TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Zjištění vhodného materiálového modelu pro numerickou simulaci tažení výlisku plechu ze slitiny titanu

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály

Autor práce: **Bc. David Koreček**
Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Liberec 2016

TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering

Diploma thesis

Study programme: N2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2301T048 – Engineering Technology and Materials

Author: **Bc. David Koreček**
Supervisor: doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Liberec 2016

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní
Akademický rok: **2015/2016**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Bc. David Koreček**
Osobní číslo:	**S14000296**
Studijní program:	**N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor:	**Strojírenská technologie a materiály**
Název tématu:	**Zjištění vhodného materiálového modelu pro numerickou simulaci tažení výlisku plechu ze slitiny titanu**
Zadávající katedra:	**Katedra strojírenské technologie**

Zásady pro vypracování:

1. Aplikace slitin titanu v průmyslové praxi (zpracovatelnost, charakteristické vlastnosti, výhody a nevýhody použití, atd.).
2. Základy numerických simulací procesu tváření (definice okrajových podmínek, volba materiálového modelu, vyhodnocení výsledků, atd.).
3. Experimentální zjištění materiálových charakteristik slitiny titanu nutných pro definici výpočtového modelu použitého při numerické simulaci.
4. Numerická simulace zvoleného výlisku ze slitiny Ti.
5. Experimentální výroba zvoleného výlisku a jeho deformační analýza.
6. Vyhodnocení, závěr.

Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**

Rozsah pracovní zprávy: **cca 50 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

[1] POLMEAR, I. *Ligth Alloy From traditional Alloys to Nanocrystals.* **4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. s. 421. ISBN 0-7506-6371-5.**
[2] ASHBY, M.F. *Materials Selection in Mechanical Design.* **3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005. s. 603. ISBN 0-7506-6168-2.**
[3] HOSFORD, W.F., CADDEL, R. *Metal Forming (Mechanics and Metallurgy).* **3rd ed. New York: Cambridge University Press, 2007. s. 312. ISBN 978-0-521-88151-0.**

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

Datum zadání diplomové práce: **31. října 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **31. března 2017**

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

Technická univerzita v Liberci - 7a -

Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. listopadu 2015

Prohlášení

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

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

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

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

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

Datum:

Podpis:

Zjištění vhodného materiálového modelu pro numerickou simulaci tažení výlisku plechu ze slitiny titanu

Finding a suitable material model for numerical simulation of sheet metal stamping pressed titanium alloy

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá zjištěním vhodného materiálového modelu slitiny titanu, který se použije pro numerickou simulaci tažení výlisku z plechu. Pro numerickou simulaci se použijí modely Hill 48 a Vegter. Oba modely jsou ve variantě s izotropním nebo kinematickým zpevněním materiálu. Pro definici těchto modelů se provede řada materiálových zkoušek. Dále se provede experiment zhotovení výlisku z plechu, který bude v závěru porovnán s numerickou simulací.

Klíčová slova: titan, vlastnosti titanu, materiálové zkoušky, numerická simulace, materiálový model pro numerickou simulaci

Annotation

This thesis deals with finding suitable material model for titanium alloy which is used for numeriacal simulation of sheet metal stamping pressed. Hill 48 and Vegter model is used for numerical simulation. Both models are used with isotropic or kinematic hardening. Many material tests are performed for the definition of these models. Followed by experiment was performed making stamping from metal sheet. Pressed will be compared with numerical simulation at the end of thesis.

Key words: titanium, titanium properties, material testing, numerical simulation, material model for numerical simulation

Poděkování

Tímto děkuji mému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D. za poskytnutí cenných rad a podkladů, které mi pomohly při vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Sobotkovi za poskytnutí podpory při vyhodnocování mechanických zkoušek a dále Bc. Zbyňku Růžičkovi za podporu v technických laboratořích.

Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže /SGS 21121/ ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.

Obsah

1 Úvod ... 10
2 Teoretická část ... 11
2.1 Titan a jeho slitiny ... 11
2.1.1 Výroba titanu a jeho slitin ... 11
2.1.2 Vlastnosti titanu a jeho slitin ... 13
2.1.3 Slitiny titanu ... 17
2.1.4 Význam a použití titanu a jeho slitin ... 21
2.2 Základy numerických simulací procesu tváření ... 23
2.2.1 Metoda konečných prvků ... 23
2.2.2 Model procesu simulace tváření ... 24
2.2.3 Algoritmy simulace procesu tváření ... 25
2.2.4 Simulace v softwaru PAM-STAMP ... 25
2.2.5 Definice okrajových podmínek a procesu tváření ... 26
2.2.6 Vyhodnocení simulace procesu tváření ... 27
2.3 Vybrané mechanické zkoušky materiálu ... 28
2.3.1 Statická zkouška tahem ... 29
2.3.2 Vypínání pevným polokulovým tažníkem (Nakajima test) ... 31
2.3.3 Rovnoosé vypínání kapalinou (Bulge test) ... 32
2.3.4 Plain strain tensile test ... 33
2.3.5 Zkouška cyklickým namáháním ... 34
3 Experimentální část ... 35
3.1 Použitý materiál ... 36
3.2 Použité mechanické a technologické zkoušky ... 36
3.2.1 Statická zkouška tahem ... 36
3.2.2 Statická zkouška tahem pro zjištění anizotropie materiálu ... 41
3.2.3 Vypínání pevným polokulovým tažníkem (Nakajima test) ... 42
3.2.4 Rovnoosé vypínání kapalinou (Bulge test) ... 49
3.2.5 Plain strain tensile test ... 54
3.2.6 Zkouška cyklickým namáháním ... 55
3.2.7 Experiment pro zjištění odpružení (ohyb + tah) ... 57
3.3 Definice materiálových modelů použitých pro numerickou simulaci ... 60
3.3.1 Model Hill 48 s izotropním zpevněním materiálu ... 60

3.3.2 Model Hill 48 s kinematickým zpevněním materiálu (Yoshida model) 62
3.3.3 Model Vegter s izotropním zpevněním materiálu 63
3.3.4 Model Vegter s kinematickým zpevněním materiálu (Yoshida model) 64
3.4 Numerická simulace tažení výlisku z plechu 65
3.5 Vyhodnocení numerické simulace tažení výlisku z plechu 68
3.6 Porovnání výsledku experimentu a numerické simulace 69
4 Závěr 73
5 Seznam použité literatury a zdrojů 74

Seznam použitých zkratek a symbolů

Označení	Rozměr	Význam
A_{80mm}	%	tažnost
A_g	%	homogenní tažnost
Al	%	hliník
B_0	mm	počáteční měřená šířka zkušební tyčinky
B_1	mm	šířka zkušební tyčinky po zkoušce
C		uhlík (prvek)
C	-	modul monotónního zpevnění
CAD		počítačem podporované projektování
CAE		výpočtová podpora procesů plošného tváření
Cl		chlor
E	MPa	Youngův modul pružnosti v tahu
F	N	síla
Fe		železo
FFC		Frayův proces výroby titanu
FLD		forming limit diagram (diagram mezních přetvoření)
L_0	mm	počáteční měřená délka zkušební tyčinky
L_1	mm	délka zkušební tyčinky po zkoušce
Mg		hořčík
N		dusík
n	-	exponent deformačního zpevnění
O		kyslík
obr.		obrázek
p	MPa	tlak
r	-	koeficient normálové anizotropie
R	mm	poloměr ideální koule
R_E	MPa	mez elasticity
R_e	MPa	mez kluzu
R_m	MPa	mez pevnosti
$R_{p0.2}$	MPa	smluvní mez kluzu
R_U	MPa	mez úměrnosti
S_0	mm	počáteční průřez
t_0	mm	počáteční měřená tloušťka zkušební tyčinky
Ti		titan
V		vanad
α		označení mřížky slitiny titanu
β		označení mřížky slitiny titanu
Δl	mm	prodloužení
ε	-	poměrné prodloužení
μ	-	Poissonovo číslo
ρ	-	hustota
σ	MPa	skutečné napětí
σ_i	MPa	intenzita napětí
φ	-	deformace
φ_0	-	posun
φ_i	-	intenzita přetvoření

1 ÚVOD

Úkolem této práce je experimentálně zjistit a definovat vhodný materiálový model slitiny titanu *Ti-CP* AMS4911 6*Al*-4*V*, který bude následně použit pro numerickou simulaci. V numerické simulaci bude simulován model tažení výlisku z plechu ze jmenované slitiny titanu. Dále pomocí experimentu zhotovit reálný výlisek, který bude v závěru porovnán s numerickou simulací.

Pro řešení této problematiky se nejprve pomocí jednotlivých zkoušek zjistí potřebné materiálové charakteristiky titanové slitiny, které se následně použijí pro definici výpočtového modelu použitého při numerické simulaci.

Pro zjištění materiálových vlastností, chování materiálu při různých způsobech zatěžování, vytvoření *FLD* diagramu a následnou definici materiálového modelu je třeba provést několik druhů mechanických a technologických zkoušek materiálu.

Pro napodobení jednoosého tahového namáhání se použije statická zkouška tahem. Pro simulaci dvouosého tahového namáhání a následně dvouosého rovnoosého vypínání se použije Nakazima test a Bulge test. Pomocí statické zkoušky tahem, pouze do předepsané hodnoty přetvoření, se zjistí anizotropie materiálu na vzorcích připravených v různých směrech válcování a to 0°, 45° a 90°. Dále se provede Plain strain test a zkouška cyklickým namáháním.

Po zjištění těchto potřebných vlastností a charakteristik materiálu proběhne pomocí softwaru PAM - STAMP numerická simulace procesu tváření plechu podle materiálových modelů Hill a Vegter ve variantě s izotropním a kinematickým zpevněním materiálu. Výsledek simulace se následně porovná s reálným vzorkem zjištěným z experimentu.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 TITAN A JEHO SLITINY

Titan a jeho slitiny je znám již od osmnáctého století, avšak průmyslově se začal využívat až ve druhé světové válce, kde se uplatnil hlavně ve vojenské technice a letectví. Po válce byl titan uplatňován hlavně v chemickém průmyslu a ve strojírenství.[1, 2]

O objevení titanu se zasloužili W. Gregor a M. K. Klaproth. Tito vědci nezávisle na sobě objevili kysličník neznámého prvku, tento prvek Klaproth nazval jako titan. Dlouho se nedařilo připravit čistý titan, poprvé se to podařilo M. A. Hunterovi v roce 1910 pomocí redukce chloridu titaničitého sodíkem. O čtyřicet let později vypracoval W. Kroll provozní metodu výroby titanu. V návaznosti světová výroba titanu prudce stoupla, nejprve ve vojenské technice a po roce 1957 se titan začal uplatňovat v průmyslu. [1, 3, 4]

2.1.1 Výroba titanu a jeho slitin

V přírodě se vyskytují minerály obsahující titan a mnohé z nich jsou tímto prvkem velmi obohaceny. Průmyslová výroba titanu je složitý a energeticky náročný proces. Příprava čistého titanu je náročná pro jeho velkou afinitu ke kyslíku, dusíku a jiným prvkům. Titan se připravuje redukcí roztaveným hořčíkem nebo sodíkem případně aluminotermicky. [1, 3, 4]

Při Krollově procesu má pro výrobu hlavní význam rutil, který obsahuje až devadesát procent oxidu titaničitého, a ilmenit s čtyřiceti až šedesáti procenty tohoto oxidu, zbytek obsahu rudy je tvořen převážně oxidem železitým. Chlorid titaničitý potřebný pro Krollův proces se připravuje chlorací rutilu nebo ilmenitu. [1, 3, 4]

V případě rutilu (oxid titaničitý) je postup jednoduchý, ruda se smísí s uhlím v poměru 3:1, briketuje se a následně probíhá kalcinace v redukční atmosféře. při teplotě 700°C. Dále následuje vlastní chlorace, která se provádí v elektricky vytápěné šachtové peci při teplotě 800- 1200°C. [1, 3, 6]

Reakce probíhá podle rovnice:

$TiO_2 + 2Cl_2 + 2C \rightarrow TiCl_4 + 2CO$

$TiO_2 + 4Cl_2 + 2C \rightarrow TiCl_4 + 2COCl_2$

Při použití ilmenitu je zapotřebí nejprve provést jeho selektivní redukci, která se provádí v obloukové peci na surové železo. Titan vytvoří snadno chlorovatelný karbid, který přejde do strusky a obohatí ji na obsah titanu. Při redukci ilmenitu za přídavku vzduchu nebo amoniaku, přejde titan do snadno chlorovatelného nitridu. [1, 3, 6]

Průběh redukce ilmenitu probíhá podle rovnice:

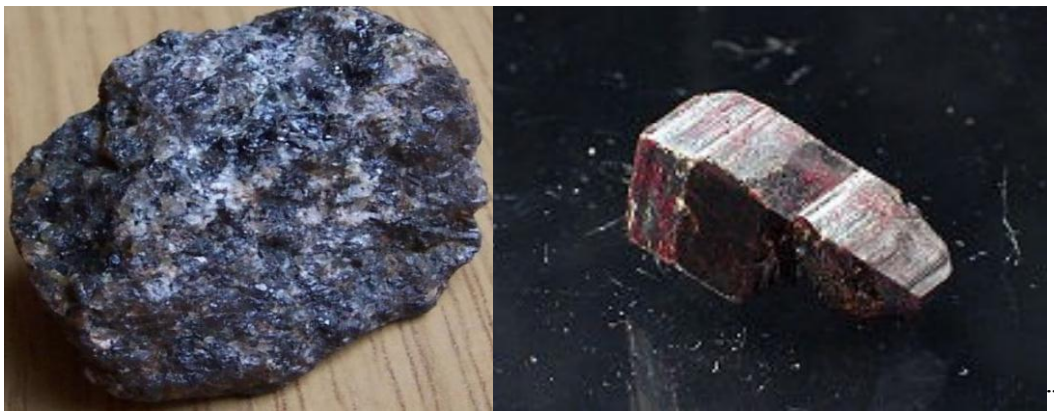
$FeTiO_3 + 4C \rightarrow TiC + Fe + 3CO$

$2FeTiO_3 + 6C + N_2 \rightarrow 2TiN + 2Fe + 6CO$

Chlorace karbidu a nitridu vzniklých redukcí ilmenitu probíhá podle rovnic:

$TiC + 2Cl_2 + ½\ O_2 \rightarrow TiCl_4 + CO$

$TiN + 2Cl_2 + ½\ O_2 \rightarrow TiCl_4 + NO$



Obr. 2.1. Ilmenit $FeTiO_3$ (vlevo) a Rutil TiO_2 (vpravo)

Samotný Krollův proces probíhá v železných nádobách při teplotách 850 - 900°C za účinku ochranné atmosféry argonu nebo helia. [1, 3, 6]

Průběh redukce chloridu titaničitého hořčíkem vyjadřuje rovnice:

$TiCl_4 + 2Mg \rightarrow Ti + 2MgCl_2$

Produktem této redukce je houbovitý titan, ten se usazuje na stěnách kelímku. Chlorid hořečnatý a hořčík, který nezreagoval, se odstraní kyselinou

chlorovodíkovou nebo vakuovou destilací. Titanová houba se slisuje do tvaru elektrody a ta se následně přetavuje v elektrické obloukové peci na kompaktní kov. [1, 3, 5]

Madex- Eastwoodův postup je modifikací Krollova postupu. Spočívá v redukci plynného chloridu titaničitého pomocí kapalného hořčíku při zvýšeném tlaku. Výsledkem této redukce je tavenina chloridu hořečnatého, ve které je obsažena suspense kovového titanu. Suspenze kontinuálně odtéká z redukční pece do elektrické pece a tam dojde k odpaření nezreagovaného hořčíku a chloridu hořečnatého. [1, 3]

Levná a perspektivní výroba titanu je pomocí elektrolitické redukce. Tento postup je nazýván po svém objeviteli jako Frayův proces výroby titanu (*FFC* proces). Elektrizují se pelety oxidu titaničitého a elektrolytem je tavenina chloridu vápenatého. Katoda i anoda jsou z grafitu. Elektrolýza probíhá za napětí okolo 3V a za teploty 950 - 1000°C v atmosféře inertního plynu. Redukčním činidlem je vápník, který vzniká na katodě. Elektrokalciotermická redukce oxidu titanu probíhá v několika stupních. Při jednotlivých stupních vznikají postupně meziprodukty jako je Ti_3O_5 dále Ti_2O_3 a TiO. Jako elektrolyzér pro redukci slouží skleněná ležatá nádoba. Anoda tvoří víko a katoda dno elektrolyzéru. Do šikmé mezery mezi elektrodami se kontinuálně dávkují pelety z TiO_2, které se gravitačně posunují po šikmém dně. Na dně nádoby se hromadí vyredukovaný titan a ten se mechanickým dopravníkem kontinuálně odstraňuje. Výhodou *FFC* procesu je jeho rychlost a celková jednoduchost postupu. [1, 3]

Další alternativní možnosti výroby titanu je pomocí redukce chloridu titaničitého vodíkem, dále termický vakuový rozklad chloridu titanitého, případně tavnou elektrolýzou nebo redukcí oxidu titaničitého hydridem vápenatým. [1, 3]

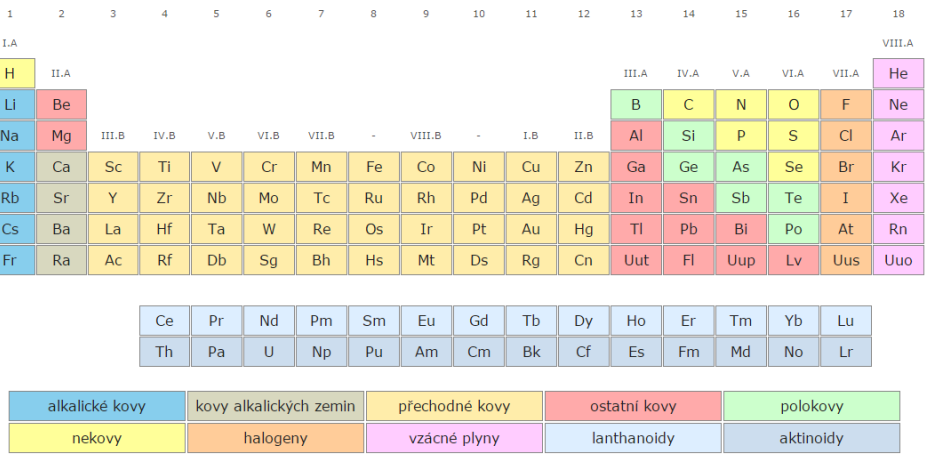
2.1.2 Vlastnosti titanu a jeho slitin

Titan je desátým nejrozšířenějším prvkem v zemské kůře. Titan je lehký a velmi tvrdý kov ocelového vzhledu, který je dobře odolný vůči korozi. Dobře vede teplo i elektrický proud. Při teplotě pod 0,39 K se stává supravodičem I typu. Má velkou chemickou stálost a jeho reaktivita závisí na úpravě povrchu. Na vzduchu je titan

velmi stálý, s fluorem reaguje při 150°C, s chlorem až okolo teploty 300°C a s ostatními nekovy se slučuje až za mnohem vyšších teplot. Titan má velkou slučivost s uhlíkem a křemíkem a snadno vytváří karbidy, s dusíkem reaguje za vzniku nitridu. [3, 4, 6]

Obr. 2.4. Titanový krystal o vysoké čistotě [4]

Titan se řadí mezi neušlechtilé kovy a snadno vytěsňuje ušlechtilé kovy z jejich solí. Snadno tvoří komplexní sloučeniny. Ve sloučeninách se nejčastěji vyskytuje jako čtyřmocný, méně často jako trímocný a dvoumocný prvek. [3, 6]



Obr. 2.5. Periodická soustava prvků [7]

Atomové číslo titanu je 22 a řadí se do čtvrté periody prvků. Titan patří do skupiny přechodových kovů. Atom titanu má neúplně obsazenou třetí vrstvu elektronového obalu, ve které se nachází 10 elektronů a čtvrtou vrstvu se 2 elektrony. Oproti ostatním kovům ve stejné periodě má titan menší měrnou hmotnost a vyšší teplotu tání. [1, 6]

Mechanické vlastnosti závisí velkou mírou na obsahu nečistot. Velký vliv má obsah hlavně kyslíku, dusíku a uhlíku. Pevností se čistý titan vyrovná běžným konstrukčním ocelím, ale má přibližně o polovinu nižší Youngův modul pružnosti v tahu. Oproti ocelím má však titan mnohem větší poměr mezi pevností a hustotou, což umožňuje dosáhnout požadované pevnosti za značné úspory hmoty součásti. [1, 2, 8]

Významný vliv na mechanické vlastnosti titanu mají dále prvky jako je bór, beryllium a hliník, avšak tyto prvky obvykle nebývají v nečistotách v titanu přítomny. Malé množství jiných nečistot, například wolframu, nemá na mechanické vlastnosti významný vliv. [1, 8]

Největší vliv na mechanické vlastnosti titanu mají kyslík a dusík. Již při malé koncentraci obou prvků se výrazně zvětšuje hodnota meze kluzu a meze pevnosti na úkor poklesu plastických vlastností. Vliv dusíku je ještě významnější než vliv kyslíku, ale reakce titanu s dusíkem se projevuje až za vysokých teplot. Vlivem obou prvků titan křehne, tudíž přípustnost těchto prvků v titanu a jeho slitinách je značně omezena. Obvykle bývá obsah kyslíku v technickém titanu maximálně do 0,15 procenta a obsah dusíku do 0,05 procenta. [1, 8]

S rostoucím obsahem uhlíku se zhoršují zejména plastické vlastnosti a zvyšuje se modul pružnosti. Rozpustnost uhlíku v titanu je za normální teploty nižší než 0,25 procenta, při vyšším obsahu tvoří s titanem karbidy. Uhlík intenzivně ovlivňuje změnu vlastností právě do obsahu 0,25 procenta, při vetší koncentraci je změna pozvolná. [1, 8]

Vodík nemá podstatný vliv na pevnost a tvrdost, ale při překročení koncentrace 0,03 procenta výrazně klesá vrubová houževnatost, proto se obsah vodíku udržuje do 0,01 procenta. Pokles houževnatosti je způsoben stárnutím titanu díky obsahu vodíku. [1, 8]

Železo a křemík jsou obvyklé nečistoty, které se do titanu dostávají již při jeho výrobě při redukci hořčíkem z kysličníku. Obsah železa v titanu se objevuje v rozmezí 0,1 až 0,3 procenta a obsah křemíku obvykle do 0,1 procenta . Železo zvyšuje pevnost a tvrdost a snižuje tvárnost. Křemík zhoršuje houževnatost. [1, 8]

Mechanické vlastnosti titanu lze zvýšit tvářením za studena, podobně jako u ocelí. S rostoucím stupněm deformace titan zpevňuje zprvu intenzivně, dále při vyšších deformacích se křivka zpevnění zplošťuje. Poměrně rychlý průběh zpevňování omezuje možnosti tváření titanu. Vlastnosti titanu velkou mírou závisí na rychlosti deformace. [1, 8]

U titanu α, podobně jako u jiných kovů z hexagonální strukturou, vzniká při tváření velmi výrazná textura. Tuto texturu nelze odstranit, je možno ji pouze omezit pomocí vhodného technologického postupu, proto je vždy nutné počítat z anizotropií mechanických vlastností. Zpevnění vlivem textury může být tak velké, že pevnost ve směru textury až dvojnásobně převyšuje pevnost ve druhém směru. [8]

Mez pevnosti a mez kluzu titanu v měkkém stavu lze přirovnat ke středně a málo legovaným konstrukčním ocelím, které dosahují podobných hodnot. Poměr obou těchto hodnot roste úměrně se stoupající pevností titanu. [1]

Tažnost a kontrakce jsou značně závislé na obsahu nečistot. Oproti ocelím stejné pevnosti dosahuje titan vyšších hodnot tažnosti. [1]

Vrubová houževnatost není příliš dobrým ukazatelem jakosti titanu. Je velice ovlivněna obsahem vodíku v titanu a tak i sebemenší změna koncentrace vodíku velmi ovlivňuje hodnotu vrubové houževnatosti. Při správně zvládnuté technologii tavení a udržení obsahu vodíku pod 0,001 procenta je hodnota vrubové houževnatosti cca 10 kg.m/cm^2. Vodík lze odstranit žíháním ve vakuu. [1]

Titan vykazuje poměrně značnou odolnost proti cyklickému zatěžování. Hodnota meze únavy bývá u hladkých vzorků vetší než 50 procent meze pevnosti v tahu, ale velmi záleží na jakosti povrchu součásti. Vrubem se mez únavy prudce snižuje, avšak citlivost na vrub je u titanu menší než u hliníkových slitin nebo nerezových ocelí. Kyslík a dusík zvyšují hodnotu meze únavy. [1]

Odolnost proti tečení je i přes poměrně vysokou pevnost relativně malá. Napětí, které vyvolá tečení, je závislé na velikosti deformace a na době, po kterou zatížení působí. Kyslík a dusík zvyšují pevnost a tedy i odolnost proti tečení. Deformační zpevnění taktéž snižuje odpor materiálu proti tečení. [1]

Titan má vysoký bod tání, ale i přes to není vhodným materiálem pro použití za zvýšených teplot. S rostoucí teplotou titan velmi rychle ztrácí svou pevnost. Modul pružnosti se při vyšších teplotách také snižuje. Tažnost i kontrakce se naopak s rostoucí teplotou zvětšují. [1]

Také obrobitelnost titanu je horší než obrobitelnost ostatních kovů. To je způsobeno poměrně vysokou pevností a malou tepelnou vodivostí. Titan má navíc schopnost pohlcovat kyslík a dusík při ohřevu v místě třísky. [8]

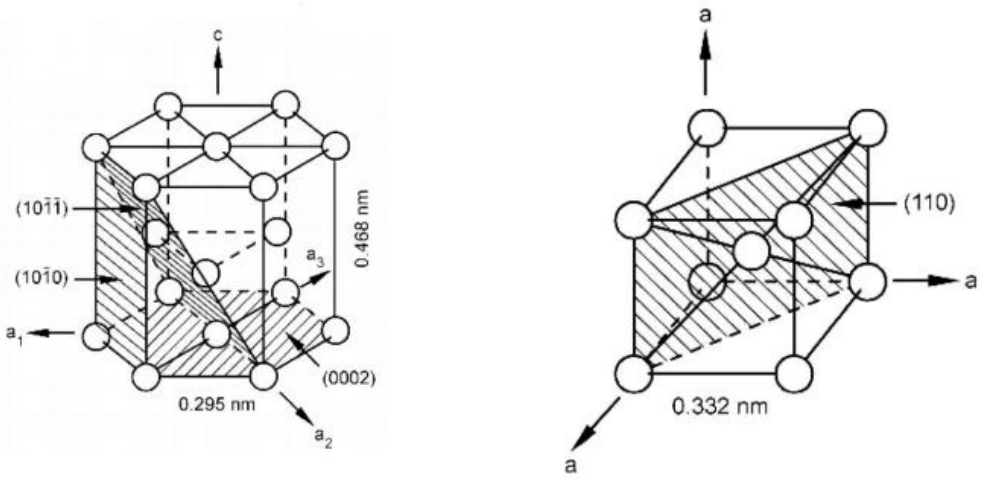
Za předpokladu působení ochranné atmosféry má titan i relativně dobrou svařitelnost. Ideálně se hodící technologií pro svařování titanu je použití wolframové netavící se elektrody v ochranné atmosféře argonu. Dále se uplatňuje bodové a švové svařování. [8]

Třecí vlastnosti titanu nejsou příliš dobré, jelikož má titan malou odolnost proti otěru a vysoký koeficient tření. Koeficient tření se dá snížit povrchovou úpravou. Titan má velkou náchylnost k zadírání, což je způsobeno povrchovou vrstvičkou tvořenou kysličníkem, která nebrání přivaření třecích ploch. [1, 8]

Velká přednost titanu je jeho odolnost proti korozi. Titan na povrchu vytváří pasivační vrstvy, které rychle zvyšují standardní potenciál. Velmi příznivé vlastnosti má titan rovněž k erozi a kavitaci. [1]

2.1.3 Slitiny titanu

Jelikož mechanické vlastnosti čistého titanu nemusí být pro technické využití dostačující, používají se jeho slitiny. Slitiny titanu jsou klasifikovány nejčastěji podle struktury v rovnovážném stavu. Čistý titan utváří dvě alotropické modifikace mřížky a to hexagonální mřížku α a kubickou plošně středěnou mřížku β. Změna fáze α na fázi β nastává při 882°C. Na fázovou přeměnu a strukturu titanu a jeho slitin mají vliv různé prvky. Mezi nejvýznamnější slitiny patří slitiny α, zejména pro výhodné mechanické vlastnosti za vyšších teplot, dobrou svařitelnost a jednoduché zpracování, avšak nejvíce používané slitiny jsou slitiny dvoufázové, které se vyznačují větší pevností. Pokud se má u slitin dosáhnout optimálních vlastností, je třeba tepelného zpracování, které se volí podle druhu slitiny. Tepelné zpracování je závislé na obsahu prvků stabilizujících fázi β. [1, 2, 6]

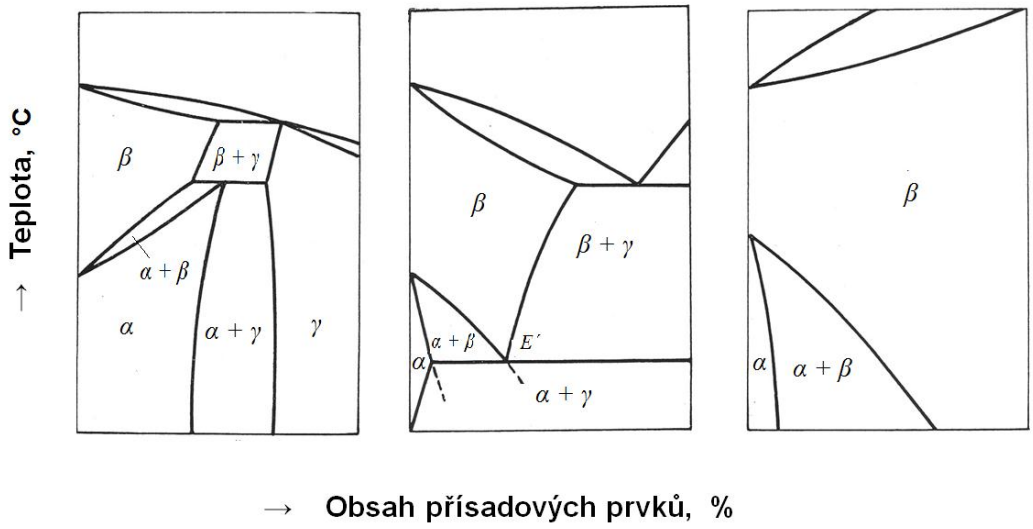


Obr. 2.2. Krystalové mřížky modifikací titanu [9]

Slitiny se rozdělují podle rozpustnosti přísady ve fázi α a ve fázi β a podle jejich stabilizačního vlivu na tyto fáze. Obě fáze se od sebe liší krystalickou mřížkou (viz obr. 2.2.), přičemž u čistého titanu je fázová přeměna tak rychlá, že ji nelze žádným způsobem potlačit. Rozdílnost obou fází ovlivňuje výslednou strukturu a mechanické vlastnosti. Legující prvky ovlivňují teplotu transformace a fázové podmínky. [6, 8, 10]

Vhodnou kombinací legujících prvků lze dosáhnout různých vlastností slitin. Kyslík a dusík jsou dobře rozpustné v obou krystalových modifikacích. Stabilizují fázi α, zvyšují pevnost a snižují plasticitu. Rozpustnost uhlíku je v obou fázích omezena. Za normální teploty do 0,25 procent. Uhlík taktéž zvyšuje mechanické vlastnosti, společně s hliníkem také rozšiřují fázi α. Vodík způsobuje precipitaci hydridu titanu a následný pokles houževnatosti. Železo je obvyklou nečistotou v titanových slitinách, do titanu přichází již při jeho výrobě redukcí. Křemík snižuje houževnatost materiálu. Železo společně s křemíkem a dalšími prvky, jako je například chrom, vanad a molybden stabilizují fázi β. [6, 8, 10]

Přísadové prvky se v obou modifikacích mohou rozpouštět úplně nebo částečně a vytvářejí roztoky typu α a β. Tyto roztoky si zachovávají danou mřížku dané modifikace titanu. Některé prvky se s titanem slučují a tvoří intermetalické sloučeniny. [11, 12]



Obr. 2.3. Rovnovážné diagramy titanových slitin [13]
α - tuhý roztok v modifikaci α , šesterečná mřížka
β - tuhý roztok v modifikaci β , kubická stereocentrická mřížka
γ - chemická sloučenina s vysokým obsahem přísadového prvku

Slitiny lze rozdělit do 6 základních skupin a to na α-slitiny, případně pseudo α-slitiny, dvoufázové slitiny typu $\alpha + \beta$ martenzitické nebo přechodové, dále pseudo β-slitiny a stabilní β-slitiny. Jejich vlastnosti záleží na podílu obou fází a na chemickém složení a zejména na podmínkách tepelného zpracování, pomocí kterého se mění fázové složení i morfologie. [1, 10]

Slitiny typu α obvykle legujeme hliníkem, který stabilizuje tuto fázi. Slitiny titanu s hliníkem mají obvykle velmi dobré mechanické vlastnosti, jsou svařitelné a mají velkou tepelnou stabilitu. Jsou odolné proti křehkému porušení i za velmi nízkých teplot. Jejich tvárnost za studena je omezená. Kyslík, dusík a uhlík mají již při obsahu několika desetin procenta tak velký vliv na růst pevnosti a pokles tvářitelnosti, že je k legování nelze použít a naopak jsou považovány za nežádoucí. S hliníkem tvoří titan stabilní tuhý roztok. Obsah hliníku se pohybuje do 7 procent, neboť větší obsah hliníku způsobuje křehnutí materiálu. Slitiny mají optimální vlastnosti při obsahu hliníku okolo 5 procent a obsahu cínu 2 až 3 procenta. [1, 11, 14]

Přidáním malého množství prvků, které stabilizují fázi β, vzniknou slitiny označované jako pseudo α slitiny. Jsou to v podstatě slitiny α se 2 až 8 procenty β fáze v rovnovážném stavu. Základem slitiny je titan, hliník a mangan s omezeným obsahem legujících prvků. Slitiny tohoto typu mají velmi dobrou pevnost a dobrou plasticitu. S rostoucím obsahem hliníku roste pevnost materiálu. Slitiny jsou dobře zpracovatelné za tepla i za studena. Ke zpevnění α fáze se využívá zirkon popřípadě cín a jako prvek stabilizující β se přidává vanad nebo molybden. [9, 11, 12]

Dvoufázové slitiny $\alpha + \beta$ jsou nejpočetnější skupinou. Množství β fáze v rovnovážném stavu se může měnit od 5 do 50 procent v závislosti obsahu a typu legujícího prvku. Slitiny, které obsahují do 25 procent β fáze patří do skupiny martenzitických slitin, neboť při rychlém ochlazení z oblasti β fáze vzniká martenzitická struktura. Slitiny obsahující nad 25 procent β fáze lze při ochlazení udržet ve struktuře i fázi β, která se však z části může změnit na fázi ω. Takto vzniklé slitiny jsou označovány jako přechodné nebo metastabilní s β fází. Tyto dvoufázové slitiny se vyznačují širokou škálou struktur a tedy i vlastností, které jsou závislé na podmínkách tváření a tepelného zpracování. Struktura může být tvořena rovnoosými zrny, nebo lamelami obou tuhých roztoků, případně směsí těchto morfologií. Oproti slitinám s jednofázovou strukturou α mají horší odolnost proti tečení, ale mají lepší odolnost proti únavovému namáhání a lze je vytvrdit pomocí tepelného zpracování. [9, 10, 11, 12]

U přechodových slitin se zvětšuje obsah prvků, které stabilizují β fázi, a snižuje obsah hliníku. Takovéto slitiny jsou označovány jako pseudo slitiny β, případně metastabilní slitiny. Obsah β stabilizátorů se pohybuje okolo 12 procent. Stabilizují prvky jsou většinou vanad, chrom nebo molybden. Obsah hliníku je limitován hranicí 3 procenta. Pseudo slitiny β dosahují velkých pevností, v žíhaném stavu až 1100 MPa a po tepelném zpracování mnohdy až 1400 MPa. Při snížení pevnosti mohou mít i dobré plastické vlastnosti. Obsah fáze β závisí na podmínkách tepelného zpracování, hlavně na teplotě ohřevu a podmínkách ochlazování. [10, 12]

Slitiny β řadíme mezi metastabilní slitiny. Zajištění struktury s čistou β fází za normální teploty je velmi obtížné. Základem je snížení teploty při fázové přeměně fáze α na fázi β, tím se docílí podstatného zpomalení přeměny. Tohoto procesu lze

dosáhnout jen díky velkému množství přídavných prvků (až 30 %), případně vhodnou kombinací těchto prvků. Struktura β se pak vytvoří zakalením nebo dokonce normálním ochlazením. Slitiny se strukturou β se vyznačují vysokou pevností, avšak ztrácejí výhodu malé měrné váhy díky velkému množství deficitních a legujících prvků. Legující prvky jsou obvykle železo, chrom, molybden nebo vanad, případně kombinace těchto prvků. Velká přednost těchto slitin je jejich dobrá tvářitelnost a vysoká pevnost do teplot cca 500°C, dále disponují dobrou houževnatostí a zpracovatelností ve stárnutém stavu. Zpevňujícím popouštěním se dosáhne částečného rozpadu β fáze a tím se zvýší pevnost až na hranici 1500 MPa. Nevýhoda je citlivost na kyslík a uhlík, které potlačují stabilitu β fáze. [1, 9, 10, 12]

2.1.4 Význam a použití titanu a jeho slitin

Příznivý poměr mezi mechanickými vlastnostmi a měrnou hmotností předurčuje titan pro jeho využití hlavně ve speciálních odvětvích průmyslu. Již od počátků průmyslové výroby titanu bylo jeho těžiště ve využití v kosmických technologiích a speciálních aplikacích v leteckém průmyslu. Titan a jeho slitiny jsou základním materiálem pro výrobu skeletů a ochranných povrchových štítků kosmických objektů. V leteckém průmyslu se titan a jeho slitiny uplatňují při konstrukci velmi namáhaných dílu letadel. Používají se zde slitiny s mezí pevnosti až 1280 MPa, mezí kluzu 1070 MPa a tažností 12 %. [1, 15, 16]

Obr. 2.4. Prakticky celotitanová konstrukce letounu SR-71 Blackbird [17]

Titan a jeho slitiny se používají na součástky motorů a přístrojů. V motorech jsou to výhradně různě části kompresorů jako jsou disky, rotory, prstence. apod. Dále se používá zejména pro rotační i stacionární kompresorové lopatky, parní a plynové turbíny, výměníky tepla apod. [9, 16]

Velká pozornost je soustředěna na vynikající antikorozní odolnost titanu a jeho slitin, což umožňuje využívat titan v chemické průmyslu pro výrobu tlakových nádob. Dále je titan používán pro výrobu chemických reaktorů, které pracují v extrémních podmínkách. Titan je také často využíván v zařízeních, která pracují ve styku s mořskou vodou, např. součásti lodí a ponorek. [16]

V běžném užívání se titan využívá jako materiál pro výrobu luxusních hodinek a šperků, dále pro svou nízkou měrnou hmotnost pro různé sportovní potřeby. Díky své vysoké korozní odolnosti a biokompatibilitě se v neposlední řadě titan používá pro různé aplikace v lékařství. [16, 17]

Obr.2.5. Aplikace titanových slitin v běžném životě [17]

V nemalém množství se titan také využívá jako přísada do speciálních slitin čímž se výrazně ovlivňují jejich mechanické vlastnosti. Dále jako ochranný povlak různých obráběcích nástrojů ve formě nitridu titanu. [3]

2.2 ZÁKLADY NUMERICKÝCH SIMULACÍ PROCESU TVÁŘENÍ

V dnešní době je kladen stále větší důraz na zvyšování produktivity a kvality procesů spojených s technologií plošného tváření. V oblasti plošného tváření je snaha dosáhnout co největších hodnot tvářitelnosti a tak umožnit výrobu i velmi složitých výlisků. Je cílem využívat metody umožňující výrobu složitých výtažků na jeden zdvih. Další věcí je nepřetržitá optimalizace technologických parametrů a podmínek procesu tváření. Tyto a další požadavky předurčují využití metod modelování a numerických simulací technologických procesů pro zrychlení a zkvalitnění technologické přípravy výroby. [18]

2.2.1 Metoda konečných prvků

Nástrojem simulací a výpočtů jsou numerické metody mechaniky poddajných těles s využití metody konečných prvků. Metoda konečných prvků je považována za nejvýkonnější metodu matematického modelování použitého v simulacích procesu tváření. [18, 19]

Je to přibližná numerická metoda řešení rovnic popisujících chování deformovaného materiálu. Tato metoda může být použita k analýze velkého množství různých úloh bez omezení, která by vyplývala z geometrie tvářených součástí. Pro řešení úloh je nejčastěji používán model tuho-plastického nebo vazko-tuho-plastického materiálu. Pro výpočet se často používá soustava rovnic teorie plasticity, rovnice kontinuity toku a konstituční rovnice. [18, 19]

Princip této metody spočívá v nahrazení spojité oblasti s nekonečným počtem bodů jednoduchými geometrickými útvary, nazývané konečné prvky. Základem je těleso rozdělit na takové prvky, které se dají matematicky snadno popsat. Indiskrétní těleso je převedeno na diskrétní, složené z prvků, které jsou spojeny v uzlech. [18, 19, 20]

Při simulacích procesů plošného tváření je využívána numerická metoda konečných prvků, ve které je lisovaná součást v prostoru definována trojúhelníkovými, případně čtyřúhelníkovými skořepinovými prvky. K výpočtu se používají rychlé krokové a inverzní řešiče, kterými jsou řešeny výpočty pohybových rovnic implicitní

numerickou metodou (PAM QuikStamp Direct a Inverse). Tento postup se používá pro ověření lisovatelnosti. Výsledky z implicitní numerické metody lze získat v řádu minut. [19, 21]

Pro realistické řešení se používají řešiče, které používají explicitní numerickou metodu pro řešení energetických pohybových rovnic (PAM-STAMP). Výsledky z explicitní numerické simulace lze získat v řádu hodin. Při optimalizovaní některých parametrů okrajových podmínek, jako je například úprava adaptivního síťování, se lze dostat na časy v řádu desítek minut. Čím menší je nejmenší element sítě, tím probíhá výpočet s menším časovým krokem a tím se prodlužuje doba výpočtu. [19]

2.2.2 Model procesu simulace tváření

Komplexní model simulace procesu tváření obsahuje mnoho dílčích vzájemně vázaných komponent. Mezi tyto položky patří:

- materiál, u kterého je třeba definovat požadovaný tvar a velikost, chemické složení a mikrostrukturu, mechanické vlastnosti v procesních podmínkách vyjádřené v závislosti na přetvárném odporu, teplotě a struktuře materiálu a na požadovaných mechanických vlastnostech finálního výrobku
- nástroj, u kterého je třeba definovat geometrii, materiálové a tepelně-mechanické vlastnosti
- stykové podmínky jako je úprava povrchu, mazání, tření a přestup tepla
- popis dějů v procesní zóně jako je plastická deformace, napětí, přetvoření, rychlost deformace a teplota
- použité stroje a zařízení a jejich parametry

K dosažení cíle je zapotřebí vyřešit ještě spoustu dalších problémů. Jeden z těchto problémů je silně nelineární charakter vztahů mezi jednotlivými parametry, to je způsobeno charakterem konstitutivních vztahů materiálu, dále nestacionárním kontaktem mezi materiálem a nástroji a velkými deformacemi polotovaru. [22]

2.2.3 Algoritmy simulace procesu tváření

Algoritmy týkající se řešení problémů v procesu tváření se zabývají splněním základních rovnic mechaniky kontinua. V těchto rovnicích jsou obsaženy rovnice rovnováhy, kinematické a konstitutivní rovnice, které popisují chování materiálu pro předepsané okrajové podmínky. Používá se zde princip virtuálních prací v případě deformačního přístupu a v případě rychlostního přístupu princip virtuálních výkonů. [22]

Deformaci tělesa lze rozložit na vratnou elastickou část a nevratnou plastickou složku deformace. Pro tváření kovů je typický řádový rozdíl mezi elastickou a plastickou složkou tenzoru napětí, což vede k myšlence zanedbání elastické složky deformace. Tento model pak vede na takzvanou rychlostní formulaci, kde je primární nezávislá veličina vektorové pole rychlostí bodů kontinua. Tento přístup je velmi efektivní díky jednoduchému algoritmu ve srovnání s deformační přírůstkovou formulací, kde jsou respektovány obě složky tenzoru napětí, jak elastická, tak i plastická. [22]

V případě deformačního přístupu jsou primární nezávislou veličinou posuvy. Tyto posuvy jsou svázány s přetvořením ε standardními vztahy nelineární kinematiky kontinua. [22]

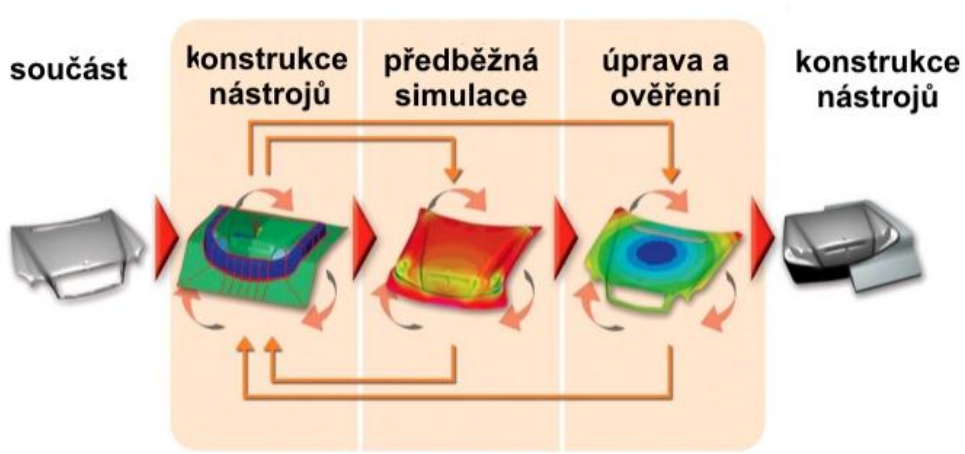
U rychlostního přístupu je primární nezávislou veličinou rychlostní pole. Tento přístup je typický pro řešení problémů mechaniky tekutin. Uplatňuje se zde Eulerův popis pohybu kontinua. [22]

2.2.4 Simulace v softwaru PAM-STAMP

Programovatelný modul PAM-STAMP je specializovaný *CAE* software pro simulaci především procesů plošného tváření, kinematiky součástí, dynamiky, proudění tekutin, apod. Simulace se dá uskutečnit pro procesy hlubokého tažení, ohýbání, lisování do pryže, hydroformingu, apod. *CAD* model nástrojů se automaticky převede na výpočtovou síť *CAE* modelu. Výpočtová síť přístřihu plechu se vygeneruje v prostředí grafického pre-procesoru spolu s potřebnými okrajovými, kontaktními a zatěžujícími podmínkami řešení. [19]

Pro řešení časového integračního schémata řešení pohybové rovnice rovnováhy vnitřních a vnějších sil se využívá explicitní formulace metody konečných prvků. Během řešení je počítáno s plně nelineární deformační historií materiálu. Popis materiálového chování je založen na Hillově formulaci podmínky plasticity, ve které je uvažována směrově závislá anizotropie materiálu. Zpevňování materiálu vlivem deformace může být doplněno informací o vlivu deformační rychlosti. [19]

PAM-STAMP umožňuje zahrnout do výpočtu deformační historii materiálu a tak dokáže detekovat porušování soudržnosti materiálu během tažení. Při tažení na více tahů, jsou výsledky z prvního tahu, přeneseny do následující operace, kde se tak zohlední ztenčení a deformačně napěťový stav materiálu. Po tažení většinou následuje ostřižení a následně simulace odpružení. [19]



Obr. 2.6. Postup simulace v softwaru PAM-STAMP

2.2.5 Definice okrajových podmínek a procesu tváření

Pro numerickou simulaci tváření je velmi důležitá definice okrajových podmínek. Tyto podmínky se formulují čistě matematicky, nebo mohou být vloženy do simulačního procesu z pomocných databází. Mezi základní problém celé simulace patří správná volba okrajových podmínek a jejich vložení do procesu. Vhodná volba okrajových podmínek může rapidně urychlit simulační proces. Nejčastější závadou na výliscích bývá nadměrné ztenčení stěny s následným možným porušením soudržnosti na těchto místech. V těchto místech jsou lokální deformace vetší než dovoluje *FLD* diagram. Poloha *FLD* diagramu je ovlivňována okrajovými podmínkami, za kterých byl zjišťován. [23, 24]

Průběh plastického toku materiálu a poloha křivek v *FLD* diagramu závisí na těchto okrajových podmínkách:

- druhu, vlastnostech a jakosti materiálu, jeho tloušťce a povrchové drsnosti
- tvaru přidržovače a velikosti tlaku na něj působícího
- tvaru, velikosti a poloze brzdících lišt
- velikosti a tvaru přístřihu
- počtu operací
- způsobu mazání a na kvalitě a množství maziva
- jakosti povrchu tvářecího nástroje
- tření mezi materiálem přístřihu a nástrojem
- anizotropii materiálu
- rychlosti tváření [23, 24]

Plastický tok materiálu ovlivňuje celá řada výše uvedených faktorů. Zahrnutí těchto limitních podmínek do procesu řešení simulace je bez praktických zkušeností velmi obtížné. Metoda verifikace je poměrně pracná a vedle provedení simulace je dále třeba praktické změření povrchových deformací v kritických místech výlisku. Pomocí simulací můžeme získat rychle přehled o tom, jak jednotlivé okrajové podmínky ovlivňují proces tváření a rozvoj deformace. [23, 24]

2.2.6 Vyhodnocení simulace procesu tváření

Jako výsledek simulace tažení plechu je pokládáno získání vlastností součásti v průběhu procesu tváření. Získají se informace například o lisovatelnosti dílu, ztenčení plechu, výskytu zvlnění a porušení materiálu. Těmito vlastnostmi je ovlivněna celková jakost lisovaného dílu a jeho použití v praxi. Pokud díl v této fázi nesplní předešlá kritéria, tak je možné upravení okrajových podmínek tak, aby se došlo k lepším výsledkům a proces výpočtu mohl být restartován. Díky výpočtu na

základě metody konečných prvků je možné odladit okrajové podmínky a až poté následně konstruovat nástroj. [19]

Pro jednotlivé analýzy ztenčení, deformace případně napětí je důležité znát mezní hodnoty v daném stavu výtažku. Jedná se hlavně a minimální a maximální hodnotu sledované analýzy. Tyto hodnoty poukazují na kritická místa výlisku. Tam, kde jsou hodnoty maximální, se může jednat o oblasti s hrozícím porušením soudržnosti, případně zvlnění výlisku. Minimální hodnoty naznačují místa, která nejsou dostatečně deformována nebo nejsou deformací zasažena vůbec, dále mohou poukázat na pěchování materiálu. [19]

2.3 VYBRANÉ MECHANICKÉ ZKOUŠKY MATERIÁLU

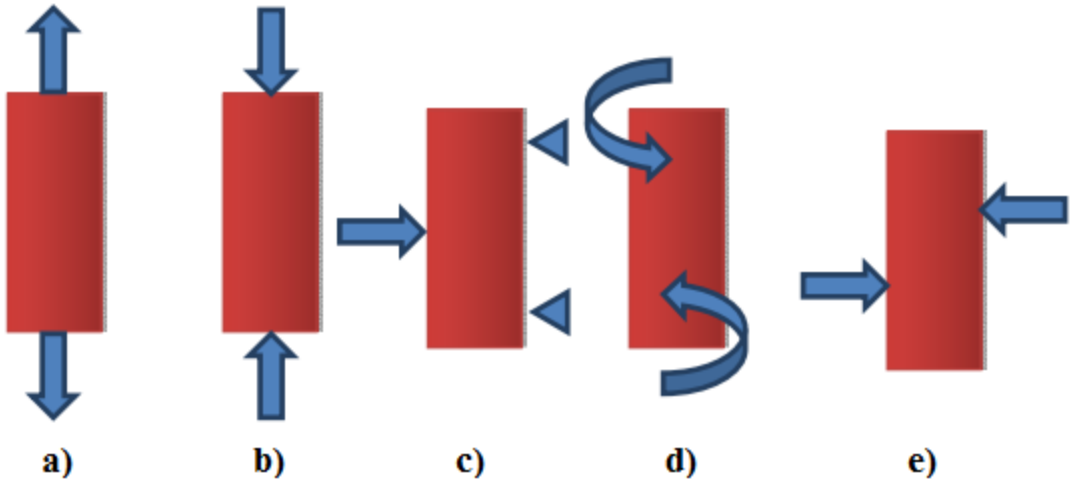
Testování mechanických vlastností materiálů je velmi důležité, ať už při kontrole technologie výroby, kontrole jakosti polotovarů a výrobků, tak i při vývoji nových materiálů a technologických postupů. V dnešní době je známa celá řada materiálových zkoušek, při kterých se zjišťují různé mechanické vlastnosti. Některé jsou uplatňovány pro testování jak křehkých, tak i houževnatých materiálů a jiné se používají ve speciálních případech. Tyto zkoušky jsou využívány pro zjištění vlastností materiálu a vhodnosti k určitému způsobu zpracování. [25]

Díky znalosti mechanických vlastností je možné kvantitativně popsat chování materiálu za působení vnějších sil. Při zpracování jsou materiály vystaveny působení zátěže různého charakteru jako je například tah, tlak, krut, střih nebo ohyb. Tato namáhání většinou nepůsobí samostatně, nýbrž v kombinaci dvou a více druhů namáhání. Některé mechanické vlastnosti materiálu vyjadřují jeho odpor proti deformaci (mez kluzu, mez tečení, tvrdost, apod.), jiné zase vyjadřují schopnost materiálu se deformovat (tažnost, kontrakce). [26, 27, 28]

Z hlediska působení síly na zkušební těleso se mechanické zkoušky rozdělují na statické a zkoušky dynamické, které se dále dělí na zkoušky rázové a cyklické. Při statických zkouškách zatížení, které působí na zkušební těleso, klidně a rovnoměrně stoupá až do okamžiku porušení zkušebního tělesa. Při dynamických zkouškách působí síla nárazově nebo se proměnné zatížení opakuje v časových cyklech. [27, 28]

Možnosti působení zatěžující síly:

- namáhání na tah (viz obr. 2.7.a)
- namáhání na tlak (viz obr. 2.7.b)
- namáhání na ohyb (viz obr. 2.7.c)
- namáhání na krut (viz obr. 2.7.d)
- namáhání na střih (viz obr. 2.7.e)



Obr. 2.7. Druhy namáhání materiálu [28]

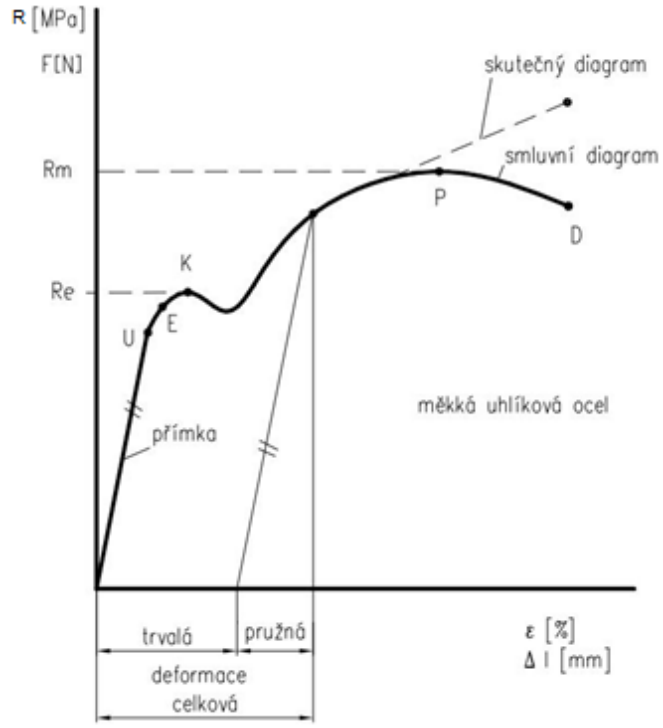
2.3.1 Statická zkouška tahem

Statická zkouška tahem je základní normalizovaná experimentální zkouška ČSN-EN 6892-1. Patří mezi zkoušky mechanických vlastností, pomocí kterých jsou určovány základní mechanické charakteristiky používané k hodnocení jakosti materiálu, pro výpočty konstrukcí i k obecnému posouzení vhodnosti určitých technologických operací. [28]

Zkouška spočívá v deformaci zkušební tyče tahovým zatížením, konkrétně jednoosým tahem. Při zkoušce je sledováno chování materiálu za působení klidných, plynule se měnících sil, bez rázů, za současného zjišťování závislosti mezi působící silou a deformací zkušební tyče. Zatížení působí rovnoměrně až do přetržení zkušební tyče. [28, 29]

Zkušební vzorky jsou normalizovány. Obvykle se používají zkušební tyčinky kruhového průřezu, případně tyčinky ploché, které mají obdélníkový průřez. Zkušební tyčinky mají na svých koncích takzvané hlavy, které slouží k upnutí tyčinky do čelistí trhacího stroje. [30]

Diagram tahové zkoušky je závislost prodloužení zkušební tyčinky na zatěžující síle (Δl / F). Po přepočtení tohoto diagramu se získá závislost relativního prodloužení na napětí (ε / σ). Tento diagram se nazývá smluvní, protože napětí se stále počítá z původního průřezu tyče S_0 a neuvažuje se zmenšení průřezu vlivem zaškrcování tyče před lomem, takzvané vytváření krčku. [31]



Obr. 2.8. Diagram statické zkoušky tahem [31]

U – mez úměrnosti - R_U

Do této hodnoty napětí je deformace úměrná zatěžující síle a diagram je přímkový. Do této meze platí Hookeův zákon $\sigma = \varepsilon \cdot E$, kde E je modul pružnosti v tahu a ε je poměrné prodloužení.

E – mez pružnosti (elasticity) - R_E

Od této meze se začínají rozvíjet malé plastické deformace. Při napětí pod tuto mez jsou deformace pružné.

K – mez kluzu – R_e

Od této hodnoty napětí se plastické deformace začínají rozvíjet velmi výrazně.

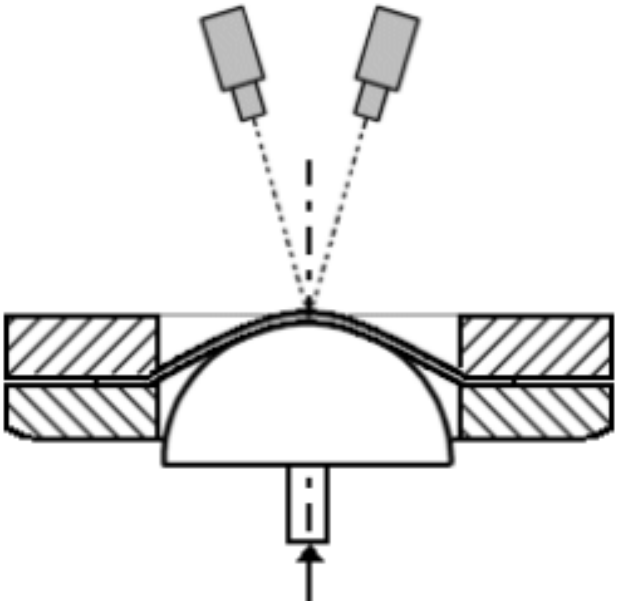
P – mez pevnosti – R_m

Při této hodnotě napětí se porušují křehké materiály, kde vznikne křehký lom. Při dalším zatěžování materiálů houževnatých dojde k zaškrcování tyče, obvykle v místě nějaké drobné materiálové vady.

D – V tomto místě se porušují materiály houževnaté. [31]

2.3.2 Vypínání pevným polokulovým tažníkem (Nakajima test)

Princip zkoušky spočívá ve vypínání kruhového přístřihu s kruhovým odlehčením. Vypínání probíhá pomocí polokulového pevného tažníku až do porušení vzorku. Při této zkoušce je možné dosáhnout různých stavů napjatosti a to díky tomu, že přístřihy mají různých šířek a rádiusů. Pomocí Nakajima testu se dají získat obě strany diagramu mezních přetvoření. [32]

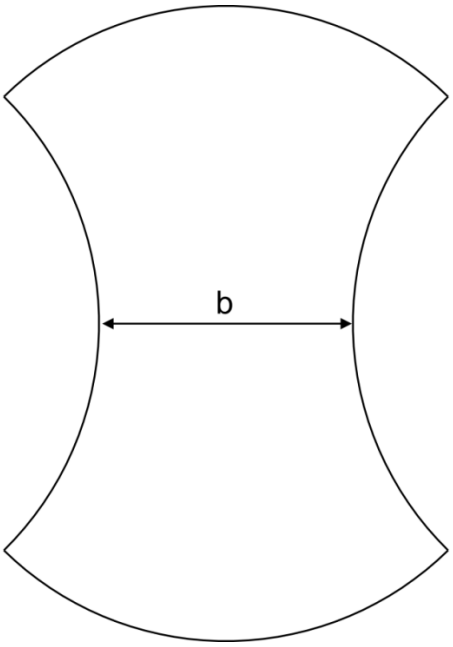


Obr. 2.9. Princip Nakajima testu [33]

Ke snímání a vyhodnocování testu jsou použity 2 CCD kamery a software Aramis. Zjišťování deformace nebo posunutí spočívá v nanesení kontrastního vzoru tzv. patternu na povrch vzorku. Při deformaci vzorku probíhá současně i deformace a posun kontrastního vzoru. Software rozdělí zkoumaný vzor na tzv. fazetky a těm

přiřadí stupně šedi. Během deformace se mění poloha fazetek a systém je pak schopný určit polohu bodů na povrchu zkoumaného vzorku. [33]

K testu se používá sedm přístřihů, které mají kruhový tvar o průměru 200 mm s odlehčením 0 až 80 mm. Vzorek je upnut po svém obvodu v přípravku a je deformován tažníkem polokulového tvaru o průměru 100 mm až do porušení. [32, 33]



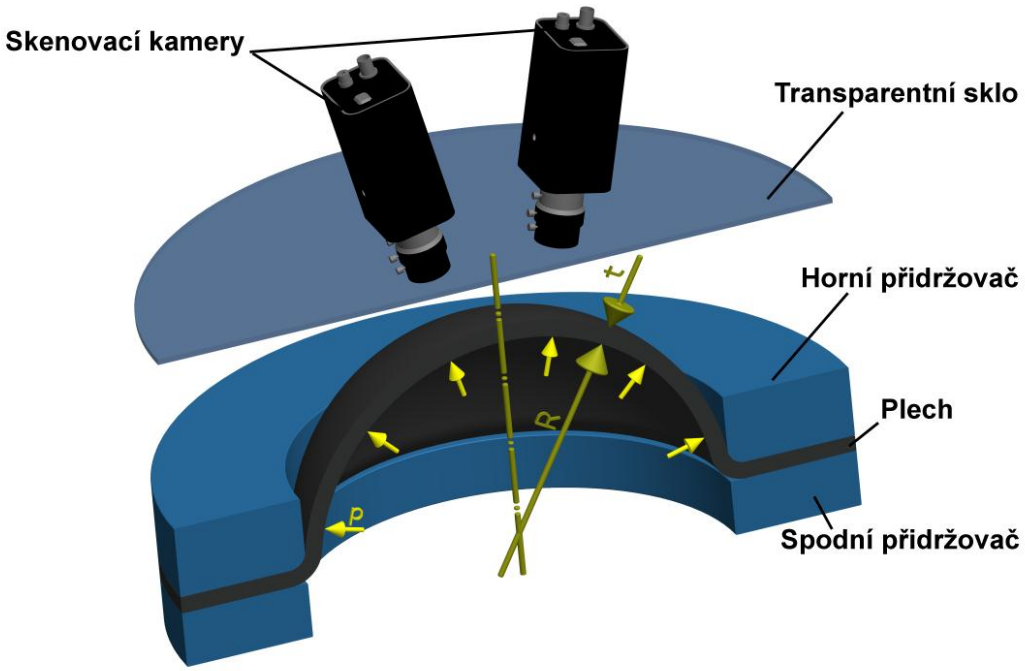
Obr.2.10. Vzorek pro Nakajima test

2.3.3 Rovnoosé vypínání kapalinou (Bulge test)

Dvojosý tah patří k příznivým schématům napjatosti a tento stav napjatosti lze dobře nasimulovat pomocí zkoušky rovnoosého vypínání kapalinou nazývané též Bulge test. Rovno-dvouosé tahové napjatosti je docíleno díky hydrostatickému vypínání. Princip této zkoušky spočívá v tváření plechu pomocí sloupce oleje, přičemž nevzniká žádné tření. Hydraulická kapalina je přiváděna pod tlakem. [34, 35]

Testovaný materiál je pevně upnut mezi přidržovač a tažnici s průměrem 80 mm. Síla, která je vyvinuta pomocí přidržovače, se dá regulovat pomocí přepouštěcího ventilu. V tažnici jsou dále umístěny brzdiče, které zabraňují vtahování materiálu do tažnice. Pod tlakem přiváděná hydraulická kapalina vybouluje testovaný materiál až do porušení. [34]

Ke snímání a vyhodnocování testu jsou opět použity 2 CCD kamery a software Aramis. Rovněž je zde nanesen kontrastní vzor na povrch vzorku a deformace je zaznamenávána kamerami. [33]



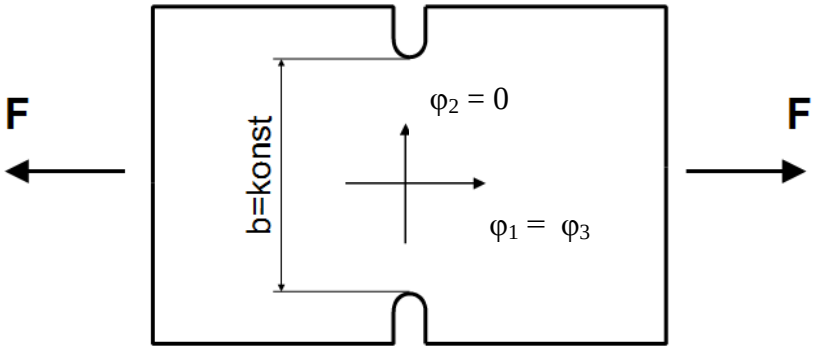
Obr. 2.11. Princip zkoušky rovnoosým vypínáním

2.3.4 Plain strain tensile test

Zkouška se zakládá na podobném principu jako statická zkouška tahem. Zkušební vzorek je zatížen tahovým namáháním ve směru pohybu hydraulických čelistí trhacího stroje.

Princip zkoušky spočívá ve vytvoření podmínek takové napjatosti, aby mohla deformace probíhat pouze ve dvou směrech a to ve směru zatížení silou vyvozenou trhacím strojem a ve směru tloušťky plechu ($\varphi_1 = \varphi_3$, $\varphi_2 = 0$).

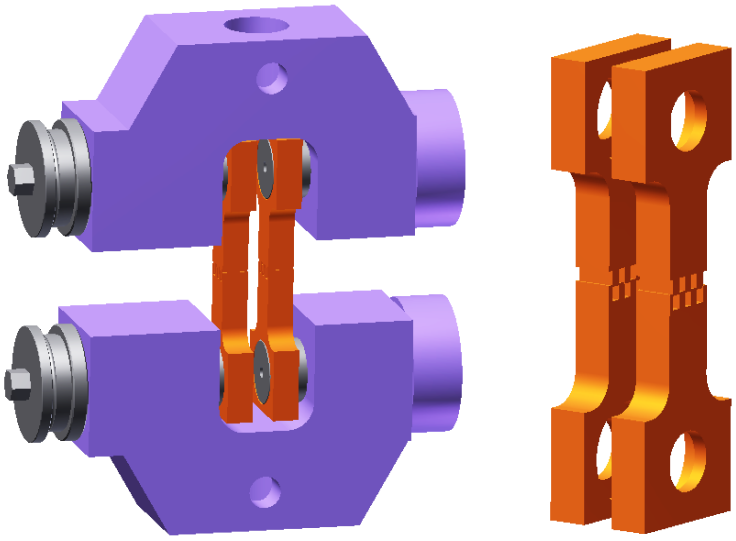
Vzorky používané pro tuto zkoušku jsou koncipovány tak, aby délka a šířka rapidně převyšovaly rozměr tloušťky (ploché vzorky obdélníkového tvaru). Dále jsou vzorky opatřeny drážkou (vrubem), ve které se koncentruje napětí. Zkouška probíhá do doby vzniku trhliny v místě vrubu. Výsledkem zkoušky je získání závislosti skutečného napětí a deformace.



Obr. 2.12. Tvar vzorku pro Plain strain test

2.3.5 Zkouška cyklickým namáháním

Zkouška se zakládá na stejném principu jako statická zkouška tahem s tím rozdílem, že zde nepůsobí jenom tahové napětí. Tahové napětí se v periodách střídá s napětím tlakovým. Tato změna napětí je umožněna pomocí speciálně upravených čelistí, které kopírují tvar zkušebního tělesa a obsahují zámky, díky kterým je umožněn vratný pohyb a je zajištěno správné upnutí vzorku v celém průběhu zkoušky. [36]



Obr. 2.12. Speciální čelisti pro cyklickou zkoušku. [36]

Pro zkoušku se použijí stejná zkušební plochá tělesa jako pro statickou zkoušku tahem. Zkouška probíhá za předepsané rychlosti zatěžování. V momentu dosažení stanoveného počtu cyklů zkouška končí. Výsledkem zkoušky je opět získání závislosti skutečného napětí a deformace, tato závislost utváří hysterezní smyčky. [36]

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem této diplomové práce je zjištění vhodného materiálového modelu, který se následně aplikuje pro numerickou simulaci tažení výlisku z plechu. Dále provést reálný experiment tažení výlisku z plechu, který bude následně simulován. Pro experiment se použije materiál ve formě plechu o tloušťce 0,640 mm ze slitiny titanu *Ti-Cp* AMS 4911.

Numerická simulace bude probíhat podle modelů Hill 48 a Vegter. Pro definici těchto materiálových modelů je třeba připravit vzorky, na kterých se aplikují vybrané mechanické a technologické zkoušky pro zjištění potřebných vlastností a závislostí.

Modely pro numerickou simulaci:

- Hill 48 s izotropním zpevněním
- Hill 48 s kinematickým zpevněním (Yoshida model)
- Vegter s izotropním zpevněním
- Vegter s kinematickým zpevněním (Yoshida model)

Aby bylo možné zjistit materiálové charakteristiky slitiny titanu a definovat materiálový model pro numerickou simulaci, použijí se následující zkoušky:

- statická zkouška tahem pro směry 0°, 45°, 90°
- statická zkouška tahem pro zjištění anizotropie materiálu
- vypínání pevným polokulovým tažníkem (Nakajima test)
- rovnoosé vypínání kapalinou (Bulge test)
- Plain strain tensile test
- zkouška cyklickým namáháním
- experiment pro zjištění odpružení (ohyb + tah)

Po provedení těchto zkoušek a získání potřebných materiálových charakteristik a vlastností se nadefinují výše zmíněné materiálové modely, podle kterých následně proběhne numerická simulace procesu tažení výlisku. Simulace se provede v softwaru PAM-STAMP.

Vybrané materiálové charakteristiky a vlastnosti potřebné pro definici jednotlivých materiálových modelů pro numerickou simulaci jsou popsány v kapitole 3.5 (Definice materiálových modelů použitých pro numerickou simulaci).

3.1 POUŽITÝ MATERIÁL

Použitý materiál je slitina titanu *Ti-CP* AMS4911 6*Al-4V*. Slitina je dodávána ve formě pásu plechu o tloušťce 0,64 mm. Pásy plechu jsou žíhané (cca 718°C).

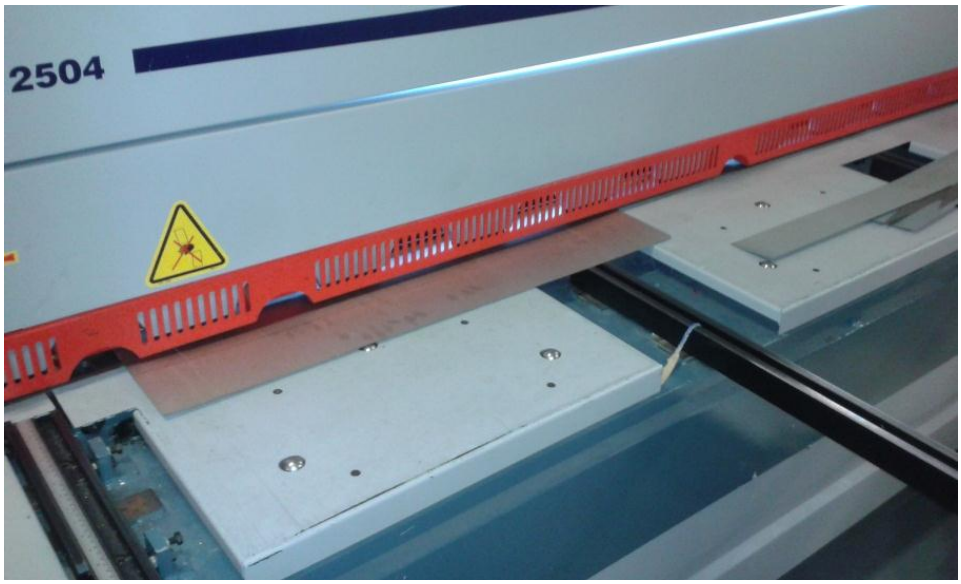
Hlavními prvky obsaženými ve slitině jsou hliník (5,5 až 6,75 %) a vanad (3,5 až 4,5 %). Další doprovodné prvky jsou kyslík s obsahem maximálně 0,3 %, uhlík maximálně 0,2 %, dusík maximálně 0,05 %, vodík maximálně 0,015 % a maximálně 0,005 % yttria.

Výrobcem udávaná mez pevnosti v tahu je R_m = 920 MPa a smluvní mez kluzu v tahu je $R_{p0.2}$ = 869 MPa.

3.2 POUŽITÉ MECHANICKÉ A TECHNOLOGICKÉ ZKOUŠKY

3.2.1 Statická zkouška tahem

Pro uskutečnění statické tahové zkoušky je nejprve třeba připravit vzorky, na kterých se tato zkouška bude realizovat. V tomto případě se jedná o ploché zkušební tyčinky, které se vystřihnou z pásu plechu. Nejprve je třeba nastříhat pás plechu na pásky, ze kterých se následně vystřihnou zkušební tyčinky.



Obr. 3.1. Nastříhání pásů plechu pro statickou zkoušku tahem

Po nastříhání plechu na pásky je třeba upnout střižný nástroj na mechanický lis. Střižný nástroj se upne pomocí upínek na pracovní stůl mechanického lisu.

Obr. 3.2. Upnutí střižného nástroje pro střihání vzorků pro tahovou zkoušku

Nyní je možné začít stříhat zkušební vzorky ve formě plochých tyčinek. Zkušební tyčinky je třeba připravit v různých směrech válcování a to v 0°, 45°, 90°. Od každého směru se připraví několik zkušebních tyčinek.

Jelikož je titan velmi citlivý na vruby, je třeba střižné plochy zabrousit pomocí brusného kotouče, aby tahová zkouška proběhla bez nepříznivých ovlivňujících faktorů, např. předčasné prasknutí zkušebního vzorku mimo sledovanou oblast.

Obr. 3.4. Nástroj pro zabroušení zkušebních tyčinek

Rozměry zkušební tyčinky:

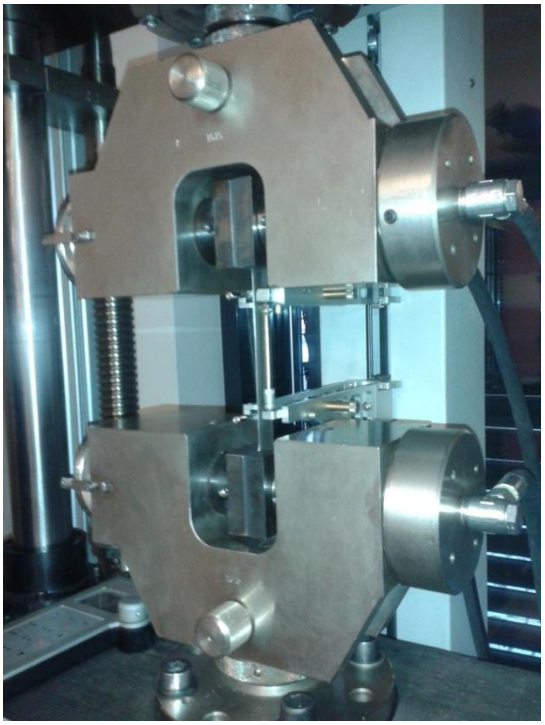
Počáteční měřená délka tyčinky L_0 = 80 mm

Počáteční měřená šířka tyčinky B_0 = 20,15 mm

Počáteční měřená tloušťka tyčinky t_0 = 0,640 mm

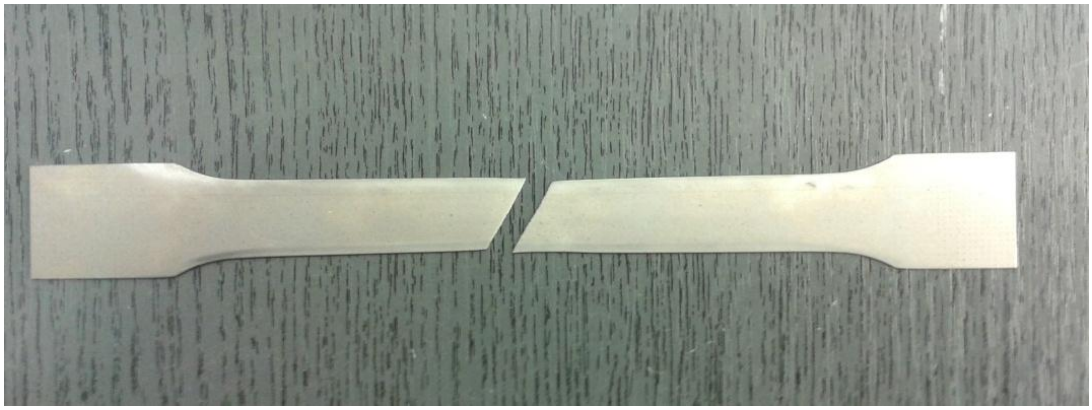
Obr. 3.3. Nastříhané a zabroušené vzorky pro statickou zkoušku tahem

Nyní jsou zkušební tyčinky připraveny pro statickou zkoušku tahem. Pro statickou zkoušku tahem se použije trhací stroj TIRA Test 2300 s integrovaným průtahoměrem MFN-A-4-500. Zkušební tyčinky se upnou do pneumaticky ovládaných čelistí na trhacím stroji. Následně se na zkušební tyčinku přiloží průtahoměr pro snímání prodloužení vzorku.



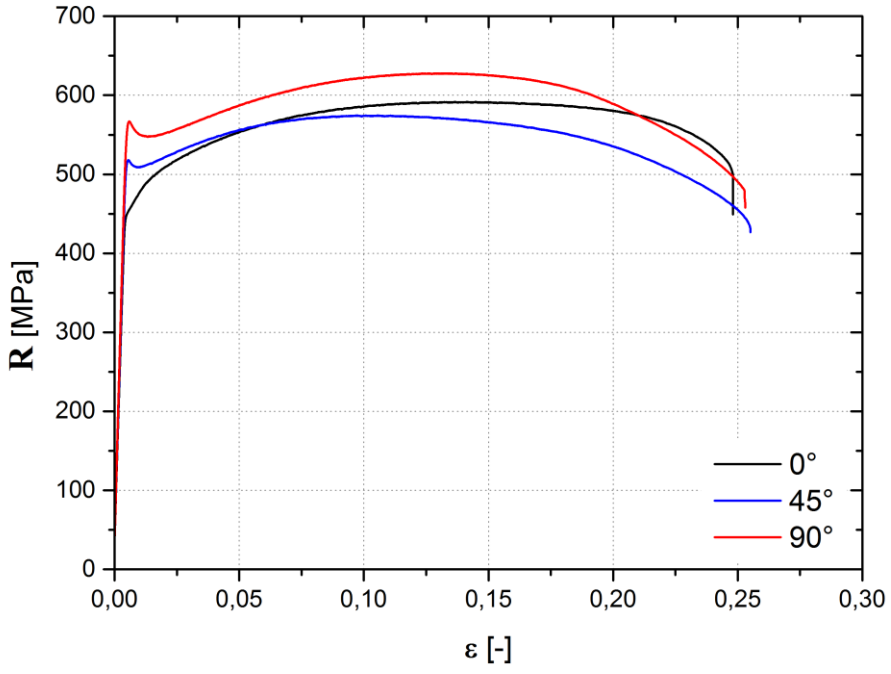
Obr. 3.4. Zkušební tyčinka upnutá v čelistech trhacího stroje

Statická zkouška tahem končí porušením zkušební tyčinky v místě vytvoření tzv. krčku.



Obr. 3.5. Zkušební tyčinka po provedení statické zkoušky tahem

Statická zkouška tahem se vyhodnocuje pomocí softwaru LabNET, který zaznamenává a vyhodnocuje průběh zkoušky. Výsledek ze statické zkoušky tahem jsou základní mechanické vlastnosti testovaného materiálu. Jsou to smluvní mez pevnosti v tahu R_m, smluvní mez kluzu v tahu $R_{p0,2}$, tažnost A_{80mm} a homogenní tažnost A_g a Youngův modul pružnosti v tahu E. Výsledné hodnoty ze statické zkoušky jsou průměrné hodnoty vypočítané ze 3 měření.



Obr. 3.6. Graf závislosti smluvního napětí a poměrného prodloužení v závislosti na směru válcování

Dále se v programu ORIGIN PRO 9 provede aproximace tahového diagramu skutečného napětí a deformace z tahové zkoušky pomocí přednastaveného modelu podle Krupkovského (viz vztah 3.1). Pomocí této aproximace získáme modul monotónního zpevnění C, exponent deformačního zpevnění n a ofsetovou deformaci φ_0.

$$\sigma = C \cdot (\varphi_0 + \varphi)^n \tag{3.1}$$

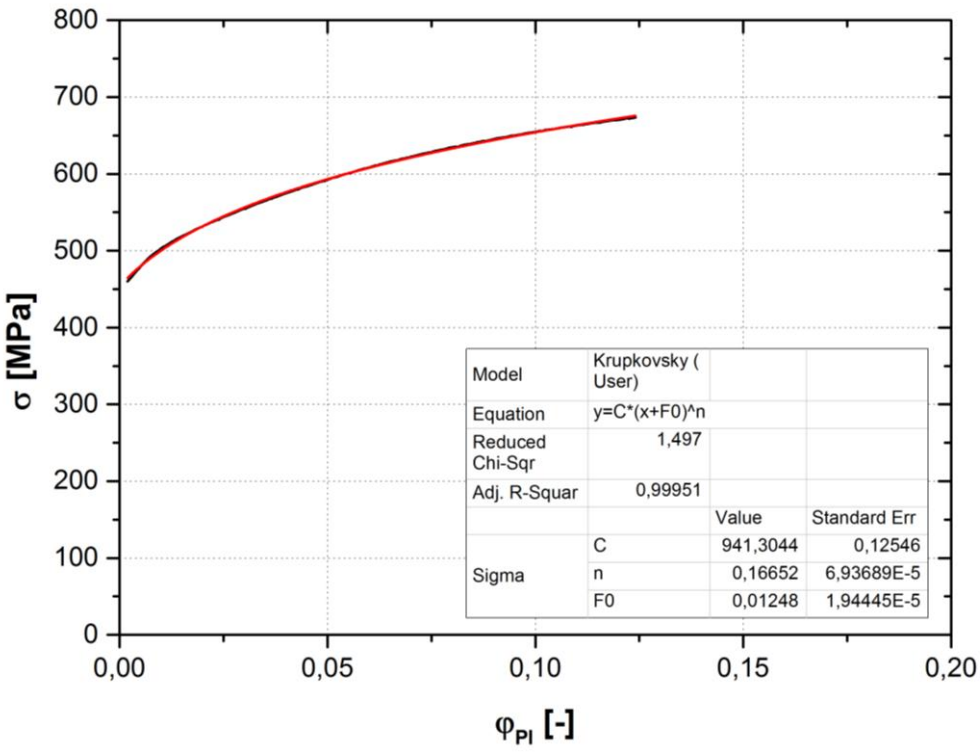
σ - skutečné napětí

C - modul monotónního zpevnění

n - exponent deformačního zpevnění

φ_0 - ofsetová deformace

φ - přetvoření



Obr. 3.7. Skutečný diagram tahové zkoušky aproximovaný podle Krupkovského

Zjištěné hodnoty modulu monotónního zpevnění, exponentu deformačního zpevnění a posunu jsou vidět v tabulce na obrázku 3.7.

Předešlý postup se opakuje postupně pro směry odebrání vzorku 0°, 45° a 90°. Výsledky tahové zkoušky a koeficienty získané z následné aproximace podle Krupkovského jsou zaznamenány v tab. 3.1.

Tab. 3.1. Hodnoty získané ze statické zkoušky tahem pro rychlost 5 mm/min

Deformační rychlost 5 mm/min										
Směr odebrání vzorku	Koeficient normálové anizotropie r_α	Mez kluzu $R_{p0,2}$	Mez pevnosti R_m	Homogenní tažnost A_g	Tažnost A_{80mm}	Youngův modul pružnosti E	Přetvoření R_m odpovídající φ_{posun}	Modul monotónního zpevnění C	Exponent deformačního zpevnění n	Ofsetová deformace φ_0
[°]	**[-]**	**[MPa]**	**[MPa]**	**[%]**	**[%]**	**[MPa]**	**[-]**	**[MPa]**	**[-]**	**[-]**
0°	**0,8659**	**456,2**	**591,6**	**13,94**	**24,41**	**106 199**	**0,12409**	**941,305**	**0,1665**	**0,0125**
45°	**2,3642**	**514,6**	**574,4**	**9,25**	**25,16**		**0,08266**	**888,658**	**0,1515**	**0,0188**
90°	**2,6109**	**563,9**	**627,8**	**12,37**	**24,94**		**0,11003**	**1031,737**	**0,1849**	**0,0192**

3.2.2 Statická zkouška tahem pro zjištění anizotropie materiálu

V každém směru má materiál různé vlastnosti. Aby bylo možné zjistit anizotropii materiálu, je třeba provést měření pro různé směry válcování. Měření se provede pro odebrání vzorku ve směru 0°, 45° a 90°. Pro měření se využije statické zkoušky tahem, za podmínky působení zatížení, které vyvolá poměrné prodloužení ε = 20 %.

Nejprve je třeba vzorky orýsovat, aby bylo možné provést měření délky po zkoušce. Orýsování se provede po 10 mm.

Obr. 3.8. Zařízení pro orýsování vzorků

První část měření spočítá v tom, že je známa délka L_0 před zkouškou, dále je třeba změřit šíři vzorku před zkouškou B_0 a tloušťku t. Po provedení zkoušky následuje změření délky po zkoušce L_1 a šířky B_1. Pro změření délky po zkoušce se použije Abbého komparátor. Anizotropní koeficienty se vypočítají ze získaných parametrů podle vztahu 3.2. Výsledné hodnoty koeficientu normálové anizotropie jsou zaznamenány v tab. 3.1.

$$r_{(0°,45°,90°)} = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} = \frac{ln\frac{b}{b_0}}{ln\frac{l_0 \cdot b_0}{l \cdot b}} \tag{3.2.}$$

r - koeficient normálové anizotropie [-]

b_0 a b - šířka vzorku před a po zkoušce [mm]

l_0 a l - délka vzorku před a po zkoušce [mm]

Obr. 3.9. Zařízení pro přesné měření délky

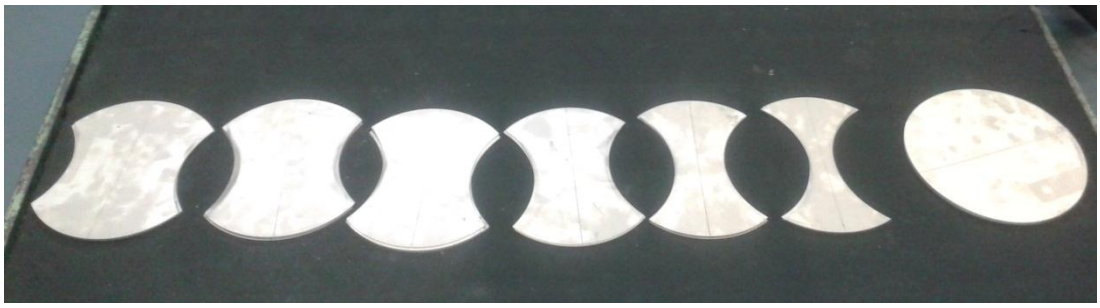
3.2.3 Vypínání pevným polokulovým tažníkem (Nakajima test)

Nakajima test se použije pro tvorbu *FLD* diagramu. Pro Nakajima test je třeba připravit sadu kruhových vzorků s různou velikostí kruhového vykrojení.

Pro připravení kruhových vzorků je třeba nejprve nastříhat pásy pro plechu ze slitiny titanu na tabulových nůžkách. Poté se nastříhají kruhové vzorky na mechanickém lisu pomocí střižného nástroje pro kruhové výstřižky o průměru 210 mm.

Obr. 3.10. Střižný nástroj pro přípravu kruhových vzorků

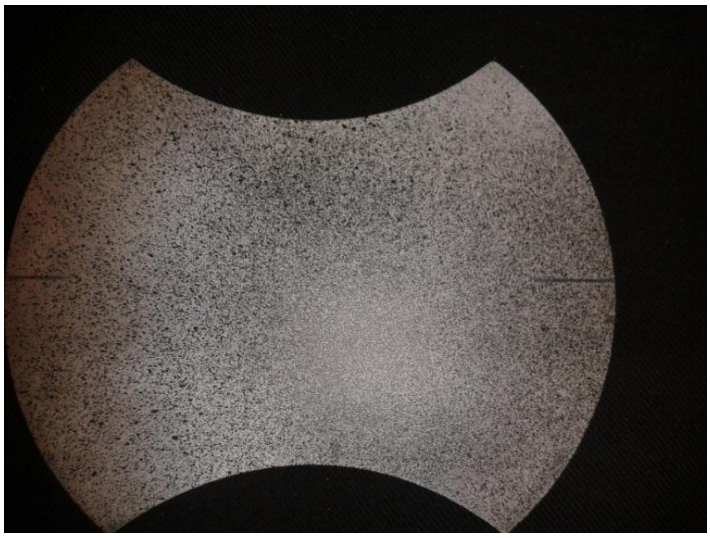
Po nastříhání kruhových vzorků je třeba do nich vystřihnout kruhový výřez definovaných rozměrů. Tato operace se provede pomocí stejného střižného nástroje jako při stříhání kruhových vzorků. Postupně se připraví vzorky s šířkou 30, 60, 90, 105, 120 a 130 mm (viz kap. 2.3.2.). Orientace hlavní deformace φ_1 je zvolena kolmo na směr válcování.



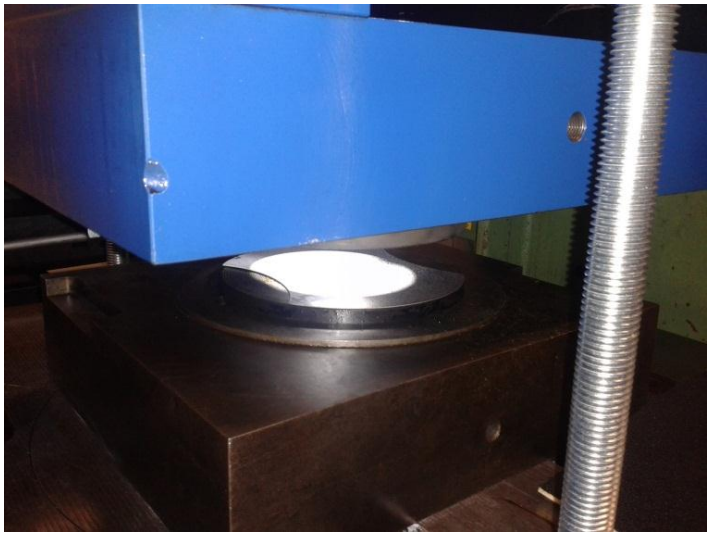
Obr. 3.11. Sada vzorků pro Nakajima test

Takto připravené vzorky je nyní třeba opatřit kontrastním nástřikem, aby bylo možné identifikovat pohyb materiálu při následné deformaci. Nejprve se vzorek opatří bílým

nástřikem a následně se nechá uschnout. Pro urychlení sušení se použije halogenová lampa. Po usušení nástřiku se na bílý podklad nanese přerušovaný černý kropenatý nástřik tzv. pattern a opět se dá sušit. Po částečném usušení nástřiku je vzorek připraven pro Nakajima test.



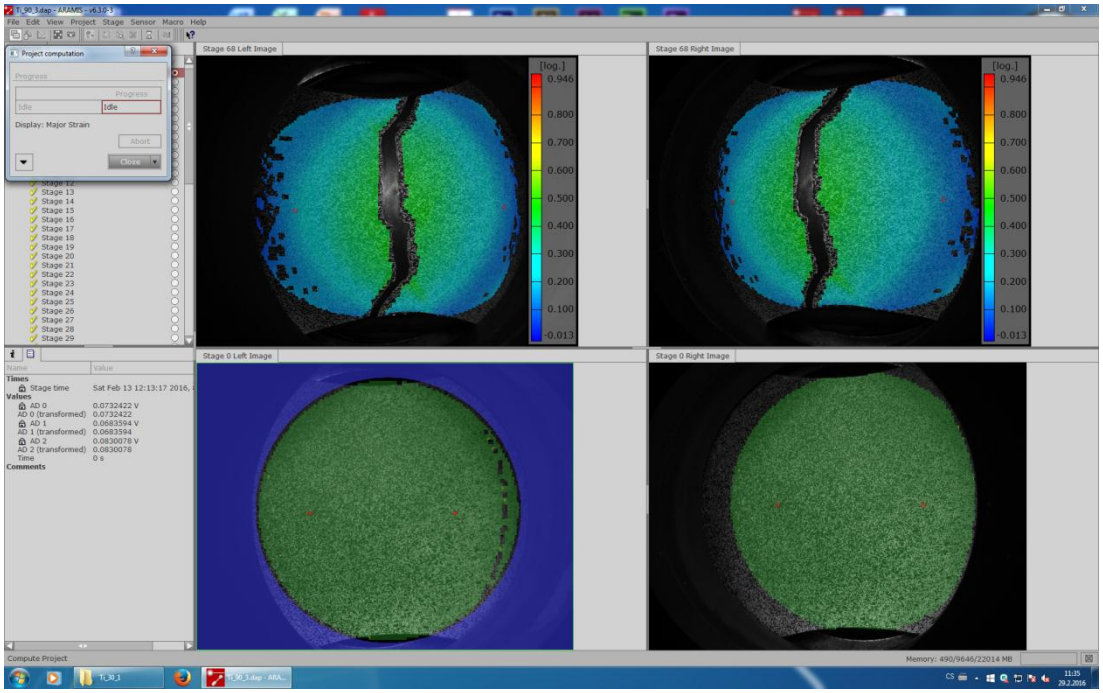
Obr. 3.12. Vzorek pro Nakajima test



Obr. 3.13. Upnutí vzorku mezi tažnici a přidržovač

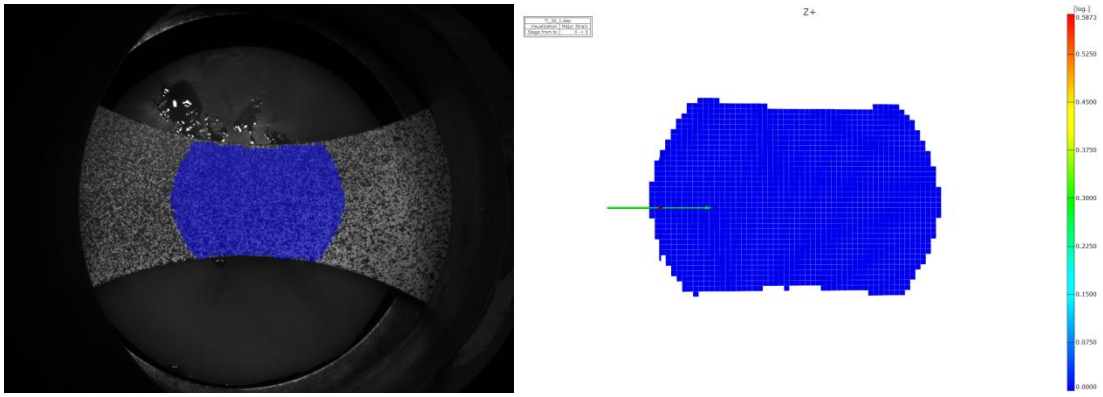
Pro provedení testu je vzorek nejprve třeba upnout mezi tažnici a přidržovač umístěné na pracovním stole hydraulického lisu. Pro snížení tření během zkoušky je část vzorku, která přijde do styku z tažníkem, namazána. Po upnuti vzorku se současně spustí hydraulický lis a systém Aramis, který pomocí kamerového systému snímá povrch vzorku a vytváří snímky během deformace zvolenou frekvencí. Zkouška probíhá do doby vzniku trhliny na povrchu vzorku.

Pomoci Nakazima testu se namodeluje levá i pravá část *FLD* diagramu. Nakazima test se vyhodnocuje pomocí softwaru Aramis. Software zaznamenává snímky během zkoušky zvolenou časovou frekvencí. Vyhodnocení proběhne postupně na vzorcích širokých 30, 60, 90, 105, 120, 130 mm podle stejného postupu (viz postup níže pro vzorek 1.).



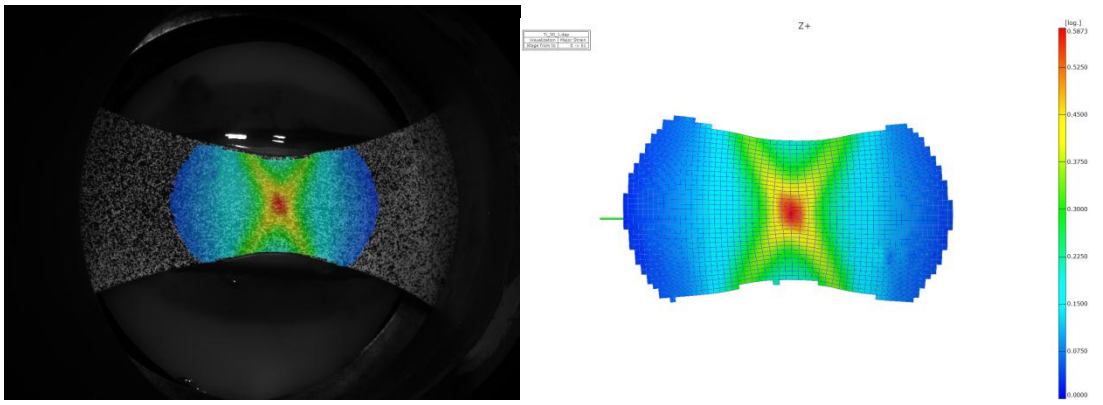
Obr. 3.14. Pracovní prostředí softwaru Aramis při vyhodnocování Nakazima testu

Pro vyhodnocení testu je nejprve třeba vybrat první zaznamenaný snímek, který představuje snímek před zahájením zkoušky. Pomocí masky se vybere oblast, která bude sloužit pro výpočet.



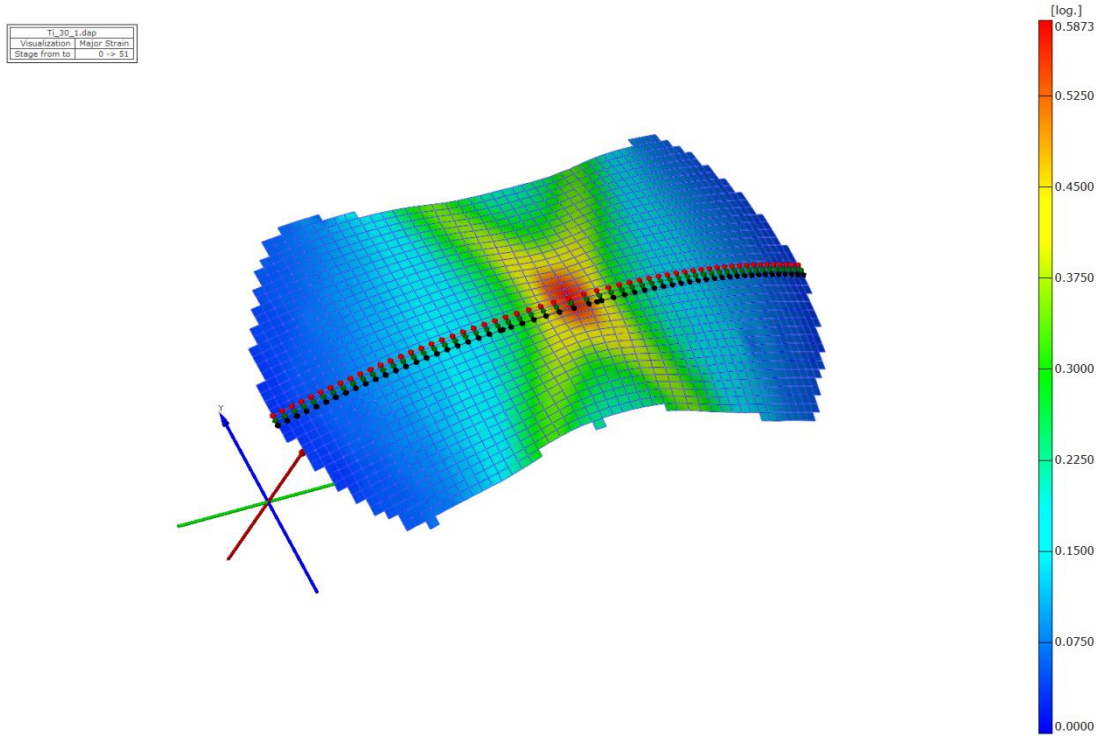
Obr. 3.15. První snímek a zvolení početní oblasti

Dále je třeba najít poslední snímek před vznikem trhliny, který bude představovat poslední snímek výpočtu. Ostatní snímky je možné odstranit, neboť je potřeba počítat pouze stavy před porušením vzorku.



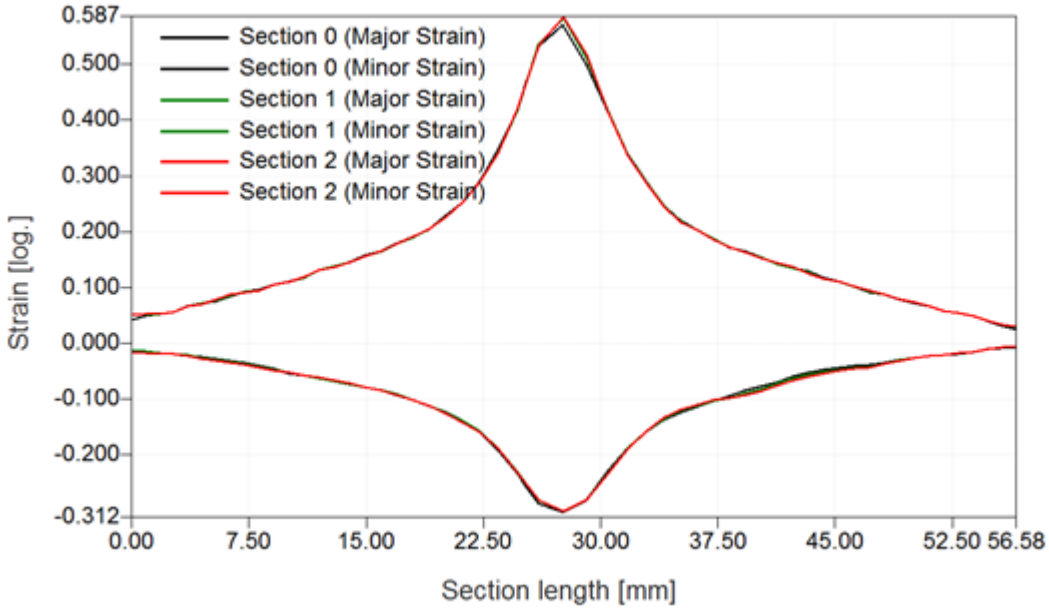
Obr. 3.16. Poslední snímek před trhlinou

Nyní je možné zahájit výpočet. Po skončení výpočtu je třeba na posledním snímku před trhlinou udělat 3 řezy v oblasti největšího napětí a deformace, kde by následně vznikla trhlina.



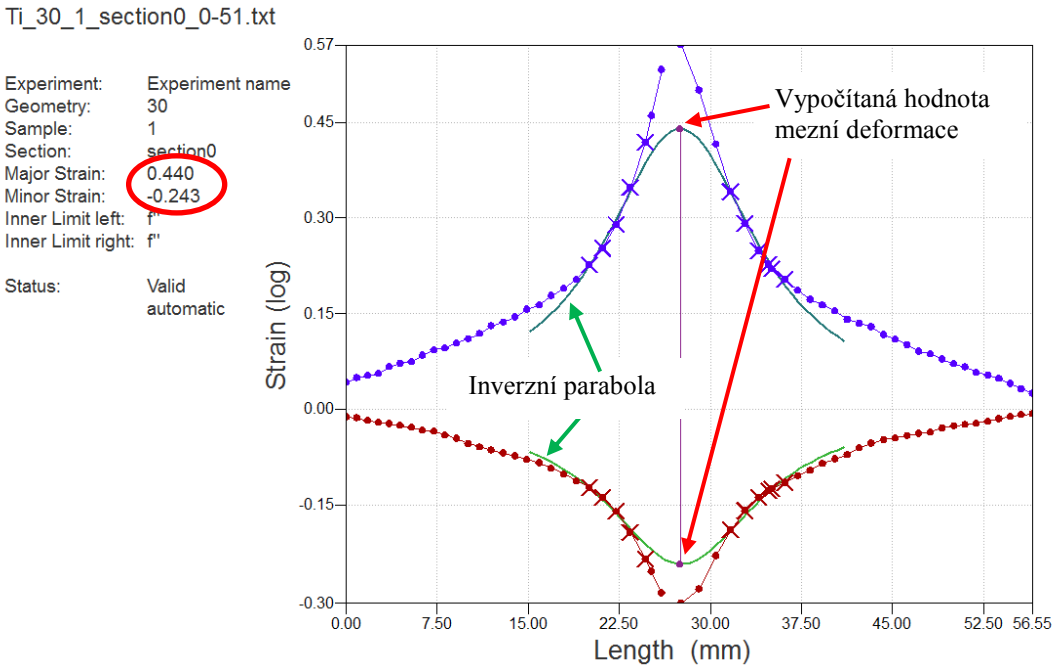
Obr. 3.17. Tvorba řezů pro výpočet bodů *FLD* diagramu

Z provedených řezů se vygeneruje diagram závislosti logaritmické deformace a délce řezu. Tento digram představuje rozložení deformace v průběhu řezu.



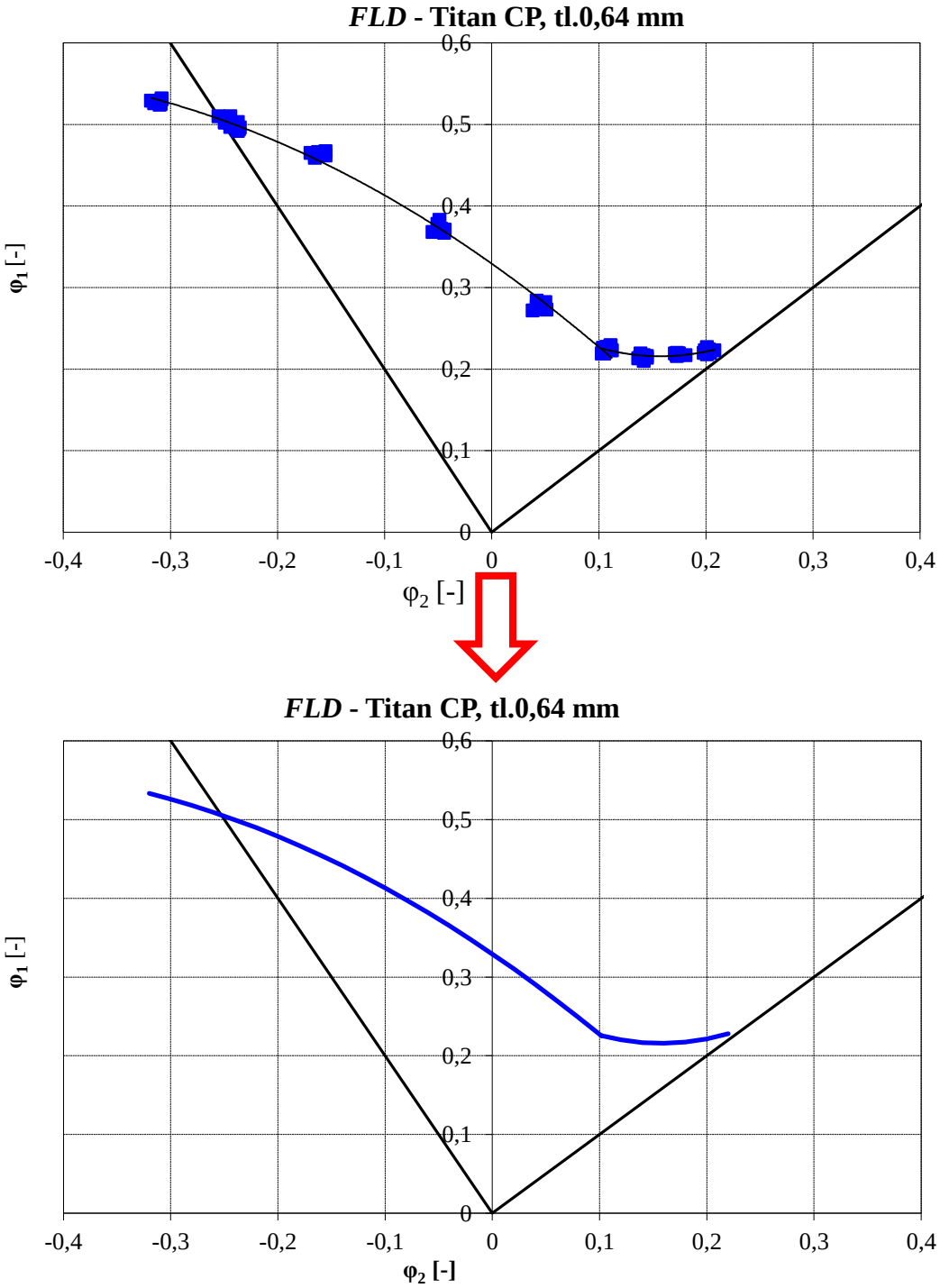
Obr. 3.18. Diagram rozložení deformace v řezu

Tento diagram představuje maximální hodnoty deformace. Nyní je třeba diagram upravit podle normy ISO/DIS 12004-2. Pomocí druhé derivace průběhu deformace se vyhledají inflexní body a proloží se jimi inverzní parabola. Tímto postupem se získá nová hodnota maximální přípustné (mezní) deformace.



Obr. 3.19. Diagram rozložení deformace v řezu proložen inverzní parabolou

Předešlý postup se opakuje postupně pro všechny vzorky a všechny řezy na nich provedené. Z naměřených hodnot mezní deformace se následně sestaví diagram mezních přetvoření pomocí proložení křivky naměřenými body.



Obr. 3.20. Výsledný diagram mezních přetvoření zkonstruovaný pomocí výsledků Nakazima testu

3.2.4 Rovnoosé vypínání kapalinou (Bulge test)

Bulge test je použit pro definici víceosé napjatosti pro materiálový model Vegter. Zkouška je provedena na hydraulickém lisu CBA 300/63 a průběh zkoušky je zaznamenáván optickým systémem Aramis.

Pro Bulge test je třeba připravit sadu plných kruhových vzorků. Takto připravené vzorky je opět třeba opatřit kontrastním nástřikem, aby bylo možné identifikovat pohyb materiálu při následné deformaci. Nejprve se vzorek opatří bílým nástřikem a následně se nechá uschnout. Pro urychlení sušení se použije halogenová lampa. Po usušení nástřiku se na bílý podklad nanese přerušovaný černý kropenatý nástřik a opět se dá sušit. Po usušení nástřiku je vzorek připraven pro Bulge test.

Obr. 3.21. Příprava nástroje pro Bulge test

Vzorek se upne mezi tažnici a přidržovač na pracovním stole hydraulického lisu. Před kamery se umístí ochranné sklo, aby nedošlo ke kontaktu kamer a tlakového oleje, při vzniku trhliny na vzorku. Po upnutí vzorku se spustí současně tlakový olej

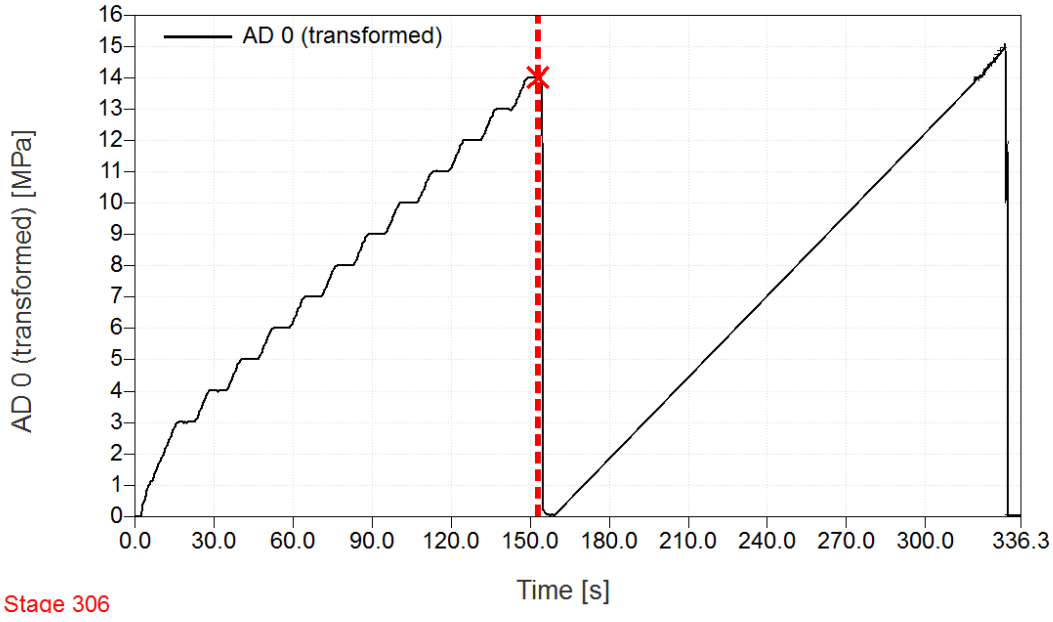
na hydraulickém lisu a systém Aramis, který pomocí kamerového systému snímá povrch vzorku a vytváří snímky během deformace zvolenou frekvencí. Tlak oleje se postupně zvyšuje vždy o 1 MPa v určitém časovém úseku až do hodnoty 14 MPa. Po dosažení této hodnoty dojde k odlehčení a poté tlak znovu plynule roste až do porušení vzorku.

Obr. 3.22. Vzorek po provedení zkoušky

Bulge test se vyhodnocuje pomocí softwaru Aramis. Software zaznamenává snímky během zkoušky zvolenou časovou frekvencí. Vyhodnocení Bulge testu proběhne postupně na dvou vzorcích o průměru 210 mm.

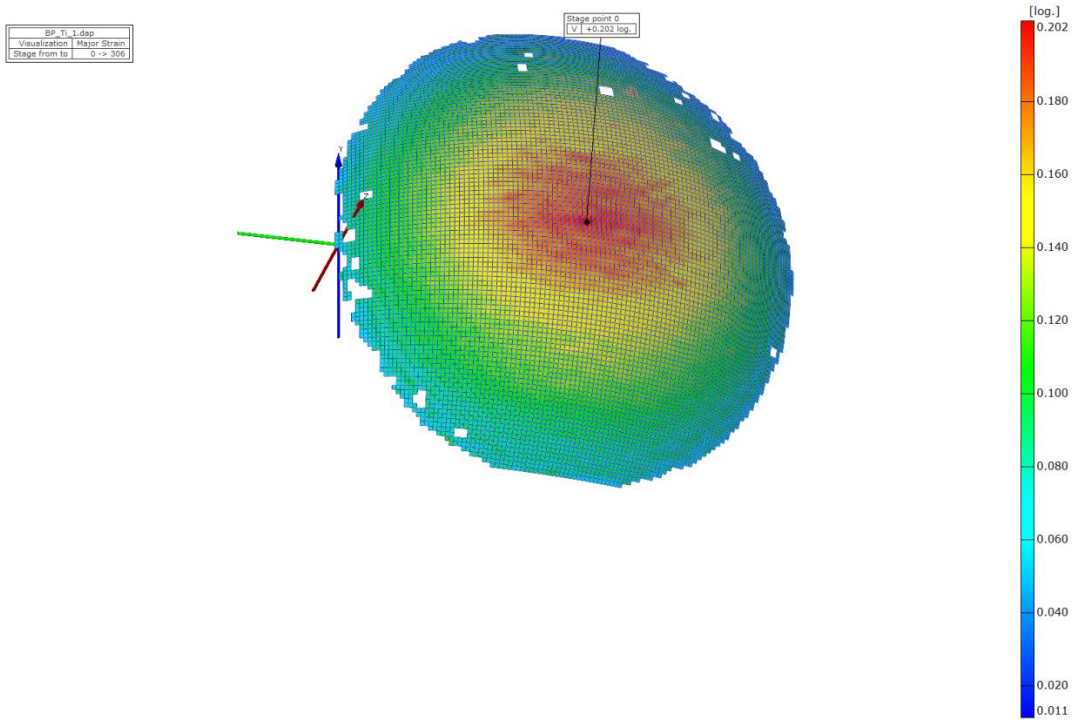
Softwarem Aramis je zaznamenáván nejen průběh deformace pomocí snímků zaznamenávaných určitou časovou frekvencí, ale také průběh tlaku během Bulge testu, který je závislý na čase.

Pro vyhodnocení testu je třeba vybrat snímky v každé prodlevě po zvýšení tlaku těsně před tím, než tlak začne opět stoupat. Zaznamená se tlak a číslo snímku. Pomocí masky se vybere oblast, která bude sloužit pro výpočet. Nyní může proběhnout výpočet.



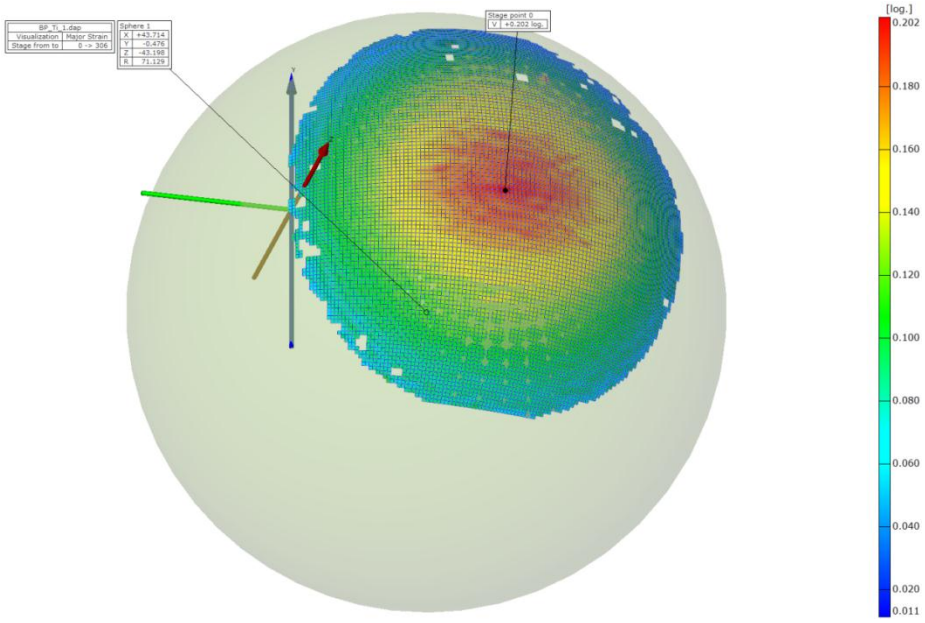
Obr. 3.23. Závislost průběhu tlaku během Bulge testu na čase

Po provedení výpočtu je třeba zaznamenat přetvoření na vybraných snímcích. Na aktuálním snímku se vybere místo největší deformace na kulovém vrchlíku a umístí se do něho bod. Dále je možné odečíst maximální hodnoty deformace právě v tomto bodě, konkrétně hlavní a vedlejší deformaci φ_1 a φ_2 a také pro 0°a 90° deformaci φ_x a φ_y.



Obr. 3.24. Vybrání bodu s maximální deformací

Následně se reálný vyboulený tvar doplní na ideální kouli. Díky této kouli je možné zobrazit hodnotu poloměru zakřivení. Hodnoty přetvoření a rádiusů, které jsou zaznamenány v tabulce 3.2. jsou průměrné hodnoty vypočítané ze 3 měření. Pomocí těchto hodnot je možno dále vypočítat aktuální tloušťku stěny v průběhu zkoušky a hlavní napětí σ_1 a σ_2. (viz. vztahy 3.3., 3.4. a 3.5.)



Obr. 3.25. Proložení vybouleného vzorku pomocí ideální koule

Výpočet aktuální tloušťky stěny

$$t = t_0 \,.\, e^{\varphi_3} \tag{3.3.}$$

Výpočet intenzity napětí

$$\sigma\mathrm{i} = \sigma_1 = \sigma_2 = \frac{p \,.\, R}{2t} \tag{3.4.}$$

Výpočet intenzity přetvoření

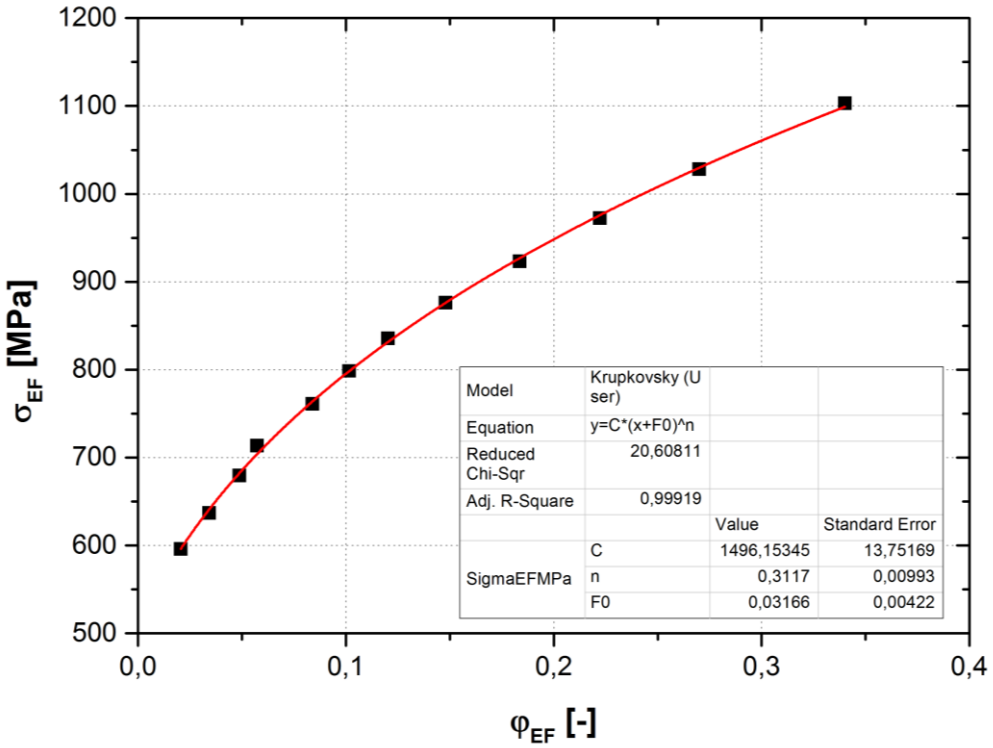
$$\varphi\mathrm{i} = \frac{2\sqrt{3}}{3} \,.\, \sqrt{{\varphi_1}^2 + \varphi_1 . \varphi_2 + {\varphi_3}^2} \tag{3.5.}$$

φ_i - intenzita přetvoření [-]
φ_1, φ_2, φ_3 - skutečné přetvoření [-]
σ_i - intenzita napětí [MPa]
σ_1, σ_2 - napětí přetvoření [MPa]
p - tlak [MPa]
R - poloměr zakřivení [mm]
t - tloušťka plechu [mm]
t_0 - počáteční tloušťka plechu [mm]

Tab. 3.2. Hodnoty získané pomocí Bulge testu

Č. snímku [-]	Tlak p [MPa]	Radius proložené koule R [mm]	Hlavní deformace φ_1 [-]	Vedlejší deformace φ_2 [-]	Deformace ve směru 0° $\varphi_0 = \varphi_x$ [-]	Deformace ve směru 90° $\varphi_{90} = \varphi_y$ [-]
43	3,008	247,106	0,015	0,011	0,012	0,014
67	4,004	195,665	0,023	0,017	0,019	0,022
91	5,010	164,259	0,031	0,024	0,025	0,030
115	5,996	142,836	0,033	0,031	0,031	0,033
139	7,002	126,985	0,050	0,041	0,041	0,049
164	8,008	114,466	0,059	0,050	0,051	0,059
187	9,004	104,542	0,068	0,060	0,060	0,068
212	10,000	95,954	0,085	0,071	0,072	0,085
236	10,996	88,687	0,105	0,087	0,087	0,105
259	11,992	82,383	0,125	0,106	0,107	0,124
283	12,998	76,592	0,157	0,122	0,122	0,157
306	14,004	71,129	0,202	0,147	0,147	0,202

Dalším důležitým výsledkem je intenzita přetvoření φ_i a intenzita napětí σ_i. Tyto hodnoty se aproximují podle Krupkovského aproximace. Výsledkem této aproximace jsou koeficienty C, n a φ_0.



Obr. 3.26. Aproximace hodnot φ_i-σ_i podle Krupkovského

Zjištěné hodnoty modulu monotónního zpevnění, exponentu deformačního zpevnění a ofsetové deformace jsou vidět v tabulce na obrázku 3.7. a jsou zaznamenány v tab. 3.3. Při porovnání s výslednými koeficienty z tahové zkoušky (viz tab. 3.1.) jsou zde hodnoty mnohem vyšší, což je způsobeno víceosou napjatostí.

Tab. 3.3. Výsledné koeficienty získané pomocí Krupkovského aproximace

Modul monotónního zpevnění C	**Exponent deformačního zpevnění** n	**Ofsetová deformace** φ_0	φ_{posun} **odpovídající horní hranici aproximace**	**Poměr** φ_{90}/φ_0
[MPa]	**[-]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**
1496,153	**0,3117**	**0,0317**	**0,340**	**1,19015**

3.2.5 Plain strain tensile test

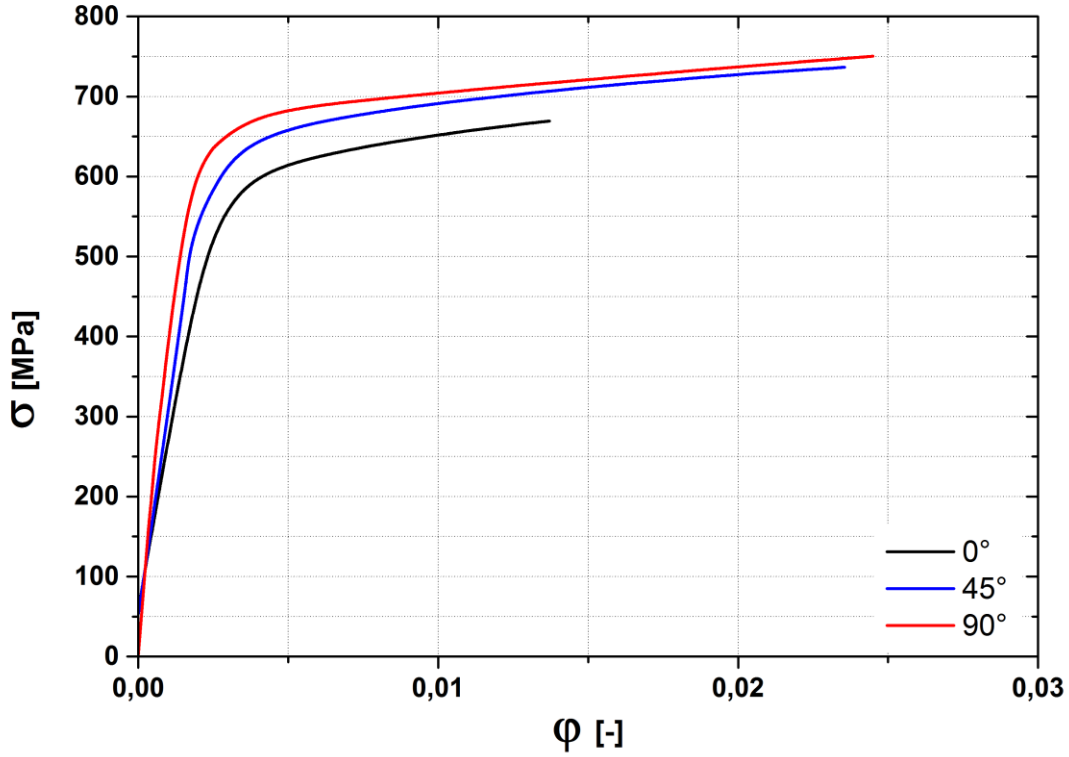
Plain strain test se použije pro zjištění závislosti skutečného napětí a deformace při tzv. rovinném testu, kdy je deformace ve směru šířky nulová. Výsledky zkoušky jsou použity pro definici modelu Vegter. Zkouška probíhá do vzniku trhliny. Zkouška je provedena na trhacím stroji TIRA Test 2300 podobně jako statická zkouška tahem.

Pro realizaci zkoušky je třeba připravit vzorky v různých směrech válcování. Na tabulových nůžkách se postupně nastříhají vzorky ve směru 0°,45°a 90°. Tyto vzorky je potřeba opatřit vrubem (drážkou), která se zhotoví pomocí frézování. Drážka má rádius 3 mm a šířka vzorku v místě odlehčení (drážky) je 60 mm.

Po upnutí zkušebního vzorku do pneumatických čelistí trhacího stroje je možné zahájit zkoušku. Po objevení trhliny na zkušebním vzorku zkouška končí. Trhlina vzniká v místě vrubu, neboť právě v místě vrubu je největší koncentrace napětí.

Obr. 3.27. Vzorky po zkoušce (objevení trhliny)

Průběh zkoušky je zaznamenávám pomocí softwaru LabNET. Výsledná závislost skutečného napětí a deformace je vidět na obr. 3.19.



Obr. 3.28. Graf závislosti skutečného napětí a deformace při zkoušce Plain strain tensile test

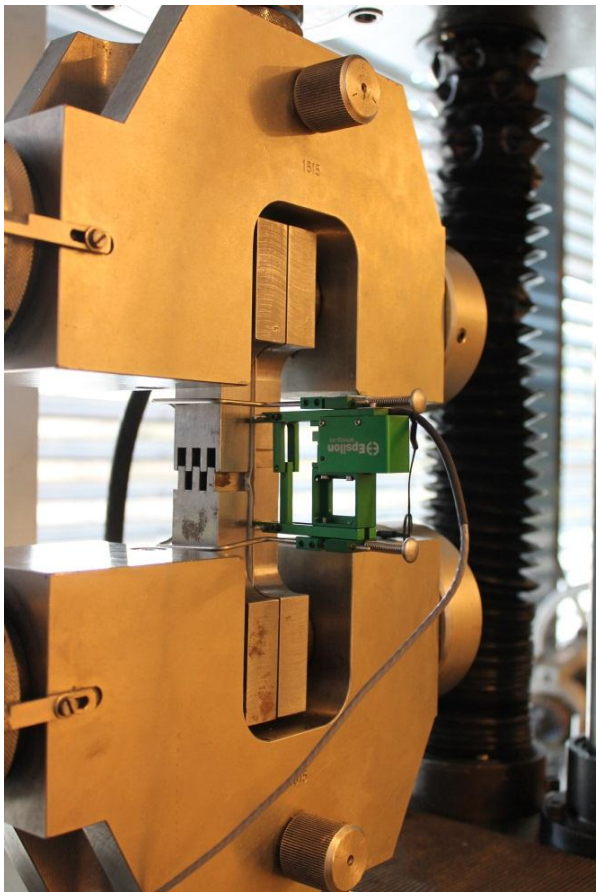
3.2.6 Zkouška cyklickým namáháním

Zkouška se použije pro zjištění průběhu skutečného napětí a deformace při cyklickém zatěžování. Při této zkoušce se projevuje Bauschingerův jev, tzn. následná změna meze kluzu při kombinovaném zatěžování tahu a tlaku.

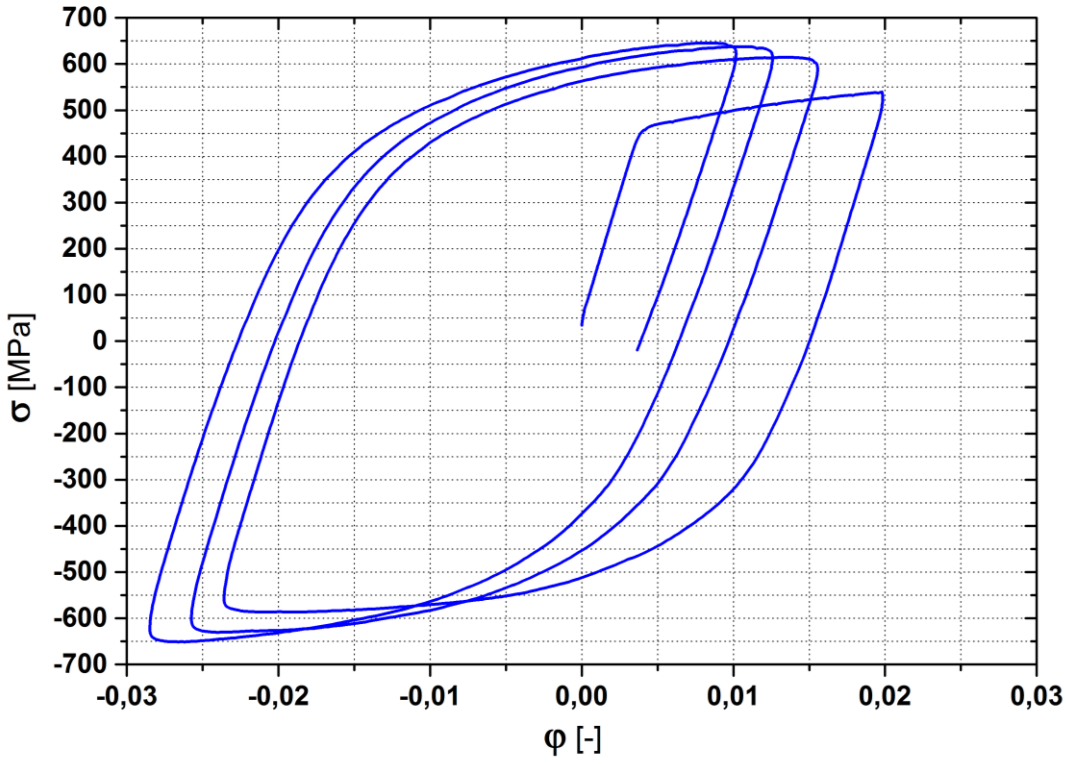
Zkoumaný vzorek ve formě zkušební tyčinky se vloží mezi speciálně upravené čelisti pro cyklické zkoušky upnuté v hydraulických čelistech trhacího stroje.

Mezi čelisti a vzorek se dále vkládají speciální teflonové fólie. Tyto fólie eliminují tření mezi vzorkem a čelistmi. Poslední věcí před zahájením zkoušky je připevnění průtahoměru pro zaznamenávání prodloužení.

Zkouška probíhá po dobu předepsaného počtu cyklů. Výsledná závislost skutečného napětí na deformaci (viz obr. 3.21.) slouží k definici kinematického modelu (Yoshida) do numerické simulace tažení výlisku z plechu.



Obr. 3.29. Nástroj pro zkoušku cyklickým zatěžováním



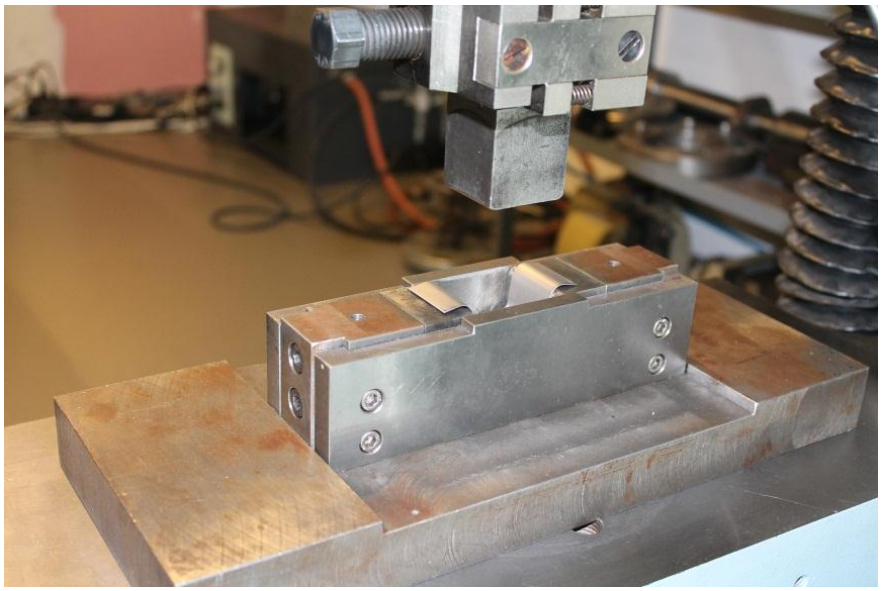
Obr. 3.30. Graf skutečného napětí a přetvoření z cyklické zkoušky

3.2.7 Experiment pro zjištění odpružení (ohyb + tah)

Pro zjištění odpružení se použije zkouška, kde se bude kombinovat ohyb a tažení. Zkouška se realizuje pomocí jednoduchého nástroje, který se skládá z tažníku a tažnice. Aby se kromě ohybového namáhání projevilo i tažení, tak se použije přidržovače, který přitlačuje vzorek k tažnici. Pro zkoušku je využito stejného trhacího stroje, který se používá pro statickou zkoušku tahem.

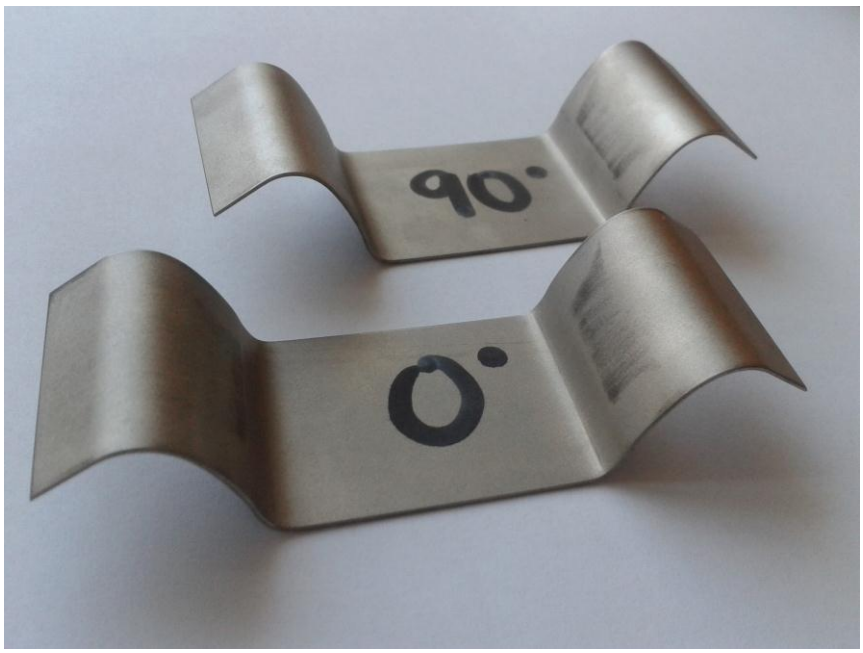
Obr. 3.31. Nástroj pro kombinovanou zkoušku ohybem a tažením

Pro zkoušku se připraví vzorky z pásu plechu dlouhé 110 mm a široké 30 mm, které se nastříhají na tabulových nůžkách. Po nastříhání vzorků se vzorek upne mezi tažnici a přidržovač. Zkouška probíhá při rychlosti 500 mm/min a při zdvihu 25.5 mm. Testujeme vzorky pro směr válcování 0° a 90°. Po provedení zkoušky se uvolní přidržovač a je možné vyjmout vzorek.



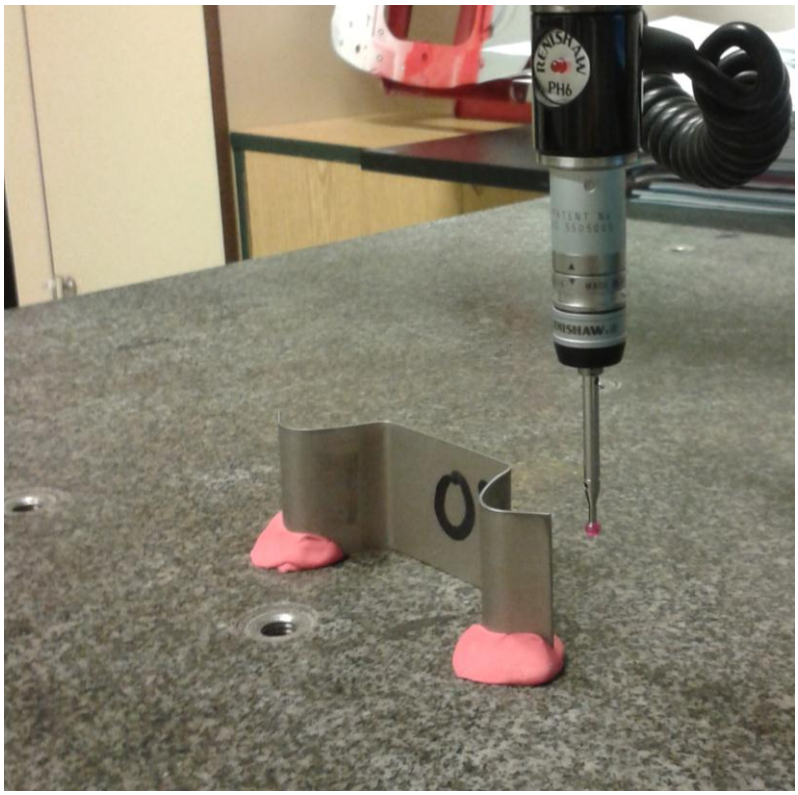
Obr. 3.32. Vzorek a nástroj po provedení zkoušky

Kombinovaná zkouška ohybem a tažením je provedena za účelem vytvoření vzorku z plechu, na kterém se lokalizuje výsledná struktura po odpružení.



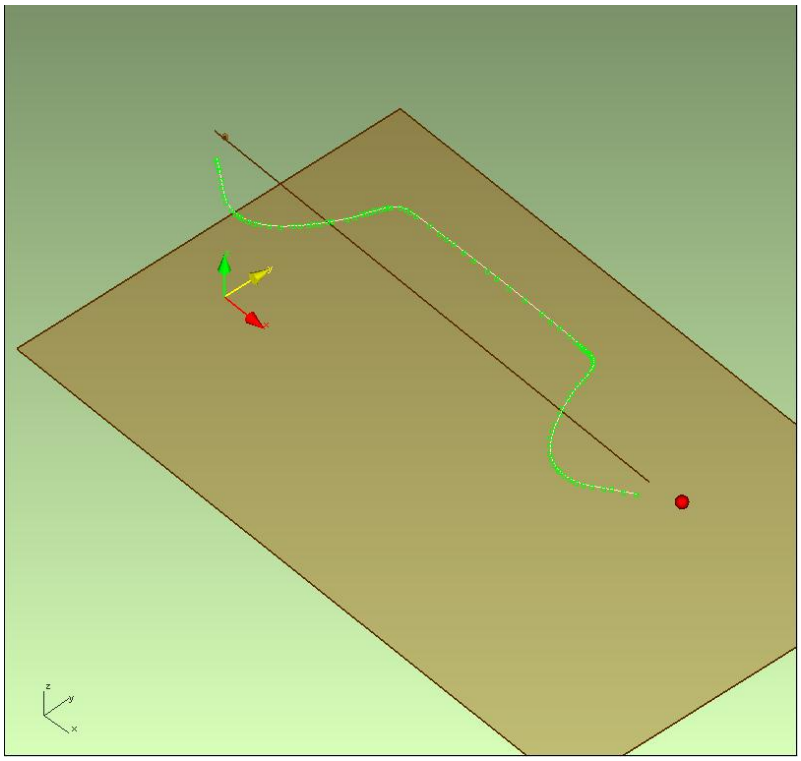
Obr. 3.33. Vzorky po experimentu

Aby bylo možné porovnat odpružení reálného vzorku se simulací, je potřeba získat konturu vzorku po provedení zkoušky. Pro zjištění kontury se použije 3D měřící souřadnicový přístroj SOMET XYZ 464, pomocí kterého se postupně nasnímají body podél celé kontury povrchu vzorku. Tyto nasnímané body jsou v přiloženém softwaru TANGO proloženy křivkou a tím se získá potřebná kontura.



Obr. 3.34. Měření kontury vzorku na 3D souřadnicovém měřícím přístroji

Na obrázku 3.26. je vidět proložení naměřených bodů křivkou. Tato křivka se následně vyexportuje ve formátu STEP a je dále použita pro porovnání se simulací.



Obr. 3.35. Výsledná kontura plechu po experimentu

3.3 DEFINICE MATERIÁLOVÝCH MODELŮ POUŽITÝCH PRO NUMERICKOU SIMULACI

Pro numerickou simulaci potřebujeme definovat materiálový model. Pro definici tohoto modelu se provede řada mechanických a technologických zkoušek, ze kterých se vygenerují potřebné údaje.

Simulace bude probíhat podle modelů:

- Hill 48 s izotropním zpevněním
- Hill 48 s kinematickým zpevněním (Yoshida model)
- Vegter s izotropním zpevněním
- Vegter s kinematickým zpevněním (Yoshida model)

Definice materiálového modelu se provede v softwaru PAM - STAMP, stejně jako následná simulace. Definice modelu spočívá v zadání a nafitování potřebných hodnot a parametrů do materiálové databáze. Nafitování je složitý proces úpravy zjištěných veličin pro potřebu správného výpočtu. Tato problematika je zadána do softwaru a nastavena ve spolupráci s firmou MECAS ESI s.r.o. Plzeň.

3.3.1 Model Hill 48 s izotropním zpevněním materiálu

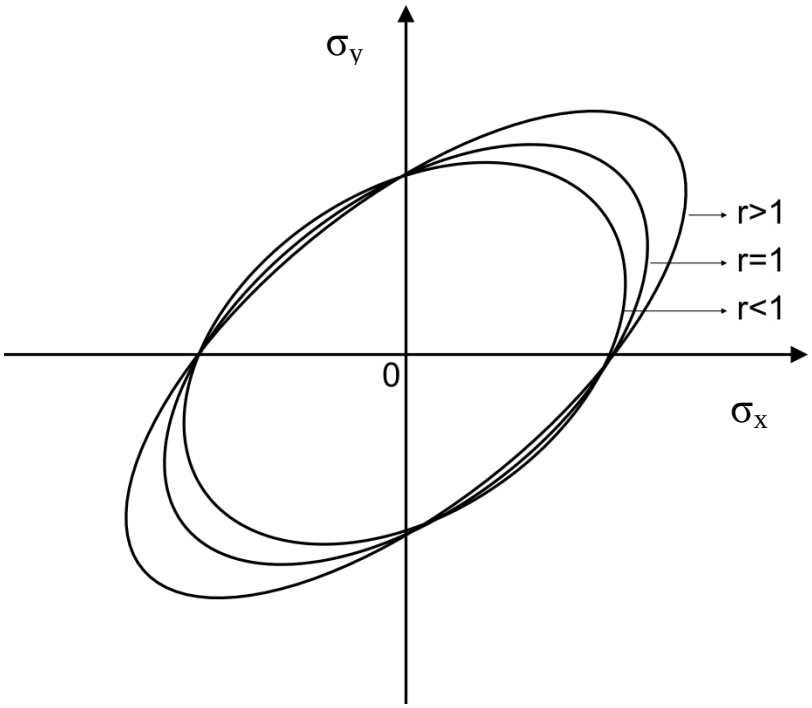
Umožňuje počítat se směrově závislou anizotropií mechanických vlastností. Výhodou je poměrně rychlý výpočet, ale nezohledňuje Bauschingerův jev. Zpevnění je definováno průměrnou křivkou zpevnění, která se získá ze statické zkoušky tahem.

Specifikace modelu:

- Youngův modul pružnosti v tahu E
- Poissonovo číslo μ
- Hustota ρ
- Koeficienty normálové anizotropie pro směry 0°, 45°, 90°
- Průměrná křivka deformačního zpevnění z tahové zkoušky (viz vztah 3.1.)

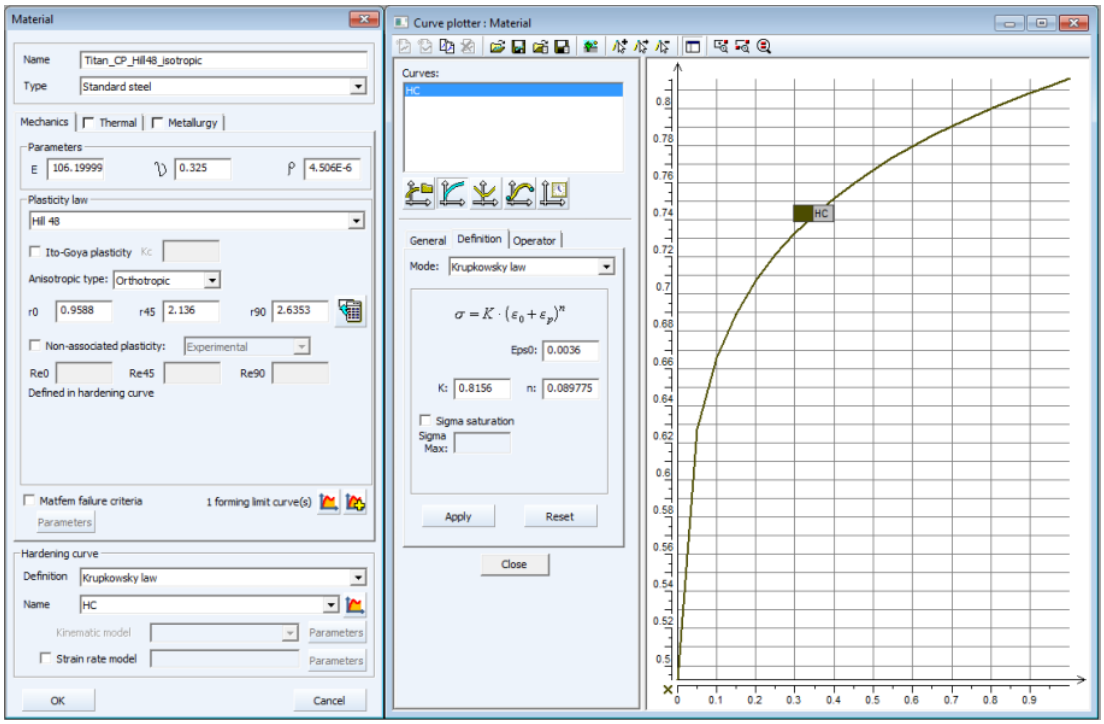
Průměrná křivka deformačního zpevnění se vypočítá z průměrných aproximačních koeficientů, průměrné koeficienty C, n a φ_0 se vypočítají podle vztahu 3.6.

$$x = \frac{1}{4} . (x + 2x_{45} + x_{90}) \qquad (3.6.)$$



Obr. 3.36. Závislost podmínky plasticity podle Hilla na koeficientu normálové anizotropie

Na obrázku 3.37. je vidět okno materiálové databáze v softwaru PAM - STAMP. V tomto okně probíhá definice materiálového modelu.



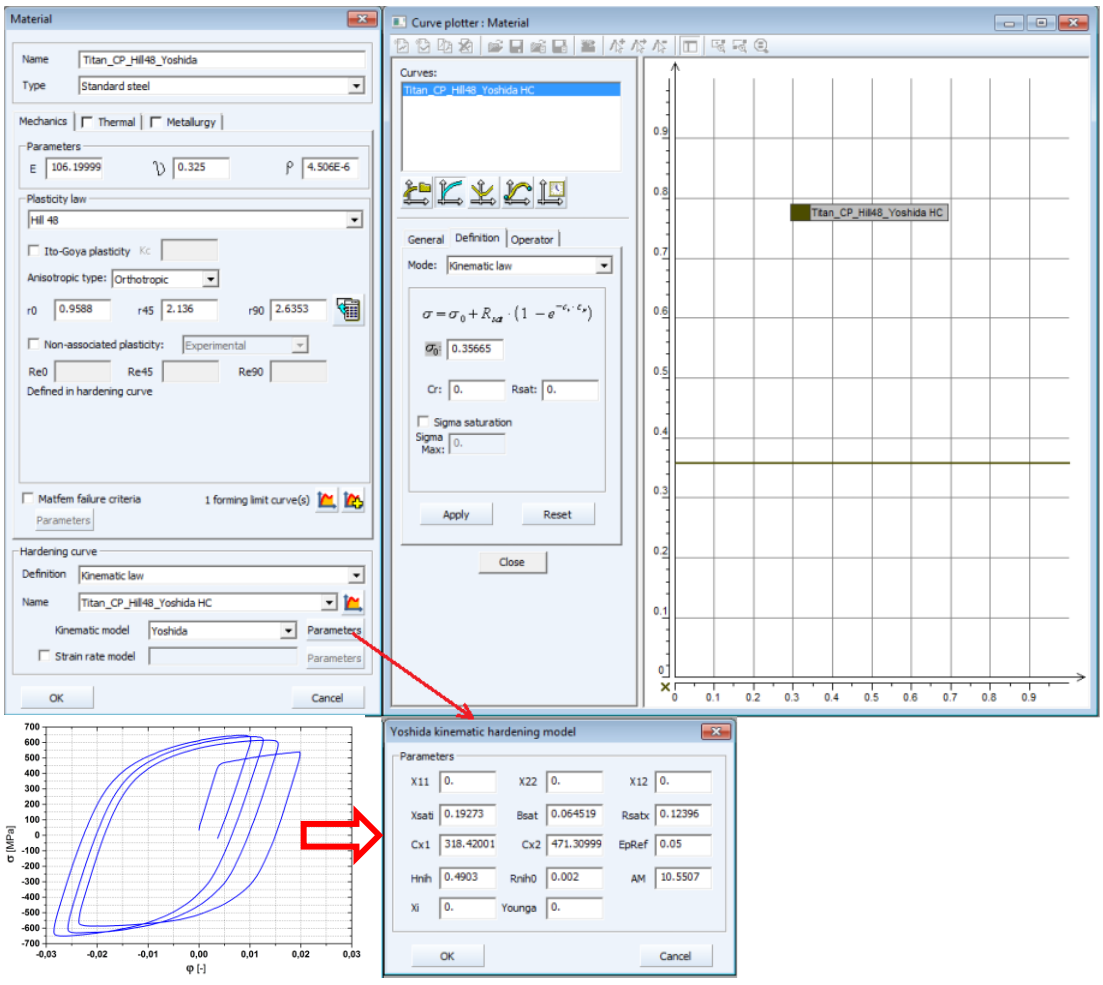
Obr. 3.37. Definice materiálového modelu Hill 48 s izotropním zpevněním v programu PAM - STAMP

3.3.2 Model Hill 48 s kinematickým zpevněním materiálu (Yoshida model)

Zpevnění se definuje pomocí hysterezních smyček získaných z cyklické zkoušky.

Specifikace modelu:

- Youngův modul pružnosti v tahu E
- Poissonovo číslo μ
- Hustota ρ
- Koeficienty normálové anizotropie pro směry 0°, 45°, 90°
- Křivka deformačního zpevnění z cyklické zkoušky



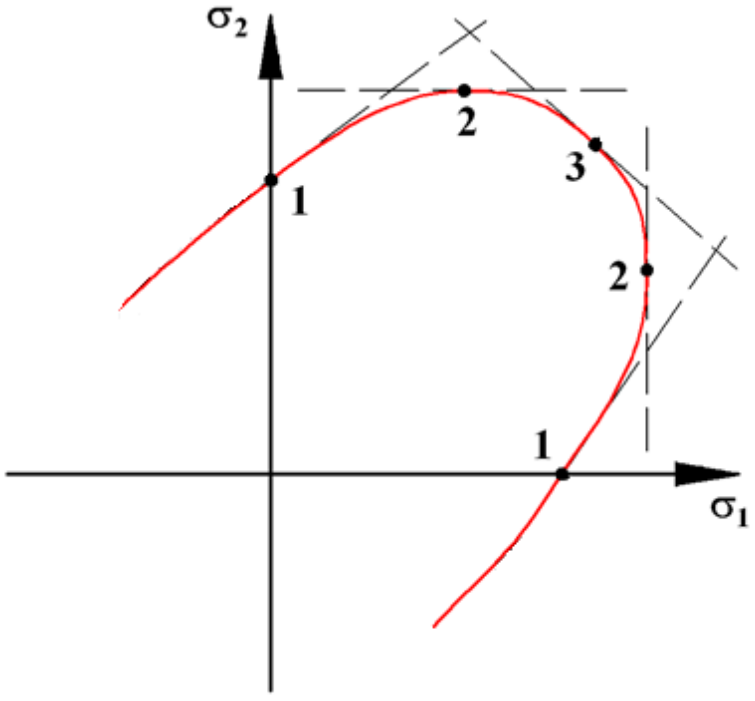
Obr. 3.38. Definice materiálového modelu Hill 48 s kinematickým zpevněním v programu PAM - STAMP

3.3.3 Model Vegter s izotropním zpevněním materiálu

Model pro anizotropní materiál. Model Vegter tvoří elipsa zkonstruovaná v souřadném systému σ_1 a σ_2. Pro definici modelu je třeba znát materiálové vlastnosti a charakteristiky použité slitiny a dále určit řídící body elipsy, které se získají vyhodnocením mechanických zkoušek.

Specifikace modelu:

- Youngův modul pružnosti v tahu E
- Poissonovo číslo μ
- Hustota ρ
- Koeficienty normálové anizotropie pro směry 0°, 45°, 90° a biaxiální anizotropie
- Statická zkouška tahem
- Plain strain tensile test
- Bulge test (definice víceosé napjatosti)
- Průměrná křivka deformačního zpevnění z tahové zkoušky (viz vztah 3.1.)

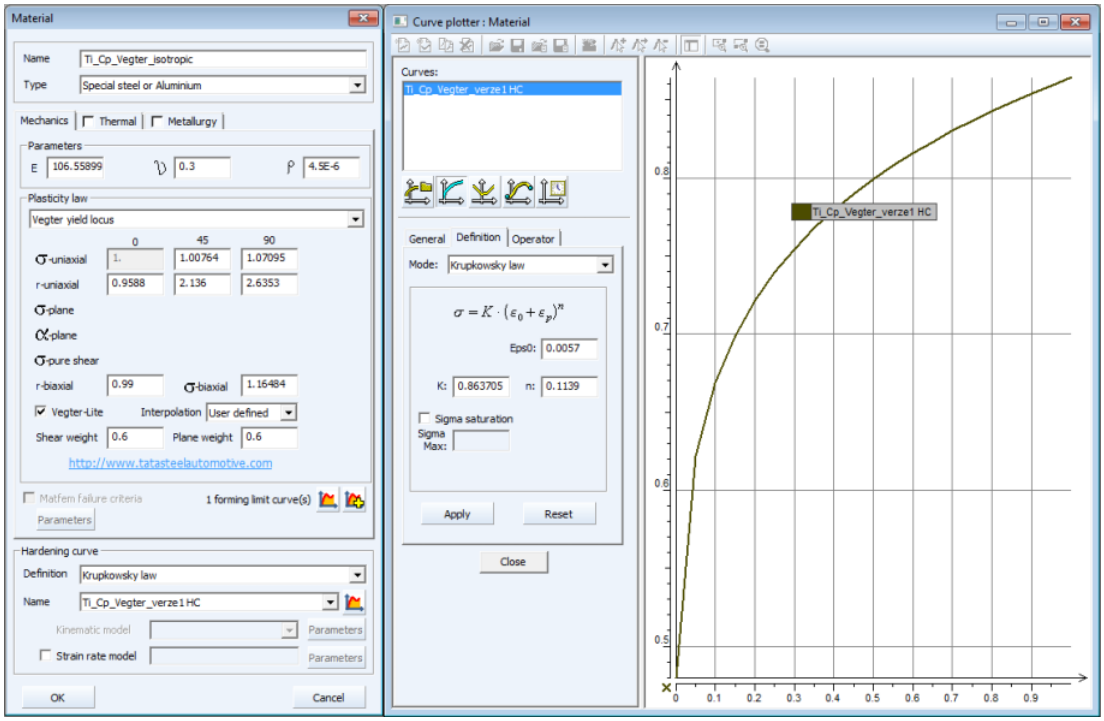


Obr. 3.39. Definice modelu Vegter

1 - tahová zkouška

2 - plane strain test

3 - bulge test



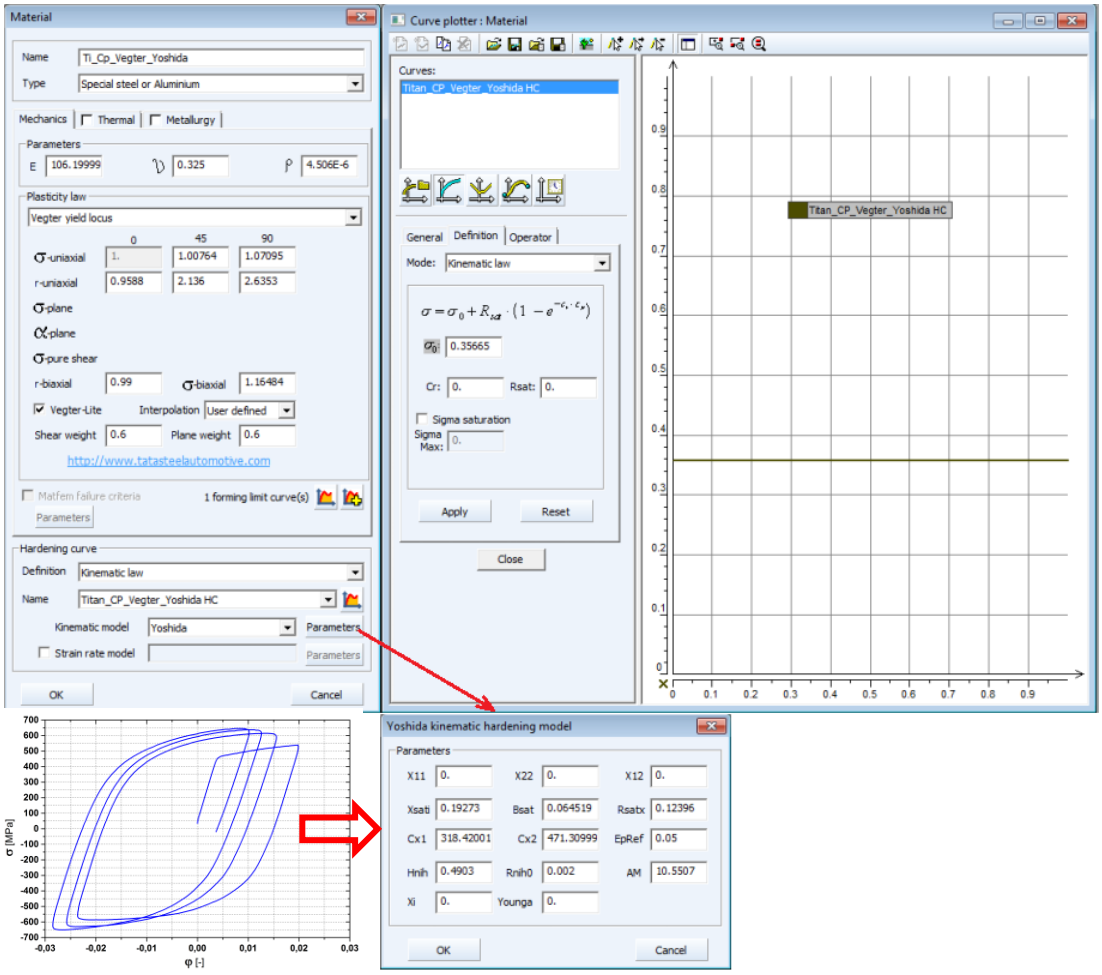
Obr. 3.40. Definice materiálového modelu Vegter s izotropním zpevněním v programu PAM - STAMP

3.3.4 Model Vegter s kinematickým zpevněním materiálu (Yoshida model)

Zpevnění se definuje pomocí hysterezních smyček získaných z cyklické zkoušky.

Specifikace modelu:

- Youngův modul pružnosti v tahu E
- Poissonovo číslo μ
- Hustota ρ
- Koeficienty normálové anizotropie pro směry 0°, 45°, 90° a biaxiální anizotropie
- Statická zkouška tahem
- Plain strain tensile test
- Bulge test (definice víceosé napjatosti)
- Křivka deformačního zpevnění z cyklické zkoušky

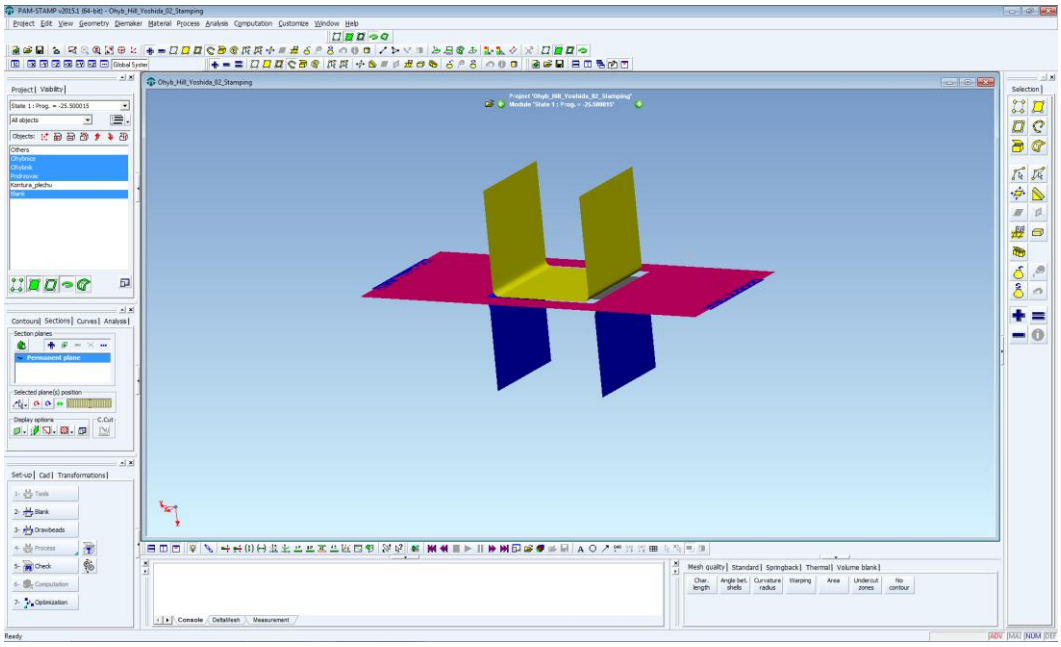


Obr. 3.41. Definice materiálového modelu Vegter s kinematickým zpevněním v programu PAM - STAMP

3.4 NUMERICKÁ SIMULACE TAŽENÍ VÝLISKU Z PLECHU

Numerická simulace má za úkol simulovat kombinovanou zkoušku ohybem a tažením. Simulace je provedena v softwaru PAM - STAMP. Výpočet je založen na metodě konečných prvků. Jedná se o simulaci plošného tváření plechu při definovaných posuvových, rychlostních a kontaktních podmínkách.

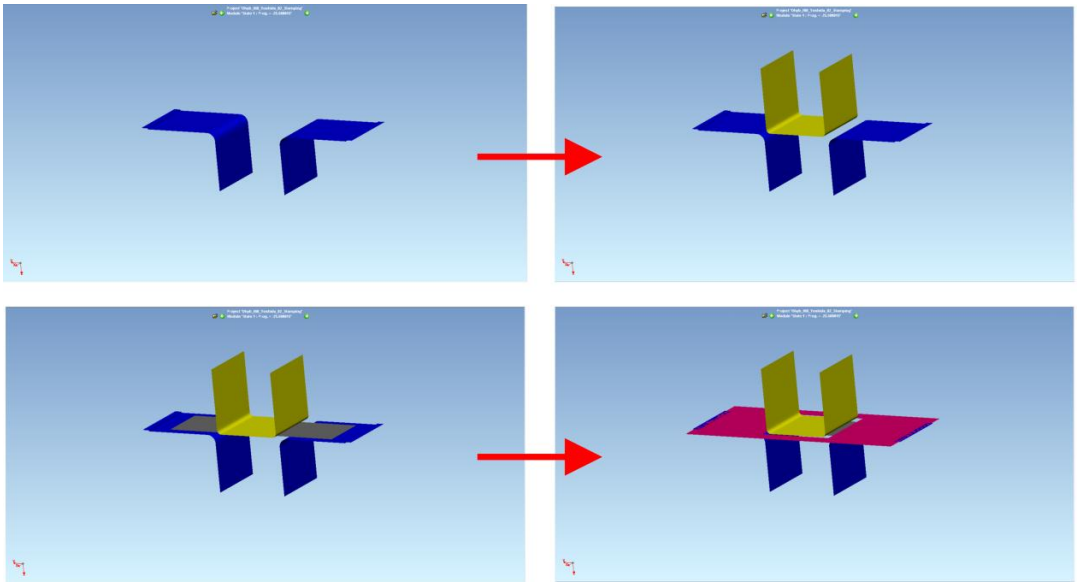
Proces je simulován prostřednictvím čtyřech výpočtových modelů (viz předchozí kapitola). Výsledkem simulace je kontura plechu po ukončení procesu a následném odpružení. Tato kontura bude v závěru práce porovnána s konturou reálného vzorku z kombinované zkoušky ohybem a tažením.



Obr. 3.42. Pracovní prostředí softwaru PAM - STAMP

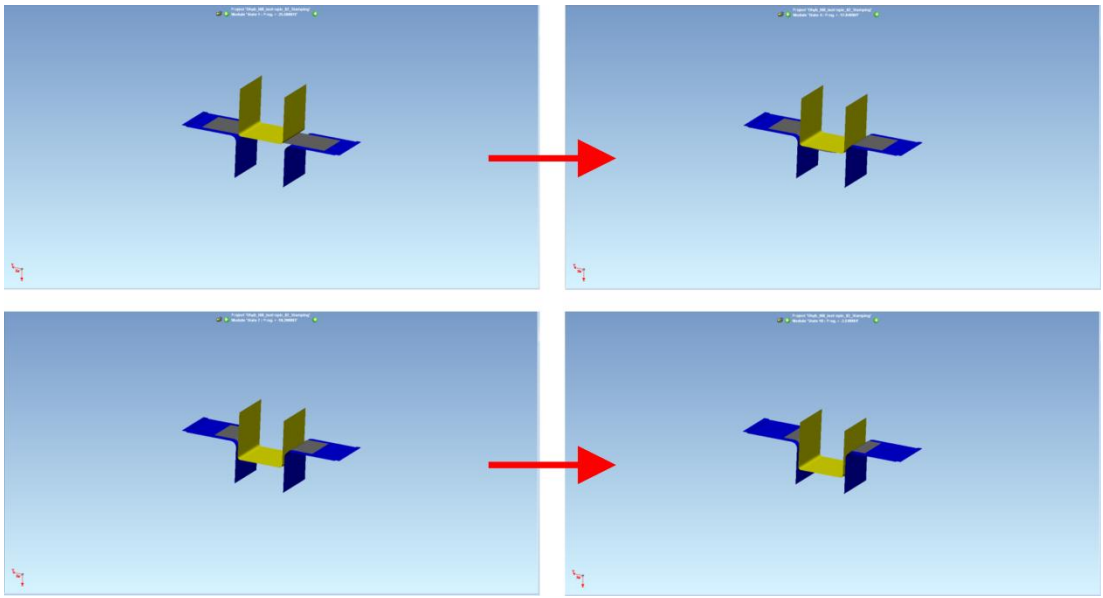
Pro přesný výsledek simulace je velmi důležité správně nadefinovat geometrii nástroje. Rozměry a geometrie nástroje musí odpovídat reálnému nástroji, pomocí kterého byla provedena reálná zkouška. Geometrie nástroje se vytvoří v softwaru CATIA. Vytvořené nástroje se následně naimportují do softwaru PAM - STAMP.

Nejprve se naimportuje tažnice a tažník. Následně plech a přidržovač. Plech je třeba ustavit na vnější povrch tažnice. Přidržovač a tažník se ustaví na horní rovinu plechu. Aby simulace proběhla správně je třeba ještě zorientovat normály na nástroji a materiálu, který bude tvářen.



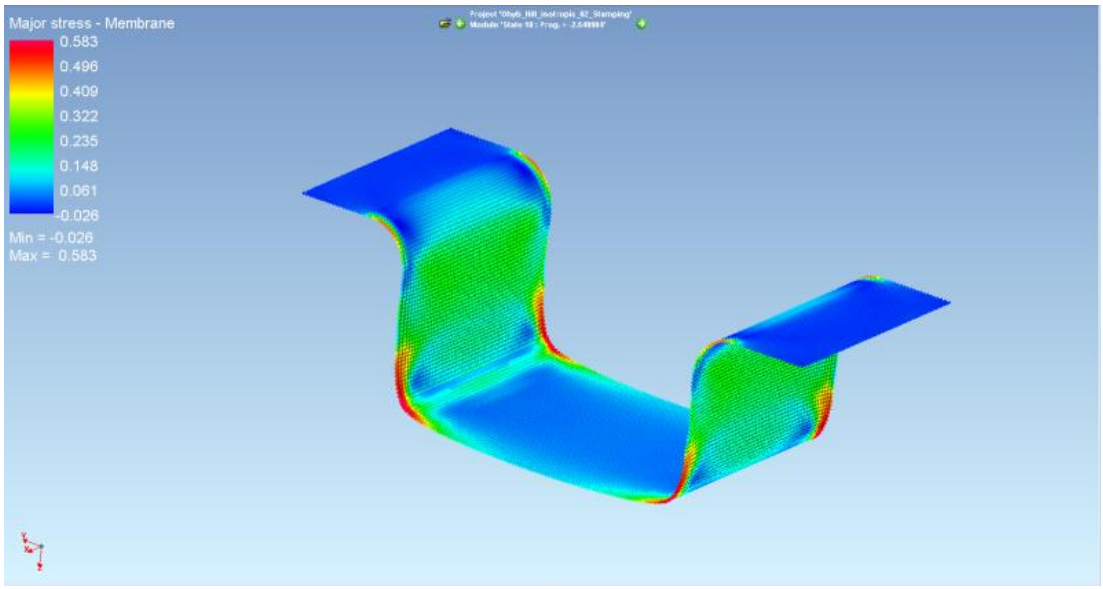
Obr. 3.43. Postupný import nástrojů do softwaru PAMP - STAMP

Nyní je nástroj připraven pro spuštění numerické simulace. Simulace probíhá postupně dle modelů Hill 48 s izotropním a kinematickým zpevněním a Vegter s izotropním a kinematickým zpevněním.



Obr. 3.44. Průběh simulace v softwaru PAM - STAMP

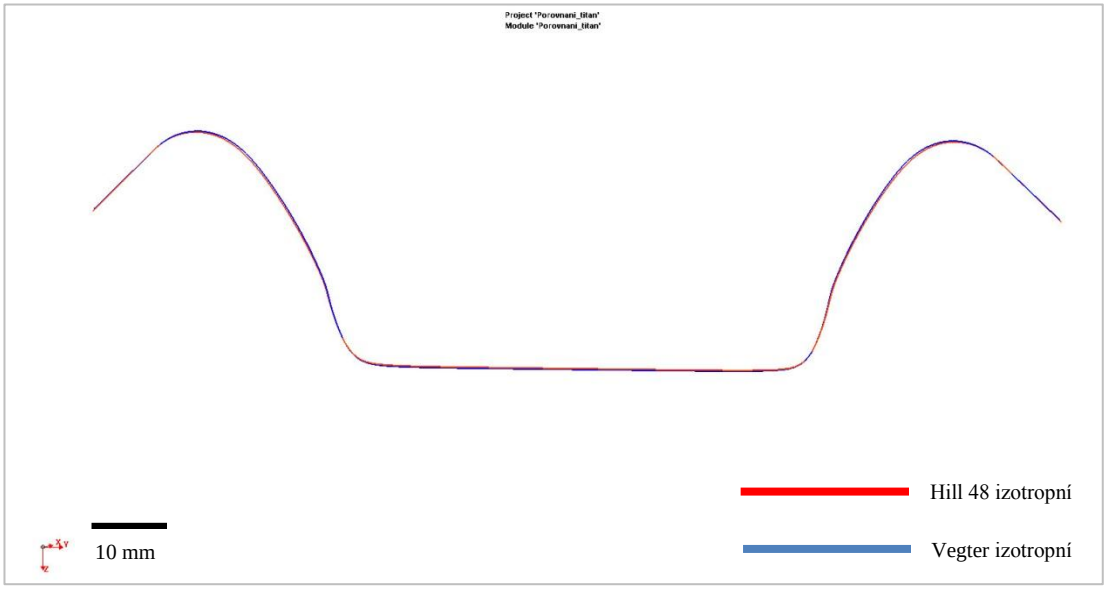
Na obrázku 3.42. je znázorněn průběh simulace procesu tváření. Pro názornost je skryt přidržovač, aby byl vidět posun plechu. Na obrázku 3.43. je vidět rozložení a velikost deformace na tvářeném materiálu po skončení tváření před uvolněním z nástroje.



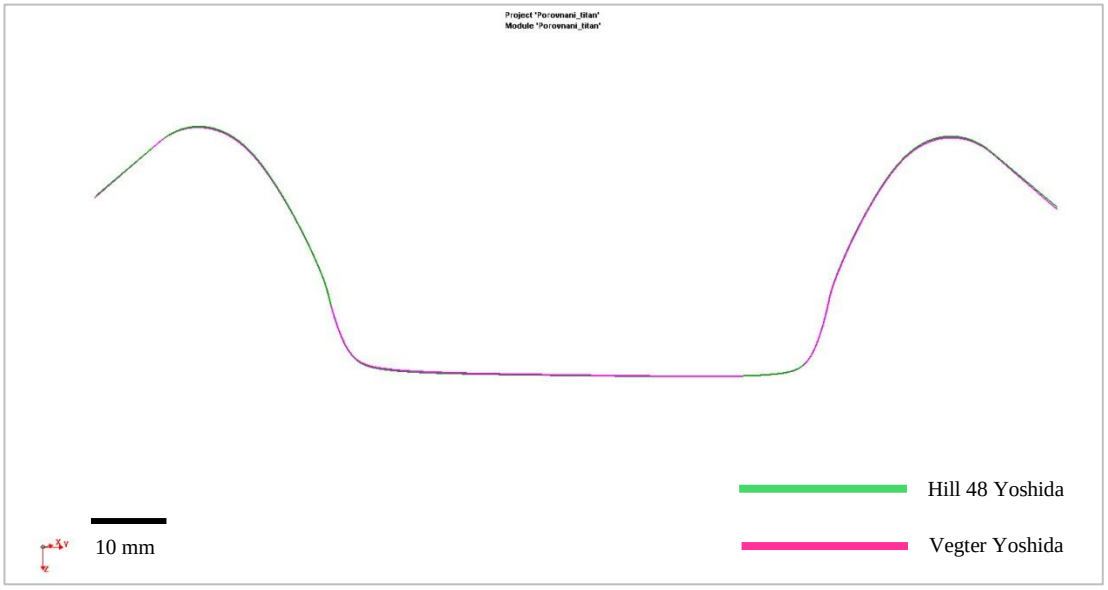
Obr. 3.45. Zdeformovaný plech před uvolněním z nástroje se znázorněným napětím v materiálu v softwaru PAM - STAMP

3.5 VYHODNOCENÍ NUMERICKÉ SIMULACE TAŽENÍ VÝLISKU Z PLECHU

Po skončení simulace a uvolnění plechu z tvářecího nástroje se projeví odpružení a plech se zdeformuje zpět o hodnotu pružné deformace. Nyní je třeba plechem proložit rovinu řezu a následně se kontura plechu vyexportuje jako 3D křivka, která bude sloužit pro porovnání s reálným vzorkem.



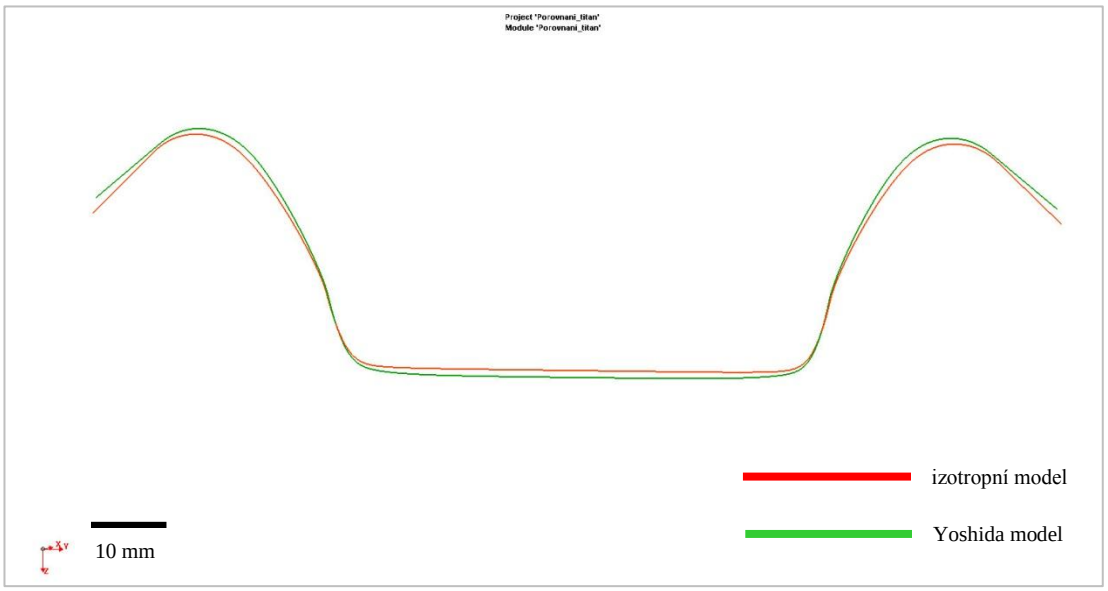
Obr. 3.46. Porovnání výsledné kontury plechu po numerické simulaci pro model Hill 48 izotropní (červená barva) a Vegter izotropní (modrá barva)



Obr. 3.47. Porovnání výsledné kontury plechu po numerické simulaci pro model Hill 48 Yoshida (zelená barva) a Vegter Yoshida (růžová barva)

Na obr. 3.46. a 3.47. je znázorněno porovnání materiálového modelu Hill 48 a Vegter. Je patrné, že mezi těmito modely není znatelný rozdíl, tudíž není možné posoudit, který z uvedených modelů je z hlediska odpružení výhodnější pro numerickou simulaci. tažení výlisku z plechu.

Nepatrné rozdíly se projevují při porovnání modelu s izotropním a kinematickým (Yoshida) zpevněním materiálu. Toto porovnání je vidět na obr. 3.48.



Obr. 3.48. Porovnání výsledné kontury plechu po numerické simulaci pro izotropní model (červená barva) a Yoshida model (zelená barva)

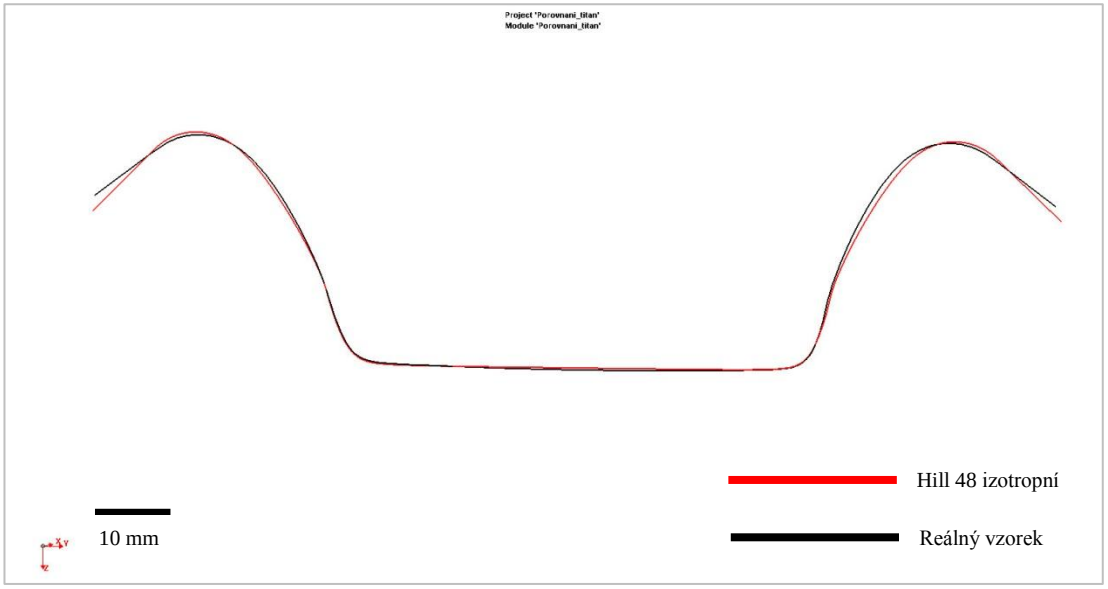
3.6 POROVNÁNÍ VÝSLEDKU EXPERIMENTU A NUMERICKÉ SIMULACE

Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole porovnání výsledků modelu Hill a Vegter mezi sebou nemá téměř žádný smysl, neboť výsledky se prakticky shodují. Nepatrných rozdílů je dosaženo při porovnání izotropního a kinematického (Yoshida) modelu.

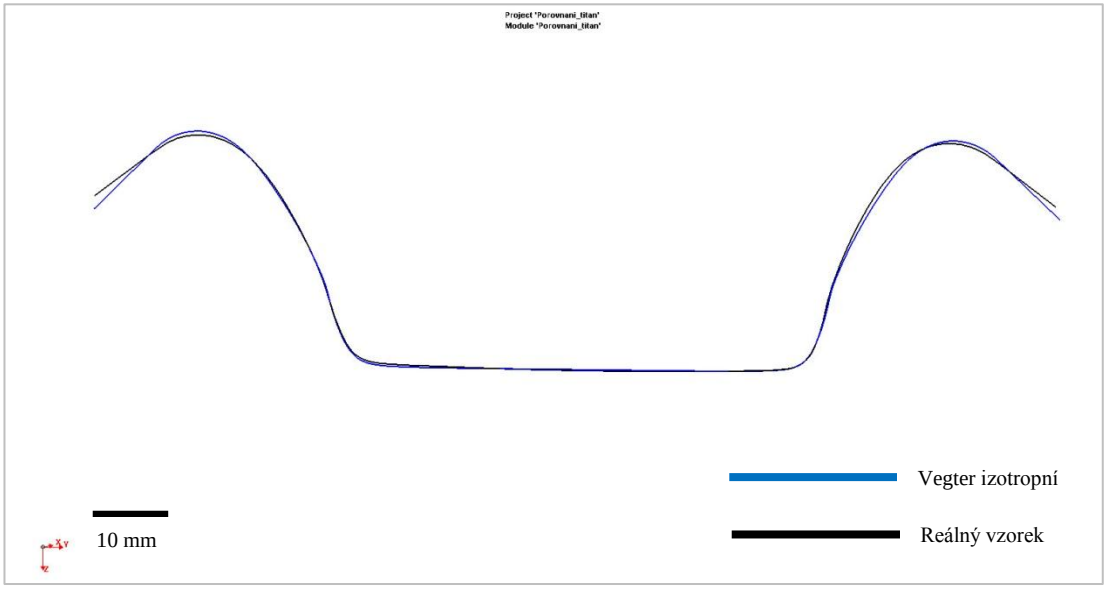
Ze simulace jsou k dispozici kontury modelů Hill 48 a Vegter vždy ve variantě s izotropním a kinematickým zpevněním materiálu.

Na následujících obrázcích je graficky znázorněno porovnání výsledné kontury získané z numerické simulace a kontury reálného vzorku získaného pomocí experimentu.

Na obrázcích 3.49 a 3.50. je znázorněno porovnání modelu Hill 48 s izotropním zpevněním a modelu Vegter z izotropním zpevněním oproti kontuře reálného vzorku. Jak již bylo zmíněno výsledky obou modelů jsou mezi sebou zaměnitelné a oproti reálnému vzorku se nepatrně liší. Odchylky je dosaženo v oblasti kolem okrajových rádiusů vzorku, kde je patrný lehce odlišný úhel odpružení.



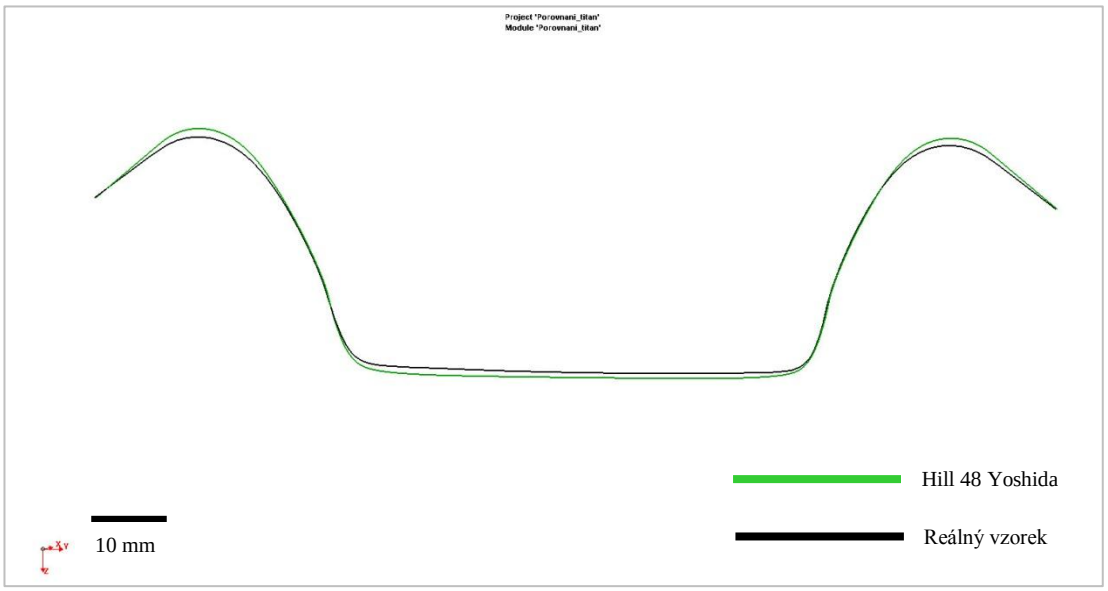
Obr. 3.49. Porovnání výsledné kontury plechu po numerické simulaci pro model Hill 48 izotropní (červená barva) a reálného vzorku (černá barva)



Obr. 3.50. Porovnání výsledné kontury plechu po numerické simulaci pro model Vegter izotropní (modrá barva) a reálného vzorku (černá barva)

V případě porovnání kontury kinematických modelů zpevnění materiálu oproti kontuře reálnému vzorku (viz obr. 3.50. a 3.51.) je odchylky dosaženo opět v oblasti kolem okrajových rádiusů vzorku, kde je patrný lehce odlišný úhel odpružení.

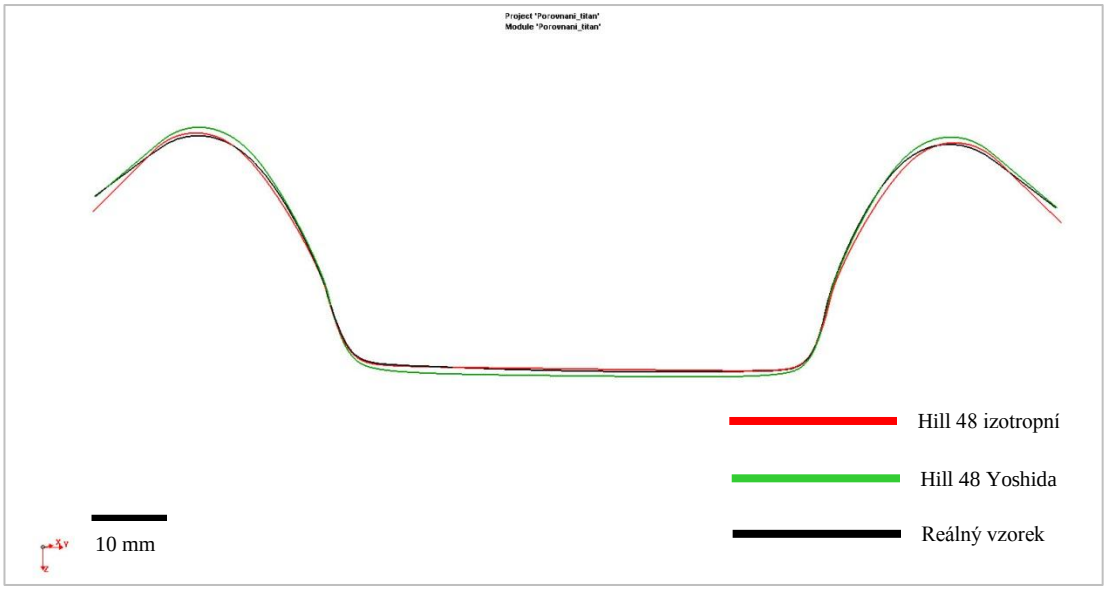
Dále je z obrázku prokazatelné, že výsledná kontura z numerické simulace podle kinematického modelu nepodlehla tak velkému odpružení jako reálný vzorek, neboť kontura je zřetelně vyšší (větší hloubka prolisu) oproti kontuře reálného vzorku.



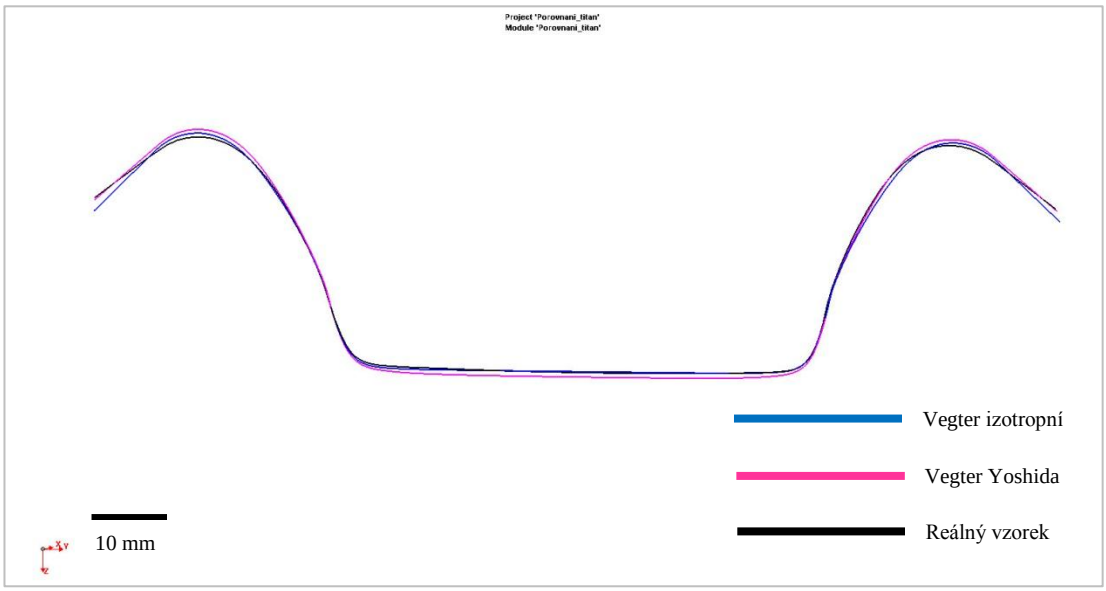
Obr. 3.51. Porovnání výsledné kontury plechu po numerické simulaci pro model Hil 48 kinematický (zelená barva) a reálného vzorku (černá barva)

Obr. 3.52. Porovnání výsledné kontury plechu po numerické simulaci pro model Vegter kinematický (růžová barva) a reálného vzorku (černá barva)

Z obrázku 3.53. a 3.54. je patrné, že ideální materiálový model pro numerickou simulaci by se nacházel někde mezi izotropním a kinematickým modelem. Ovšem vzhledem ke konkrétnímu případu výlisku použitého v experimentu jsou odchylky simulace a reálného vzorku prakticky zanedbatelné.



Obr. 3.53. Porovnání výsledné kontury plechu po numerické simulaci pro modely Hill 48 izotropní (červená barva), Hil 48 kinematický (zelená barva) a reálného vzorku (černá barva)



Obr. 3.54. Porovnání výsledné kontury plechu po numerické simulaci pro modely Vegter izotropní (modrá barva), Vegter kinematický (růžová barva) a reálného vzorku (černá barva)

4 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo zjistit a definovat vhodný materiálový model, který se použije pro numerickou simulaci tažení výlisku plechu ze slitiny titanu. Tato problematika byla zkoumána a řešena pro materiálové modely Hill 48 a Vegter. Pro oba tyto modely byla použita jak varianta s izotropním zpevněním tak i varianta z kinematickým zpevněním materiálu tzv. Yoshida model. K simulaci tažení výlisku podle jednotlivých materiálových modelů bylo použito softwaru PAM - STAMP.

V experimentální části této práce bylo provedeno několik materiálových zkoušek pro zjištění potřebných vlastností a charakteristik testovaného materiálu. Konkrétně statická zkouška tahem pro zjištění průměrné křivky zpevnění, koeficientů anizotropie a modulu pružnosti. Dále Nakazima test a Bulge test pro definování víceosé napjatosti. Plain strain test a cyklický test za střídavého tahu a tlaku. Údaje získané z těchto zkoušek následně sloužily pro definici materiálového modelu použitého pro numerickou simulaci tažení výlisku z plechu.

Dále bylo za úkol pomocí experimentu zhotovit reálný výlisek plechu ze slitiny titanu *Ti-CP* AMS4911 a výslednou konturu vzorku z experimentu porovnat s konturou vzniklou pomocí numerické simulace podle jednotlivých materiálových modelů.

S odkazem na předchozí kapitoly 3.5.a 3.6. je patrné, že volba materiálového modelu Hill 48 nebo Vegter nehraje podstatnou roli, neboť výsledky obou materiálových modelů jsou v podstatě srovnatelné.

Rozdílného výsledku je dosaženo při porovnání modelu s izotropním a modelu s kinematickým (Yoshida model) zpevněním materiálu, kde se výsledky simulace od sebe nepatrně liší rozdílnou výškou výlisku a jiným úhlem odpružení.

Při porovnání kontury výlisku ze simulace a kontury reálného výlisku získaného pomocí experimentu je patrné, že tvarem krajních rádiusů a úhlem odpružení krajních částí výlisku se reálný vzorek více podobá kinematickému modelu Yoshida, avšak výškou výlisku se přibližuje spíše modelu izotropnímu. Ideální model použitý pro numerickou simulaci by se tedy nacházel někde mezi modely izotropního a kinematického zpevnění materiálu.

5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ

[1] SEDLÁČEK, Vladimír. *Titan a jeho slitiny*. [cit. 2016-01-1]. Praha : ANTL, 1963. 206 s.

[2] SEDLÁČEK, Vladimír. Neželezné kovy a slitiny. [cit. 2016-01-1]. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1979.

[3] *Periodická tabulka- Titan* [online]. [cit. 2016-01-1]. Dostupné z: http://www.prvky.com/22.html

[4] *Titan* [online]. [cit. 2016-01-1]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Titan_(prvek)

[5] Lipavská, Eva. *Titan* [online]. [cit. 2016-01-1]. Dostupné z: http://www.kch.tul.cz/sites/default/files/texty/fp/ach/prace-studentu/062_2Ti-Lipavska.pdf

[6] *Titan a jeho slitiny* [online]. [cit. 2016-01-1]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/Nikl_titan.pdf

[7] Periodická tabulka [online]. [cit. 2016-01-1]. Dostupné z: http://www.prvky.com/periodicka-tabulka.html

[8] PÍŠEK, F.; JENÍČEK, L.; RYŠ, P. *Nauka o materiálu I : Neželezné kovy*.3. [cit. 2016-01-1] Praha : Academia, 1973.

[9] KLAPKOVÁ, Alena. *Mechanické vlastnosti titanových slitin* [online]. [cit. 2016-01-1]. Brno, 2012. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=52258

[10] SEDLÁČEK, Vladimír. *Únava hliníkových a titanových slitin* [cit. 2016-01-1]. Praha : SNTL, 1989.

[11] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II.* [cit. 2016-01-1] 2. opr. a rozš. vyd. Brno : CERM, 2002. 392s. ISBN 80720424832.

[12] MACEK, Karel. *Kovové materiály.* [cit. 2016-01-1]. Vyd. 1. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006, 164s. ISBN 80-010-3513-1.

[13] *Slitiny titanu* [online]. [cit. 2016-01-1]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/05_Slitiny%20Ti.ppt

[14] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Speciální kovové materiály*. [cit. 2016-01-1]. Nauka o materiálu 3. část: Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 118 s. ISBN 978-800-1042-120.

[15] *Titan- vlastnosti, použití, slitiny a výroba* [online]. [cit. 2016-01-1]. Dostupné z: http://documents.tips/documents/titan-vlastnosti-pouziti-slitiny.html

[16] *Kování titanu a jeho slitin* [online]. [cit. 2016-01-1].Technický týdeník 2006. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/kovani-titanu-a-jeho-slitin_16624.html

[17] PODRÁBSKÝ, Tomáš, JULIŠ, Martin, NĚMEC, Karel. *Neželezné kovy a jejich slitiny I.* [online]. [cit. 2016-01-1]. Dostupné z: http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/databaze-predmetu/3SV/vechet/prednasky/06A-3SV.ppt

[18] KIJONKA, Miloš. *Simulace procesu lisování* [online]. [cit. 2016-02-1]. SPŠ-TP Karviná, 2005. Dostupné z: http://www.spskarvina.cz/projekty/Ict2005/manual/data/odborne/lisovani/Simulace_procesu_lisovani_v_etaDYNAFORM.pdf

[19] MACHÁLEK, Jakub, ČADA, Radek, FRODLOVÁ, Barbora. *Simulace procesů plošného tváření v softwaru PAM-STAMP 2G* [online]. [cit. 2016-02-1]. Vysoká škola báňská Ostrava, 2012. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2715-5.pdf

[20] BENEŠOVÁ, Soňa. *Materiálové modelování a numerická simulace jako nástroj pro vývoj technologických procesů* [online]. [cit. 2016-02-1]. Západočeská univerzita v Plzni, 2007. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~sbenesov/Dizertace.pdf

[21] *Počítačová simulace tváření plechů.* [online]. [cit. 2016-02-1]. MM průmyslové spektrum, 2001. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/pocitacova-simulace-tvareni-plechu.html

[22] PETRUŠKA, Jindřich. *Některé problémy výpočtové simulace tvářecích procesů* [online]. [cit. 2016-02-1]. Vysoké učení technické v Brně, 2006. Dostupné z: http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/80-214-3106-7.pdf

[23] *Verifikace simulací hlubokého tažení dílů karoserií*. [online]. [cit. 2016-02-1]. MM průmyslové spektrum, 2002. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/verifikace-simulaci-hlubokeho-tazeni-dilu-karoserii.html

[24] ŠANOVEC, Jan, KÁBRT, Petr. *Optimalizace technologií tažení plechových dílů* [online]. [cit. 2016-02-1]. ČVUT FS Praha. Dostupné z: http://docplayer.cz/15144432-Optimalizace-technologii-tazeni-plechovych-dilu.html

[25] *Mechanické zkoušení kovů*. [online]. [cit. 2016-03-1]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_mechanicke_zkouseni/teorie.htm

[26] Zkoušení materiálů. [online]. [cit. 2016-03-1]. Dostupné z: http://tzs.kmm.zcu.cz/material2.pdf

[27] DRIML, Bohuslav. Základní vlastnosti materiálů a jejich zkoušení. [online]. [cit. 2016-03-1]. Dostupné z: http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf

[28] *Mechanické zkoušky.* [online]. [cit. 2016-03-1]. OVMT Projekt č.: CZ.1.07/1.1.02/04.0004. Dostupné z: http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/tahova_zkouska.pdf

[29] ŠKNOUŘILOVÁ, Eva. *Svařování plazmou vysokopevnostních ocelí*. [online]. [cit. 2016-03-1]. Vysoké učení technické v Brně, 2011. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41809

[30] PROCHÁZKA, Karel. *Zkoušky mechanických vlastností materiálu.* [online]. [cit. 2016-03-1]. SŠPU Opava, Projekt č.: CZ.1.07/1.5.00/34.0129. Dostupné z: http://www.strojka.opava.cz/UserFiles/File/_sablony/KOM_III/VY_52_INOVACE_J-05-21.pdf

[31] PROCHÁZKA, Karel. *Diagram tahové zkoušky.* [online]. [cit. 2016-03-1]. SŠPU Opava, Projekt č.: CZ.1.07/1.5.00/34.0129. Dostupné z: http://www.strojka.opava.cz/UserFiles/File/_sablony/KOM_III/VY_52_INOVACE_J-05-22.pdf

[32] ŠANOVEC, Jan, KÁBRT, Petr. *Materiálové databáze pro software PAM - STAMP*. [online]. [cit. 2016-03-1]. ČVUT FS Praha. Dostupné z: http://konference.tanger.cz/data/metal2000/sbornik/papers/211.pdf

[33] DRÁPELA, Miloslav. *3D optické měření deformace při tváření materiálů.* [online]. [cit. 2016-03-1]. MCAE Systems s.r.o. Dostupné z: http://www.mcae.cz/data/files/clanek2-mcae-drapela-3d-opticke-mereni-deformace-pri-tva-23.pdf

[34] PROCHÁZKA, Karel. *Úprava zariadenia pre hydraulické vybuľovanie za účelom zvýšenia výkonu hydraulického čerpadla*. [online]. [cit. 2016-03-1]. Technická univerzita v Košiciach, 2012. Dostupné z: http://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/24-2012/pdf/103-106.pdf

[35] JURČIŠIN, Miroslav. *Experimentální měření křivky mezních deformací*. [online]. [cit. 2016-04-1]. MM průmyslové spektrum, 2015. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/experimentalni-mereni-krivky-meznich-deformaci.html

[36] JUPPA, Jan. *Predikce velikosti odpružení pomocí numerické simulace v prostředí PAM STAMP 2G při ohybu tenkých plechů*. [cit. 2016-04-1]. Technická univerzita v Liberci, 2015.