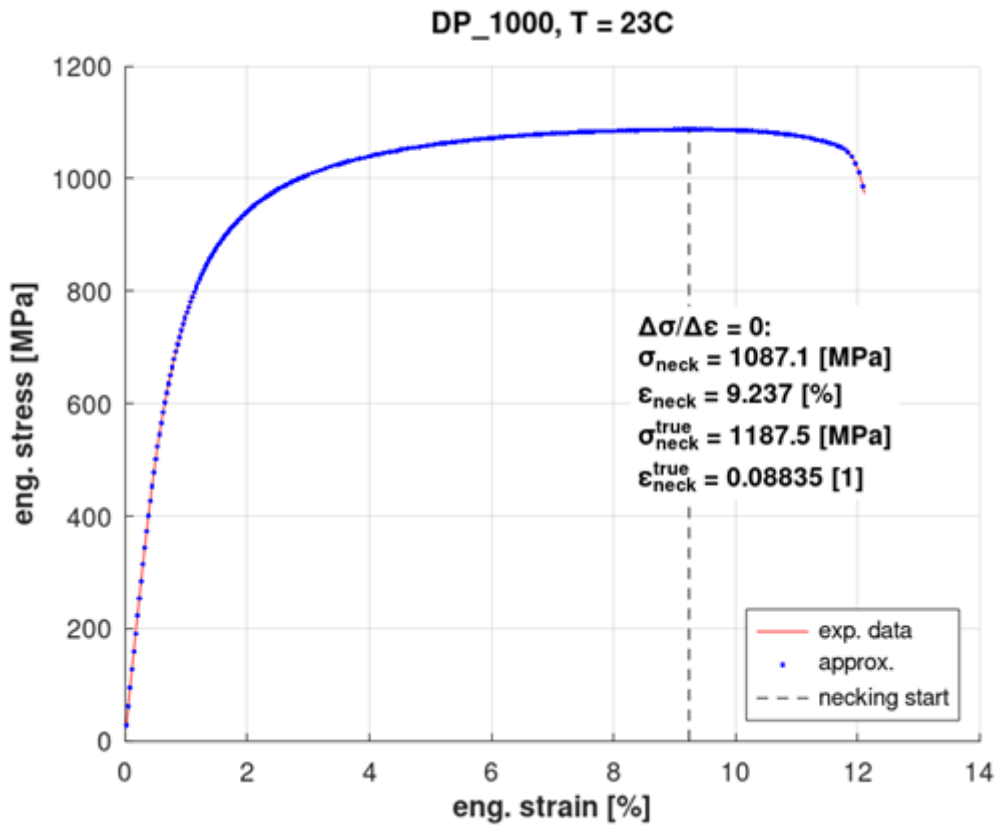
Na následujících obrázcích jsou výsledky pro druhou iteraci (jako příklad) a vzájemné srovnání křivek zpevnění je zobrazeno viz Obrázek 46.

Obrázek 43 zobrazuje hodnoty určené meze pro daný posuv deformace (0,2%) na základě stanovené hodnoty Youngova modulu.

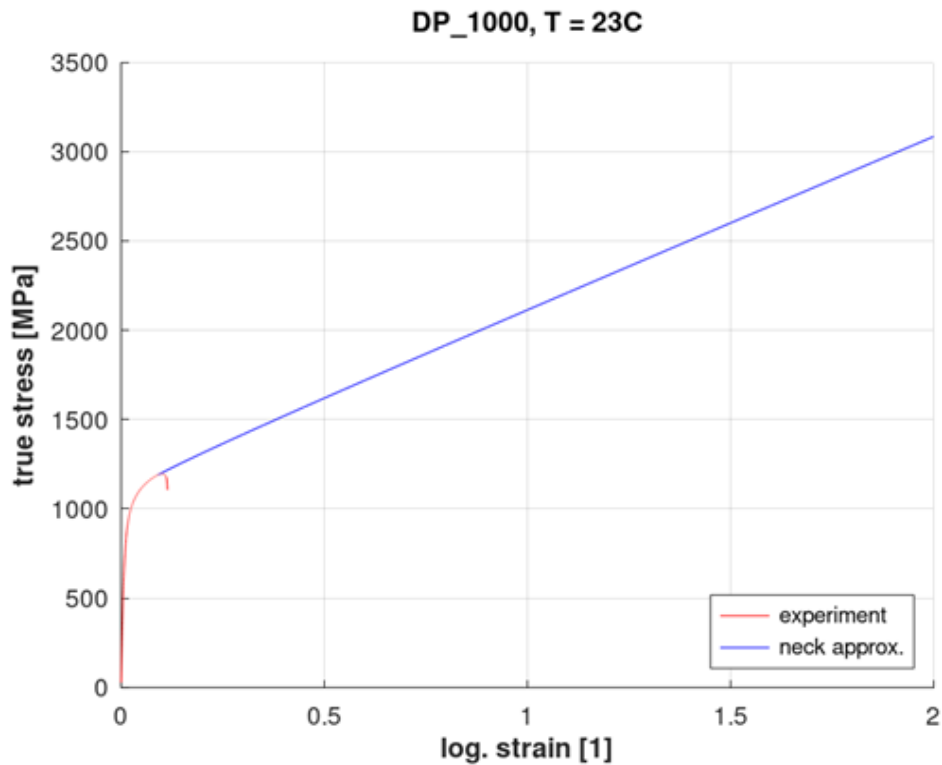
Obrázek 44 vyobrazuje určení bodu vzniku krčku (viz definice Obrázek 8)



Obrázek 43 – Hodnoty určené meze pro daný posuv deformace 0,2%



Obrázek 44 – Bod vzniku krčku

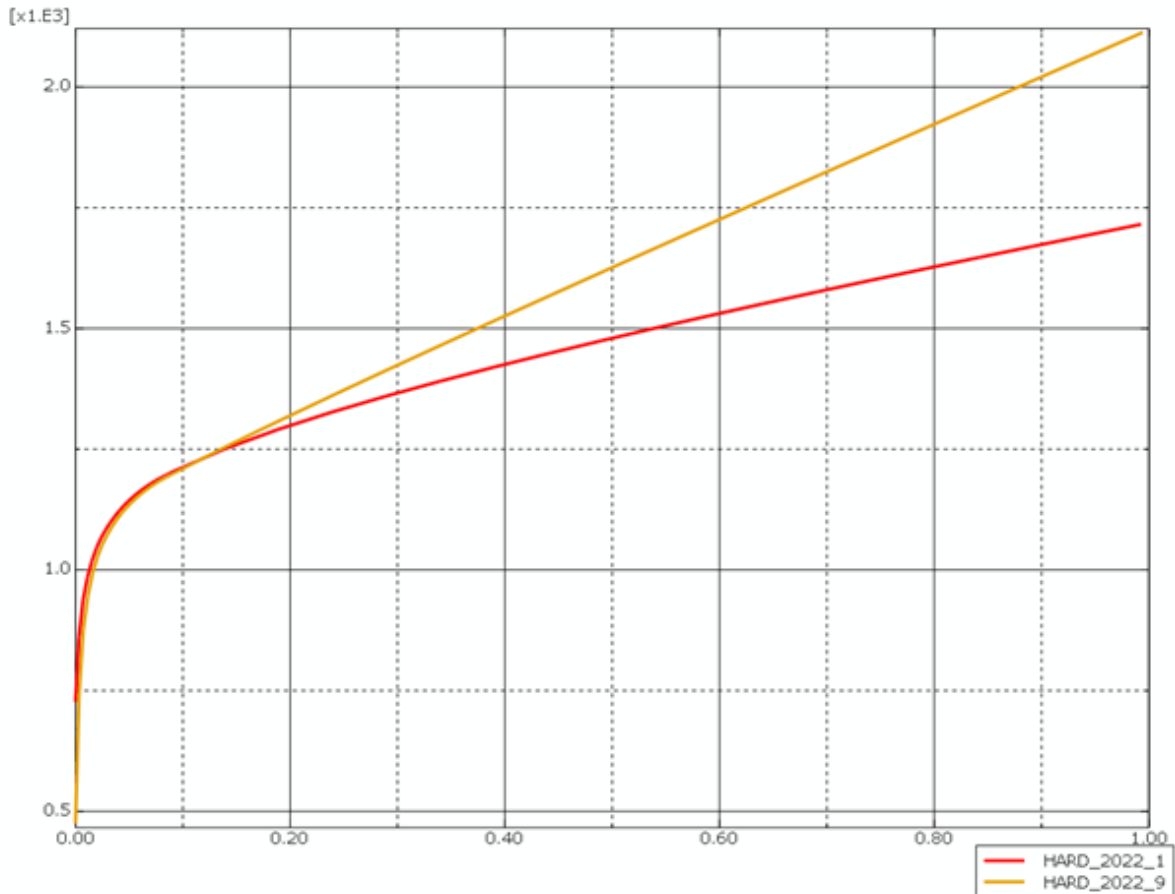


Obrázek 45 – Experimentální a extrapolované hodnoty závislosti skutečného napětí na skutečné deformaci

Experimentální hodnoty a graf extrapolované závislosti skutečného napětí a skutečné deformace je zobrazen viz Obrázek 45.

Včetně souboru plastického zpevnění, který lze načíst do materiálové karty sw ABAQUS

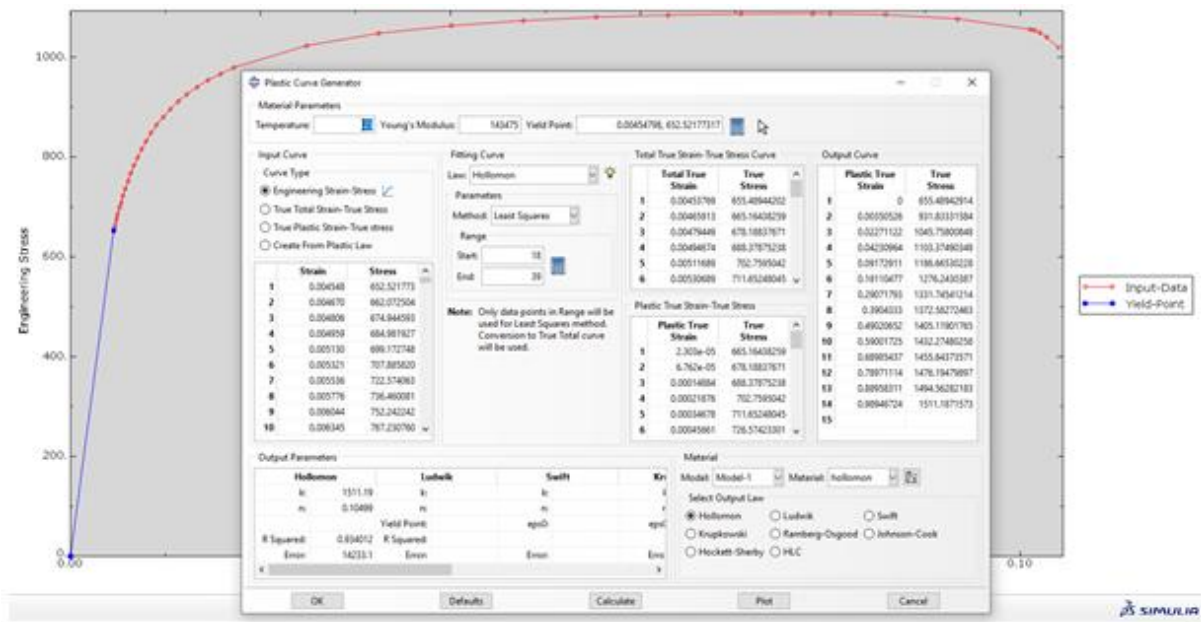
DP_1000__tah__T23__RD_1__elpl_data.inp



Obrázek 46 - Srovnání křivek zpevnění pro první a druhou iteraci

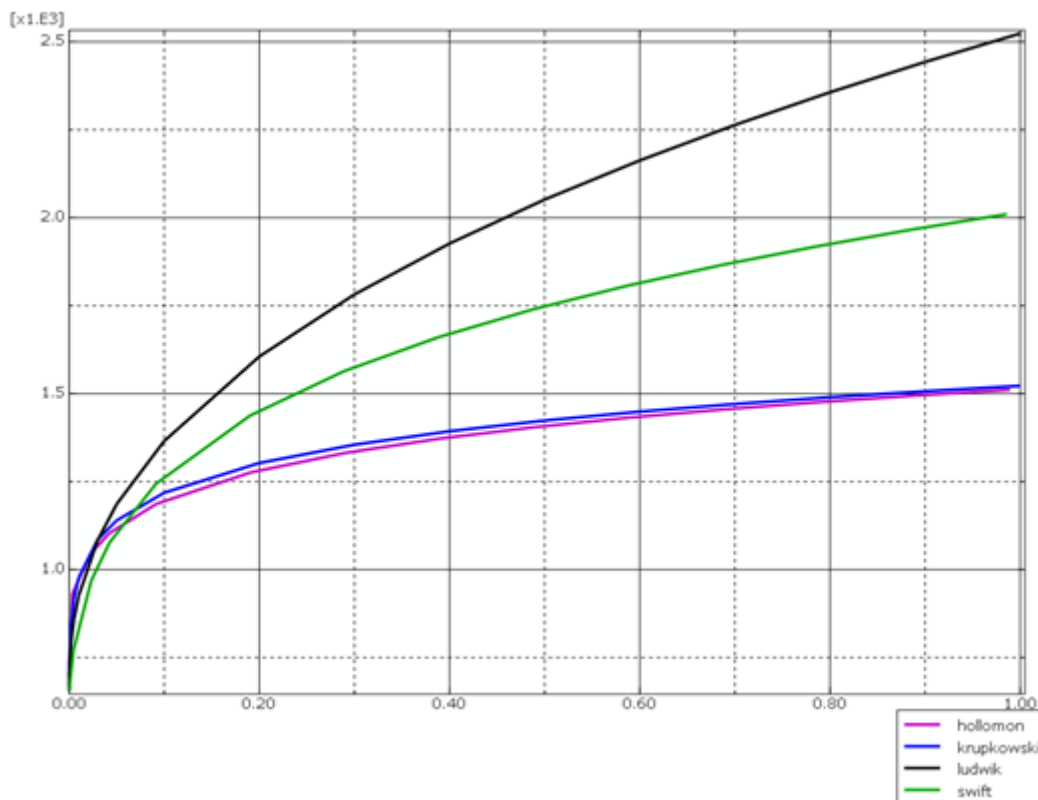
7.2 ABAQUS Plug-in Plastic curve generator (PCG)

Jako vstupní informace pro program PCG bylo použito závislosti smluvního napětí na deformaci. Úvodní tabulka viz Obrázek 47.



Obrázek 47 - Úvodní tabulka programu PCG

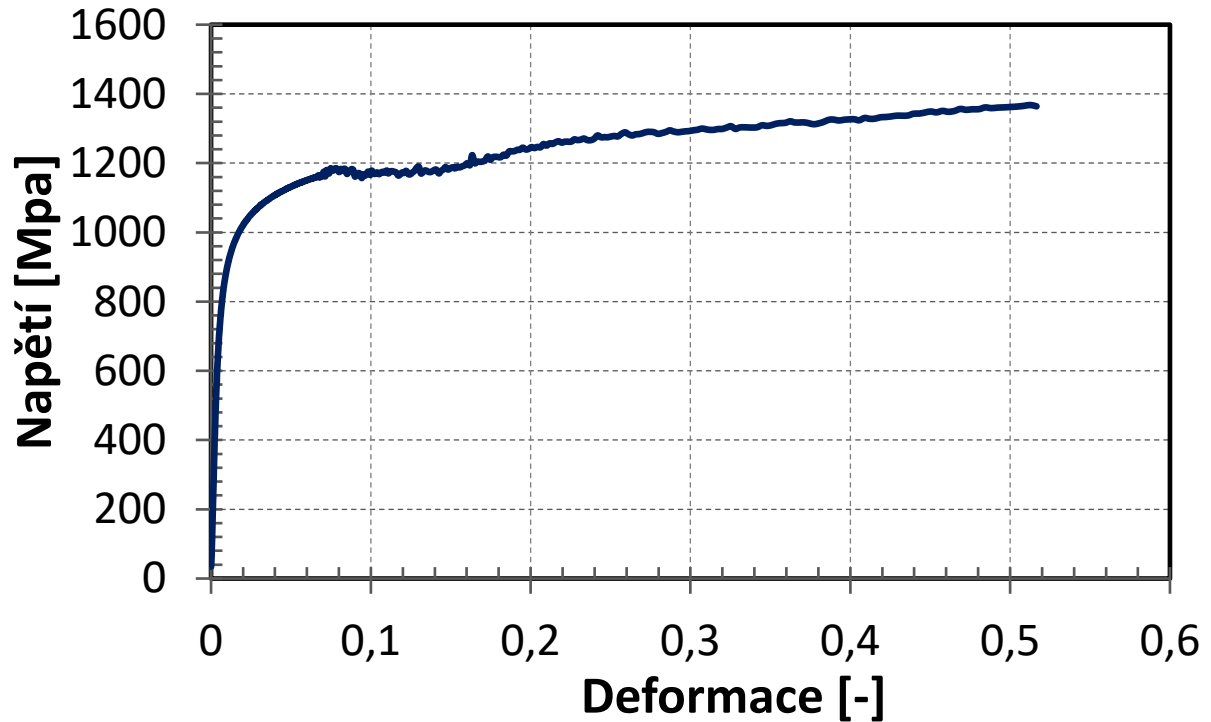
Vyhodnocení a extrapolace pro daná vstupní data podle zvolených vztahů, a to podle Hollomona, Ludwika, Swifta nebo Krupskowskiho je zobrazena viz Obrázek 48.



Obrázek 48 - Extrapolace podle Hollomona, Ludwika, Swifta a Krupskowskiho

7.3 Norma ČSN EN ISO 16808

Za pomoci vzorců (32), (33), (34) a (35) zmíněných v kapitole 4.3 byla křivka výsledných hodnot z tahové zkoušky a křivka výsledků z bulge testu extrapolovány do jedné výsledné křivky jednoosé napjatosti viz Obrázek 49.

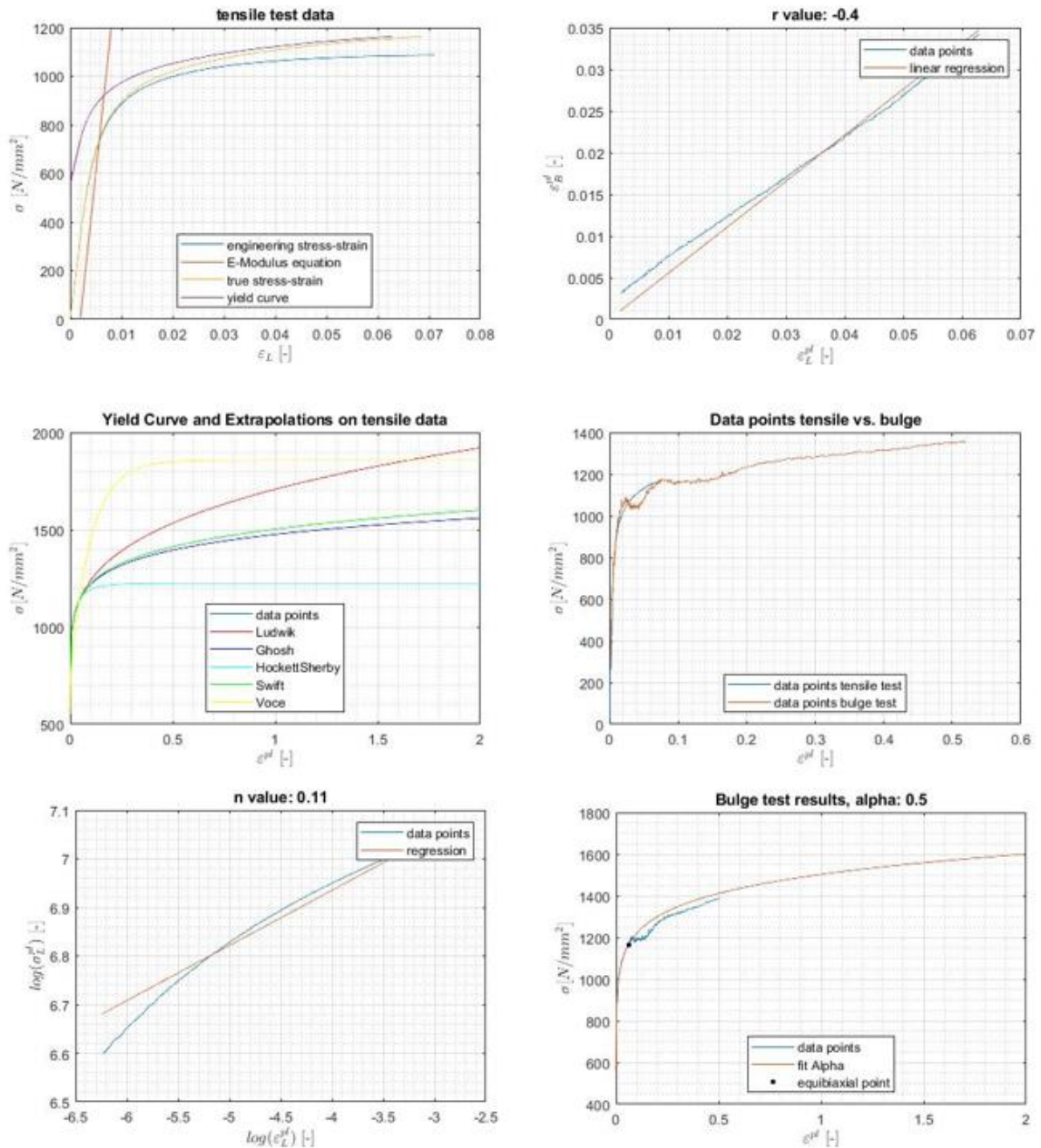


Obrázek 49 - Křivka výsledných hodnot z tahové zkoušky a křivka výsledky z bulge testu extrapolovány do jedné výsledné křivky jednoosé napjatosti

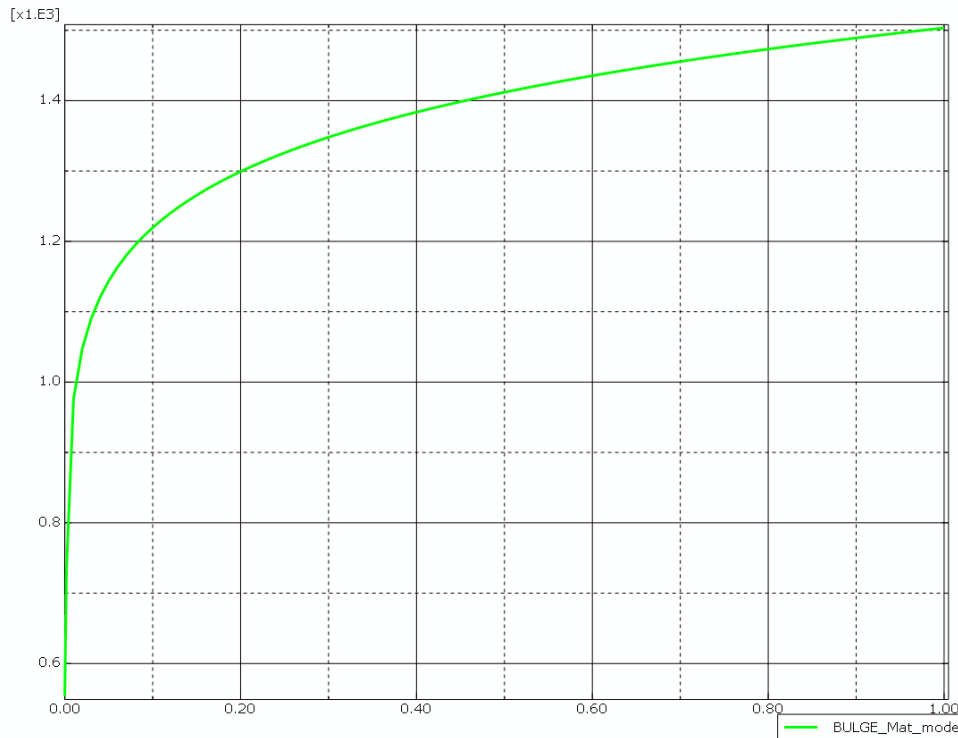
7.4 MaterialModeler

Do programu jsou postupně načteny hodnoty tahové zkoušky a výsledky z bulge testu.

Po zpracování dat byly získány výsledky viz Obrázek 50, ze kterých je patrné rozšíření oblasti plastického zpevnění.



Obrázek 50 - Grafy získané z MaterialModeleru



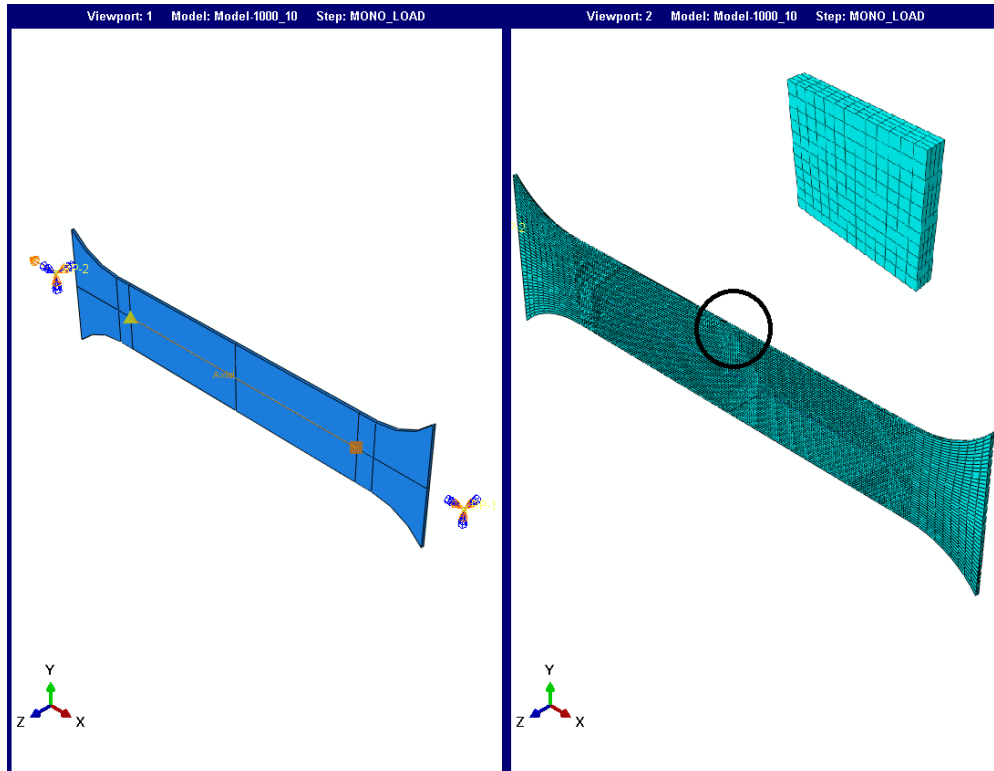
Obrázek 51 – Křivka zpevnění stanovená programem MaterialModeler

Obrázek 51 zobrazuje křivku zpevnění zahrnující tahovou zkoušku a bulge test stanovenou programem MaterialModeler.

7.5 Porovnání vyhodnocení křivky zpevnění pro tahovou zkoušku

Základní vyhodnocení křivky zpevnění lze provést MKP simulací tahové zkoušky s uvažováním velkých pružně plastických deformací. Tímto způsobem zjistíme s celkem dostatečnou přesností i oblast vzniku krčku s následujícím difúzním i lokalizovaným zúžením v případě, že použitá síť je dostatečně jemná.

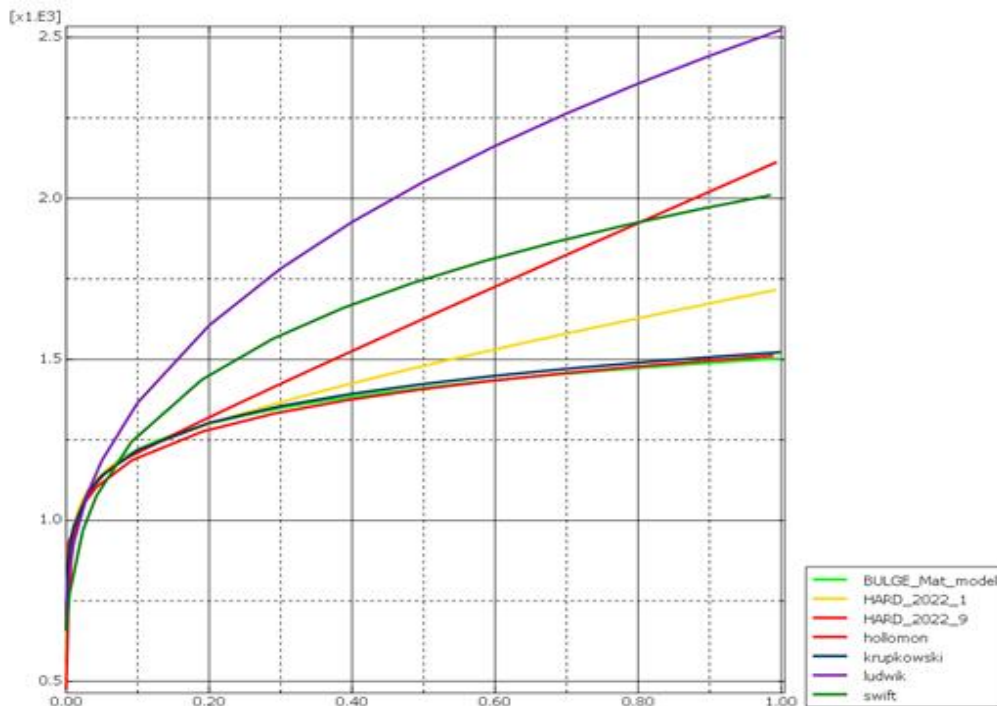
Pro naši úlohu byl použit model, který je zobrazen viz Obrázek 52.



Obrázek 52 – Model tahové zkoušky

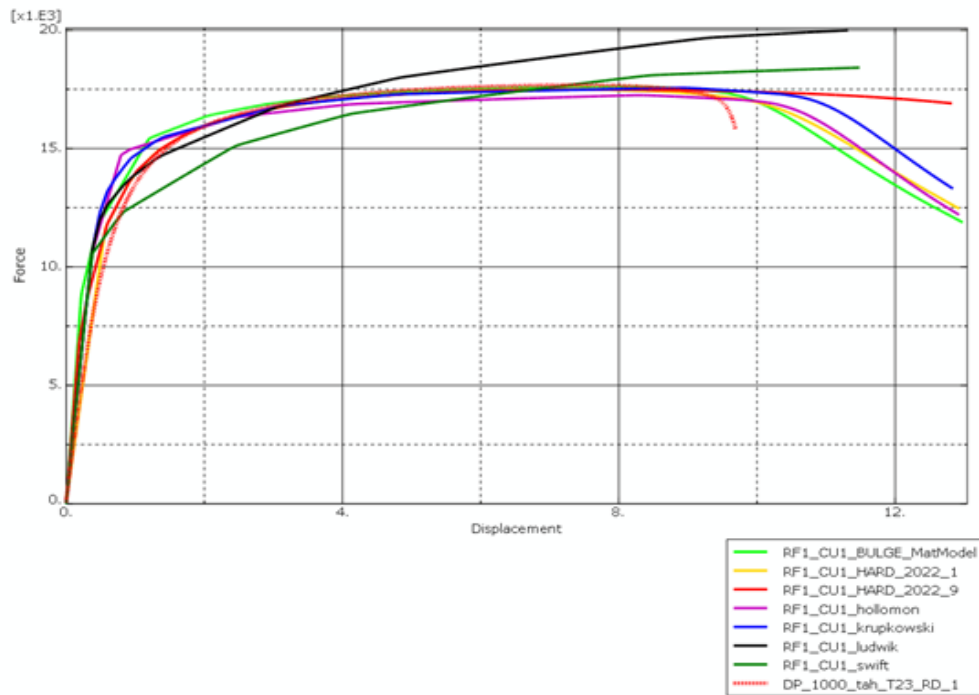
Model obsahuje 31 840 elementů C3D8R a je použito implicitní řešení. Po tloušťce byly použity 4 elementy o velikosti $0,2 \cdot 10^{-3} \times 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$.

Postupně byly použity uvedené křivky zpevnění, které jsou uvedeny viz Obrázek 53.



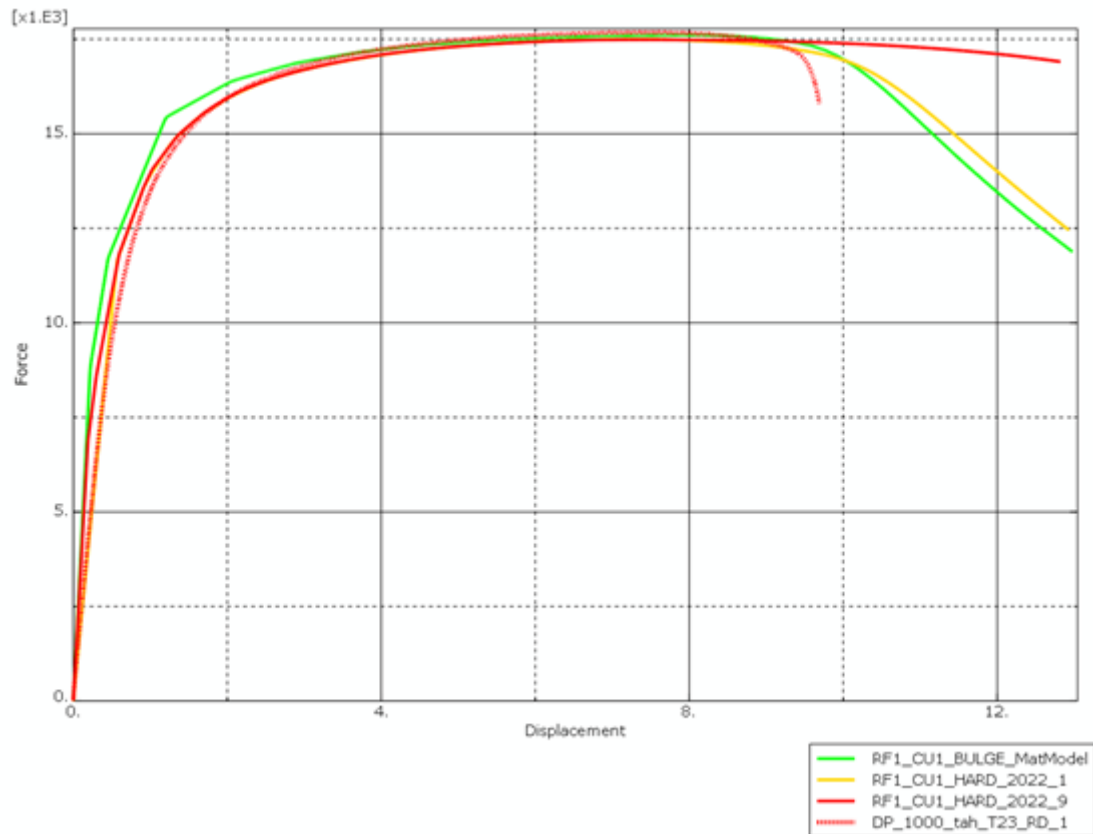
Obrázek 53 - Křivky zpevnění

Výsledky pro závislost síla – posunutí pro oblast extenzometru (80 mm) jsou zobrazeny viz Obrázek 54.



Obrázek 54 - Diagram závislosti síly na posunutí

Jako křivky nejlépe aproximující změřenou závislost síly a deformace se jeví na základě vizuálního porovnání křivky zobrazené viz Obrázek 55 pro uvedené matematické modely.



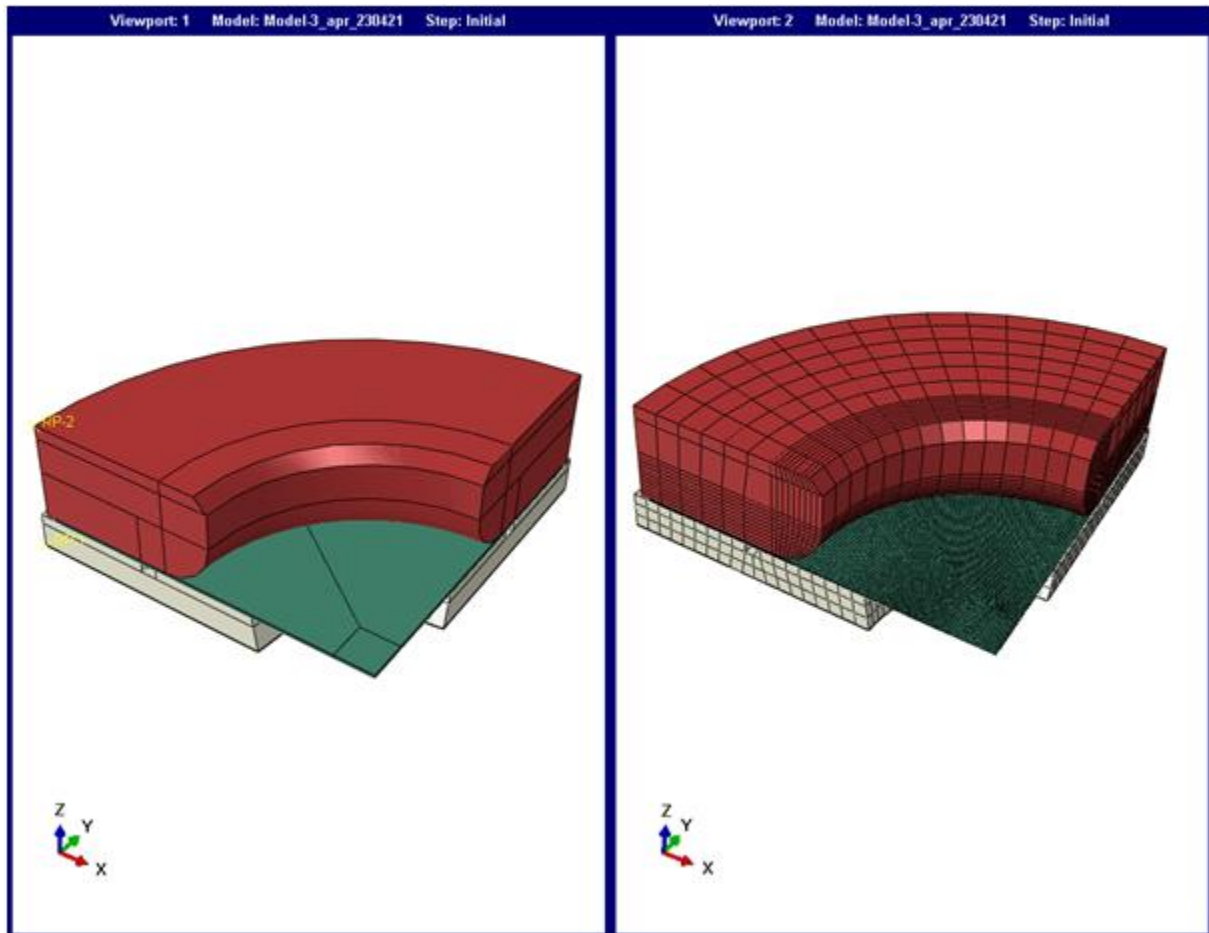
Obrázek 55 – Vybrané křivky zpevnění

7.6 Výpočet MKP a porovnání s experimentem

7.6.1 Výpočtový model

Za účelem zjištění relevance výsledků získaných experimentem bylo pro materiál DP1000 využito numerických simulací testu bulge. Proto byl vytvořen model zkušebního tělesa pro metodu konečných prvků ve výpočtovém prostředí Abaqus. Výpočtový model byl vytvořen za pomoci dvou rovin symetrie a bylo tak možné provádět výpočet pouze na jedné čtvrtině modelu. Dalším zjednodušením bylo zkrácení délky zápustky, která neměla na výpočet vliv (viz Obrázek 56). Model sestavy je složen ze dvou druhů materiálu, přičemž klasická ocel je zobrazena zeleně a materiál vzorku ocel DP1000 je zobrazena červeně. Celý model se skládá z 54 918 prvků ve tvaru hexaedrů C3D8R. Všem uzlům nacházejícím se v rovinách symetrie byl zamezen posuv kolmo na tyto roviny symetrie.

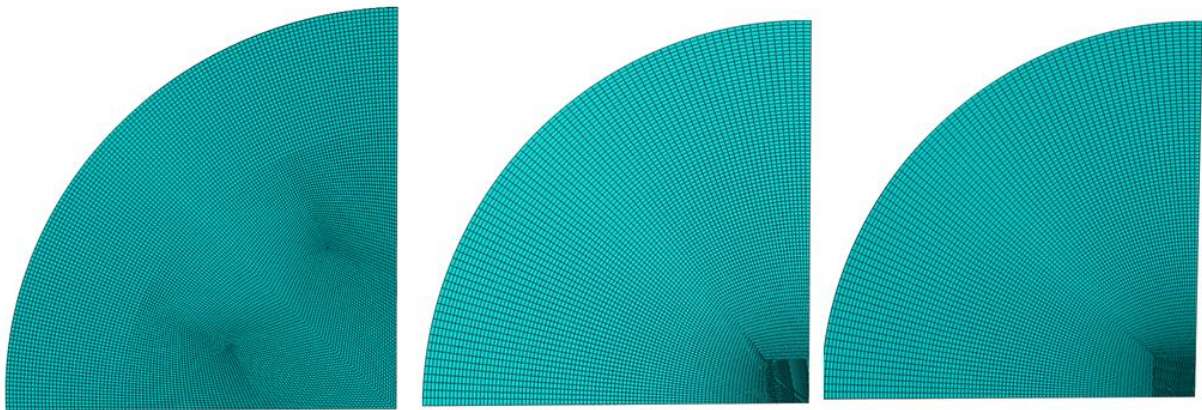
Pro výpočet byl použit materiálový model RF1_CU1_Bulge_MatModel viz Obrázek 55.



Obrázek 56 - Zjednodušený model sestavy Bulge testu se sítí

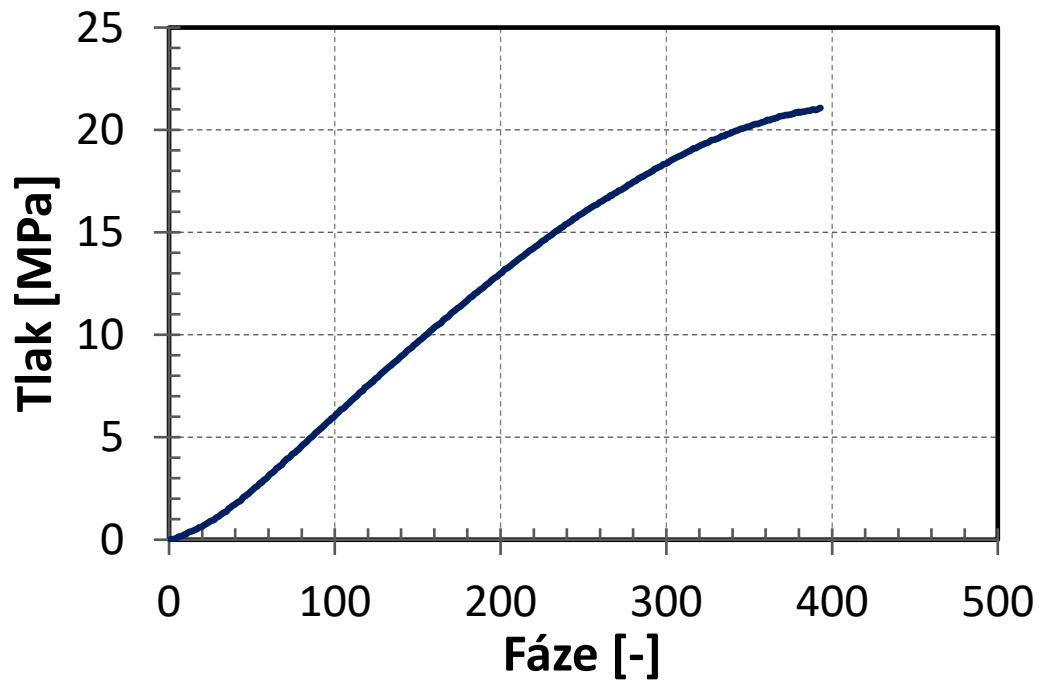
Součástí modelu byly i zápustka a držák vzorku, u kterých byl nastavený kontakt povrchu zápustky a držáku vzorku se vzorkem bez prokluzu. Všem uzlům zápustky a držáku vzorku byl zamezen posuv ve směru kolmém na rovinu zkušebního vzorku. Celý model byl vytvořen bez vlivu anizotropie materiálu.

Na vzorku bylo postupně vytvořeno několik speciálních sítí (viz Obrázek 57). Jako první byla na vzorku vytvořena velmi jemná síť s 6 prvky po tloušťce. Při dalším testu byla u vrcholu vzorku vytvořena speciální zóna ve tvaru čtverce. Nejpřesnější výsledky však přinesla síť vytvořená podle metody zmíněné v práci [24], kde kromě vytvoření čtvercové zóny došlo i k mírnému ztenčení vzorku směrem k vrcholu této zóny. Zmenšení bylo o 1 %, kdy výsledná tloušťka vzorku ve vrcholu byla 0,792 mm místo stávajících 0,8 mm.



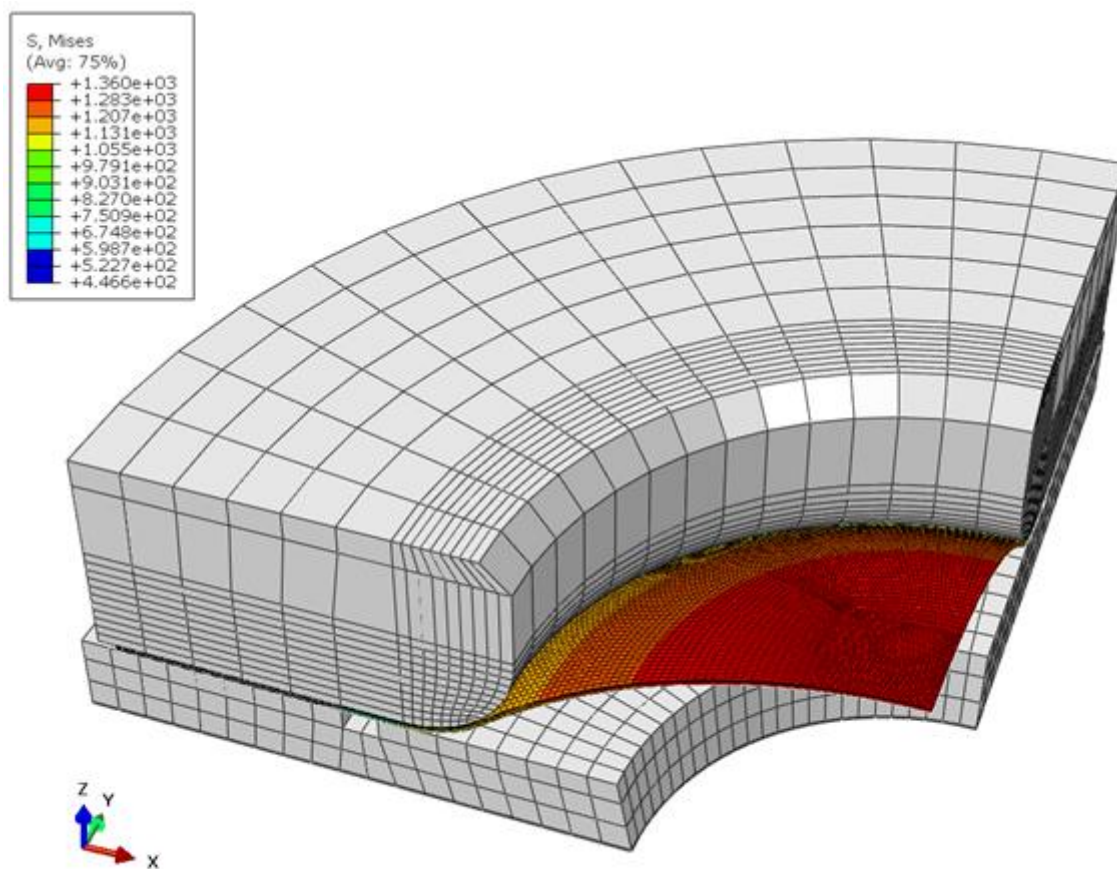
Obrázek 57 - Různé sítě pro vzorek

Celá takto vytvořená sestava byla následně zatížena tlakem, který byl zjištěn během experimentálního měření (průběh tlaku viz Obrázek 58). Tento tlak působí vždy v ose na danou část vzorku.



Obrázek 58 - Závislost působícího tlaku na fázi měření

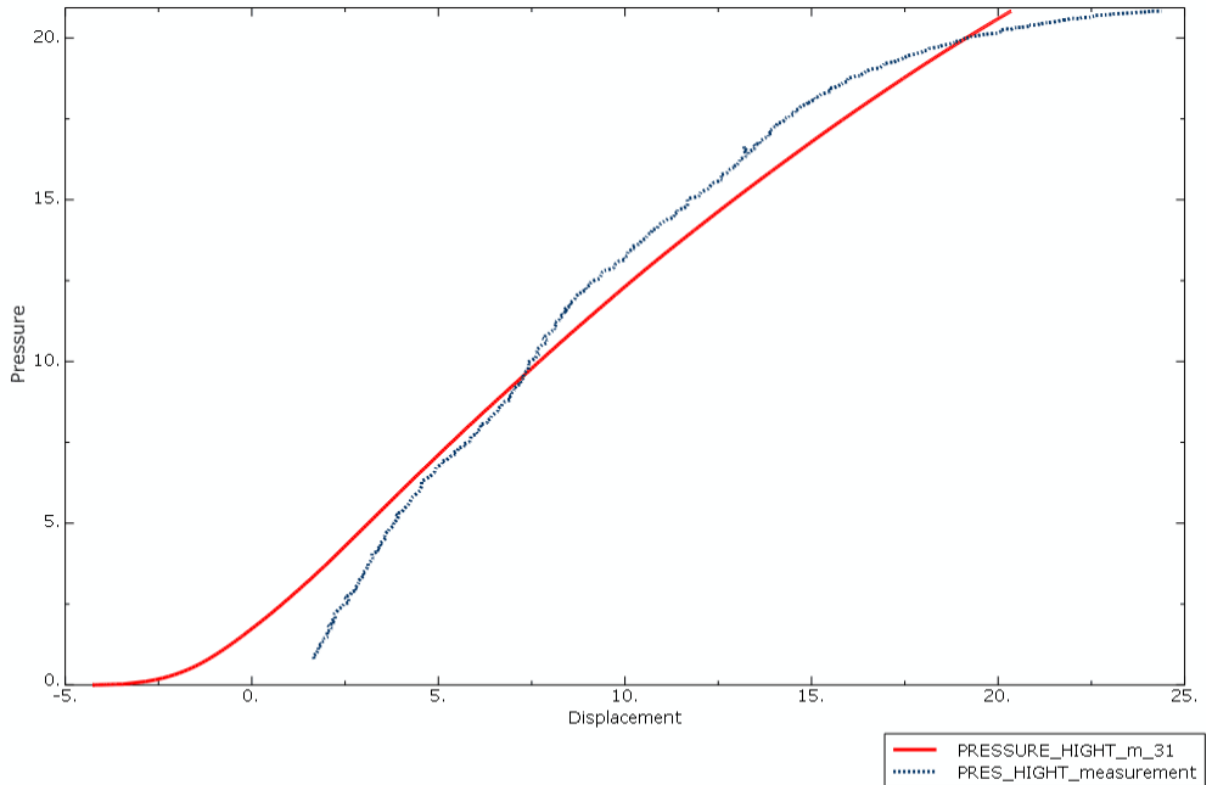
Obrázek 59 zobrazuje deformovaný model sestavy bulge testu se zobrazenou ekvivalentní napjatostí.



Obrázek 59 – Deformovaný model sestavy bulge testu

3.5.1. Interpretace výsledků

Pro určení správnosti prováděného experimentu je důležité porovnání závislosti tlaku na posuvu s tou samou závislostí získanou ze simulace. Při porovnání těchto závislostí se simulace s experimentem liší jen velmi zanedbatelně, což vede k závěru, že bulge test je ve firmě COMTES FHT a.s. prováděn správně.



Obrázek 60 - Porovnání závislosti tlaku na posuvu pro simulaci a experiment

8 Závěr

V rámci této práce bylo úspěšně dosaženo všech předem určených cílů. Prvním cílem této bakalářské práce bylo prodloužení křivky zpevnění oceli DP1000. Výchozí křivka zpevnění byla určena pomocí jednoosé tahové zkoušky. Tuto křivku se podařilo prodloužit čtyřmi způsoby, konkrétně třemi různými softwary a také dle normy ČSN EN ISO 16 808. 1. software s názvem HARD_2022 prodlouží křivku zpevnění za pomoci vlastního algoritmu. 2. software PCG extrapoluje křivku zpevnění podle vzorců definovaných dle Hollomona, Ludwika, Swifta nebo Krupskowskiho. 3. software MaterialModeler prodlouží křivku zpevnění za pomoci jednoosé tahové zkoušky a dvouosého bulge testu. A podle normy ČSN EN ISO 16 808 se křivka prodlužuje pomocí energetické bilance.

Software pro vyhodnocení PCG a MaterialModeler jsou uzavřené moduly – „black-box“, do nichž lze zadat pouze vstupní data s minimální možností ovlivnění postupu výpočtu křivek zpevnění. Software HARD_2022 vznikl jako společný projekt COMES FHT a.s. a společnosti IDIADA zatím ve formě pro prostředí OCTAVE. V současné době probíhá přepis do prostředí PYTHON, firma COMTES FHT a.s. tak má možnost ovlivňovat použité algoritmy, což představuje významnou výhodu. Tato bakalářská práce tak přispěla k dalšímu rozvoji softwarů v oblasti podpory numerických simulací.

Druhým cílem této práce bylo porovnání experimentálních dat a výsledků numerických simulací pro bulge test. Pro numerickou simulaci byl sestaven izotropní materiálový model popisující plastické chování oceli. K vyhodnocení experimentu byl využit optický systém ARAMIS založený na digitální obrazové korelaci. Při porovnání těchto dat byly zjištěny jen zanedbatelné odchylky a díky tomu byl potvrzen správný postup při měření bulge testu.

Poslední cíl byl konstrukční návrh speciálního siloměru včetně přechodek, který byl vložen do zkušební sestavy bulge testu pro ověření správnosti dat získaných ze snímače tlaku.

Seznam použité literatury

- [1] Karoserie-web.tym.cz [online]. 2006 [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: <http://karoserie-web.tym.cz/uvod.html>
- [2] DEMERI, M. Y. Advanced high-strength steels: science, technology, and applications. Materials Park, Ohio: ASM International, 2013. ISBN 9781627080057.
- [3] HORA, P., M. GORJI a M. PETERLI. Optical Metrology for Sheet Metal Forming: Material Parameters, Simulation Verification. IVP-ETH Zurich, 2015.
- [4] VUCETIC, Milan, Sven HÜBNER, Ilya PESHEKHODOV a Bernd-Arno BEHRENS. Influence of Strain Rate on Biaxial True Stress – True Strain Curves from the Bulge Test. Institute of Forming Technology and Machines IFUM Leibniz Universität Hannover.
- [5] ROSSI, Marco, Attilio LATTANZI, Luca MORICHELLI, Joa MARTINS, Sadrine THUILLIER, António ANDRADE-CAMPOS a Sam COPPIETERS. Testing methodologies for the calibration of advanced plasticity models for sheet metals: A review. 2022. Review.
- [6] KESSLER, Lutz a Joerg GERLACH. THE IMPACT OF MATERIAL TESTING STRATEGIES ON THE DETERMINATION AND CALIBRATION OF DIFFERENT FEM MATERIAL MODELS. Duisburg, Germany.
- [7] HLAVNIČKA, Jiří. MODELÝ TVÁRNÉHO PORUŠOVÁNÍ TENKOSTĚNNÝCH KONSTRUKCÍ. TRANSFORMACE MOHR-COULOMBOVA MODELU NA FFLD. Praha, 2022. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
- [8] ASM INTERNATIONAL: ASM handbook. Mechanical Testing and Evaluation. Materials Park, 2000. ISBN 10: 0871703890.
- [9] ABBASSI, Fethi, Touhami BELHADJ, Sébastien MISTOU a Ali ZGHAL. Parameter identification of a mechanical ductile damage using Artificial Neural Networks in sheet metal forming. Materials and Desing. 2012. Dostupné z: doi:DOI:10.1016/j.matdes.2012.09.032
- [10] ČSN EN ISO 16808: Kovové materiály – Plechy a pásy – Stanovení závislosti dvojosého napětí-deformace zkouškou vyboulením s optickými měřicími systémy. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [11] HALLFELDT, HOTZ, LEPPIN, et al. Sheet Bulge Testing. 2014, 85-95. ISSN 9780080965338. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00105-9>
- [12] KOH, Cheok Wei. Design of a hydraulic bulge test apparatus. Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Mechanical Engineering., 2008. Thesis. Massachusetts Institute of Technology. Vedoucí práce Tomasz Wierzbicki.
- [13] ZEBICON. Digital Image Correlation. Dánsko, 2013.
- [14] ARAMIS: Determination of Forming Limit Curves. Braunschweig, 2014.
- [15] KELLER, Stefan, Walter HOTZ a Harald FRIEBE. YIELD CURVE DETERMINATION USING THE BULGE TEST COMBINED WITH OPTICAL MEASUREMENT. Bonn, 2009.

- [16] BOUDA, Tomáš. Simple tension test post processing: Octave script for Comtes FHT. 2022.
- [17] GARCIA, Rodrigo Espí. SIMULIA Community.
- [18] GOM mbH: ARAMIS User Manual - Software: Bulge Test Evaluation (Biaxial Yield Stress (Flow curve) Calculation). Německo, 2014.
- [19] BENKERT, T, C HARTMANN, M EDER, F SPECKMAIER a W VOLK. MaterialModeler - From experimental raw data to a material model. 2019. Dostupné z: doi:doi.org/10.1016/j.softx.2019.100249
- [20] ŘÍHÁČEK, Jan. Počítačová podpora technologie. Brno: Vysoké učení technické, 2015.
- [21] ČSN EN ISO 6892-1. Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [22] VARNE, Vaibhav, Vasudev SHINDE a Vijay KAMBLE. Parametric optimization of Pancake Type Load Cell Using Response Surface Methodology. International Journal of Current Engineering and Technology. 2016. ISSN 227-4106.
- [23] KAMBLE, Vijay, Vasudev SHINDE a Jayant KITTUR. Review on optimization of load cells. Jurnal of Advancements in Material Engineering. 2020. ISSN 2582-0036.
- [24] CHEN, Kelin, Martin SCALES, Stelios KYRIAKIDRES a Edmundo CORONA. Effects of anisotropy on material hardening and burst in the bulge test. Research Center for Mechanics of Solids, Structures & Materials WRW 110, C0600 The University of Texas at Austin, Austin, TX 78712, United States, 2015. Thesis. University of Texas at Austin.
- [25] GOM mbH: Aramis User Manual - Software: Bulge Test Evaluation. Německo, 2015.
- [26] MARTÍNEZ PALMETH, Luis Humberto, María Angelica GONZALEZ CARMONA a José MIRANDA CASTRO. Design and Analysis of a Bulge Test Device. Ingeniería e Investigación [online]. 2021, 41(3), 1-9 [cit. 2022-09-23]. ISSN 2248-8723. Dostupné z: doi:10.15446/ing.investig.v41n3.85756
- [27] DVOŘÁK, Petr. Vyhodnocování zkoušky tahem pomocí digitalizačního systému ARAMIS. Praha, 2020. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. František Tatiček, Ph.D.
- [28] BARAN, Lukáš. Vliv stavu napjatosti na křivku zpevnění u hlubokotažného materiálu. Liberec, 2013. Diplomová práce. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Pavel Solfronk, Ph. D.
- [29] JELÍNEK, Dan. 3D optické měřicí systémy vhodné pro technologie tváření. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Eva Peterková, Ph.D.
- [30] KOŠTÁL, Josef. Possibilities of the description of stress-strain curve for computational simulations. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. František Šebek, Ph.D.

[31] WOJCIK, Rudolf. Porovnání ocelí a technologií při výrobě automobilové karoserie. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Ivo Dohnal.

[32] HAVELKA, Jan. Moderní materiály v automobilovém průmyslu a jejich vlastnosti z hlediska tváření. Praha, 2018. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Michal Valeš.

[33] ŠEDA, Pavel. MKP pro rychlé simulace obrábění. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Jan Zouhar, Ph.D.

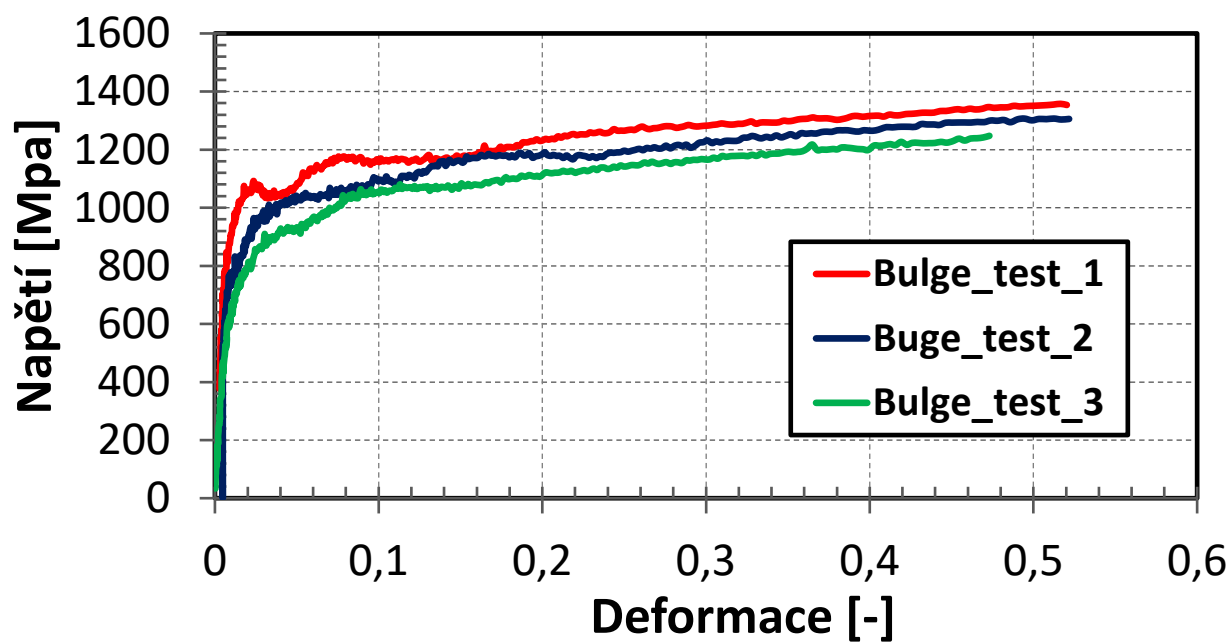
[34] CHEN a Kuang-Shun OU. Comprehensive Materials Processing. Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies, 2014.

[35] BENEŠ, Václav. Návrh způsobu zavedení zbytkového napětí do MKP modelu teploty. Praha, 2017. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Doc. Ing. Lukáš Horný, Ph.D.

PŘÍLOHA č. 1

Měření bulge test

Měření bulge test



PŘÍLOHA č. 2

Příprava zkoušky Bulge test

Příprava zkoušky Bulge test

- Zasunout pístnici pracovního válce do dolní úvratě
- Vytlačit píst Bulge testu do horní úvratě (čelo pístu zároveň s čelem válce)
- Zkontrolovat (umístit) těsnící „O“ kroužek
- Na vodící kolíky držáku vzorku nasunout vzorek
- Pomocí vodících kolíků nasunout držák vzorku se vzorkem do zápustky
- Utáhnout šrouby držáku vzorku momentovým klíčem ($258 \text{ N} \cdot \text{m}$)
- Umístit a utáhnout aretační zátku
- Otevřít oba kulové ventily Bulge testu
- Pomocí ruční pumpy několika zdvihy odzdušnit prostor válce do indikační baňky
- Zavřít kulový ventil na výstupním šroubení
- Pomocí ruční pumpy načerpat olej do pracovního prostoru válce a tím zasunout píst do spodní úvratě
- Zavřít kulový kohout na vstupním šroubení Bulge testu
- Demontovat aretační zátku
- Pracovní válec opatřený kulovou plochou vysunout téměř do kontaktu s pístní tyčí Bulge testu
- Vlastní zkouška Bulge testu
- Po zkoušce demontovat držák vzorku Bulge testu a vyjmout prasklý vzorek
- Očištění krycích skel před kamerami, kontrola zařízení

PŘÍLOHA č. 3

Výkresy přechodek

