

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2022

**JIŘÍ
MARYT**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Maryt** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **473631**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Tvorba materiálové karty pro materiálovou jakost DX56

Název diplomové práce anglicky:

Creation of material card for material quality DX56

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je naměřit kompletní materiálovou kartu pro numerické simulace plošného tváření.

- 1) Seznámení s problematikou plošného tváření
- 2) Charakteristika okrajových podmínek pro numerické simulace
- 3) Příprava dat pro tvorbu materiálové karty pro numerické simulace
- 4) Ověření vlivu rozptylu vlastností analyzované materiálové jakosti
- 5) Závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

Literatura:

ČSN EN 12004-2

ČSN EN ISO 6892-1

Sheet Metal Forming Processes and Die Design, Vukota Bojanovic

ASM Handbook Volume 14B: Metalworking: Sheet Forming

Další literatura na doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Vít Novák ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Ing. Lukáš Chrást'anský, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání diplomové práce: **21.04.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **15.08.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2022**

Ing. Vít Novák
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením mého vedoucího Ing. Víta Nováka a použil jsem pouze zdroje a literaturu uvedenou v příloženém seznamu.

V Praze dne: 15. srpna 2022

Podpis:



Poděkování:

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Vítu Novákovi za ochotu a trpělivost při vytváření mé diplomové práce, a především za cenné rady, informace a zkušenosti které mi předal. Dále bych rád poděkoval Ing. Františkovi Tatičkovi Ph.D. a Ing. Lukášovi Chrášťanskému Ph.D., kteří mi věnovali důležité konzultace při tvorbě této práce.



Anotace

Škola:	České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Název práce:	Tvorba materiálové karty pro materiálovou jakost DX56
Akademický rok:	2021/2022
Autor:	Bc. Jiří Maryt
Vedoucí práce:	Ing. Vít Novák
Konzultant:	Ing. Lukáš Chrástanský, Ph.D. Ing. František Tatiček, Ph.D.

Bibliografické údaje:	Počet stran	86
	Počet obrázků	50
	Počet tabulek	15
	Počet grafů	10

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá tvorbou materiálové karty pro numerické simulace plošného tváření. V teoretické části je nejprve základní seznámení s technologií plošného tváření. Následuje úvod do problematiky numerických simulací spolu s charakteristikou okrajových podmínek. Dále je zde popsán princip digitální korelace obrazu, jehož pomocí se budou vyhodnocovat naměřená data. Experimentální část je složena ze dvou odlišných měření. Jedním jsou tahové zkoušky pro získání křivek zpevnění a základních mechanických vlastností materiálu a druhým jsou zkoušky dle Nakajimy pro získání křivek mezních deformací. Při měření bude použit optický systém ARAMIS. Cílem experimentální části je získat naměřená data při různých rychlostech zatěžování, a ty poté použít pro sestavení materiálové karty v softwaru AutoForm, který se používá pro numerické simulace plošného tváření.

Klíčová slova:

Materiálová karta, Numerické simulace, Plošné tváření, Tvářitelnost, Křivka zpevnění, Křivka mezních deformací, Optický systém ARAMIS, Digitální korelace obrazu



Annotation

University:	Czech technical university in Prague	
	Faculty of Mechanical Engineering	
Department:	Department of manufacturing technology	
Head of the department:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.	
Title:	Creation of material card for material quality DX56	
Academic year:	2021/2022	
Author:	Bc. Jiří Maryt	
Supervisor:	Ing. Vít Novák	
Consultant:	Ing. Lukáš Chrástanský, Ph.D.	
	Ing. František Tatíček, Ph.D.	
Bibliographic data:	Number of pages	86
	Number of figures	50
	Number of tables	15
	Number of charts	10

Abstract:

The diploma thesis deals with the creation of a material card for numerical simulation of sheet metal forming. The theoretical part presents a basic introduction to the technology of sheet metal forming. This is followed by an introduction to numerical simulations and a description of boundary conditions. Then, the principle of digital image correlation is described, which will be used to evaluate the measured data. The experimental part consists of two different measurements. The first is the tensile tests to obtain the hardening curves and the fundamental mechanical properties of the material, and the second is the Nakajima tests to obtain the Forming limit curves. The ARAMIS optical system will be used for the measurements. The experimental part aims to obtain measured data at different loading rates and then use these to create a material card in the AutoForm software, which is used for numerical simulations of sheet metal forming.

Keywords:

Material card, Numerical simulation, Sheet forming, Formability, Hardening curve, Forming limit curve, Optical system ARAMIS, Digital image correlation



Obsah

Úvod.....	1
1 Tváření.....	3
1.1 Rozdělení tváření dle teploty.....	3
1.1.1 Tváření za studena	3
1.1.2 Tváření za tepla	3
1.2 Rozdělení tváření dle deformací.....	4
1.2.1 Objemové tváření.....	4
1.2.2 Plošné tváření.....	4
2 Numerické simulace plošného tváření a přehled softwarů.....	7
2.1 Základní typy numerické simulace plošného tváření	7
2.1.1 Dynamická explicitní metoda	8
2.1.2 Statická explicitní metoda	8
2.1.3 Statická implicitní metoda inkrementální	8
2.1.4 Statická implicitní metoda s velkým krokem.....	8
2.1.5 Statická metoda jednokroková.....	9
2.2 Softwary pro numerické simulace plošného tváření.....	9
2.2.1 AutoForm	9
2.2.2 PAM-STAMP	10
3 Materiálová karta - popis materiálových vlastností	12
3.1 Součinitel plastické anizotropie.....	14
3.2 Deformační zpevnění materiálu	16
3.3 Zásoba plasticity	18
3.4 Diagram mezního přetvoření.....	19
4 Materiálové modely plasticity	22
4.1 Hillovo kritérium	23
4.2 BBC kritéria	24
4.3 Vegter kritéria.....	26
5 Optické systémy pro měření přetvoření plechu.....	31
5.1 DIC	31
5.1.1 Princip metody	31
5.1.2 2D DIC.....	32
5.1.3 3D DIC.....	33
5.2 ARGUS.....	34
5.2.1 Metoda měření deformace pomocí měrných sítí	35
5.3 ARAMIS	37
6 Návrh experimentu	39
6.1 Zkoušená materiálová jakost.....	41



7	Zkoušky tahem - křivky zpevnění.....	43
7.1	Příprava vzorků.....	43
7.1.1	Čištění a odmašťování	44
7.1.2	Vytváření náhodné sítě	44
7.2	Zkušební zařízení	45
7.3	Kalibrace zařízení	47
7.4	Postup experimentu	48
7.5	Vyhodnocení zkoušek tahem.....	50
7.5.1	Naměřené hodnoty	51
7.5.2	Křivky zpevnění	56
7.5.3	Shrnutí vyhodnocení	60
8	Zkoušky dle Nakajimy- křivky mezních deformací.....	63
8.1	Příprava vzorků.....	63
8.1.1	Čištění a odmaštění.....	64
8.1.2	Vytváření náhodné sítě	65
8.2	Zkušební zařízení	66
8.3	Postup měření	68
8.4	Vyhodnocení křivek mezních deformací.....	70
9	Sestavení materiálové karty v AutoForm	74
10	Závěr.....	77
	Seznam použité literatury	80
	Seznam obrázků	83
	Seznam tabulek.....	84
	Seznam grafů.....	85
	Seznam příloh.....	86



Seznam použitých symbolů

A_g	%	Homogenní plastická tažnost při maximálním zatížení
A_{gt}	%	Celková tažnost při maximálním zatížení
BiW	-	<i>Body in White</i> – Svařený rám karoserie auta
C	MPa	Materiálová konstanta
C_{SSD}	-	Korelační kritérium
CAD	-	<i>Computer aided design</i> – Počítačem podporované projektování
CCD	-	<i>Charge-coupled device</i> – Typ obrazového snímače
CMOS	-	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i> – Typ obrazového snímače
DIC	-	<i>Digital Image Corre</i> – Digitální korelace obrazu
ε, φ	-	Smluvní, skutečná deformace
E	MPa	Youngův modul
FE	-	<i>Finite element</i> – Konečné prvky
FLC	-	<i>Forming Limit Curve</i> – Křivka mezních deformací
FLD	-	<i>Forming Limit Diagram</i> – Diagram mezních deformací
k	-	Materiálový koeficient
MKP	-	Metoda konečných prvků
n	-	Exponent deformačního zpevnění
r	-	Součinitel normálové anizotropie
Δr	-	Součinitel plošné anizotropie
R_{eH}, R_{eL}	MPa	Horní, dolní mez kluzu
$R_{p0,2}$	MPa	Smluvní mez kluzu
R_m	MPa	Mez pevnosti v tahu
R, σ	MPa	Smluvní, skutečné napětí
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	MPa	Složky hlavních napětí
SSD	-	Sum-squared difference – Suma kvadrátů rozdílů
WEDM	-	Wire electrical discharge machining
ZP	MPa	Zásoba plasticity



Úvod

Na výrobní technologie je v dnešní době kladen čím dál větší důraz na efektivitu a produktivitu. Díky emisním normám se výroba čím dál více kontroluje. Obecným trendem je vyrábět výrobky tak, aby se na výrobu spotřebovalo co nejméně materiálu, což většinou negativně ovlivní jeho životnost. Nicméně se vyvíjí nové typy materiálů, které by měly splnit kladené požadavky. Především u nových typů materiálů je nutné dopodrobna znát jejich chování a vlastnosti, aby je bylo možné efektivně implementovat do výrobních procesů a technologií. Kromě nových typů materiálů se lze setkat ve výrobě i s problémem různých vlastností materiálu v rámci jedné šarže (tavby). Materiál, který je na začátku, uprostřed nebo na konci svitku plechu, může mít různé vlastnosti. Dále může nastat situace, že vlastnosti materiálu dodávaného jedním dodavatelem z různých šarží se budou lišit. Nakonec také při změně dodavatele materiálu nastává problém s odlišnými vlastnostmi daného materiálu.

Jako velmi důležitý pomocný nástroj při návrhu procesu výroby a případných optimalizací se jeví numerické simulace. Pokud by se taková numerická simulace výrobního procesu nastavila správně, znamenalo by to významnou úsporu času i financí. Sníží se tak potřeba fyzických testů a výroby prototypů, které by měly být nahrazeny právě simulacemi. Dále je možné díky těmto simulacím posunout hranice možností a zvýšit efektivitu.

Právě díky snaze vyrábět rychle a efektivně, se často sahá po numerických simulacích procesu. Jednou z hlavních podmínek pro nastavení numerické simulace je správný popis okrajových podmínek simulovaného procesu. Správný popis materiálového modelu pomocí materiálové karty je také velmi důležitý. Na základě přesnosti popisu materiálového modelu se mohou výrazně lišit výsledky numerických simulací. Proto je kladen velký důraz na to, aby materiálová karta v numerické simulaci co nejvíce kopírovala chování a vlastnosti použitého materiálu z daného procesu. Poté co se simulace nastaví s daty odpovídajícími reálnému stavu, budou i její výsledky mnohem přesněji odpovídat skutečnosti a bude možné zabránit nepříznivým stavům jako je zmetkovitost ve výrobě.

V této diplomové práci se budu zabývat tvorbou materiálové karty pro numerické simulace plošného tváření. V experimentální části provedu měření materiálových dat pro danou materiálovou jakost, která byla dodána od ŠKODA AUTO. Zkoušky materiálu budou



prováděny při různých, vyšších rychlostech zatěžování, než předepisuje norma, protože i ve výrobě může být materiál tvářen vyššími rychlostmi. Pro získání potřebných dat bude při měření použit optický systém ARAMIS. Cílem je sestavit takovou materiálovou kartu, která bude odpovídat reálnému stavu materiálu a použití této materiálové karty povede ke zvýšení přesnosti výrobního procesu. V závislosti na možnostech simulačního softwaru vkládat pouze jednu FLC křivku do limitního diagramu, bude vytvořeno více materiálových karet pro různé rychlosti. Tyto karty by měly sloužit při numerických simulacích ve firmě ŠKODA AUTO.

1 Tváření

Tváření je strojírenská technologie, při které dochází k výrobě konečného výrobku bez úběru materiálu. Vlivem působení vnějších sil na materiál mění polotovar svůj tvar do požadované podoby. Kromě změny tvaru a rozměrů dochází při tvářecím procesu také ke změně mechanických vlastností materiálu. Jedná se o velmi produktivní technologii s minimálním odpadním materiálem. Tváření lze rozdělit například podle teploty, za které proces probíhá, anebo také podle způsobu působení přetvoření. V následujících podkapitolách bude stručně rozdělena problematika tváření.

1.1 Rozdělení tváření dle teploty

Velmi důležitým kritériem pro rozlišení tváření je teplota za které proces probíhá. Jedná se o veličinu, která má významný vliv na proces tváření a především na výsledné mechanické vlastnosti materiálu. Základní rozdělení je na tváření za studena, nebo za tepla. Jako pomyslnou hranici mezi těmito metodami tváření lze považovat rekrytalizační teplotu, která u čistých kovů bývá 0,4 homologické teploty.

1.1.1 Tváření za studena

Tváření probíhá za studena, pokud je teplota procesu menší nebo rovna 0,3 násobku teploty tání zpracovávaného materiálu, kdy jsou uvažovány termodynamické teploty v Kelvinech. Výrazným jevem doprovázejícím tváření za studena je intenzivní zpevňování materiálu. Pokud by došlo k velkému zpevňování materiálu, kdy by se hodnota meze kluzu přiblížila mezi pevností, došlo by k vyčerpání plastičnosti materiálu. Někdy je zapotřebí provést rekrytalizační žihání, aby materiál křehce nepraskal. Při zpevňování materiálu vlivem plastické deformace se zároveň deformují zrna materiálu. To vede k tvorbě orientované struktury ve směru působení vnějších sil a vzniku anizotropie mechanických vlastností materiálu. Hlavně u válcovaných plechů je zapotřebí uvažovat anizotropické chování materiálu, protože je vytvořena vláknitá struktura ve směru válcování. Nejčastěji se tváření za studena uplatňuje u plošného tváření.

1.1.2 Tváření za tepla

Za tváření za tepla se považuje proces tváření, který probíhá za teploty vyšší než je 0,7 násobek teploty tání daného materiálu, kdy jsou uvažovány termodynamické teploty v Kelvinech. Jev který doprovází tento druh tváření je také zpevňování vlivem plastické deformace, ale i protichůdný jev uzdravování materiálu. Uzdravování, neboli rekrytalizace, probíhá vlivem vyšší teploty během tváření i po něm, což znamená, že vliv zpevňování je



okamžitě eliminován. Závisí však na teplotě, typu materiálu, stupni deformace a deformační rychlosti. Pokud by bylo dosaženo vysoké deformační rychlosti rekrystalizace by nestihla proběhnout kompletně a tudíž by materiál zůstal částečně zpevněný. Obecně je výhodou, že na rozdíl od tváření za studena má materiál mnohem menší přetvárný odpor a tudíž jej lze více přetvořit za působení mnohem nižších sil. Dále se tato metoda tváření využívá s výhodou především u objemového tváření.

1.2 Rozdělení tváření dle deformací

Dalším faktorem, podle kterého lze rozdělit tvářecí proces, je působení deformací v jeho průběhu. Působí-li přetvoření ve všech třech rozměrech jedná se o objemové tváření. Pokud působí deformace pouze ve dvou rozměrech jedná se o plošné tváření.

1.2.1 Objemové tváření

Tento typ tváření je převážně využíván v hutním tváření při výrobě dalších polotovarů, ale může být použit i při výrobě konečných výrobků například při zápusťkovém kování. Materiál je při něm přetvořen v celém svém objemu. V důsledku přetvoření celého objemu tento typ tváření probíhá nejčastěji za tepla. Může se jednat například o technologie kování, válcování nebo protlačování.

1.2.2 Plošné tváření

Kromě toho, že při plošném tváření dochází k přetvoření převážně ve dvou rozměrech a třetí rozměr, nejčastěji tloušťka, zůstává téměř nezměněna, se od objemového tváření rozlišuje typem polotovaru. Proces běžně probíhá za studena. Nejčastěji se používají válcované plechy a různé přístřihy. Mezi základní technologie plošného tváření řadíme ohýbání, stříhání a tažení. V automobilovém průmyslu jasně dominuje technologie hlubokého tažení, která je uplatňována při výrobě karoserie.

- Ohýbání

Tato technologie plošného tváření se využívá pro přetvoření polotovaru o určitý úhel. Materiál je ohýbán přes hranu nástroje. Vyskytuje se zde často problematika odpružení materiálu, která se v dnešní době řeší pomocí numerických simulací. Obecně mezi ohýbání lze zařadit proces lemování, zakružování nebo ohraňování.

- Stříhání

Technologie stříhání se řadí mezi metody dělení materiálu. Hlavní předností je, že při stříhání nevznikají žádné třísky a je možné pracovat s vysokou přesností v závislosti na střížné vůli. Materiál je pomocí dvou břitů namáhán na stříh a přitom dochází ke vzniku výrazného zpevnění střížné hrany materiálu.

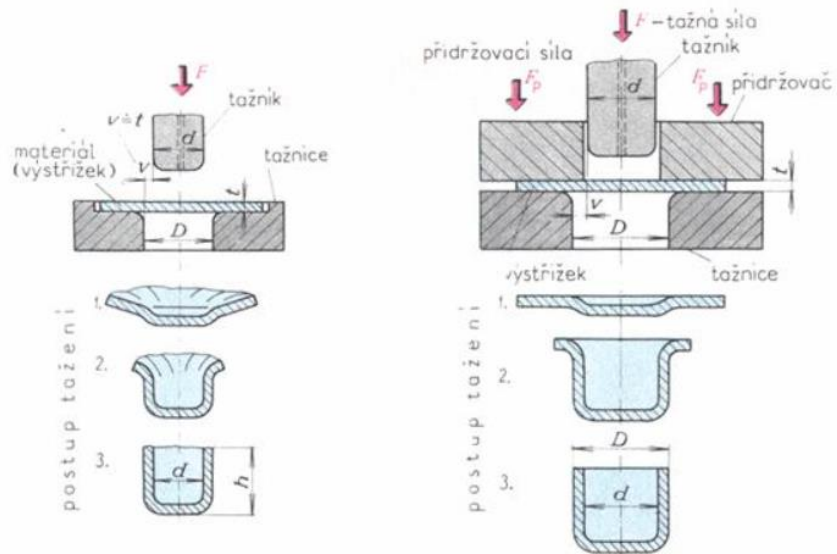
- Hluboké tažení

Hluboké tažení spočívá v přetvoření rovného přístříhu plechu v požadovaný dutý tvar, aniž by došlo ke vzniku zvlnění nebo trhlin. Většinou se vzniku zvlnění zabraňuje pomocí přidržovače v kombinaci s brzdými drážkami, které zpomalují tok materiálu.

Tvářecí nástroje, bez kterých nelze hluboké tažení provádět, jsou přidržovač, tažník a tažnice. Proces výroby probíhá díky přidržovači, který svírá okraje přístříhu, zatímco tažník může tvarovat zbylou střední část polotovaru vnikáním přes hranu do tažnice. Na obrázku níže (obr. 1) jsou na schématu zobrazeny nástroje pro hluboké tažení. Hlavní funkcí přidržovače je zabránit, toku materiálu mimo nástroje. Dále by měl při správně nastavené síle zabránit ztrátě stability a tím případným vadám. Kromě síly na přidržovači je zde řada dalších faktorů ovlivňující výslednou kvalitu výrobku. Patří sem například tribologický systém ovlivňující tření při tažení nebo správná volba přístříhu a jeho orientace vůči směru válcování. Působením tažníku na plech nedochází díky přidržovači k výrazné změně tloušťky, a tak může vnikat do tažnice, kde se vytvoří finální tvar výtažku. [1]

Hluboké tažení zahrnuje mnoho napěťových stavů a způsobů deformace. Vyskytuje se zde například ohybové napětí na okrajích tažnice, pod přidržovačem nebo ve stěnách a na dně výrobku se různě kombinuje tahové a tlakové napětí. Tato technologie patří k nejvyužívanějším v automobilovém průmyslu, jak již bylo zmíněno výše a výroba konečných karosářských dílů většinou probíhá na více operací kvůli složité geometrii výrobku. [2]

Z předchozího popisu je patrné, že se jedná o poměrně rozsáhlou problematiku, a proto je zapotřebí před nastavením procesu mít správně určené parametry. Užitečným nástrojem by měly být například numerické simulace, které by měly odhalit nedostatky v navrhovaných parametrech a zabránit tak vzniku různých vad.



obr. 1 Schéma tažení [2]

2 Numerické simulace plošného tváření a přehled softwarů

Numerické simulace se v dnešní době stávají nedílnou součástí různých průmyslových odvětví. Jedná se o mocný nástroj, který nachází uplatnění například ve vývoji nebo při optimalizaci různých výrobních procesů. Ovšem nelze numerické simulace chápat jako od začátku vyladěný a přesný prostředek, který bude dávat vždy správné výsledky. Ještě stále je nutné mít na paměti, že se jedná o nástroj, který bude natolik dobrý a přesný jako je jeho uživatel. Uživatel při vytváření numerické simulace musí dostatečně rozumět dané problematice a co je především důležité, musí použít správná vstupní data pro simulace. Materiálové hodnoty mají zásadní vliv na relevantnost výsledků, protože ovlivňují výpočty. Numerické simulace v mnohých případech pracují pomocí metody konečných prvků. Existují i simulace pomocí metody konečných diferencí, nebo metody konečných objemů. Kromě materiálových dat dále ovlivňují správnost výsledků definování působícího zátěžového cyklu, okrajové podmínky a kvalita diskretizace daného modelu.

Pro technologii plošného tváření může numerická simulace posloužit nejčastěji pro odzkoušení tvářecích nástrojů, jejichž prototypování a následné testování by bylo velmi finančně náročné. Dále je možné použít numerickou simulaci na zjištění tvářitelnosti různých dílů a jejich limity nebo pro optimalizaci tvářecího procesu. V neposlední řadě lze zjistit velikost odpružení materiálu po plošném tváření a pomocí simulace provést návrh kompenzace odpružení. Numerické simulace také mohou řešit stabilitu procesu, neboli jeho robustnost a zamezit tak riziku zmetkovitosti.

V následujících podkapitolách budou představeny základní metody numerických metod používané v simulačních softwarech a příklady některých simulačních softwarů pro plošné tváření.

2.1 Základní typy numerické simulace plošného tváření

V simulačních softwarech se může používat různých metod numerické simulace pro řešení problematiky plošného tváření. Existuje základní rozdělení na tři formulace metody řešení a do tří kategorií strategie řešení. Jedná se o metody dynamické explicitní a statické explicitní. Statické implicitní formulace se poté ještě navzájem kombinují s různými strategiemi řešení v kódech MKP programů. Strategie řešení mohou být inkrementální, jednokroková nebo metoda velkých kroků. [3]

2.1.1 Dynamická explicitní metoda

Jedná se o velmi robustní metodu, která je vhodná i pro komplexní problémy velkého rozsahu. Využití nachází především v simulacích zahrnujících dynamické efekty soustavy jako je matice setrvačných sil, tlumení a momenty hybnosti v simulacích nárazu nebo tzv „crash“ simulacích. Typický časový krok je v řádu mikrosekund a pro běžnou simulaci plošného tváření je počet časových kroků několik desítek tisíc. Aby bylo dosaženo úspěšných výsledků je zapotřebí modifikovat do explicitního procesu hustotu materiálu, rychlost úderu a historii zatěžování. Pomocí této metody lze simulovat lisovací proces pro odhalení defektů, ovšem je zapotřebí velmi zkušeného uživatele simulace, kvůli modifikaci zmíněných parametrů a volbě vhodné konečné prvkové sítě. Navíc při této metodě je zapotřebí věnovat zvýšenou pozornost při simulaci odpružení. Pro tyto účely se kombinuje dynamická explicitní metoda s kvazistatickou implicitní. [3], [4]

2.1.2 Statická explicitní metoda

Statická explicitní metoda nevyužívá iterační proces. Rovnice rovnováhy jsou splněny pouze ve stavu poměru, a výsledek se tak může značně lišit od skutečné hodnoty. Pro eliminaci chyb se volí velmi malý krok výpočtu. Jedná se o poměrně rychlou metodu, ale zase méně přesnou, proto se používá jen zřídka. [4]

2.1.3 Statická implicitní metoda inkrementální

Staticko-implicitní přístup se jeví jako ideální pro problematiku tváření kovů. Rovnice statické rovnováhy se řeší iterativně, což zajišťuje, že podmínky rovnováhy jsou splněny v každém kroku. V praxi jsou však nelineární problémy zahrnující hodně kontaktů a ty mohou vést k pomalé nebo nedostatečné konvergenci. Doba potřebná k řešení soustavy rovnic roste přibližně kvadraticky s počtem stupňů volnosti. Tato metoda může být použita pro přesnou simulaci odpružení nebo pro simulaci lemování. [3], [4]

2.1.4 Statická implicitní metoda s velkým krokem

Jedná se o přístup využívající velký přírůstkový časový krok. Tato metoda může být použita za předpokladu speciální úpravy kontaktů a využití algoritmu pro řešení nespojitého ohybu a adaptivního zjemnění sítě v potřebné lokalitě. Některé výsledky pouze aproximuje. Tyto specializované funkce jsou vhodné pro simulace tváření tenkých plechů, čímž činí kód efektivním. Například pro simulaci využívající informace o kontaktních nebo nekontaktních plochách není tato metoda vhodná, protože je omezena predikce zvrásnění plechu a vzpěru. [4]

2.1.5 Statická metoda jednokroková

V tomto přístupu se používá jediný časový krok. Za předpokladu lineární dráhy deformace a zanedbání historie kontaktů je možné použít jediný časový krok, který uvažuje proces deformace z konečné konfigurace součásti do počáteční konfigurace plochého polotovaru. Tato metoda zahrnuje výrazné zjednodušení, proto je její hlavní výhodou velmi krátká doba výpočtu a méně vstupních dat. Použití těchto kódů se uplatňuje ve fázi návrhu produktu, při absenci informací o lisovacích nástrojích. [3], [4]

2.2 Softwary pro numerické simulace plošného tváření

V následující části budou představeny nejznámější komerčně využívané softwary, které se používají v automobilovém průmyslu pro simulace plošného tváření.

2.2.1 AutoForm

Společnost AutoForm byla založena v roce 1995 ve švýcarském Curychu a od té doby se neustále rozrůstá. Svými inovacemi pro rychlou, a hlavně spolehlivou validaci inženýrských, vývojářských a výrobních procesů, společnost AutoForm nesmírně ovlivnila trh. Nabízené produkty jsou programy ve formě softwarového balíku, který obsahuje programy na různé operace jako například AutoForm-StampingAdviser, AutoForm-Explorer, AutoForm-Sigma, AutoForm-DieDesigner atd.

AutoForm patří mezi známé softwary pro simulace procesu tváření, které využívá především automobilový průmysl. Mezi hlavní výzvy firmy AutoForm v automobilovém průmyslu patří redukce emisí CO₂, spotřeby paliva a s tím související hmotnosti vozidla a snížení spotřeby materiálu na výrobu, ale také zvýšení bezpečnosti, digitalizace a implementace Průmyslu 4.0. Dále se AutoForm angažuje do elektrických a medicínských aplikací, leteckého průmyslu, ale také do průmyslu výroby tzv. bílých produktů v domácnosti.

V následujících odstavcích ve stručnosti shrnu některé možnosti, které AutoForm svým zákazníkům nabízí. Při návrhu nových dílů je velmi důležitá zpětná vazba o proveditelnosti. Důležité je, aby byla dodána spolehlivě, včas a srozumitelně. Analýza proveditelnosti se dělá v případě, kdy je k dispozici pouze geometrie nové součásti, ale nejsou k dispozici žádné informace o nástroji nebo výrobním procesu. AutoForm umožňuje rychle a snadno vyhodnotit proveditelnost dílu a také určit tvar polotovaru, využití materiálu a cenu polotovaru.

Další velmi důležitou oblastí použití softwaru AutoForm je při návrhu tvářecích nástrojů, nejčastěji zápustek. Tato problematika úzce souvisí s analýzou proveditelnosti dílu. Uživatel může zápustku, respektive její tvarové plochy navrhovat a odsimulovat přímo z CAD dat.

Kromě zmíněných oblastí je možné ještě simulovat kompletní tvářecí proces od hlavní tvářecí operace, až po ty vedlejší jako je odstříhávání nebo obrubování. Lze tak optimalizovat střížnou linii, redukovat zpětné odpružení a zabránit vzniku možných povrchových vad na výlisku.

Jako poslední možnost využití zde zmíním tvorbu digitálního dvojčete. Software AutoForm nabízí svým uživatelům digitální reprezentaci procesu, která slouží jako plán reálného fyzického procesu, ať už se jedná o zkoušení a výrobu výlisků či sestav BiW¹. Pokud by se ve fyzické výrobě vyskytl problém, je možné pomocí digitálního dvojčete určit jaké jsou zapotřebí zákroky ve fyzickém procesu. Software tak umožňuje předvídat, řídit a efektivně řešit problémy, čímž se dá snížit počet zkoušecích smyček ve fyzické výrobě. [5]

2.2.2 PAM-STAMP

Další ze softwarů pro numerickou simulaci plošného tváření je program od ESI group. Jedná se o program PAM-STAMP, který je součástí velkého softwarového balíku pod názvem PAM. Společnost ESI group (*Engineering Systems International*) byla založena v roce 1973 ve Francii. Mezi hlavní zaměření patří počítačové simulace pro automotive, letecký průmysl, vojenský průmysl a energetiku. Programy z balíku PAM řeší danou problematiku pomocí filozofie založené na přenosu informací o změnách fyzikálních vlastností mezi jednotlivými moduly numerické simulace technologických procesů tzv. *virtual manufacturing*, až po simulaci samotného výrobku tzv. *virtual prototyping*.

PAM-STAMP je dalším velmi známým softwarem pro simulace výrobních procesů tváření, návrhu nástrojů a optimalizaci výroby. Mezi procesy tváření, které PAM-STAMP umožňuje simulovat patří hluboké tažení, ohýbání, lisování do pryže nebo hydroforming plechů a trubek. Je možné provést validaci lisování jednotlivého dílu, ale také validovat

¹ Jedná se o anglickou zkratku *Body in White*, v Automotive se tak označuje sestava svařeného rámu karoserie.



sestav. Tvoří tak prostředek pro ověřování klíčových výrobních procesů a kompletaci sestav i sub-sestav všech plošně lisovaných dílů, jak z ocelí, tak i z neželezných kovů. [6]

Vstupními daty pro numerickou simulaci v PAM-STAMP je CAD model tvářecího nástroje a polotovaru. Automatický generátor poté v softwarovém prostředí převede vstupní geometrii na požadovanou výpočtovou síť. Diskretizovaný FE (*Finite element*) model je v grafickém prostředí pre-processoru doplněn potřebnými okrajovými podmínkami, definováním kontaktů a zatěžujícími podmínkami. PAM-STAMP pracuje s explicitní formulací metody konečných prvků při řešení pohybové rovnice rovnováhy vnitřních a vnějších sil. Uvažuje se také s nelineární deformační historií polotovaru. Materiálové chování během simulace je založeno na Hillově formulaci (Hill 1948) podmínky plasticity, která bere ohled na směrově závislou anizotropii plechu, vznikající během válcování. Pro simulace tváření hliníku je možné v programu zvolit Hillovu nekvadratickou podmínku plasticity (Hill 1990). Během simulace může být deformační zpevnování materiálu doplněno o citlivost na deformační rychlost. Díky znalosti deformační historie je možné do výpočtu zahrnout kritéria porušování soudržnosti plechu v průběhu tažení. PAM-STAMP umožňuje vizualizovat lokální překročení hraniční plastické deformace, ztenčení, či překročení křivky mezních deformací. Pro svou obecnou formulaci lze PAM-STAMP použít pro numerické simulace libovolné výrobní technologie plošného tváření. [6], [7]

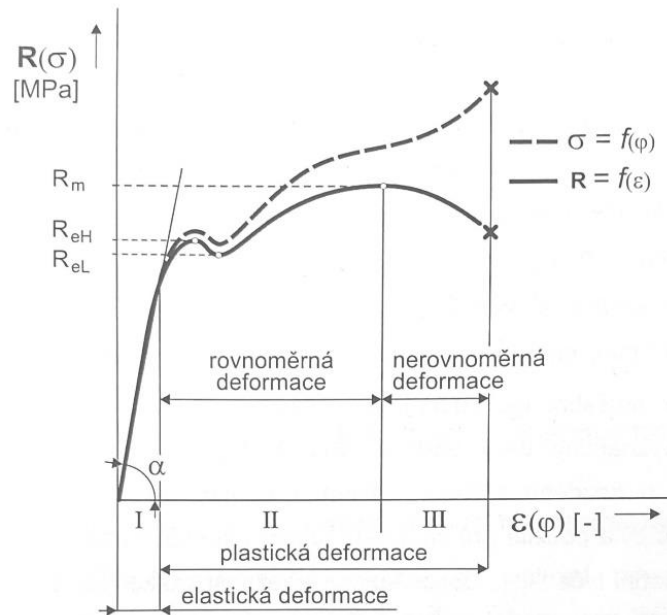
3 Materiálová karta - popis materiálových vlastností

Jak bylo již zmíněno, nutným předpokladem správného fungování a relevantních výsledků numerické simulace je správně nadefinovaná materiálová karta. Karta by měla obsahovat co nejpřesnější data, které byly získány z mechanických a technologických zkoušek příslušného materiálu. Níže jsou vypsané některé materiálové vlastnosti potřebné k vytvoření materiálové karty.

Materiálová data:

- Mez pevnosti
- Mez kluzu
- Youngův modul
- Tažnost
- Anizotropie
- Exponent deformačního zpevnění
- Zásoba plasticity
- FLC

Jedna z nejzákladnějších mechanických zkoušek je zkouška tahem, která nám poskytuje velmi důležité údaje o materiálu. Tato zkouška je normalizovaná a provádí se podle normy ČSN EN ISO 6892-1. Pomocí zkoušky tahem se získávají mechanické vlastnosti daného plechu pro plošné tváření. Lze naměřit běžné napět'ové a deformační charakteristiky (mez pevnosti, mez kluzu, tažnost, kontrakce), ale také je možné ze zkoušky tahem získat součinitel plošné anizotropie (Δr), součinitel normálové anizotropie (r) a exponent deformačního zpevnění (n). Pomocí těchto hodnot se může hodnotit tvářitelnost daného materiálu. Grafický záznam z této zkoušky je pracovní diagram, který je závislostí tahové síly vyvozené na trhačím stroji a přírůstku délky na zkušební vzorku, který je měřen například extenzometrem. Hodnoty jsou většinou přepočítány na smluvní napětí a poměrné prodloužení pro získání smluvního diagramu $R = f(\varepsilon)$, který však nebere v potaz změnu průřezu vzorku. Skutečný tahový diagram udává závislost $\sigma = f(\varphi)$ skutečného napětí na skutečné deformaci. [8], [9]



obr. 2 Porovnání smluvního a skutečného diagramu [9]

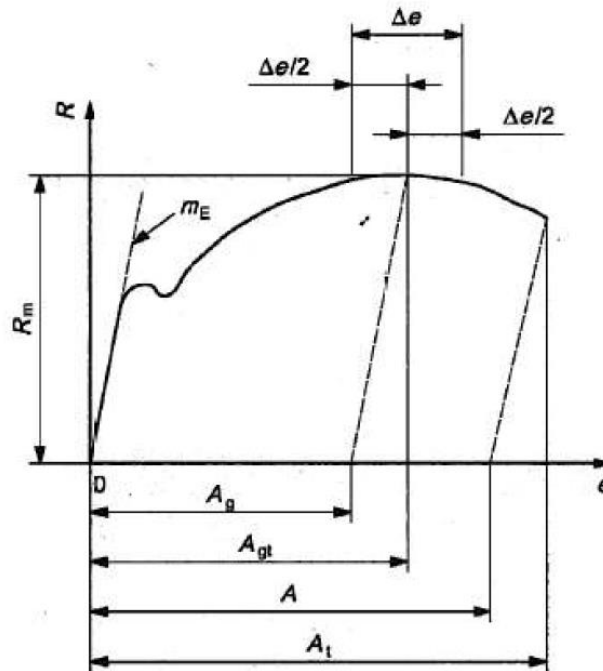
Mez pevnosti vyjadřuje nejvyšší napětí ve smluvním diagramu, kdy končí rovnoměrná deformace. Jedná se o smluvní napětí, které se vypočte jako podíl maximální síly změřené při zkoušce tahem a počátečního průřezu zkušebního tělesa. [10]

Mez kluzu vyjadřuje napětí, při kterém se materiál začíná trvale deformovat. Vypočte se jako podíl síly na mezi kluzu a počátečního průřezu zkušebního tělesa. Pokud materiál vykazuje výraznou mez kluzu, udává se jeho horní a dolní hodnota (R_{eH} , R_{eL}). Pokud však materiál výraznou mez kluzu nemá, tak se udává smluvní mez kluzu (např. $R_{p0,2}$), která odpovídá trvalé deformaci 0,2 %. [10]

Youngův modul E je materiálová hodnota, která udává, jak velký odpor klade daný materiál na působení napětí v oblasti elastických deformací. Modul pružnosti v tahu lze získat ze zkoušky tahem jako směrnici lineární části diagramu v oblasti platnosti Hookova zákona.

Tažnost materiálu je mechanický parametr určující procentuální poměr prodloužení zkušebního tělesa k jeho původní délce při tahovém namáhání. Většinou se ze zkoušky tahem, která končí přetržením zkušebního tělesa, určuje celková tažnost. Tažnost měříme buď na poměrových zkušebních tělesech s indexem 5,65 a 11,3 nebo na nepoměrových zkušebních tělesech kde index značí měřenou délku např. A_{80} . ΔL_u značí rozdíl délky měřeného úseku po přetržení a jeho původní délky. [9]

Pro tvářecí proces je však mnohem důležitější tažnost homogenní (A_g), která se uvádí méně často. Vyjadřuje plastické prodloužení v procentech pro homogenní plastické deformace, při maximálním zatížení. Hodnoty homogenní tažnosti se měří průtahoměrem, ale získávají se obtížně kvůli pozvolnému přechodu od rovnoměrné do nerovnoměrné plastické deformace. [11]



obr. 3 Smluvní diagram s plastickou tažností při zatížení A_{gt} [12]

3.1 Součinitel plastické anizotropie

Anizotropií ve válcovaném plechu se rozumí směrová nestejnoroďost vlastností. Jsou tím ovlivněny především mechanické vlastnosti polykrystalického materiálu. Anizotropie vzniká již při výrobě válcováním plechu v důsledku tepelného a mechanického zpracování polotovaru. Osa x se ztotožňuje se směrem válcování a označuje se indexem 0. Při posuzování anizotropie se materiál považuje za homogenní, ortogonálně anizotropní, který je charakterizovaný třemi ortogonálními osami anizotropie.

Zásadní vliv na anizotropii má textura polykrystalického materiálu, která se definuje jako pravidelné geometrické a krystalografické uspořádání struktury a substruktury. Vzniká, jak již bylo zmíněno během tepelného a mechanického zpracování. Takto vzniklá textura se nazývá deformační texturou. Lité polotovary pro tváření obsahují strukturální texture způsobenou přítomností různých vměstků a chemickou nehomogenitou. V průběhu válcování se tvárné vměstky protahují po směru válcování a spolu s netvárnými se

přeorientovávají do vláknité struktury. Takto vzniklá struktura nejde odstranit ani tepelným zpracováním. [13]

Součinitel plastické anizotropie (r) vyjadřuje odlišnost mechanických vlastností v rovině plechu a v rovině k ní kolmé. Definuje se jako podíl skutečného zúžení (φ_b) a skutečného ztenčení (φ_t) vzorku v oblasti homogenní plastické deformace viz rovnice (1). Z důvodu horšího měření změny tloušťky vzorku je díky zákonu o zachování objemu nahrazeno skutečné ztenčení výrazem $\ln\left(\frac{L_k \cdot b_k}{L_0 \cdot b_0}\right)$. [10], [13]

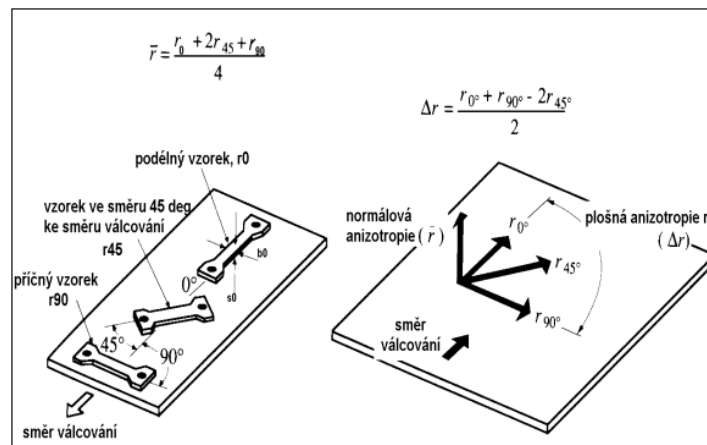
$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_t} = \frac{\ln \frac{b_0}{b_k}}{\ln \frac{t_0}{t_k}} = \frac{\ln \frac{b_0}{b_k}}{\ln \left(\frac{L_k \cdot b_k}{L_0 \cdot b_0} \right)} [-]$$

(1)

Kde:

$L_0, b_0, t_0 \dots$ počáteční délka, šířka, tloušťka vzorku [mm]

$L_k, b_k, t_k \dots$ konečná délka, šířka, tloušťka vzorku [mm]



obr. 4 Součinitele anizotropie a rozložení vzorků [13]

Vážený průměr součinitele plastické anizotropie (neboli normálová anizotropie) je určován ze směru 0°, 45° a 90° pomocí rovnice (2). [13]

$$\bar{r} = \frac{r_{0^\circ} + 2 \cdot r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4} [-]$$

(2)

Stupeň plošné anizotropie (neboli plošná anizotropie) popisuje nestejnorodost mechanických vlastností v rovině plechu. Vyjadřuje se jako součinitel plošné anizotropie (Δr) pomocí rovnice (3). [13]

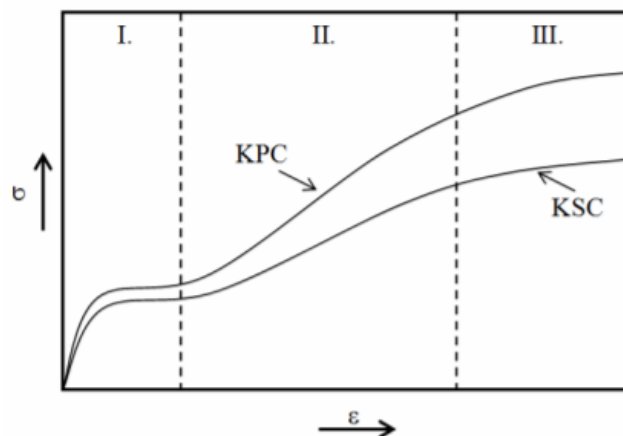
$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} - 2 \cdot r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{2} [-]$$

(3)

3.2 Deformační zpevnění materiálu

Plastická deformace je realizována pohybem dislokací, kdy rostoucí odpor materiálu proti jejich pohybu představuje deformační zpevnění. Čím je větší hustota dislokací, tím větší je i zpevnění materiálu. Tato hustota roste díky vzájemné interakci pohybujících se dislokací s různými překážkami. Pokud je materiál tvářen pod teplotou nižší, než je jeho teplota rekrystalizační, tak plastická deformace způsobí jeho deformační zpevnění. Tváření pod teplotou rekrystalizace materiálu je označováno jako tváření za studena. Pokud by se však tvářelo za teploty vyšší než rekrystalizační, došlo by k uzdravovacím procesům.

Jak již bylo zmíněno, pohyb dislokací je brzděn překážkami, mezi které se počítají precipitáty, disperzní částice, hranice zrn a subzrn, dislokační sítě a atomy příměsí. Mechanismy zpevnění materiálu jsou následně odvozeny jako dislokační zpevnění, zpevnění hranicemi zrn a subzrn, zpevnění legováním a zpevnění cizími částicemi. Při procesu tváření za studena se uplatní nejvíce zpevnění dislokační. [14], [15]



obr. 5 Porovnání zpevnění monokrystalu v závislosti na typu mřížky [14]



Materiál, který je tvářen za studena je intenzivně zpevňován a díky velkým tvářecím silám se značně mění jeho mechanické vlastnosti. Plastické vlastnosti (např. tažnost) se velmi zhoršují, kdežto ty pevnostní (např. mez kluzu, mez pevnosti) se zlepšují.

Deformační zpevnění se vyjadřuje pomocí exponentu deformačního zpevnění, který je možné získat např. ze zkoušky tahem. Vyjadřuje intenzitu zpevňování daného materiálu během působení plastické deformace. Jedná se o materiálový parametr, který velkou mírou ovlivňuje tvářitelnost materiálu. Figuruje také v matematickém popisu závislosti intenzity skutečného napětí na intenzitě skutečné deformace. Graficky se tato závislost vykresluje jako křivky zpevnění daného materiálu. Jeden z možných zápisů závislosti je pomocí rovnice (4) (Hollomon):

$$\sigma = C \cdot \varphi^n \quad (4)$$

Kde:

σ ... skutečné napětí [MPa]

C ... materiálová pevnostní konstanta [MPa]

φ ... skutečná deformace [-]

n ... exponent deformačního zpevnění [-]

Materiálová pevnostní konstanta C se rovná napětí, které odpovídá deformaci $\varphi=1$. Exponent deformačního zpevnění n udává tvar a strmost křivky zpevnění a s jeho rostoucí hodnotou materiál lépe odolává nerovnoměrné deformaci při namáhání tahem. Anizotropie materiálu ovlivňuje exponent n , proto se používá jeho aritmetický průměr viz rovnice (5) podobně jako u koeficientu anizotropie. [15], [16]

$$n_m = \frac{n_{0^\circ} + 2 \cdot n_{45^\circ} + n_{90^\circ}}{4} [-] \quad (5)$$

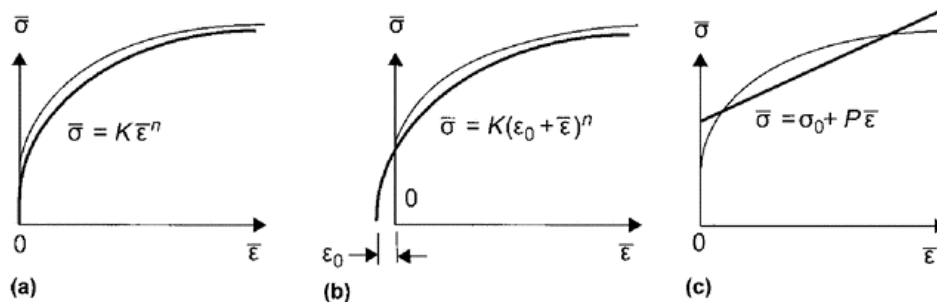
$n_m < 0,215$ nízká tažnost

$n_m = 0,215 - 0,25$ dobrá tažnost

$n_m > 0,25$ vynikající tažnost

Další aproximační popis zpevnění materiálu, který už byl dříve přetvořený o hodnotu deformace φ_0 je popsán pomocí rovnice (6) (Swift): [15]

$$\sigma = C \cdot (\varphi_0 + \varphi)^n \quad (6)$$



obr. 6 Aproximace křivky zpevnění a) Hollomon b) Swift c) Ludwik [15]

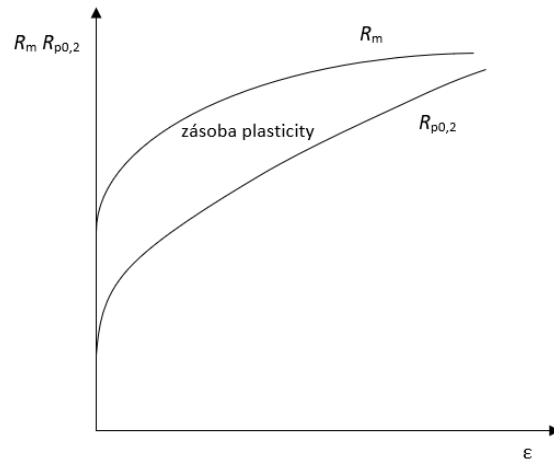
3.3 Zásoba plasticity

Jedná se o vlastnost, která je velmi důležitá pro proces plošného tváření. Již z názvu je patrné, že nám udává míru tváritelnosti materiálu, kdy ještě nedojde ke vzniku trhliny. Například materiály pro hluboké tažení už z principu technologie musí mít velkou zásobu plasticity. Udává se pomocí rovnice (7):

$$ZP = k \cdot (R_m - R_{p0,2}) \cdot \varepsilon_{\max} [MPa] \quad (7)$$

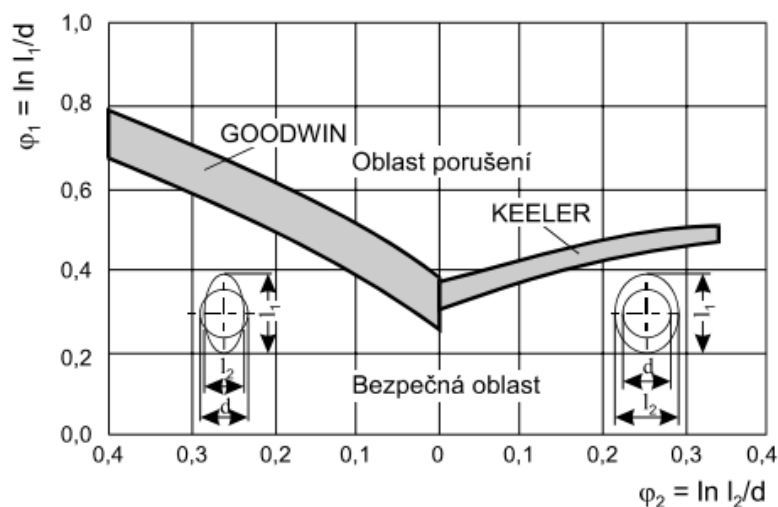
Koeficient k je závislý na materiálu, kdy pro materiály s výraznou mezí kluzu se rovná $3/4$ a pro materiály s nevýraznou mezí kluzu nabývá hodnoty $2/3$.

Zásobu plasticity lze získat pomocí hodnot ze zkoušky tahem. Hlavní roli zde hraje podíl meze kluzu a meze pevnosti. V případě, kdy se mez kluzu rovná mezi pevnosti je zásoba plasticity kompletně vyčerpána a materiál již nelze tvářet bez vzniku trhliny. V ideálním případě chceme, aby materiál pro hluboké tažení měl vysokou mez pevnosti a zároveň velmi nízkou mez kluzu. Na obrázku dále je vidět, jak se s rostoucím přetvořením zásoba plasticity zmenšuje. [10], [13]

obr. 7 Závislost R_m a $R_{p0,2}$ na přetvoření [13]

3.4 Diagram mezního přetvoření

Dalším velmi důležitým parametrem pro plošné tváření je zásoba plasticity tvářeného materiálu. Lze ji vyjádřit pomocí diagramu mezního přetvoření z angl. *Forming Limit Diagram (FLD)*. Diagram FLD se někdy nazývá podle autorů Keeler a Goodwin. První se zabýval limitním diagramem Keeler, ale uvažoval pouze kladné hodnoty deformace, a poté se přidal i Goodwin a doplnil tak diagram i do záporných hodnot. Zásoba plasticity kvantitativně udává schopnost materiálu se ještě deformovat bez toho, aby došlo k iniciaci trhliny. Ovlivňují ji jak technologické, tak i metalurgické vlastnosti materiálu. Je zřejmé, že platí závislost čím větší má materiál zásobu plasticity tím lépe je tvářitelný. Informace obsažené v diagramu limitního přetvoření jsou velmi důležité právě pro správné sestavení materiálové karty pro numerické simulace. Většina simulačních softwarů umožňuje nahrát právě data z měření zásoby plasticity. [13]

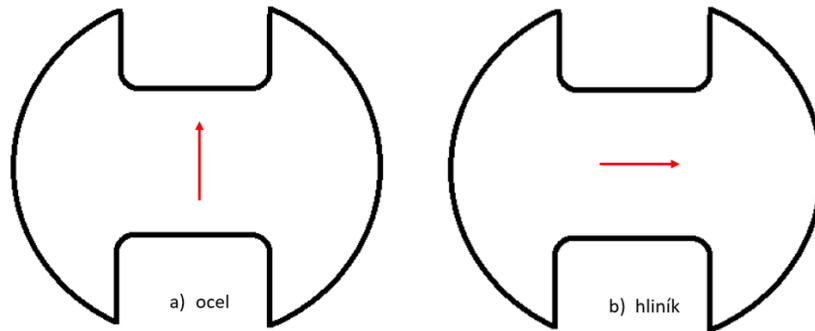


obr. 8 Keeler-Godwin FLD diagram [13]

FLD diagramy jsou v souřadnicích skutečné deformace, kdy na svislé ose je hlavní deformace φ_1 a na vodorovné ose je vedlejší deformace φ_2 . Jedná se tedy o limitní hodnoty v rovině hlavních deformací φ_1 - φ_2 . Stěžejním prvkem limitního diagramu je hranice oddělující oblast, kde jsou tzv. bezpečné deformace od oblasti, ve které dochází k iniciaci trhliny. Tato hranice je reprezentována křivkou limitní tvářitelnosti z angl. *Forming Limit Curve (FLC)*. Oblasti na křivce obsahují informace o hlavních deformacích pro různé druhy zatížení, které FLC křivka pokrývá. Jedná se zleva o hluboké tažení, jednoosý tah, rovinnou deformaci až po dvouosý tah na pravé straně křivky. [17]

Poloha FLC křivky je ovlivněna materiálem, jeho tloušťkou, exponentem deformačního zpevnění, mezí kluzu v tahu a součinitelem plastické anizotropie. Čím výše bude FLC křivka umístěna, tím bude větší oblast pro bezpečné tváření. Materiál pro plošné tváření bude mít větší zásobu plasticity s rostoucím exponentem deformačního zpevnění, součinitelem plastické anizotropie a tloušťkou polotovaru. Protichůdně působí mez kluzu v tahu, kdy naopak s rostoucí hodnotou bude mít menší zásobu plasticity. Dále se předpokládá, že i rychlost zatěžování má značný vliv na polohu FLC křivek. [18], [19]

Křivky mezního přetvoření lze podle normy ČSN EN ISO 12004-2 provádět různými způsoby. Jedním ze způsobů je provést měření podle Nakajimy a další možností je měření podle Marciniaka. Hlavním rozdílem v provedení zkoušky je použití dvou odlišných tažníků. Podle Nakajimy se používá půlkulový tažník s průměrem $100 \pm 2 \text{ mm}$. U metody měření dle Marciniaka se používá válcový plochý tažník o průměru $100 \pm 25 \text{ mm}$ se zaoblenými hranami o poloměru jedné desetiny průměru tažníku. Zkušební tělesa pro měření jsou plechy od tloušťky 0,3 mm do 4 mm, jejichž geometrie obsahuje rovnoběžný dřík, který má délku alespoň 25 % poloměru tažníku. Rádus u dříku je doporučován od 20 mm do 30 mm. U obou metod provedení zkoušek je důležité dbát na správnou polohu zkušebního vzorku vůči směru válcování. Norma zde udává zásadní rozdíl pro materiál ocel a hliník viz obr. 9. [17]



obr. 9 Rozdílné vzorky pro různé materiály [17]

Pro metodu zkoušení dle Nakajima ještě vyvstává problém se správnou polohou trhliny vzniklé při porušení plechu. Zkouška je platná pouze tehdy, když se trhlina nachází na vrcholu v oblasti do 15 % průměru tažníku. Jelikož se zde jedná o tažník ve tvaru polokoule, je zapotřebí pokud možno co nejvíce eliminovat negativní účinek třecích sil, které by brzdily plastickou deformaci od postupu na vrchol polokoule a trhlina by se iniciovala níže. Před každým měřením podle Nakajimy je důležité aplikovat tribologický systém, který je zapotřebí pomocí zkušeností a testování navrhnout pro specifický druh materiálu, protože nelze jednoznačně určit univerzální systém pro všechny typy materiálů. [17]

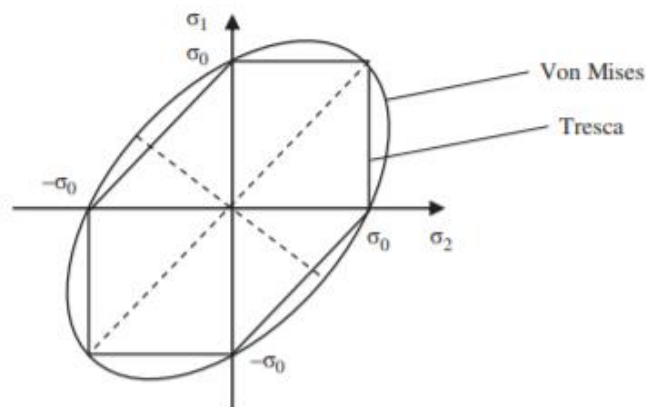
4 Materiálové modely plasticity

Ze základních kurzů pružnosti a pevnosti víme, že pro izotropní materiály se nejčastěji používá materiálových modelů s podmínkami plasticity buďto τ_{max} nebo HMM. Podmínka plasticity pro maximální smykové napětí, někdy nazývána jako Trescova, předpokládá přechod do plastického toku po překročení určité kritické hodnoty K viz rovnice (8). Energetická podmínka plasticity neboli HMM podle autorů Huber, Mises, Hencky, předpokládá plastický tok materiálu, pokud intenzita napětí vyjadřující energetickou hustotu překročí kritickou hodnotu viz rovnice (9). [20]

$$K = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (8)$$

$$K = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (9)$$

Na obrázku níže je grafické porovnání mezních ploch těchto dvou podmínek plasticity pro rovinné napjatosti.



obr. 10 Porovnání podmínek plasticity Tresca a HMM [20]

Jak již bylo popsáno v předešlých kapitolách, tak kovové materiály používané pro plošné tváření, nejčastěji polotovary ve formě válcovaných plechů, jsou anizotropní. V průběhu jejich výroby získávají určitou texturu. Proto se také musí používat příslušné materiálové modely zohledňující anizotropii mechanických vlastností daného materiálu. [20]

4.1 Hillovo kritérium

Historické Hillovo kritérium patří mezi první kritéria, uvažující anizotropii materiálu. V roce 1948 Rodney Hill přišel s kritériem popisujícím přechod na plastickou deformaci, které bylo zobecněním HMM podmínky plasticity. Toto kritérium zohledňuje anizotropii materiálu ve třech ortogonálních osách. Je vyjádřeno pomocí následující kvadratické funkce viz rovnice (10):

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 1 \quad (10)$$

V rovnici (10) f je funkcí plasticity a F, G, H, L, M, N jsou materiálové konstanty specifikující anizotropické vlastnosti. Směry ortogonálních os x, y, z jsou v případě plochého válcovaného materiálu chápány tak, že směr válcování je označen indexem 1, směr označen indexem 2 je na něj kolmý a poslední směr 3 je ve směru normály plošného polotovaru. Za pomoci meze kluzu v tahu pro jednotlivé směry ortogonálních os vyjádřené jako X, Y, Z lze získat koeficienty F, G, H . [20]

$$2F = \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2}; \quad 2G = \frac{1}{Z^2} + \frac{1}{X^2} - \frac{1}{Y^2}; \quad 2H = \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2} \quad (11)$$

Při použití smykového napětí na mezi kluzu R, S, T v jednotlivých osách je možné získat zbylé koeficienty L, M, N . [20]

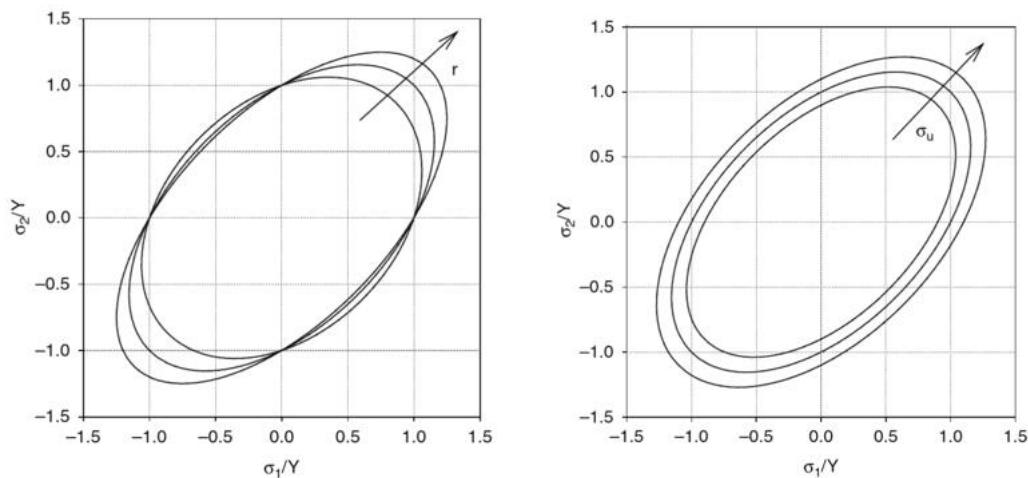
$$2L = \frac{1}{R^2}; \quad 2M = \frac{1}{S^2}; \quad 2N = \frac{1}{T^2} \quad (12)$$

Kompletní popis anizotropického materiálu podle Hillova modelu je možný pomocí šesti složek meze kluzu v jednotlivých osách anizotropie. Jak již bylo na začátku zmíněno, jedná se pouze o historické kritérium, které je v dnešní době nahrazováno novějšími. [20]

Vliv součinitele plastické anizotropie (r) a jednoosé meze kluzu (σ_u) na polohu mezní plochy je znázorněn na obrázku níže. Hillovo kritérium předpokládá, že elipsa ohraničující mezní plochu je vůči elipse dané von Misesovým kritériem:

- a) Vně pokud platí: $r > 1$; $\sigma_b > \sigma_u$

b) Uvnitř pokud platí: $r < 1$; $\sigma_b < \sigma_u$



obr. 11 Vliv r a σ_u na polohu mezní plochy [20]

Ještě zde zmíním krátce dvě Hillova kritéria. V roce 1979 přišel Hill s kritériem, které umožňuje popsat anizotropické chování materiálů jako jsou např. slitiny hliníku, u kterých se vyskytovaly tzv. anomálie. Za zvláštní vlastnosti materiálů se brala hodnota koeficientu anizotropie menší než jedna a zároveň se jejich mezní plocha nacházela vně mezní plochy podle von Misesa. Toto kritérium oproti kvadratickému kritériu bylo možné použít pouze pro plechy, nikoliv i pro tyče. Další kritérium bylo Hillm vydáno v roce 1990, kdy oproti tomu z roku 1979 jej bylo možné použít i v případech, kdy směry hlavních napětí nebyly koincidentní se směry ortotropních os. Zobecněním kritéria vyjádřením v obecném souřadnicovém systému se toto omezení vyřešilo. [20]

4.2 BBC kritéria

Pokročilá kritéria popisující anizotropní chování materiálů vznikaly díky vývoji nových materiálů především pro automobilový a letecký průmysl. Bylo možné vytvořit materiálový model, který by popisoval anizotropní chování kovů s BCC, FCC i HCP mřížkou. Jednalo se o různé druhy ocelí, slitin hliníku, a dokonce i slitin hořčíku. Další materiálový model je od autorů Banabic, Balan a Comsa. V roce 2000 byl zahájen výzkumný program, který měl za úkol vyvinout přesný model popisující plasticky přetvořený povrch predikovaný výpočty textury. Nová formulace viz rovnice (13) vycházela z původní izotropní formulace navržené Hersheyem. [20]

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^a + (\sigma_2 - \sigma_3)^a + (\sigma_3 - \sigma_1)^a = 2\sigma_u^a$$

(13)

Po přidání hmotnostních koeficientů k tomuto modelu se výzkumníkům podařilo vytvořit flexibilní kritérium plasticity. Poslední verze zahrnuje 8 mechanických parametrů: 3 jednoosé meze kluzu, 3 jednoosé koeficienty anizotropie, dvouosá mez kluzu a dvouosý koeficient plastické anizotropie. Mezi výhody BBC kritérií patří jednoduchost funkcí vyjadřující mezní stavy, schopnost přesně popsat mezní plochu a zároveň dobře předpovídají plošné rozložení jednoosé meze kluzu a jednoosého koeficientu plastické anizotropie. Další výhodou je, že výpočetní čas procesoru pro simulace komplexního procesu tváření není příliš velký. Materiálové modely využívající BBC kritéria lze použít i když je k dispozici méně než 8 mechanických parametrů. Nevýhodami jsou poměrně složitá formulace kritéria, vývoj 3D rozšíření je složitý a koeficienty nemají přímý fyzikální význam. [20]

Podle kritéria BBC 2005 se předpokládá, že se plech chová jako plasticky ortotropní membrána, která je zatěžována rovinným napětím. Na základě tohoto předpokladu je mezní plocha popsána následující rovnicí (14):

$$\Phi(\sigma_{\alpha\beta}, Y) = \bar{\sigma}(\sigma_{\alpha\beta}) - Y = 0 \quad (14)$$

Kde pro ekvivalentní napětí podle BBC 2005 platí $\bar{\sigma}(\sigma_{\alpha\beta}) > 0$ podobně jako pro mezní parametr $Y > 0$. Rovinné složky tenzoru napětí $\sigma_{\alpha\beta} = \sigma_{\beta\alpha}$ ($\alpha, \beta = 1, 2$) jsou vyjádřené v ortonormální bázi superponované na osy anizotropie (1=směr válcování; 2=příčný směr). [20]

Kritérium BBC 2005 nevynucuje žádná zvláštní omezení při volbě mezního parametru. Ve skutečnosti může jako Y vystupovat jakákoli veličina představující mez kluzu. Například jednoosé napětí na mezi kluzu vztažené ke směru definovaného úhlem měřeným od směru válcování, průměr několika jednoosých napětí v kluzu nebo dvouosé napětí v kluzu spojené se směrem válcování a příčným směrem. [20]

Dalším kritériem popisující plastické chování velmi anizotropních materiálů je BBC 2008, které vzniklo jako nová verze za účelem zvýšení flexibility výnosového kritéria BBC 2005. Model je vyjádřen jako nekonečná řada, kterou lze v závislosti na objemu experimentálních dat rozšířit tak, aby v ní zůstalo více nebo méně členů. K určení koeficientů funkce popisující mezní chování je možné použít různé strategie s 8, 16 nebo 24 vstupními hodnotami. Rovnice popisující mezní plochu je totožná jako u BBC 2005. [20]

4.3 Vegter kritéria

Dalším typem kritéria je Corus Vegter, které při tvorbě materiálových modelů uvažuje jejich anizotropní chování. Nese název po holandském autorovi Henku Vegterovi. Toto kritérium meze kluzu je konstruováno pomocí naměřených dat referenčních bodů a gradientů. Aby bylo možné dostatečně přesně popsat chování materiálu při mezi kluzu jsou provedeny měření při různém stavu napětí. Referenční body jsou získány z měření:

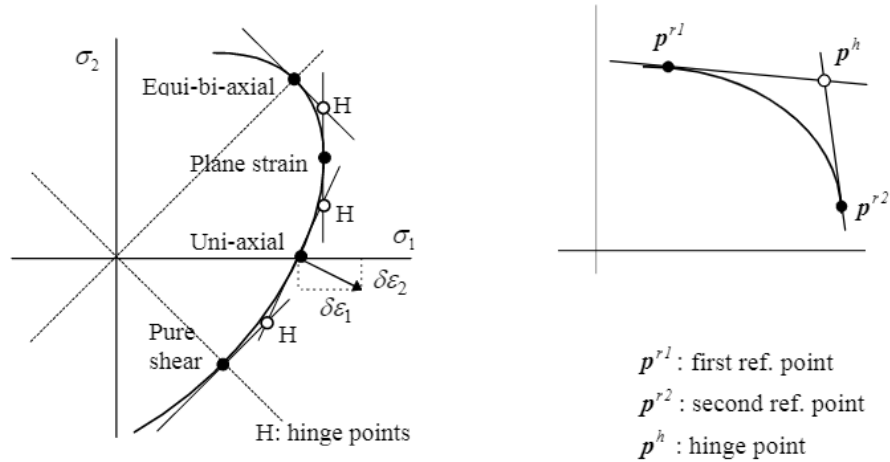
- Zkouška tahem (*tensile test*) - jednoosé namáhání
- zkouška smykového namáhání (*shear test*) – čisté smykové namáhání
- zkouška rovinné deformace (*plane strain test*) - rovinná deformace
- zkouška vypínání (*bulge test*) - rovnoměrného dvouosého namáhání

Gradients vyjadřují vztah k deformačnímu zpevnování materiálu. Mezní plocha Vegterova kritéria je sestrojena pomocí Beziérovu interpolace mezi dvěma referenčními body. Je popsáno následující rovnicí (15):

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{pmatrix} = (1 - \lambda)^2 \cdot \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{pmatrix}_i^r + 2\lambda \cdot (1 - \lambda) \cdot \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{pmatrix}_i^h + \lambda^2 \cdot \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{pmatrix}_{i+1}^r \quad (15)$$

Kde λ je parametrem pro Beziérovu interpolaci, i je číslováním pořadí referenčních bodů a horní indexy r a h odpovídají referenčnímu (tzv. „reference point“) a kloubovému bodu (tzv. „hinge point“). [21], [22], [23]

Pokud se provede měření referenčních bodů pod různými úhly vůči směru válcování např. 0° , 45° a 90° , je možné dostat plně anizotropní mezní plochu pro válcovaný materiál. Kloubový bod je získán protnutím tečen Beziérovu křivky dvou referenčních bodů. Kromě hodnot napětí v těchto bodech se při konstrukci tečny berou v úvahu také vektory deformace, které mají normálový směr na mezní plochu. [21], [22], [23]



obr. 12 Mezní plocha podle různých typů zatížení a Beziérova interpolace [21]

Pro získání bodů meze kluzu v libovolném úhlu natočení vůči směru válcování se používá kosinová interpolace referenčních bodů a vektorů deformace. [21], [22], [23]

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{pmatrix}_i^r = \sum_{j=0}^{m \cos} \begin{pmatrix} a_1^j \\ a_2^j \end{pmatrix}_i \cdot \cos(2j\varphi)$$

(16)

$$\rho_i(\varphi) = \sum_{j=0}^{m \cos} b_i^j \cdot \cos(2j\varphi)$$

(17)

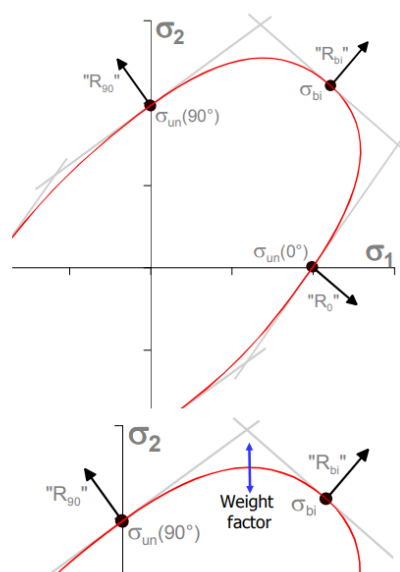
Kde parametr $m \cos$ je počet kosinových členů použitých pro rozšíření referenčních bodů nebo vektorů deformace. Členy a_1^j a a_2^j jsou parametry pro kosinovou interpolaci, které se mají určit pro referenční body. Úhel φ je úhel mezi hlavními osami rovinného napětí a hlavními osami anizotropie. Vektor deformace $\rho_i (= \delta\epsilon_2/\delta\epsilon_1)$ je vektor v referenčních bodech a b_i^j je parametr pro kosinovou interpolaci, který se má určit pro vektor deformace. Běžná hodnota pro parametr $m \cos$ je 2, což znamená možnost získat data pro tři různé úhly od směru válcování a to odpovídá každých 45°. Referenční body byly zvoleny tak, aby měly buď pevný stav napětí, nebo pevný stav deformace. Bod jednoosé a dvouosé rovnoměrné napjatosti mají pevný stav napětí, zatímco bod rovinné deformace a čistého smyku mají pevný stav deformace. Tato volba vede k tomu, že v každém referenčním bodě je potřeba maximálně dvě neznámé. V případě anizotropie, která se vyznačuje tvorbou čtyř uch je tedy pro toto kritérium třeba určit 17 parametrů provedením 9 různých mechanických zkoušek.

Corus Vegter Lite je materiálový model, který vychází z původního modelu Corus Vegter. Jedná se o zjednodušenou verzi, ve které je méně parametrů než v původní verzi. Používá se menší počet referenčních bodů a počet parametrů se snižuje na devět. Minimální počet požadovaných zkoušek je čtyři; kdy tři z nich jsou zkoušky tahem a pak *bulge test*. Referenční body v tomto kritériu meze kluzu jsou použity pouze pro jednoosé namáhání a dvouosé rovnoosé namáhání. V modelu Corus Vegter Lite je Beziérova interpolace 2. řádu nahrazena Nurbovou interpolací 2. řádu viz rovnice níže. [21], [22], [23]

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{pmatrix} = \frac{(1-\lambda)^2 \cdot \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{pmatrix}_i^r + w2\lambda \cdot (1-\lambda) \cdot \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{pmatrix}_i^h + \lambda^2 \cdot \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{pmatrix}_{i+1}^r}{(1-\lambda)^2 + w2\lambda \cdot (1-\lambda) + \lambda^2}$$

(18)

Nurbsovo interpolace 2. řádu je v porovnání s Beziérovou interpolací 2. řádu, použitou v původním kritériu, o trochu více matematicky komplexnější a tudíž i složitější. Dalším rozdílem je zavedení w váhového faktoru, který řídí polohu křivky mezi referenčními body. Při změně tohoto váhového faktoru lze řídit polohu referenčních bodů rovinné deformace a bodů pro čistý smyk, jak je znázorněno na obrázku níže. Pro anizotropický materiál, kde se tvoří tzv „čtyři uši“ při hlubokém tažení, je zapotřebí znát pět hmotnostních faktorů. Tři v oblasti rovinné deformace w_{ps} pro úhly 0° , 45° a 90° a dva pro oblast čistého smyku, kde díky symetrii tahu a tlaku při zkoušce smyku postačí w_{sh} pro úhly $0^\circ(90^\circ)$ a 45° . [21], [22], [23]



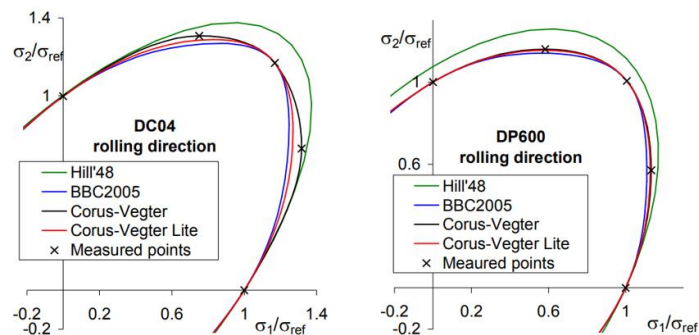
obr. 13 Mezní plocha Corus Vegter Lite a Nurbsova interpolace [22]

Jako další výhodu oproti původnímu kritériu lze brát, že hodnoty bodů rovinné deformace a čistého smyku jsou nyní vztaheny pouze k referenčním bodům jednoosého a dvouosého rovnoměrného namáhání. Na základě zkušeností z mnoha zkoušek různých materiálů se pro oceli a hliník mohou používat konstantní hodnoty těchto váhových součinitelů. [21], [22], [23]

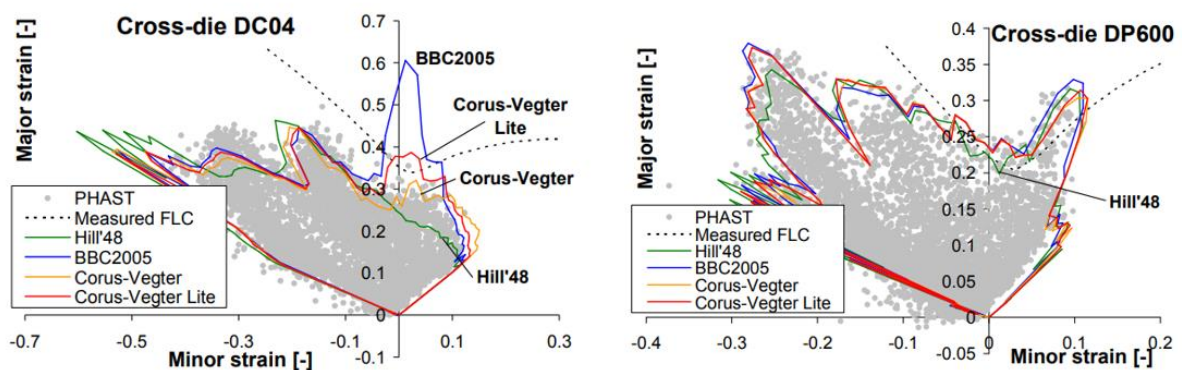
- Ocel: $w_{ps} = w_{sh} = 0,6667$
- Hliník: $w_{ps} = 0,4125$; $w_{sh} = 0,75$

Další možností je získat pět jednotlivých hmotnostních faktorů z provedení zkoušek pro námi požadovaný materiál. Model Vegter Corus Lite je výhodný, protože dosahuje podobné přesnosti jako jeho předchůdce a navíc je k jeho sestavení potřeba mnohem méně vstupních dat. [21], [22], [23]

Na následujících obrázcích je ukázáno porovnání různých materiálových modelů použitých při validaci numerické simulace plošného tváření z [23].



obr. 14 Porovnání mezních ploch pro 2 různé materiály měřené ve směru válcování [23]



obr. 15 Porovnání limitních diagramů pro 2 různé materiály [23]



Materiálový model Vegter 2017, který pochází z rodiny kritérií Vegter, je velmi praktickým a především přesným modelem plasticity. Vstupní data do materiálové karty lze tak jednoduše získat pouze ze zkoušek tahem a zkoušky podle Nakajima. Ze zkoušky tahem se získají jak informace o mezi kluzu, tak i koeficienty plastické anizotropie r_0 , r_{45} , r_{90} . Výsledky ze zkoušky podle Nakajima se použijí pro sestavení mezní křivky tváření (FLC). Aby se jednalo o spolehlivý model, byla zjištěna korelace mezi mechanickými vlastnostmi tahových parametrů a pokročilými parametry. Tím vznikl soubor rovnic, který dokázal přesně předpovědět mez kluzu. Model byl ověřen porovnáním předpovězené mezní plochy elasticity s mezní plochou získanou z údajů ze zkoušek. [24], [25], [26]

5 Optické systémy pro měření přetvoření plechu

V technické praxi se deformace poddajných těles dají měřit několika různými způsoby. Může se jednat o kontaktní a bezkontaktní způsoby měření. Záleží na požadované měřené veličině. Například lokální 1D prodloužení během jednoosé napjatosti lze měřit pomocí tenzometrů, které nachází využití i při dalších typech zatěžování. V případě, kdy je zapotřebí snímat prostorovou globální deformaci 3D tělesa je zapotřebí využít optické systémy, které dokážou mnohem snadněji zaznamenávat deformace na celém povrchu zatěžované součásti. Díky optickým snímacím systémům lze získávat důležité informace o přetvoření materiálu během procesu lisování. Tyto informace je možné následně využít při vývoji lisovaných výrobků a odzkoušení jejich nástrojů. V následujících podkapitolách bude vysvětlen princip digitální korelace obrazu pro měření deformací. Dále budou představeny dva optické systémy pro měření přetvoření plechů. Jedná se o produkty společnosti GOM, která od poloviny roku 2019 spadá pod německou Zeiss group. Hlavní specializací GOM je především oblast optického 3D měření, skenování, výpočetní tomografii a také testování.

5.1 DIC

Zkratka DIC je anglickou zkratkou pro *Digital Image Correlation* neboli digitální korelaci obrazu. Jedná se o velmi využívanou optickou metodu pro měření deformací, posuvů a šíření trhlin napříč různými odvětvími průmyslu. Tato metoda může být využita jak pro 2D, tak i pro 3D měření.

5.1.1 Princip metody

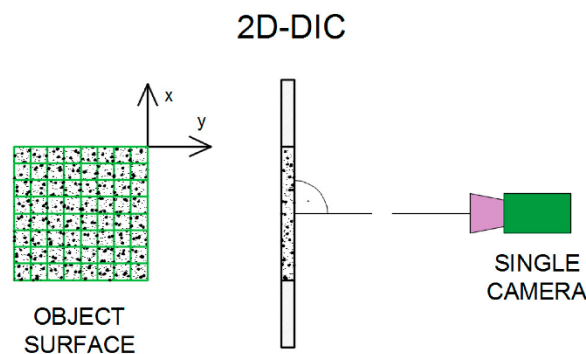
Metoda spočívá v porovnávání digitálních snímků testovaného objektu pořízených v reálném čase zatěžování. Snímky jsou nejčastěji pořizovány pomocí fotoaparátu s CCD nebo CMOS čipem. V některých případech je žádoucí, aby povrch sledovaného objektu byl upraven nanesením náhodných kontrastních značek. V průběhu zatěžování se budou spolu s povrchem součásti deformovat i tyto značky, čímž se následně získá informace o posuvech. Nanesení jedinečného vzoru lze provést nejjednodušeji nástřikem pomocí spreje. Barva by měla být kontrastní a zároveň dostatečně přílnavá, aby se v průběhu zatěžování dobře deformovala spolu s objektem. Povrch objektu se poté rozdělí virtuální mřížkou a vytvoří se podoblasti.

Subset neboli podoblast bodu slouží k určení přesného posunutí námi vybraného bodu. Snímaný bod se nachází uprostřed podoblasti. Poté následuje korelace obrazu pomocí numerického algoritmu, který zpracovává barevnost pixelů v subsetech. Přesnost měření

může být na úrovni pixelové, ale to je pro spoustu oblastí nedostačující, protože kdybychom porovnávali pouze pixely, tak v celém obraze je spousta shodných pixelů a nebylo by možné správně určit posuv. Z toho důvodu se používá sub-pixelová úroveň přesnosti. Sub-pixelová úroveň znamená, že se pro vyhodnocení posunutí bodu využije i jeho okolní podoblasti. [27]

5.1.2 2D DIC

Digitální korelace obrazu pro měření deformací v rovině se zkráceně nazývá 2D DIC. Pro snímání postačí jeden přístroj, který bude umístěn v normále roviny snímaného objektu viz obr. 16. Jelikož se jedná o monokulární snímání, je zapotřebí zajistit, aby poloha fotoaparátu vůči objektu zůstala konstantní po celou dobu měření.

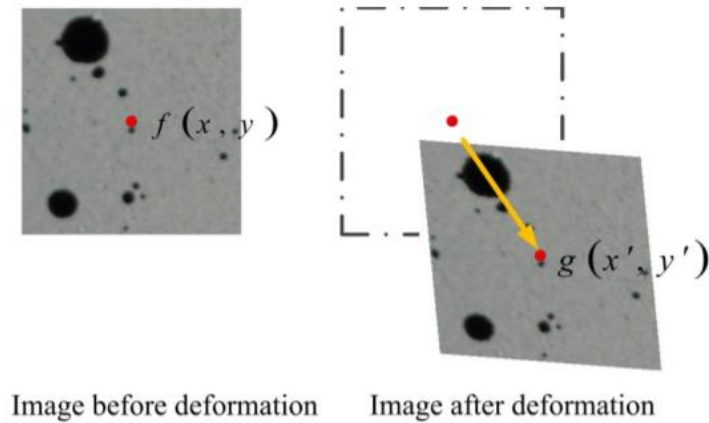


obr. 16 Schéma 2D DIC [28]

Obraz pořízený před zatížením je referenční a je dále porovnáván s obrazy zdeformovaného objektu pořízenými v určitém časovém intervalu. Na referenčním obraze se nadefinuje subset, který nás zajímá a v něm se vygeneruje mřížka. Subset se skládá z čtvercové matice pixelů, například 7x7 pixelů. Jednotlivé pixely mohou nabývat různých hodnot intenzity mezi černou a bílou. Například u 8bitové hloubky obrazu bude intenzita nabývat hodnot od 0 do 256. Ve středu se nachází námi pozorovaný unikátní bod. Čím větší bude subset, tím přesnějších výsledků dosáhneme, ale za cenu dlouhé doby výpočtů. Jedno z možných korelačních kritérií je SSD (z angl. *sum-squared difference*) kritérium. Princip spočívá v nalezení minima sumy čtverců diferencí intenzit jednotlivých pixelů viz rovnice (19). Funkce $f(x_i, y_j)$ vyjadřuje hodnotu intenzity referenčního bodu (x_i, y_j) a funkce $g(x'_i, y'_j)$ hodnotu intenzity bodu po deformaci (x'_i, y'_j) viz obr. 17.

$$C_{SSD} = \sum [f(x_i, y_j) - g(x'_i, y'_j)]^2$$

(19)

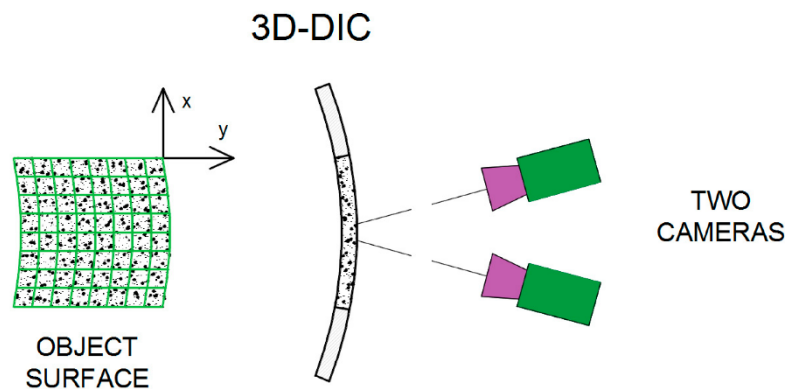


obr. 17 Princip obrazové korelace [27]

Korelační kritérium C_{SSD} lze obdržet použitím například algoritmu Newton-Rhapsonovy iterační metody, kdy vstupní údaje jsou informace o posuvech středového bodu subsetu v deformovaném stavu. Dalšími algoritmy pro získání korelačního kritéria jsou fitační metoda přiřazení známé korelační funkce nebo interpolace intenzity šedi. [27], [28], [29], [30]

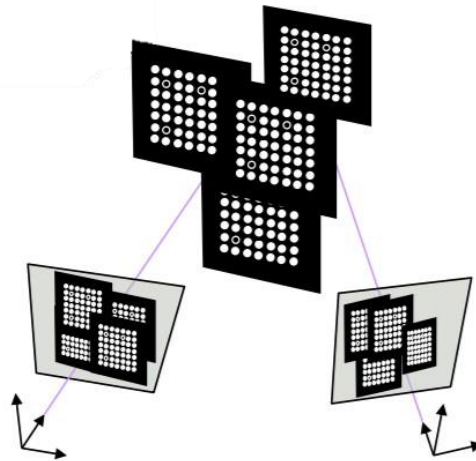
5.1.3 3D DIC

3D DIC je digitální korelace obrazu, která umožňuje měřit deformace mimo rovinu v prostoru. Vybavení pro měření se oproti 2D DIC liší tím, že se místo jedné CCD kamery používají dvě viz obr. 18. Je tak možné měřit různé prostorové deformace nebo zakřivení, ale pouze na povrchu snímaného objektu, kam jsou obě kamery fokusovány.



obr. 18 Schéma 3D DIC [28]

Pro měření je zapotřebí kamery nejprve zkalibrovat pomocí kalibračních prvků ve formě různých mřížek viz obr. 19. Oproti 2D DIC je délkové měřítko deformací spojeno s fyzickým prvkem namísto přepočítaného délkového měřítka mezi velikostí pixelu a obrázku. [27], [28], [30]



obr. 19 Kalibrace 3D DIC [30]

5.2 ARGUS

ARGUS je optický systém, který byl vyvinut společností GOM na snímání a vyšetřování deformací během plošného tváření plechů. Systém ARGUS je hodně využíván v automobilovém průmyslu, kde se často tváří součásti z plechů. Pod totožným názvem ARGUS nabízí firma GOM kromě bezkontaktního měřicího systému také software, který následně zpracovává data z měření. Pod optickým systémem ARGUS se skrývá kvalitní certifikovaný fotoaparát používaný na fotogrammetrii, kterým lze získat snímky s vysokým rozlišením. Lze snímat jak malé, tak i velké objekty. Další nedílnou součástí jsou kódované značky-tzv. kameny viz obr. 20, které se pomocí magnetů rozmístí na vylisovaný objekt nebo se rozmístí do jeho blízkosti a dále ještě kalibrační měřky. Kalibrační měřky slouží na pořízených fotografiích jako reference vzdálenosti. [31]



obr. 20 Kódované značky a kalibrační [31]

Na měřený díl je nutné nejprve nanést měrnou síť bodů. Poté co je na díle nanesena měrná síť, ať už laserem nebo elektrochemicky, následuje proces tváření. Po dokončení

tváření se nasnímá povrch dílu z různých úhlů pomocí fotoaparátu a zdeformovaná měrná síť se v softwaru ARGUS vyhodnocuje. Ve všech pořízených snímcích jsou 2D souřadnice všech bodů matematicky odvozeny a přepočítány na 3D souřadnice pomocí principů fotogrammetrie, s přihlédnutím k průsečíkům paprsků, poloze kamery a zkreslení čočky. Hlavním výsledkem je jemné mračno mnoha bodů, které představují 3D povrch plechového dílu. Vyhodnocením relativní vzdálenosti mezi body v kombinaci s lokálním výpočtem tenzoru rovinné deformace se následně stanoví celková deformace na povrchu dílu. Výsledky ve formě barevných deformačních map na geometrii součásti lze dále použít pro vyhodnocení tvářecího procesu vzhledem k limitnímu diagramu FLD, nebo lze pomocí naměřených hodnot tento diagram sestavit. [31]



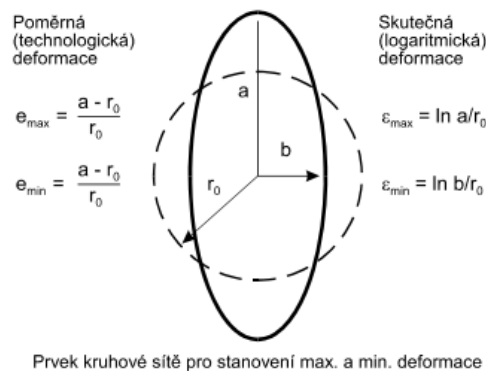
obr. 21 Měření vylisovaného dílu pomocí systému ARGUS [31]

5.2.1 Metoda měření deformace pomocí měrných sítí

Pomocí této metody lze vyhodnocovat deformace na plošně tvářených dílech. Princip spočívá v tom, že na povrch námi zkoumaného dílu je nanesen určitý vzor neboli z anglického jazyka „*pattern*“, který se po deformaci vyhodnocuje. Jedná se tedy o zkoušku kvantitativní, která popisuje tok materiálu při jeho přetvoření. Předpokladem pro použití měrných sítí je, že materiál, pro plošné tváření většinou plech, se bude deformovat pomocí rovinné napjatosti. Při lokální akumulaci rovinné napjatosti v místech, kde je největší deformace poté dojde k porušení materiálu.

Pro metodu sítí je nejvýhodnější použít jako elementy sítě kružnice, protože se po přetvoření zdeformují na elipsy. Existují různé typy sítí s kruhovými elementy. Pomocí

hlavní a vedlejší osy elipsy, lze poté snadno určit směr působení hlavního a vedlejšího napětí viz obr. 22. [13]



obr. 22 Vyjádření deformace kruhového prvku [13]

Sítě jsou na povrchu součásti vytvářeny různými metodami, ale ve výsledku je důležité, aby byly dostatečně kontrastní a odolné proti poškození během tváření. Kontrast a čitelnost sítě je důležitá kvůli následnému optickému měření. Další podmínkou pro nanesené měrné sítě je co nejmenší ovlivnění tvářecího procesu. V optimálním případě by plech s měrnou sítí vykazoval totožné výsledky sil mezi výliskem a tvářecím nástrojem jako tentýž plech bez sítě. [13]

Výběr metod vytváření sítě:

- Rytí
- Ražení
- Sítotisk
- Fotochemické leptání
- Elektrochemické leptání
- Laser

Při rytí a ražení se mechanicky poškozuje povrch součásti, což může vést k iniciaci trhlin. Sítotiskem lze jednoduše a levně vytvářet sítě na různých materiálech a nepoškozuje se tím povrch součásti. Nevýhodou je nižší odolnost takovéto sítě vůči otěru. Fotochemické leptání je další přesnou metodou tvorby sítě. Vzor sítě je nejprve připraven pomocí UV vytvrditelné emulze na povrchu, respektive jeho pozitiv a následuje poté leptání velmi tenké povrchové vrstvy kovu. Elektrochemické leptání je poměrně rozšířenou variantou, protože se jedná o rychlou metodu s dobrou kvalitou vytvořené sítě. Použití laseru při tvorbě sítě lze

využit pro vynikající přesnost sítě, avšak za nejvyšší náklady. V tabulce 1 je z [32] kvalitativní porovnání metod, které mechanicky výrazně neovlivňují povrch. [13], [32]

Tabulka 1 Kvalitativní porovnání metod vytváření měrné sítě [32]

Metody vytvoření sítě	Sledované parametry								
	Přesnost	Rozlišení a kontrast	Stálost, odolnost	Odolnost proti otěru a mazivu	Teplotní odolnost	Použitelnost na různé materiály	Finanční náklady	Časová náročnost	Použitelnost na velké povrchy
Elektrochemické leptání	A	B	A	A	A	D	C	A	C
Sítotisk	B	A	A	B	C	A	A	A	C
Fotochemické leptání	B	B	C	B	C	A	D	D	D
Laser	A	A	A	A	A	C	D	D	A

A = Výborný B = Dobrý C = Průměrný D = Dostatečný

5.3 ARAMIS

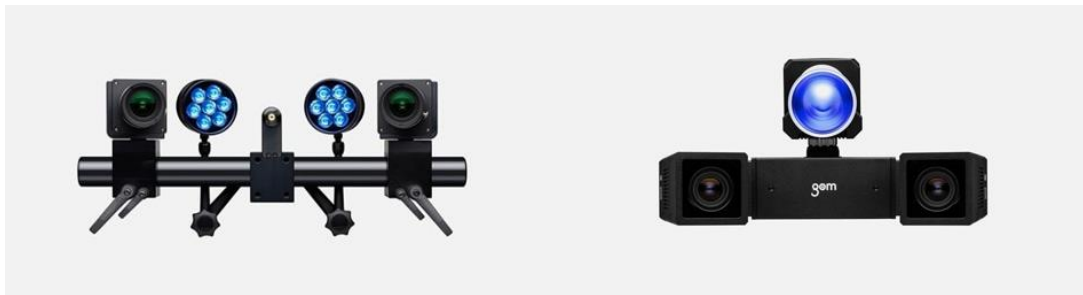
ARAMIS představuje další možnost bezkontaktního optického zaznamenávání deformací. Opět se jedná o produkt společnosti GOM. Nachází využití napříč průmyslovým odvětvím.

Aplikace využití systému ARGUS a ARAMIS:

- Ověřování numerických simulací
- Zjišťování kritických oblastí
- Řešení komplexních problémů tváření
- Optimalizace tvářecího procesu
- Ověřování tvářecích nástrojů
- Přejímka dávek materiálu

Systém ARAMIS se od systému ARGUS liší hned v několika případech. U systému ARAMIS není zapotřebí pravidelná měrná síť, ale vystačí si pouze se stochasticky vytvořenou sítí, která může být vytvořena například pomocí barev ve spreji. Přístroj pro snímání je 3D kamera, která pracuje na principu digitální korelace obrazu. 3D kamera je přístroj, který se skládá ze dvou kamer vzdálených od sebe o určitou vzdálenost na

společném rameni. GOM nabízí také modulární provedení systému ARAMIS Adjustable, které lze podle potřeby snadno adaptovat pro různé analýzy viz obr. 23. [33], [34]



obr. 23 ARAMIS Adjustable (vlevo), ARAMIS 3D Camera (vpravo) [33]

Pomocí nejnovějších 12 megapixelových kamer je možné měřit jak malé deformace, tak i lokální deformace na velkých sestavách s vysokým prostorovým rozlišením. Snímat lze povrch od 10 mm^2 do 5 m^2 . Oproti tenzometrům měří deformaci geometrie skutečného objektu. Výsledkem měření jsou deformace z povrchu objektu, které následně mohou sloužit pro vyhodnocování například záznamu napětí a deformace nebo různých materiálových vlastností jako je Youngův modul pružnosti, Poissonův poměr, modul pružnosti ve smyku nebo sestavení FLC křivek. Dále je možné ARAMIS použít pro analýzu vibrací, únavové zkoušky nebo nárazové testy. Před měřením je zapotřebí, aby povrch objektu byl pokryt náhodnými body, jak bylo popsáno v kapitole o DIC. Před začátkem měření se provede kalibrace kamer. Systém ARAMIS umožňuje snímání deformací z povrchu v reálném čase během zatěžování, čímž se zásadně odlišuje od systému ARGUS. Podobně jako u systému ARGUS je od společnosti GOM k dispozici také software pro následné zpracování výsledků z měření systémem ARAMIS. Lze tak ověřovat spolehlivost numerických simulací a optimalizovat tak různé výrobní procesy nebo produkty. [33], [34]



obr. 24 Měření pomocí systému ARAMIS [34]

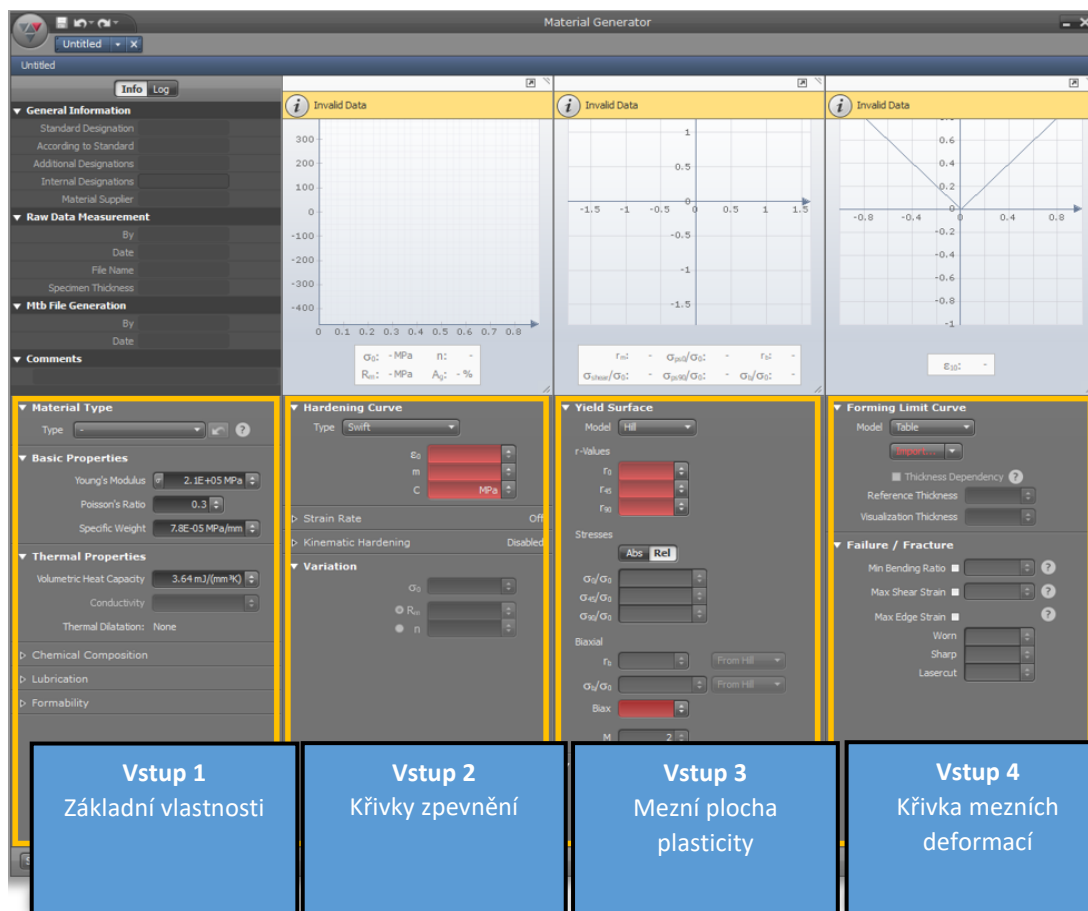
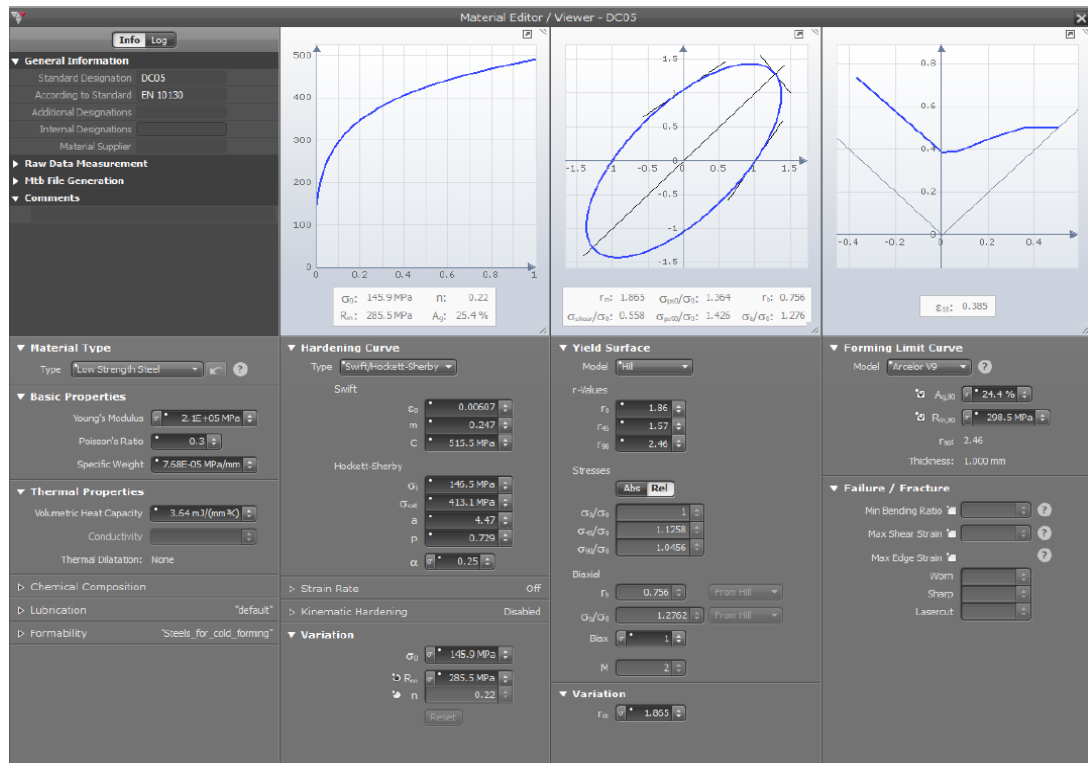
6 Návrh experimentu

Jelikož je cílem práce sestavení materiálové karty pro numerické simulace plošného tváření, tak je zapotřebí získat určitá materiálová data. V teoretické části práce byly popsány vstupní data pro tvorbu materiálové karty. Dále je zapotřebí zvážit, jak jsou tato data vstupující do numerických simulací v korelaci s reálným chováním materiálu při lisovacím procesu.

Pro získání požadovaných dat bude provedeno měření mechanických vlastností dané materiálové jakosti pomocí zkoušky tahem dle ČSN EN ISO 6892-1 a zkoušky dle Nakajimy dle ČSN EN ISO 12004-2. Aby bylo možné se v numerické simulaci přiblížit podmínkám a chování materiálu v reálném procesu, je zapotřebí naměřit data při vyšších rychlostech přičnku, respektive zatěžování, než doporučují příslušné normy. Pro příklad norma ČSN EN ISO 12004-2 předepisuje rychlost tažníku $1,5 \pm 0,5$ mm/s. Takové rychlosti však neodpovídají snaze dosáhnout co nejvyššímu výrobnímu taktu v sériové výrobě. Z tohoto důvodu budou zkoušky měřeny při příslušných rychlostech:

- Zkouška tahem: 10 mm/min; 50 mm/min; 100 mm/min; 200 mm/min; 500 mm/min; 600 mm/min
- Zkouška dle Nakajimy: 2 mm/s; 17 mm/s

Výsledkem z měření budou křivky zpevnění pro různé rychlosti zatěžování a samozřejmě také pro tři různé orientace vůči směru válcování. Dále získáme potřebné křivky mezního přetvoření pro různé rychlosti tažníku. Z teoretické části kapitoly 4 *Materiálové modely plasticity* vychází, že je nejvhodnější použít kritérium mezní plasticity Vegter 2017, protože bylo dokázáno, že se jedná o přesné kritérium, a navíc nám stačí výsledky, které získáme pouze ze zkoušek tahem. Jednotlivé měření bude zaznamenáváno pomocí bezkontaktního optického systému ARAMIS od společnosti GOM. Výsledná materiálová karta bude sestavena v softwaru pro simulace plošného tváření AutoForm. Pro demonstraci, jak taková karta vypadá je na další stránce obrázek ze softwaru AutoForm, kam se budou nahrávat data do čtyřech vstupů viz obr. 25.



obr. 25 Tvorba materiálového modelu v AutoForm

6.1 Zkoušená materiálová jakost

Z názvu práce je patrné, že experiment by měl probíhat pro materiálovou jakost DX56. Kvůli omezení ve výrobě ŠKODA AUTO nám byla namísto zmiňované jakosti DX56 dodána jakost materiálu DC05. Nicméně tyto dvě jakosti spadají podle interní normy koncernu Volkswagen a materiálového listu VDA 239-100, kterým se ve ŠKODA AUTO řídí, pod jednu jakost označovanou CR4. Materiálové jakosti DX56 a DC05 jsou si poměrně podobné, co se mechanických vlastností a chemického složení týče. Nyní by bylo vhodné trochu vysvětlit významy zkratk v označení materiálových jakostí.

- D Plechy pro hluboké tažení
- X Není předepsaný způsob válcování plechu
- C Je předepsán způsob výroby válcováním za studena
- 56, 05 Číselné označení jakosti

Jak již bylo zmíněno, tak podle interní normy VW 50065, kterou se v koncernu Volkswagen řídí, spadají obě materiálové jakosti pod jednu materiálovou jakost označenou jako CR4 viz Tabulka 2. Jedním z hlavních rozdílů DX56 a DC05 je způsob povrchové úpravy materiálu. Jakost DC05 se dodává buďto bez povrchové úpravy, nebo galvanicky pozinkovaná. Zatímco jakost DX56 je buď žárově pozinkovaná, nebo pokovená elektrolyticky zinkem. [35], [36]

- +Z Žárové zinkování
- +ZF Pokovení zinkem
- +U Bez povrchové úpravy
- +ZE Galvanický zinkování

V tabulce 3 je vidět chemické složení pro obě jakosti předepsané ve ŠKODA AUTO pro jakost CR4. Dále je v tabulce 4 vidět jaké má mít jakost CR4 mechanické vlastnosti.

Tabulka 2 Označení jakostí dle různých norem [35]

Kvalita podle VW 50065	Kvalita podle DIN EN / VW / TL		Staré označení		Změny v porovnání s DIN EN / VW / TL
	+ U / + ZE	+ Z / + ZF	+ U / + ZE	+ Z / + ZF	
CR4	DC05	DX56D	St15	St07 Z	-

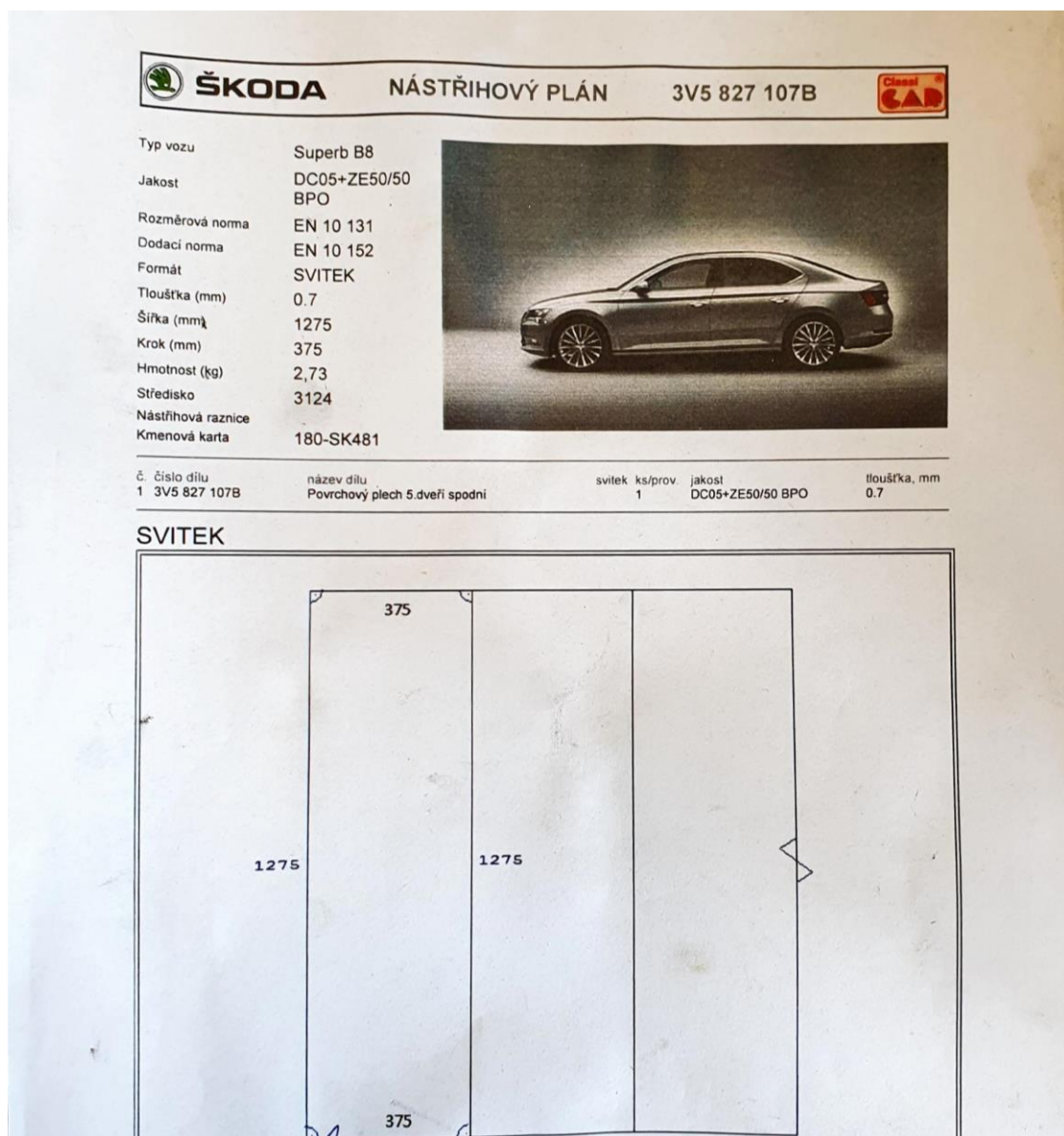
Tabulka 3 Chemické složení materiálů DX56 a DC05 [36]

Materiál	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]	Ti [%]
CR4	≤ 0,06	≤ 0,50	≤ 0,40	≤ 0,025	≤ 0,025	≥ 0,010	≤ 0,030

Tabulka 4 Mechanické vlastnosti pro materiály CR 4 [36]

Materiál	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	A_{50mm} [%]	A_{80mm} [%]	$r_{90/20}$ [-]	$r_{m/20}$ [-]	$n_{10-20/Ag}$ [-]
CR4	od 140 do 180	od 270 do 330	-	≥ 40	≥ 39	≥ 1,9	≥ 1,6	≥ 0,20

Dále je zde přiložena fotka nástřihového plánu, který byl doručen spolu s přístřihy od ŠKODA AUTO.

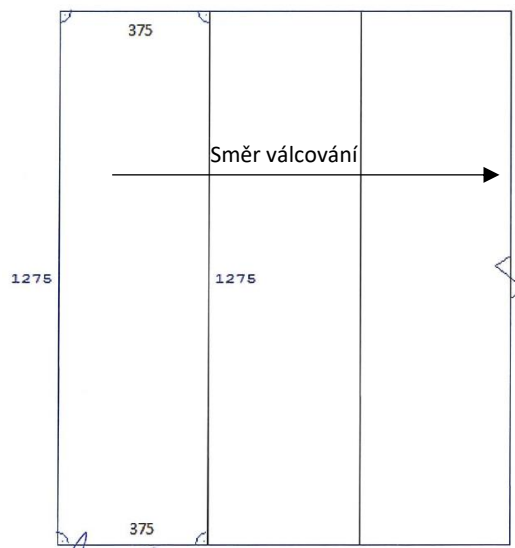


obr. 26 Nástřihový plán

7 Zkoušky tahem - křivky zpevnění

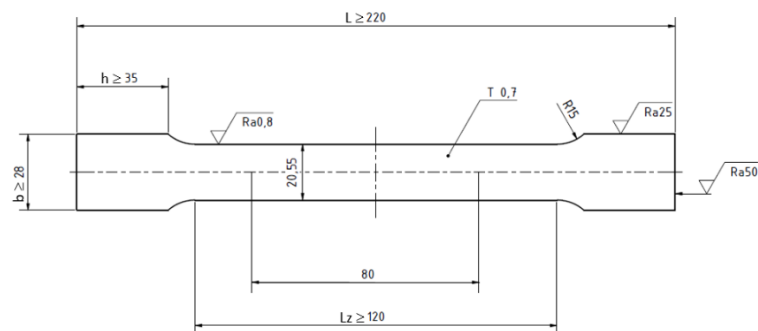
7.1 Příprava vzorků

Přístřihy, které dorazily ze ŠKODA AUTO byly odebrány ze svitku plechu určeného pro lisování víka zavazadlového prostoru modelu ŠKODA SUPERB. Jednalo se o plech tloušťky 0,7 mm a s rozměry 1275 mm x 375 mm viz obrázek přístřihu obr. 27. Nejprve bylo zapotřebí z těchto plechů vystříhat vzorky pro tahovou zkoušku dle příslušné normy.



obr. 27 Přístřih 3V5 827 107B

Upínací konce vzorku by měly být širší, než je dřív ve zkoušené oblasti, a to alespoň o 1,2násobek počáteční šířky dřívku. Vzorky, které se připravily, měly počáteční šířku 20,55 mm. Jejich počáteční měřená délka byla 80 mm, kdy se doporučuje, aby zkoušená délka byla 120 mm. Následně bylo zapotřebí upínací konce vzorků zdrsnit, aby v průběhu zkoušky lépe držely v čelistích zkušebního stroje a neprokluzovaly. To se provedlo ručně pilníkem na železo.



obr. 28 Schéma vzorku

7.1.1 Čištění a odmašťování

Dalším krokem bylo důkladné odmaštění, protože jak bylo zmíněno dříve, experimenty byly zaznamenávány optickým měřicím systémem ARAMIS. Pro odmaštění se použil jar, odmašťovač Viton CL 07 a technický líh. Postup odmašťování byl následující:

1. Mytí vzorků v teplé vodě s jarem.
2. Oplach vodou a následné vysušení.
3. Čištění zkoušené délky odmašťovačem CL 07.
4. Oplach vodou a následné vysušení.
5. Čištění zkoušené délky pomocí technického líhu.
6. Oplach vodou a následné vysušení.

7.1.2 Vytváření náhodné sítě

Na čisté odmaštěné vzorky v oblasti zkoušené délky bylo následně zapotřebí vytvořit „*pattern*“ pro pozorování kamerami. Vzor sítě by měl mít dostatečný kontrast, proto se používá kombinace černé a bílé barvy, která by měla být na ploše snímané části v poměru 1:1. Nejjednodušší metoda přípravy stochastického vzoru je pomocí barev ve spreji. Ovšem i zde jsem se potýkal s problémem dostatečné přilnavosti barev na povrchu vzorku viz obr. 29. Barvy se loupaly ještě před dokončením tahové zkoušky, což znehodnotilo následné vyhodnocení pomocí systému ARAMIS. To vyvolalo několik otázek. Jsou vzorky dostatečně odmaštěné? Stihla základní bílá barva dostatečně zaschnout? Nebo je lepší, když naopak základní barva nezaschne kompletně? Používáme vhodné barvy ve spreji?



obr. 29 *Loupání barev náhodného vzoru*

Problém nedostatečného odmaštění jsem po zvážení vyloučil jako nejméně pravděpodobný. Po zvážení zbylých otázek jsem se rozhodl pro otestování různých barev ve spreji a zároveň vyzkoušet i různou délku doby schnutí barev. Barvy, které jsem původně používal na vytváření náhodné sítě byly běžné autolaky. Podkladová bílá i vrchní černá byly

matné akrylové barvy. Dále jsem vyzkoušel kombinaci podkladové bílé barvy akrylové, avšak na vodní bázi a jako vrchní černou barvu jsem zkusil polyuretanovou barvu na vodní bázi. Poslední kombinací byla bílá polyuretanová barva na vodní bázi se speciální vrchní barvou na vodní bázi, která vytvářela granitový efekt pomocí černých plastických částic. Nejlépe se osvědčila poslední kombinace sprejů. Všechny tři kombinace jsou zobrazeny a postupně seřazeny viz obr. 30. Závěrem tohoto experimentu bylo, že doba potřebná pro schnutí podkladové barvy nesmí být delší než 24 hodin, aby barva nestihla vytvrdnout. Ideální doba schnutí je 10 až 15 min.



a) Akrylové matné barvy

b) Akrylová barva a PU barva

c) PU barva s granitovým efektem

obr. 30 Použité kombinace barev ve spreji

7.2 Zkušební zařízení

Pro měření zkoušek tahem se použil stroj od firmy LaborTech, který má k dispozici fakulta strojní na ústavu strojírenské technologie. Některé technické údaje ke stroji jsou vypsány v tabulce 5. Jedná se o stroj LabTest 5.100SP1 viz obr. 31. Jedná se o laboratorní stroj pro zkoušky tahem. Ze stroje jsou data vedena do počítače, kde je následně zpracovává software Test & Motion a zároveň je deformace vzorku ještě zpracovávána pomocí systému ARAMIS.

Tabulka 5 Vybraná technická data LabTest 5.100SP1

Jmenovité zatížení [kN]	100
Max. zkušební rychlost [mm/min]	600
Přesnost řízení rychlosti [%]	±0,5
Rozlišení příčnicku [μm]	1
Tuhost rámu [mm/N]	$1,6 \times 10^{-6}$
Rozpětí sil [kN]	500-600
Přesnost měření síly [%]	±0,3 z hodnoty v rozsahu
Přesnost dráhy [μm]	1 - ČSN EN ř513
Přesnost měření napětí [%]	±0,5 průtahoměru



obr. 31 Zkušební stroj LabTest 5.100SP1

Na stroji je přidělaný i laserový průtahoměr LE-05 od firmy LABORTECH viz obr. 32, kterým se měří tažnost vzorků. Prodloužení je měřeno pomocí reflexních pásek umístěných na vzorku. Měřicí rozsah je 8-127 mm a rozlišení je 0,001 mm. Disponuje paprskem diodového laseru s vlnovou délkou 670nm a jeho maximální výstupní výkon je menší než 1 mW. Měřicí frekvence laserového průtahoměru je 100 Hz.



obr. 32 Laserový průtahoměr LE-05

Kamerový systém ARAMIS, který byl použit pro měření, se umísťuje před zkušební stroj na stativ. Jedná se o typ kamer označovaných jako ARAMIS 4M, který je dodáván s nastavitelnou základnou. Princip fungování na základě digitální korelace obrazu byl již popsán v teoretické části v podkapitole 5.3 ARAMIS. V případě měření zkoušek tahem se jedná o dvourozměrnou digitální korelaci obrazu, nicméně z důvodů přesnějšího měření byly použity dvě kamery. V tabulce 6 je vypsáno několik důležitých informací, které uvádí výrobce v technických specifikacích kamer.

Tabulka 6 Technické údaje k systému ARAMIS 4M

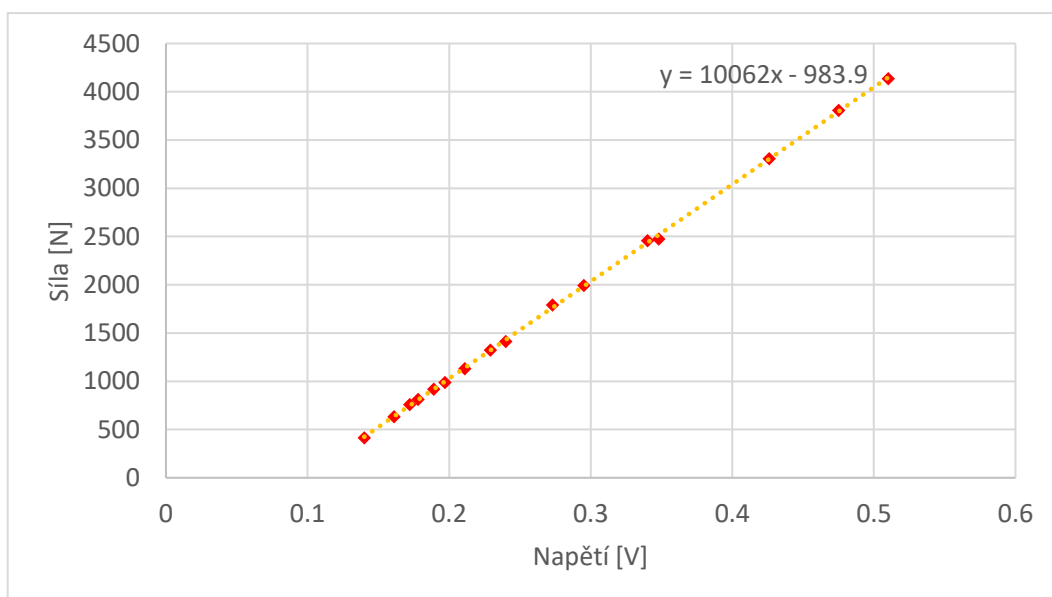
Typ senzoru	ARAMIS 4M rev03
Rozlišení kamer	2400 x 1728 pixel
Čip kamer	CMOS
Max. snímkovací frekvence	168 Hz (2400 x 1728 px)
	336 Hz (2400 x 864 px)
	672 Hz (2400 x 400 px)
	1334 Hz (2400 x 168 px)
Doba expozice	0.1 ms – 2s
Rozmezí měřených deformací	0.02% – <100%
Přesnost měřených deformací	až 0.01%

7.3 Kalibrace zařízení

Před samotným měřením bylo nejdůležitější provést správnou kalibraci optického systému ARAMIS. Kalibraci není potřeba provádět před každým měřením, ale je potřeba ji provést po delší pauze v rámci několika dní, kdy se neměří. Jako první krok je zapotřebí zapnout systém, aby se zahřál před samotnou kalibrací případně poté i měřením. Nejprve se nastaví požadovaná vzdálenost kamer od sebe na rameni. Z manuálu jsem zvolil vzdálenost 318 mm pro daný typ senzoru. Poté se kamery natočí pomocí nastavitelného stativu kolmo k libovolnému povrchu. Následně tam položíme kalibrační destičku pro tento typ kamer, což

je *CQ/CP20 55x44*. Pomocí laserového paprsku, který je součástí sestavy kamerového systému, odměříme požadovanou vzdálenost kamer od zvoleného povrchu 785 mm. Dále se pomocí šroubů na kloubech nastaví úhel kamer 25°, což se dělá pomocí kalibrační destičky a laserového paprsku. Kamery se natáčí tak, aby byl vidět paprsek uprostřed destičky. Na počítači jsem si v softwaru ARAMIS spustil tvorbu kalibračního protokolu, což mě provedlo kalibrací, která spočívala v otáčení destičky v různých vzdálenostech a úhlech. Kalibrační protokol je k dispozici v příloze 1. Jedná se o poměrně náročný proces, u kterého bylo zapotřebí tří lidí. Kalibrace pro měření zkoušek tahem trvala přibližně hodinu a třicet minut.

Dále bylo zapotřebí propojit trhací stroj s kamerovým systémem ARAMIS a naměřit kalibrační křivku, viz Graf 1, pro převod napětového výstupu na silový. To se provádělo na zkušebním stroji, kdy se vzorek postupně zatěžoval předem známou silou a z toho se zjišťovalo, jaké hodnotě napětí odpovídá. Pomocí měření několika hodnot se sestavila kalibrační křivka s odpovídající rovnicí, což bylo důležité pro nastavení potřebného offsetu a převodníkového faktoru z analogového vstupu do vyhodnocovacího systému ARAMIS.



Graf 1 Kalibrační křivka

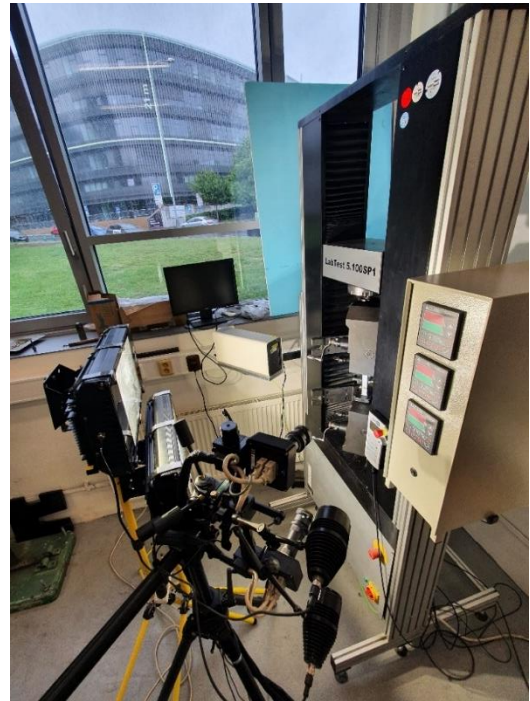
7.4 Postup experimentu

Připravené vzorky, na které byla nanášena náhodná síť pomocí barev ve spreji, byly umístěny do čelistí zkušebního stroje. Před spuštěním zkoušky bylo vždy zapotřebí zkontrolovat kvalitu sítě, jestli je dostatečně kontrastní a čitelná pro kamery. Jelikož se měřilo i při poměrně vysokých rychlostech, bylo potřeba zvýšit snímkovací frekvenci kamer,

ale zároveň i zvýšit intenzitu osvětlení vzorku. Týkalo se to především rychlostí příčnicku 500 mm/min a 600 mm/min. Z toho důvodu bylo zapotřebí nainstalovat další externí LED reflektory vedle těch, které jsou součástí sestavy kamerového systému.



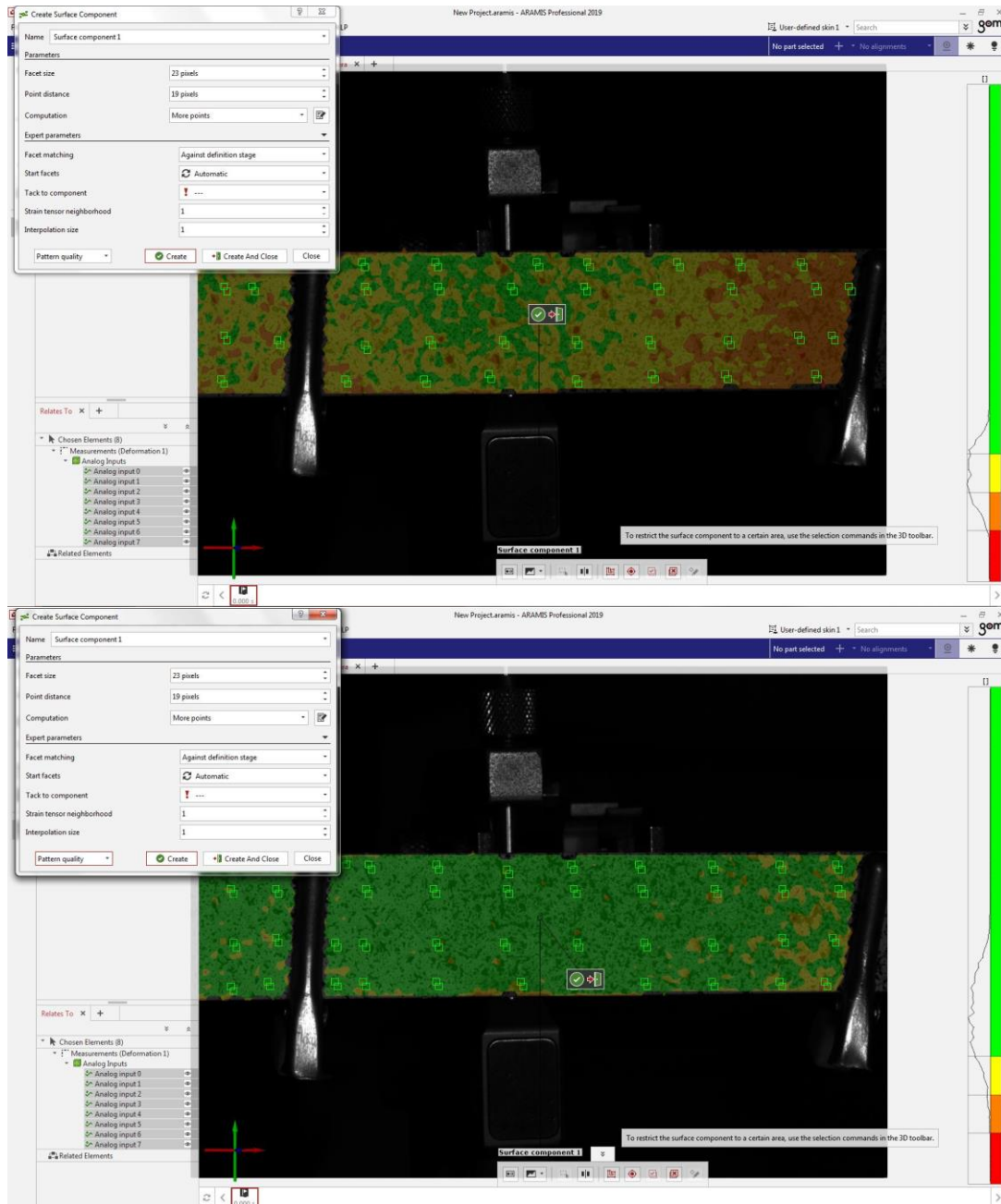
a) Rozestavení pro nižší rychlosti



b) Rozestavení pro vyšší rychlosti

obr. 33 Konfigurace systému ARAMIS pro měření tahových zkoušek

Na následujícím obrázku (obr. 34) je vidět, jak přidané LED reflektory pomohly při čtení sítě v průběhu zkoušek. Nahoře je vidět, že bez reflektorů jsou na vzorku žlutá až oranžová místa, kdežto po přidání je měřená oblast na vzorku celá zelená, což svědčí o správné kvalitě „*patternu*“. Poté co byla zkontrolována kvalita nanesené stochastické sítě, tak se nastavila rychlost příčnicku, počáteční měřená délka z laserového extenzometru se přepsala do Test & Motion a následně se na extenzometru vynulovala. Pak stačilo již zapnout snímkování kamer a spustit zkoušku. Pomocí zkalibrovaného kamerového systému umístěného před vzorky se snímala deformace. Měření se vyhodnocovala pomocí systému ARAMIS a pomocí softwaru Test & Motion, který je připojený pomocí počítače přímo ke zkušebnímu stroji, se také řídila zkouška se všemi potřebnými vstupy.



obr. 34 Ověření kvality stochastické sítě

7.5 Vyhodnocení zkoušek tahem

Hodnoty, které jsem z měření vyhodnocoval byly následující:

- Mez pevnosti v tahu (R_m)
- Mez kluzu ($R_{p0,2}$)
- Plastické prodloužení při maximálním zatížení (A_g)
- Deformační exponent (n)
- Koeficient anizotropie (r)

7.5.1 Naměřené hodnoty

Tabulka 7 Naměřené hodnoty pro orientaci 0° a nižší rychlosti

Úhel 0°							
Rychlost zatěžování 10 [mm/min] Rychlost deformace 0.0012 [s-1]	č. vzorku	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	A_g [%]	n [-]	r [-]	$R_{p0,2}/R_m$ [-]
	1	159	275	30.00	0.24	2.05	0.58
	2	135	266	26.08	0.24	2.03	0.51
	3	153	296	25.98	0.24	2.06	0.52
	4	159	283	26.73	0.24	2.04	0.56
	5	170	284	-	0.24	1.94	0.60
	6	174	282	-	0.23	1.98	0.62
	Průměr	158	281	27.20	0.24	2.02	0.56
Sm.odch.	12.62	9.13	1.64	0.004	0.04	0.04	
Rychlost zatěžování 50 [mm/min] Rychlost deformace 0.0060 [s-1]	č. vzorku	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	A_g [%]	n [-]	r [-]	$R_{p0,2}/R_m$ [-]
	1	185	293	22.47	0.23	2.03	0.63
	2	185	294	23.96	0.23	2.00	0.63
	3	184	292	-	0.24	2.03	0.63
	4	180	293	23.98	0.23	2.01	0.61
	5	187	302	25.60	-	-	0.62
	Průměr	184	295	24.00	0.23	2.02	0.62
	Sm.odch.	2.32	3.66	1.11	0.01	0.01	0.01
Rychlost zatěžování 100 [mm/min] Rychlost deformace 0.0119 [s-1]	č. vzorku	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	A_g [%]	n [-]	r [-]	$R_{p0,2}/R_m$ [-]
	1	188	294	22.18	-	-	0.64
	2	178	293	21.38	0.21	1.96	0.61
	3	195	292	23.10	0.22	2.06	0.67
	4	194	295	24.56	0.21	1.99	0.66
	5	159	293	21.48	0.22	2.01	0.54
	6	187	295	23.76	0.22	2.01	0.63
	Průměr	184	294	22.74	0.22	2.01	0.62
Sm.odch.	12.28	1.11	1.17	0.01	0.03	0.04	

Výsledky v tabulce 7 vychází dle očekávání, akorát u prvního vzorku pro rychlost zatěžování 10 mm/min vyšla vyšší tažnost a vzorky 5 a 6 se bohužel nepovedla vyhodnotit vůbec. Problémem bylo nejspíš prokluzování tenkého vzorku v čelistech. Dále se u některých vzorků nepodařilo vyhodnotit pomocí systému ARAMIS koeficient anizotropie a exponent deformačního zpevnění. Důvodem bylo loupání „*patternu*“ spolu s jeho horší kvalitou. Celkově u naměřených hodnot vychází nízká směrodatná odchylka.

Tabulka 8 Naměřené hodnoty pro orientaci 0° a vyšší rychlosti

Úhel 0°							
Rychlost zatěžování 200 [mm/min] Rychlost deformace 0.0238 [s-1]	č. vzorku	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	A_g [%]	n [-]	r [-]	$R_{p0,2}/R_m$ [-]
	1	196	301	21.08	0.24	1.94	0.65
	2	204	302	20.32	0.23	1.95	0.68
	3	203	297	20.05	0.20	2.02	0.68
	4	203	299	23.27	0.23	2.06	0.68
	5	212	305	20.87	-	-	0.70
	Průměr	204	301	21.12	0.22	1.99	0.68
Sm.odch.	5.08	2.71	1.14	0.01	0.05	0.01	
Rychlost zatěžování 500 [mm/min] Rychlost deformace 0.0595 [s-1]	č. vzorku	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	A_g [%]	n [-]	r [-]	$R_{p0,2}/R_m$ [-]
	1	230	310	18.84	-	-	0.74
	2	225	304	21.66	-	-	0.74
	3	232	306	23.80	0.23	2.00	0.76
	4	206	300	21.71	-	-	0.69
	5	217	307	19.63	-	-	0.71
	6	218	315	22.45	-	-	0.69
	7	223	319	21.86	0.22	1.97	0.70
	8	221	321	25.28	0.22	1.97	0.69
	9	220	319	22.54	0.20	1.96	0.69
	Průměr	221	311	21.97	0.22	1.97	0.71
Sm.odch.	7.24	7.11	1.84	0.01	0.02	0.03	
Rychlost zatěžování 600 [mm/min] Rychlost deformace 0.0714 [s-1]	č. vzorku	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	A_g [%]	n [-]	r [-]	$R_{p0,2}/R_m$ [-]
	1	229	311	17.04	0.23	1.98	0.74
	2	238	307	18.37	0.23	2.00	0.78
	3	191	279	18.92	0.22	2.01	0.68
	4	204	286	20.66	0.24	2.00	0.71
	5	211	292	21.06	0.24	2.01	0.72
	6	227	299	19.10	0.24	2.01	0.76
	Průměr	217	296	19.19	0.23	2.00	0.73
Sm.odch.	16.15	11.25	1.36	0.01	0.01	0.03	

Výsledky v tabulce 8 pro vyšší rychlosti opět vychází dle očekávání, kdy s rostoucí rychlostí se zvyšují hodnoty pevnostní. Protichůdný efekt je u plastické homogenní tažnosti. Dále je vidět, že poměr meze kluzu s mezí pevnosti se s rostoucí rychlostí zatěžování přibližuje hodnotě 1. To svědčí o zmenšování zásoby plasticity materiálu. U měření rychlostí zatěžování 500 mm/min se nepodařilo vyhodnotit u pěti vzorků koeficient anizotropie a exponent deformačního zpevnění. Důvodem byla špatná čitelnost stochastické sítě na vzorku související s nedostatečnou intenzitou osvětlení. V této fázi měření byl přidán externí LED reflektor pro zvýšení intenzity osvětlení, což výrazně pomohlo.

Tabulka 9 Naměřené hodnoty pro orientaci 45° a nižší rychlosti

Úhel 45°							
Rychlost zatěžování 10 [mm/min] Rychlost deformace 0.0012 [s-1]	č. vzorku	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	A_g [%]	n [-]	r [-]	$R_{p0,2}/R_m$ [-]
	1	147	276	27.43	0.23	1.63	0.53
	2	140	279	25.15	0.23	1.58	0.50
	3	143	287	24.52	0.23	1.61	0.50
	4	172	297	25.28	0.22	1.57	0.58
	5	173	305	23.11	0.21	1.57	0.60
	Průměr	155	289	25.10	0.22	1.59	0.54
	Sm.odch.	14.46	10.89	1.40	0.01	0.02	0.04
Rychlost zatěžování 50 [mm/min] Rychlost deformace 0.0060 [s-1]	č. vzorku	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	A_g [%]	n [-]	r [-]	$R_{p0,2}/R_m$ [-]
	1	185	301	22.49	-	-	0.61
	2	174	293	23.82	0.22	1.52	0.59
	3	183	295	24.57	0.22	1.57	0.62
	4	176	301	22.89	0.21	1.62	0.58
	5	159	287	23.57	0.22	1.55	0.55
	6	194	309	22.09	0.21	1.57	0.63
	Průměr	179	298	23.24	0.21	1.57	0.60
Sm.odch.	10.87	6.99	0.84	0.01	0.03	0.03	
Rychlost zatěžování 100 [mm/min] Rychlost deformace 0.0119 [s-1]	č. vzorku	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	A_g [%]	n [-]	r [-]	$R_{p0,2}/R_m$ [-]
	1	182	289	22.54	0.23	2.26	0.63
	2	164	269	21.93	0.22	2.21	0.61
	3	192	288	-	0.22	2.27	0.67
	4	200	293	-	0.23	2.29	0.68
	5	180	287	24.36	0.22	2.26	0.63
	Průměr	184	285	22.94	0.22	2.26	0.64
	Sm.odch.	12.16	8.35	1.03	0.005	0.03	0.03

Výsledky pro nižší rychlosti u vzorků s orientací 45° vycházely vcelku bezproblémově a dle očekávání. U vzorků číslo 3 a 4 pro rychlost zatěžování 100 mm/min se nepodařila správně vyhodnotit homogenní plastická tažnost. V průběhu zkoušky mohl ze vzorku spadnout příčný extenzometr a zavadit o svorku s reflexní páskou, což znemožnilo vyhodnocení tažnosti. V této fázi měření nedocházelo ke komplikacím s nanášenou barvou a celkově vychází u hodnot nízká směrodatná odchylka.

Tabulka 10 Naměřené hodnoty pro orientaci 45° a vyšší rychlosti

Úhel 45°							
Rychlost zatěžování 200 [mm/min] Rychlost deformace 0.0238 [s-1]	č. vzorku	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	A_g [%]	n [-]	r [-]	$R_{p0,2}/R_m$ [-]
	1	186	282	19.82	0.22	1.53	0.66
	2	188	300	20.87	0.22	1.50	0.63
	3	189	295	24.01	0.21	1.52	0.64
	4	184	287	20.18	0.22	1.58	0.64
	5	193	311	17.78	0.21	1.52	0.62
	Průměr	188	295	20.53	0.22	1.53	0.64
	Sm.odch.	3.03	10.14	2.02	0.005	0.03	0.01
Rychlost zatěžování 500 [mm/min] Rychlost deformace 0.0595 [s-1]	č. vzorku	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	A_g [%]	n [-]	r [-]	$R_{p0,2}/R_m$ [-]
	1	209	294	18.36	0.23	1.59	0.71
	2	206	302	20.38	0.23	1.59	0.68
	3	193	285	21.37	0.22	1.52	0.68
	4	213	298	18.19	0.24	1.51	0.71
	5	209	294	19.21	0.22	1.60	0.71
	Průměr	206	295	19.50	0.23	1.56	0.70
	Sm.odch.	6.87	5.64	1.21	0.01	0.04	0.02
Rychlost zatěžování 600 [mm/min] Rychlost deformace 0.0714 [s-1]	č. vzorku	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	A_g [%]	n [-]	r [-]	$R_{p0,2}/R_m$ [-]
	1	227	311	19.19	-	-	0.73
	2	229	308	17.93	0.22	1.56	0.74
	3	231	319	18.99	0.21	1.57	0.72
	4	226	303	19.52	0.21	1.50	0.75
	5	215	295	18.41	-	-	0.73
	6	226	304	18.91	-	1.60	0.74
	Průměr	226	307	18.83	0.21	1.55	0.74
	Sm.odch.	5.09	7.41	0.52	0.004	0.04	0.01

V tabulce 10 chybí vyhodnocené hodnoty koeficientu anizotropie a exponentu deformačního zpevnění u třech vzorků měřených při rychlosti zatěžování 600 mm/min. Vyšší rychlosti zatěžování byly náročnější na změření pomocí systému ARAMIS. Nicméně i přesto vychází ostatní hodnoty dle očekávání a zásoba plasticity se s rostoucí rychlostí zatěžování zmenšuje a pevnostní hodnoty rostou na úkor tažnosti.

Tabulka 11 Naměřené hodnoty pro orientaci 90° a nižší rychlosti

Úhel 90°							
Rychlost zatěžování 10 [mm/min] Rychlost deformace 0.0012 [s-1]	č. vzorku	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	A_g [%]	n [-]	r [-]	$R_{p0,2}/R_m$ [-]
	1	170	281	26.08	-	-	0.60
	2	155	288	29.40	0.23	2.28	0.54
	3	150	278	28.03	-	-	0.54
	4	145	264	28.11	0.24	2.31	0.55
	5	160	280	28.53	-	-	0.57
	6	165	281	25.02	-	-	0.59
	7	175	287	25.06	-	-	0.61
	8	169	288	25.25	-	-	0.59
	9	179	293	23.58	0.22	2.21	0.61
	Průměr	163	282	26.56	0.23	2.27	0.58
Sm.odch.	10.83	7.91	1.88	0.01	0.04	0.03	
Rychlost zatěžování 50 [mm/min] Rychlost deformace 0.0060 [s-1]	č. vzorku	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	A_g [%]	n [-]	r [-]	$R_{p0,2}/R_m$ [-]
	1	177	291	25.12	-	-	0.61
	2	161	286	23.00	-	-	0.56
	3	181	289	23.49	-	-	0.63
	4	180	301	23.26	-	-	0.60
	5	199	298	22.12	0.21	2.28	0.67
	6	169	298	21.84	0.22	2.20	0.57
	7	175	298	24.32	0.22	2.18	0.59
	8	167	298	24.29	0.23	2.21	0.56
	9	203	301	23.09	0.22	2.28	0.67
	Průměr	179	296	23.39	0.22	2.23	0.61
Sm.odch.	13.20	5.14	1.00	0.01	0.04	0.04	
Rychlost zatěžování 100 [mm/min] Rychlost deformace 0.0119 [s-1]	č. vzorku	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	A_g [%]	n [-]	r [-]	$R_{p0,2}/R_m$ [-]
	1	168	304	20.97	0.22	1.51	0.55
	2	190	310	21.46	0.21	1.60	0.61
	3	190	307	22.80	-	-	0.62
	4	205	318	19.38	-	-	0.64
	5	188	307	22.85	0.21	1.59	0.61
	6	205	299	20.09	-	-	0.69
	Průměr	191	308	21.26	0.21	1.57	0.62
	Sm.odch.	12.46	5.80	1.29	0.01	0.04	0.04

Nejvíce problémů při měření se vyskytlo u vzorků s orientací 90° vůči směru válcování. V tabulce 11 jsou výsledky pro nižší rychlosti. Oproti předchozím orientacím zde bylo zapotřebí změřit více vzorků, abychom mohli vyhodnotit koeficient anizotropie a exponent deformačního zpevnění. Bylo zapotřebí pečlivě vzorky odmašťovat a dodržet odzkoušený postup tvorby stochastické sítě a především i doby schnutí. Nicméně přes tyto komplikace vychází hodnoty dle očekávání a s nízkými směrodatnými odchylkami.

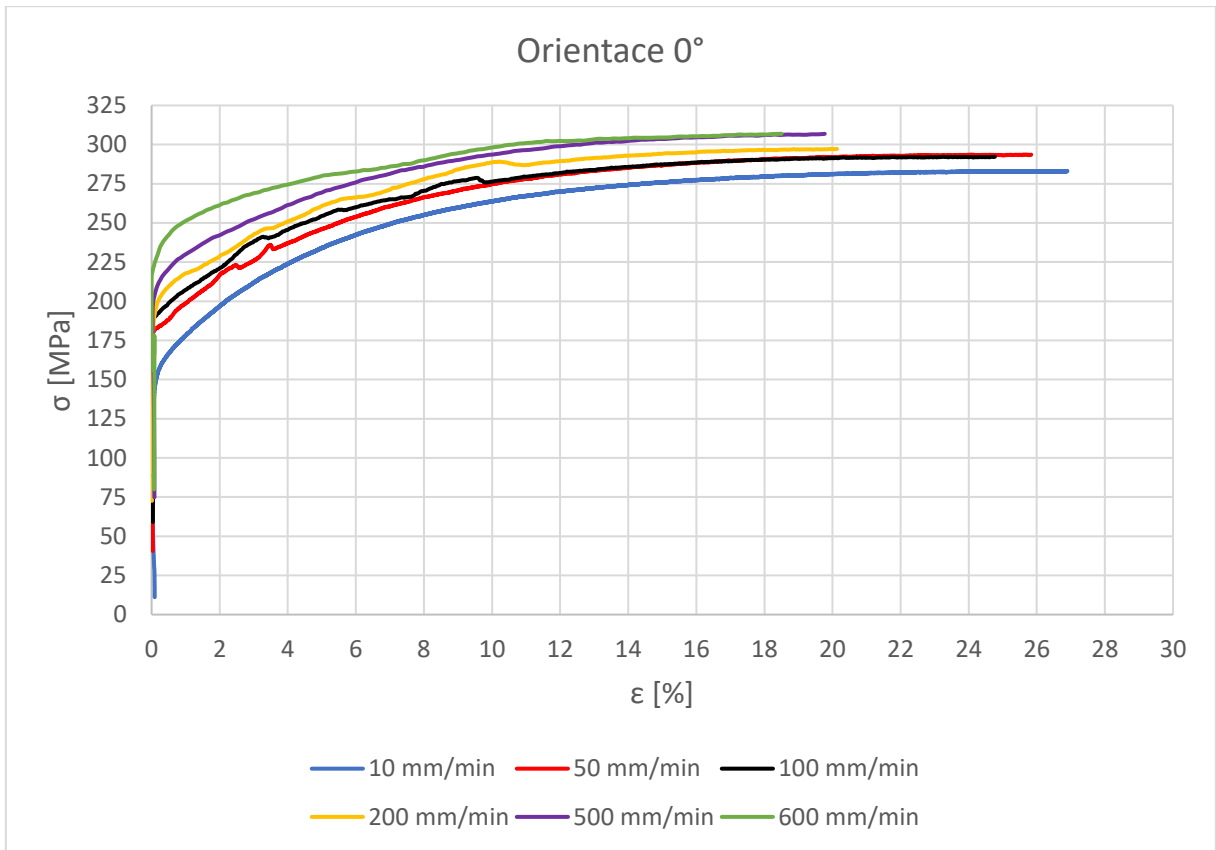
Tabulka 12 Naměřené hodnoty pro orientaci 90° a vyšší rychlosti

Úhel 90°							
	č. vzorku	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	A_g [%]	n [-]	r [-]	$R_{p0,2}/R_m$ [-]
Rychlost zatěžování 200 [mm/min] Rychlost deformace 0.0238 [s-1]	1	191	287	21.34	0.23	2.23	0.67
	2	185	281	21.45	0.22	2.26	0.66
	3	227	309	20.24	-	-	0.73
	4	208	299	21.44	0.22	2.25	0.70
	5	201	290	22.75	0.22	2.26	0.69
	6	218	302	20.87	0.21	2.24	0.72
	Průměr	205	295	21.35	0.22	2.25	0.69
	Sm.odch.	14.57	9.53	0.76	0.01	0.01	0.03
Rychlost zatěžování 500 [mm/min] Rychlost deformace 0.0595 [s-1]	č. vzorku	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	A_g [%]	n [-]	r [-]	$R_{p0,2}/R_m$ [-]
	1	216	293	-	0.22	2.24	0.74
	2	200	288	19.42	0.23	2.25	0.69
	3	229	305	19.98	0.23	2.18	0.75
	4	223	300	18.93	0.22	2.26	0.74
	5	225	314	21.49	0.20	2.22	0.72
	Průměr	219	300	19.96	0.22	2.23	0.73
	Sm.odch.	10.21	9.10	0.96	0.01	0.03	0.02
Rychlost zatěžování 600 [mm/min] Rychlost deformace 0.0714 [s-1]	č. vzorku	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	A_g [%]	n [-]	r [-]	$R_{p0,2}/R_m$ [-]
	1	204	290	16.15	-	-	0.70
	2	229	308	17.93	0.23	2.18	0.74
	3	206	288	18.24	0.23	2.17	0.72
	4	219	291	17.05	0.22	2.24	0.75
	5	202	288	19.65	0.22	2.17	0.70
	6	212	291	20.47	0.22	2.24	0.73
	7	199	293	-	0.18	2.23	0.68
	Průměr	210	293	18.25	0.22	2.20	0.72
	Sm.odch.	9.88	6.45	1.46	0.02	0.03	0.02

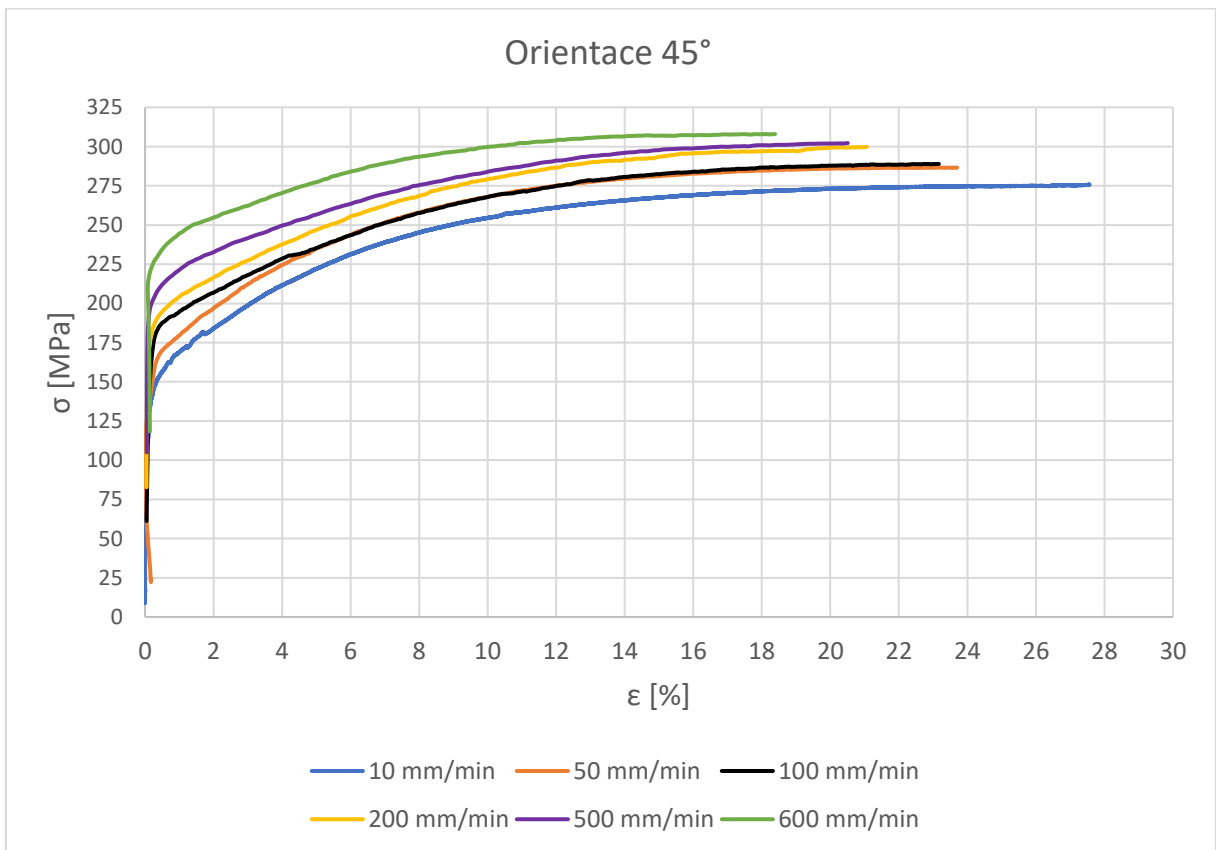
Při vyšších rychlostech zatěžování pro orientaci 90° se pouze ve dvou případech nepodařilo správně naměřit tažnost a koeficient anizotropie s exponentem deformačního zpevnění. Hodnoty v tabulce 12 popisují očekávaný trend zvyšování pevnostních charakteristik při zvyšování rychlosti zatěžování.

7.5.2 Křivky zpevnění

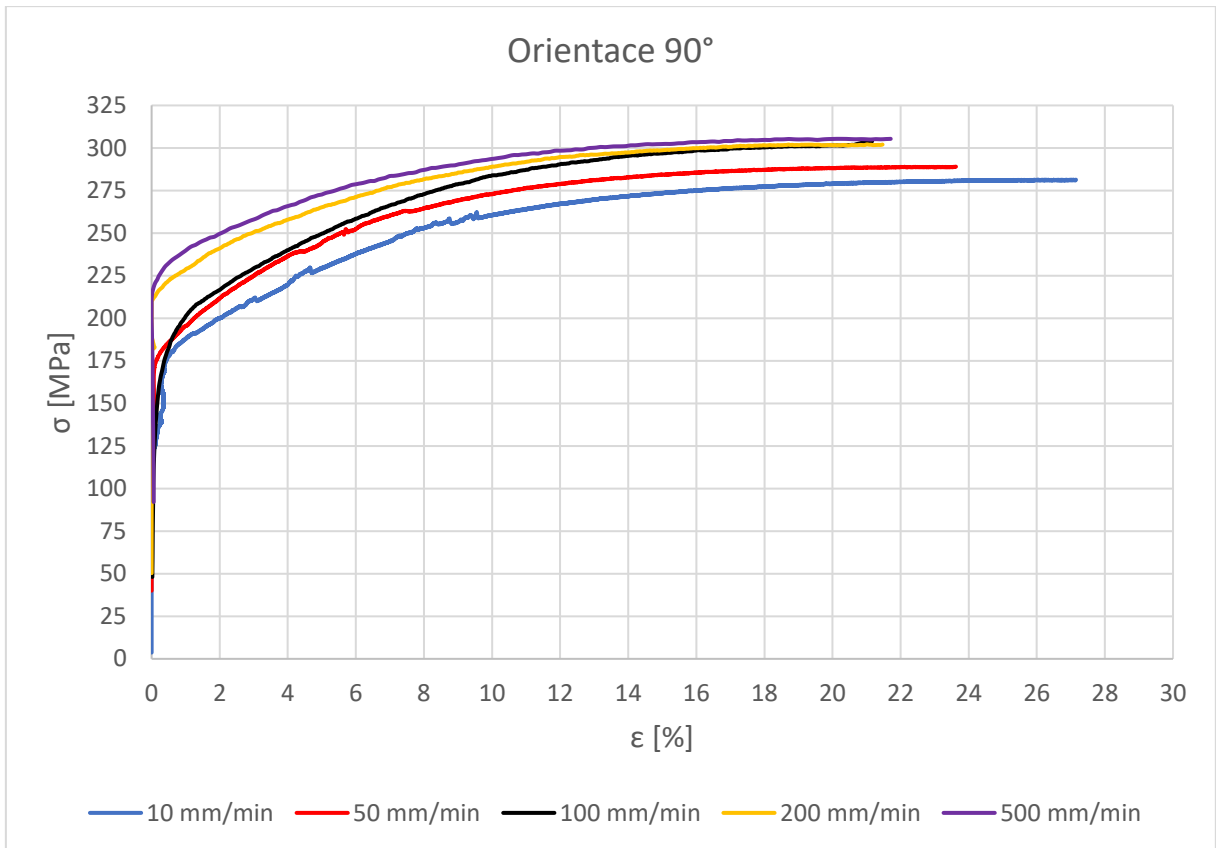
Na následujících grafech jsou vyneseny reprezentativní průběhy křivek zpevnění do meze pevnosti. Hodnoty z měření, které byly použity pro tyto křivky, budou následně sloužit i pro vytvoření materiálové karty.



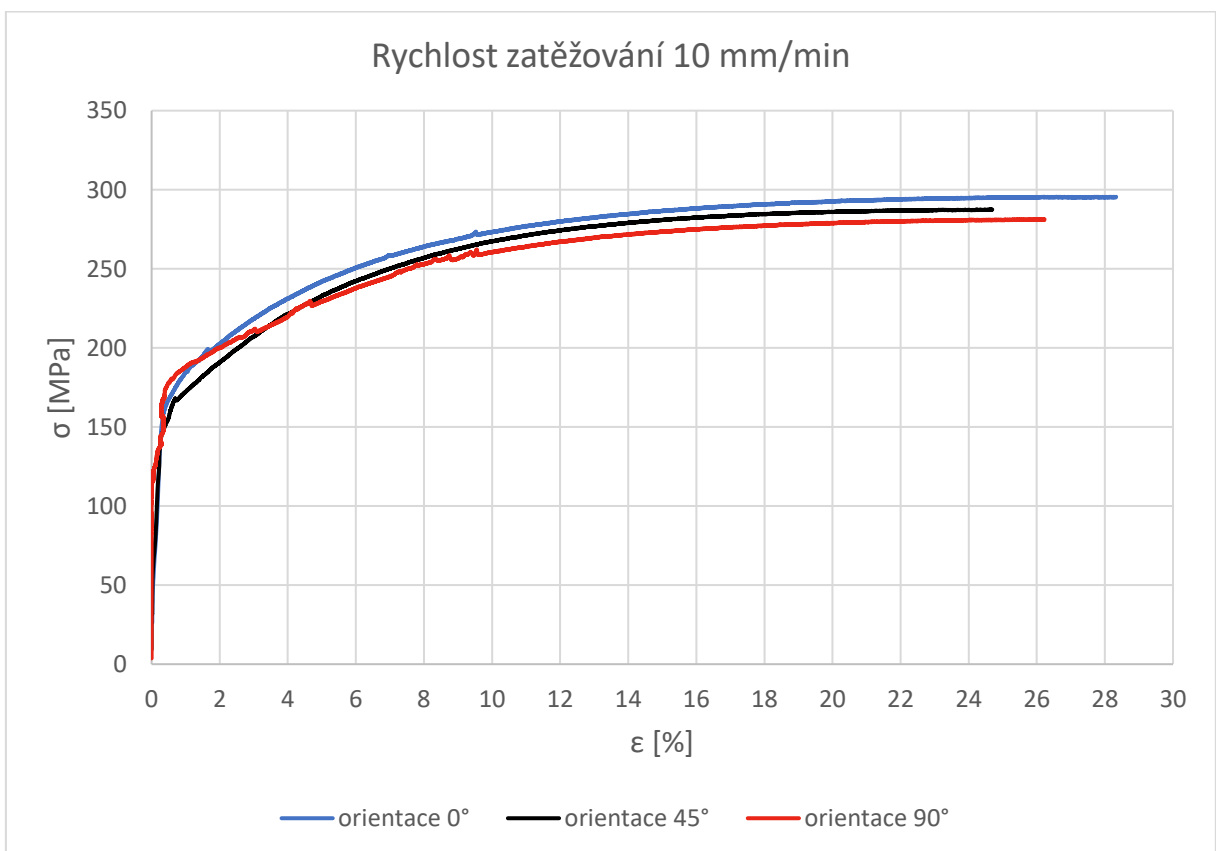
Graf 2 Křivky zpevnění pro různé rychlosti zatěžování a orientaci 0°



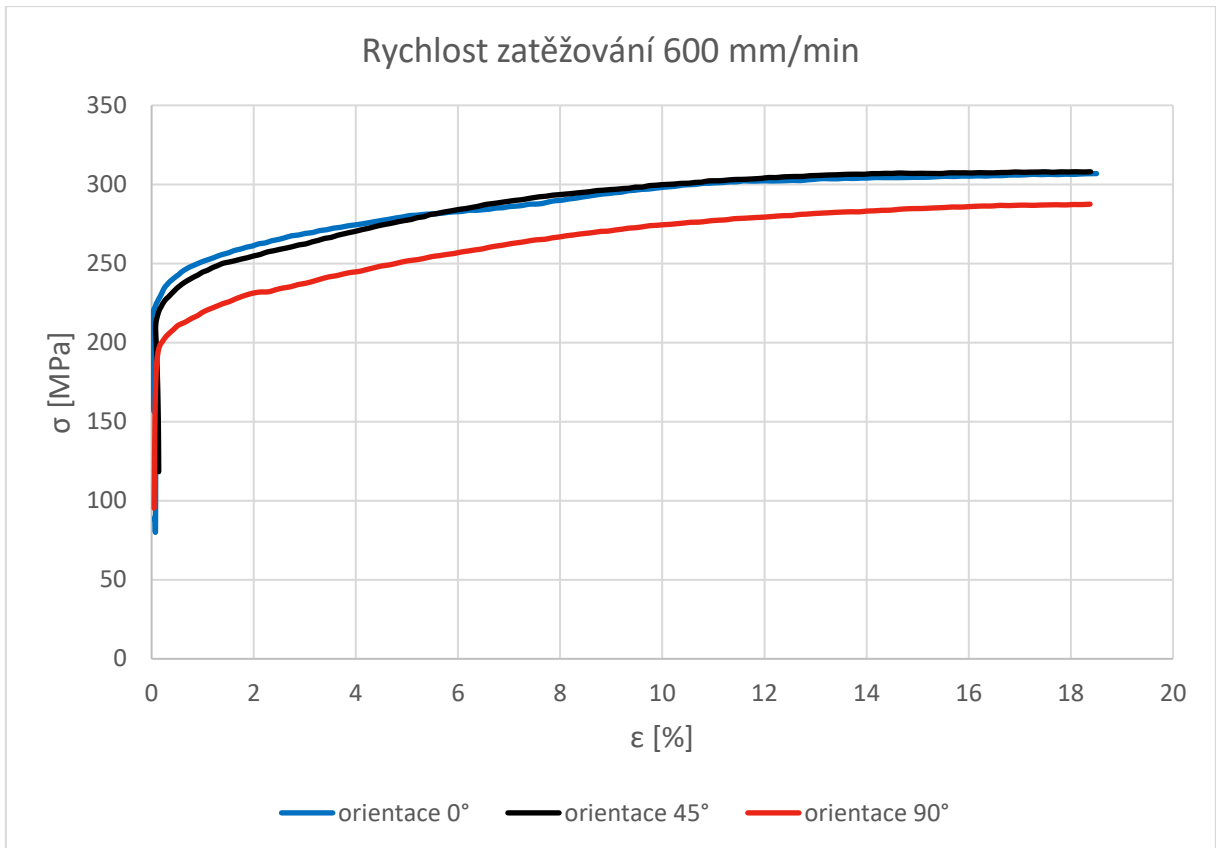
Graf 3 Křivky zpevnění pro různé rychlosti zatěžování a orientaci 45°



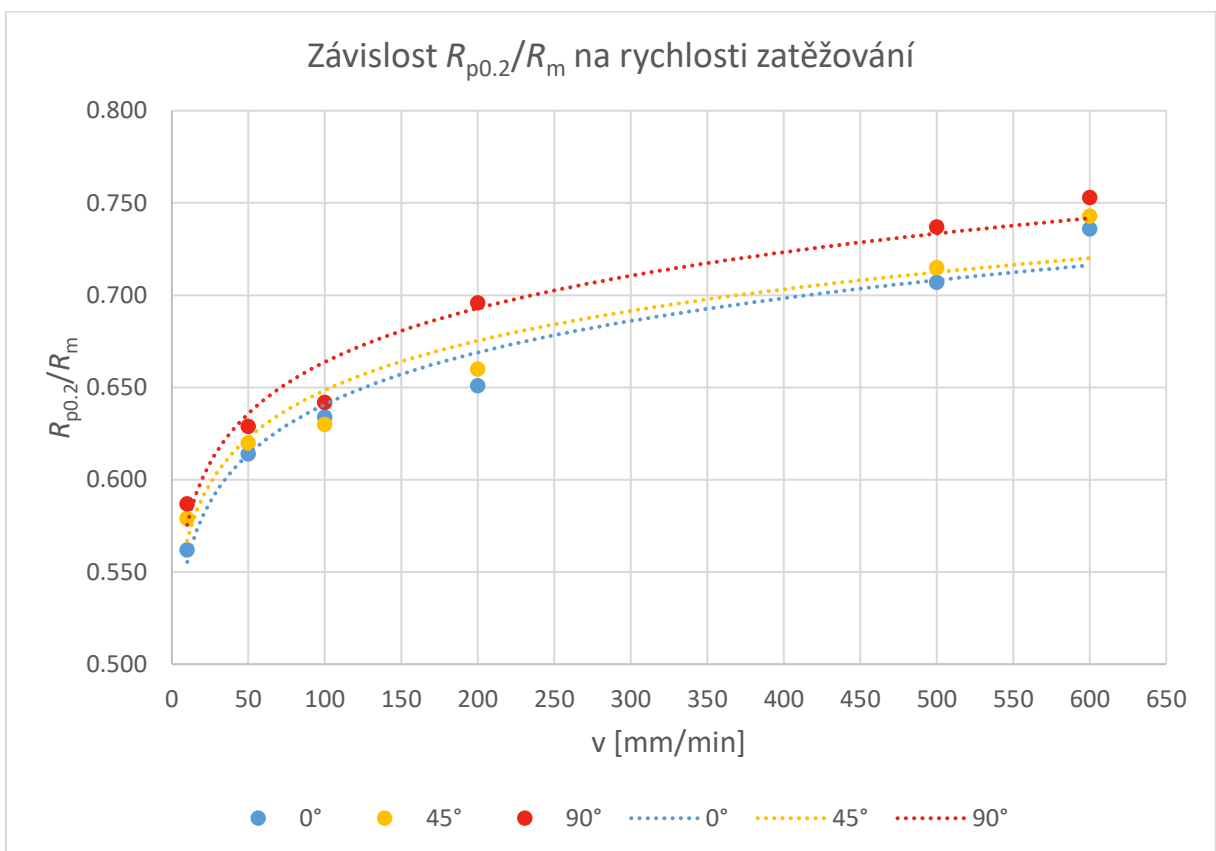
Graf 4 Křivky zpevnění pro různé rychlosti zatěžování a orientaci 90°



Graf 5 Křivky zpevnění pro tři různé orientace a rychlost zatěžování 10 mm/min



Graf 6 Křivky zpevnění pro tři různé orientace a rychlost zatěžování 600 mm/min



Graf 7 Závislost poměru $R_{p0.2}/R_m$ na rychlosti zatěžování

V předchozích grafech jsou znázorněny závislosti křivek zpevnění do meze pevnosti. Podle očekávání vychází průběhy křivek, kdy při nejnižší rychlosti je dosaženo nejvyšší tažnosti a nejnižší meze pevnosti. Při nejvyšší rychlosti je tomu právě naopak. Dále je v grafu 5 vidět vliv orientace vůči směru válcování a opět je potvrzen předpoklad, kdy pro směr válcování 0° vychází hodnoty nejpříznivěji a pro 90° zase nejhůře. V grafu 6 je průběh křivek zpevnění při rychlosti zatěžování 600 mm/min a pro orientaci 0° a 45° je rozdíl ve výsledcích pouze nepatrný. V posledním grafu 7 je znázorněna klesající zásoba plasticity pomocí poměru meze kluzu s mezí pevnosti. Hodnoty poměru se s rostoucí rychlostí zatěžování, respektive i deformace blíží hodnotě 1. Svislá osa na grafu záměrně pro lepší přehlednost začíná od vyšší hodnoty, aby byl dobře vidět rozdíl mezi hodnotami pro jednotlivé orientace.

7.5.3 Shrnutí vyhodnocení

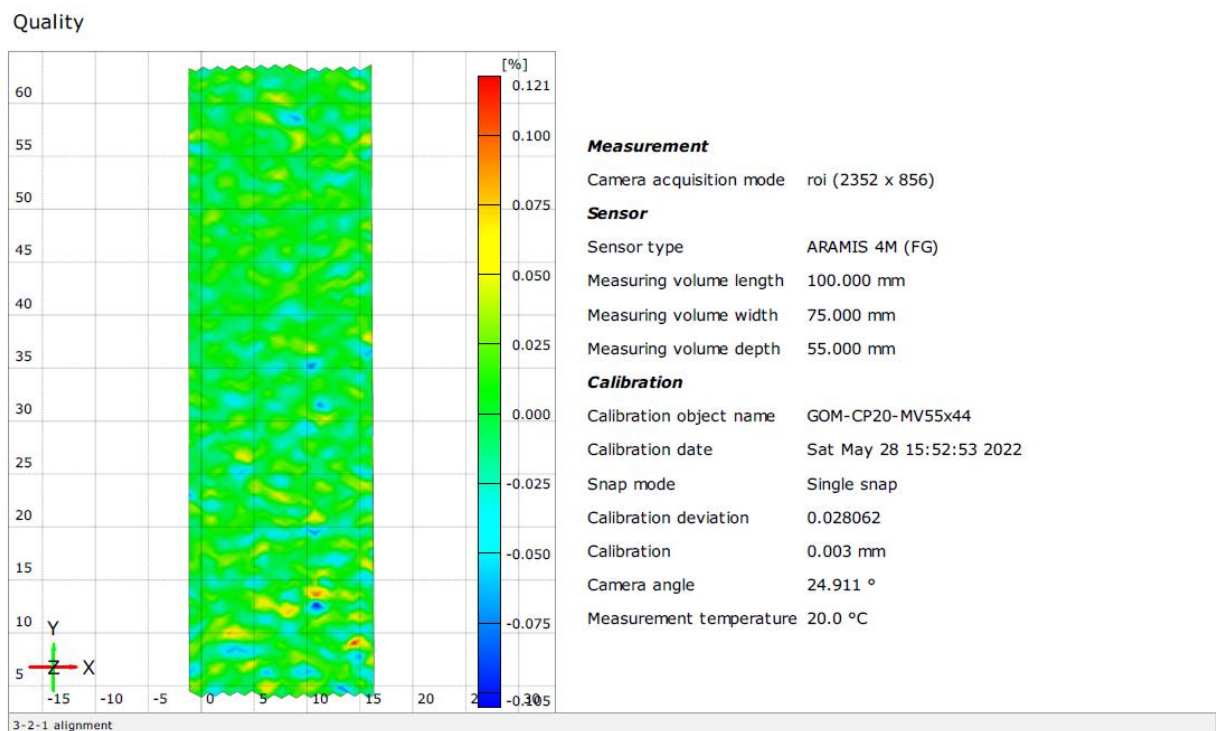
V předchozích tabulkách jsou vyhodnocené hodnoty exponentu deformačního zpevnění (n) a koeficientu anizotropie (r) ze systému ARAMIS pro různé rychlosti a tři orientace vůči směru válcování. Dále jsou tam i hodnoty pevnostní přímo ze systému Test & Motion. V posledním sloupci je zaznamenána zásoba plasticity vyjádřena pomocí poměru meze kluzu s mezí pevnosti v tahu. Dle očekávání hodnoty v tabulkách potvrzují trend, že se zvyšující se rychlostí zatěžování klesá tažnost materiálu a naopak roste jeho pevnost.

Některé hodnoty exponentu deformačního zpevnění (n) a koeficientu anizotropie (r) ze systému ARAMIS chybí kvůli špatné kvalitě „*patternu*“. Z tohoto důvodu nemohly být některé vzorky vyhodnoceny. Problém nastával při loupání barev a nižší intenzitě osvětlení. V průběhu experimentu jsem s těmito poznatky pracoval a snažil se je řešit. Dalším důvodem, proč se některé hodnoty ze systému ARAMIS nepodařilo naměřit, může být neprovedená kalibrace kamer po delší době např. týdnů. Tato kalibrace nemusí být provedena před každým měřením, nicméně pokud se například týden neměří a poté se má jít měřit, tak je potřeba kalibraci provést. Jedná se o náročný proces, který vyžaduje přítomnost více lidí.

U vzorků, kde chybí vyhodnocená homogenní plastická tažnost mohlo docházet k prokluzu vzorku v čelistech způsobeným nedostatečným dotažením čelistí. Dále v průběhu zkoušky mohlo nastat, že ze vzorku spadl příčný extenzometr pro měření kontrakce a posunula se tak svorka s reflexní páskou umístěná na vzorku. To mohlo vést k ovlivnění

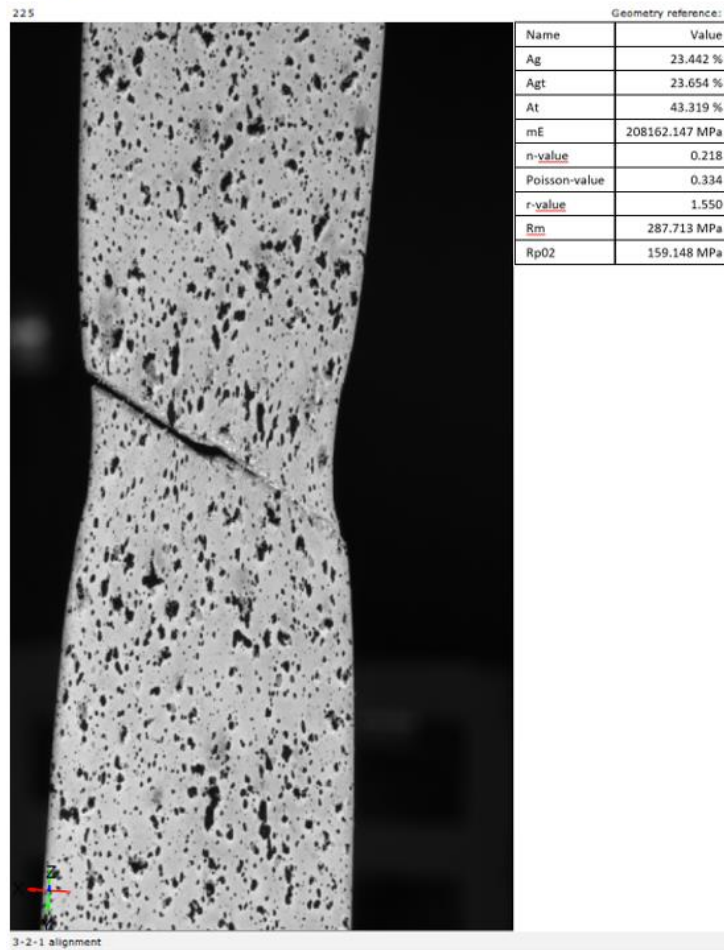
měření tažnosti. Nicméně i přesto vychází směrodatné odchylky poměrně nízké a jejich hodnoty jsou do 10% průměrné hodnoty dané charakteristiky.

Na obrázcích níže jsou pro ilustraci zobrazeny některé stránky z protokolu o vyhodnocení zkoušek, který se vygeneroval ze systému ARAMIS. Z důvodu velkého množství provedených zkoušek a skutečnosti, že projekt, jehož součástí je i má diplomová práce, stále pokračuje a není ukončen, nebudou uvedeny všechny protokoly z měřených zkoušek. Na úvodní stránce jsou vždy hodnoty, které se týkají nastavení kamer. Dále jsou tam některé informace o kalibraci kamer. Například parametr na úvodní stránce označený jako *Calibration deviation* má limitní hodnotu 0.05 a parametr *Calibration* má limitu 0.005 mm. Pokud některá z těchto hodnot nevyšla v přípustné mezi, nebylo možné vyhodnotit výsledky. Dále pak protokol obsahuje materiálová data naměřená na vzorku a vygeneruje i grafy smluvního a skutečného digramu z průběhu zkoušky.



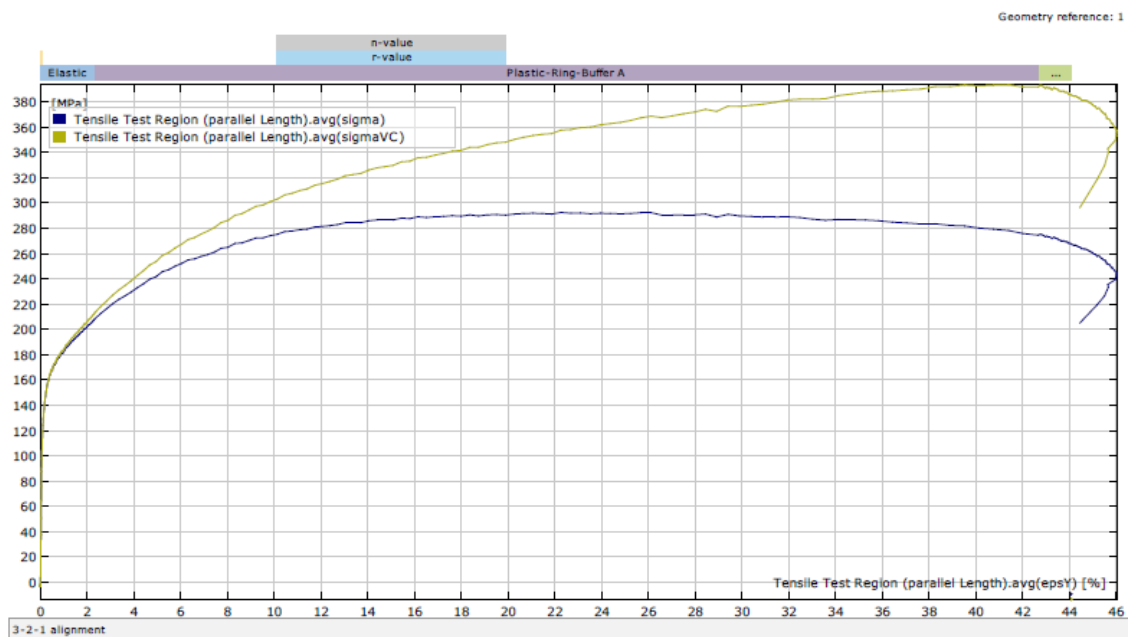
obr. 35 Úvodní stránka z protokolu s informacemi o nastavení kamer

Materialdata



obr. 36 Vyhodnocená materiálová data se snímkem při prasknutí vzorku

Stress - Strain Curve



obr. 37 Vygenerovaný smluvní a skutečný diagram

8 Zkoušky dle Nakajimy- křivky mezních deformací

8.1 Příprava vzorků

Vzorky pro měření FLC křivek jsem si připravil ze stejných přístřihů jako pro vzorky na zkoušky tahem. Norma ČSN EN ISO 12004-2 předepisuje pro popis kompletní křivky mezních deformací alespoň pět různých geometrií, které rovnoměrně popíší celou oblast křivky. V tomto experimentu jsem se rozhodl FLC křivky měřit pro osm různých geometrií, abych měl přesnější popis křivek. Každou geometrii jsem si připravil pět krát, abych měl jistotu, že docílím alespoň tří platných měření jak je předepsáno v normě.

Nejprve se z přístřihů nastříhaly čtverce o rozměru 205 mm krát 205 mm. V rozích se vyvrtaly díry, aby bylo možné více plechů pro stejnou geometrii sešroubovat. Poté se sedm geometrií viz obr. 38 nechalo vyrobít drátovým elektroerozivním obráběním (WEDM), aby nedošlo ke zpevnění hrany a tedy ovlivnění materiálu v měřené oblasti. Osmá geometrie zůstala pouze jako čtverec 200 x 200 mm. Při přípravě vzorků bylo důležité dbát na správný směr válcování v dřívku, který předepisuje norma pro zkoušení ocelí kolmo na hranu dřívku.



obr. 38 Sedm geometrií vyrobených pomocí WEDM ve tvaru FLC

8.1.1 Čištění a odmaštění

Jelikož se vzorky nechávaly vyrobit pomocí WEDM u externího dodavatele, dorazily zpět do laboratoře značně znečištěné od dielektrika viz obr. 39. Proto bylo zapotřebí vzorky důkladně umýt a odmastit, kvůli následnému nanášení barev a vytváření náhodné sítě.



obr. 39 Vzorky před a po čištění

Čištění a odmašťování probíhalo hodně podobně jako u vzorků pro zkoušky tahem. Přibylo čištění pomocí isopropylalkoholu 99.8 %. Postup byl následující:

1. Mytí vzorků v teplé vodě s jarem.
2. Oplach vodou a následné vysušení.
3. Čištění zkoušené délky odmašťovačem CL 07.
4. Oplach vodou a následné vysušení.
5. Čištění zkoušené délky pomocí technického líhu.
6. Oplach vodou a následné vysušení.
7. Čištění pomocí isopropylalkoholu.
8. Oplach vodou a následné vysušení.



obr. 40 Isopropylalkohol 99.8% a čistič CL07

8.1.2 Vytváření náhodné sítě

Při vytváření stochastické sítě na vzorky pro měření křivek mezních deformací (FLC) jsem vycházel z poznatků získaných při přípravě vzorků pro zkoušky tahem. Nicméně i přesto se vyskytl problém s přilnavostí barvy. Jelikož u měření FLC křivek působí deformace v trojrozměrném prostoru, na rozdíl od zkoušek tahem, kde působí jen v rovině. Proto bylo zapotřebí metodiku ještě vylepšit.

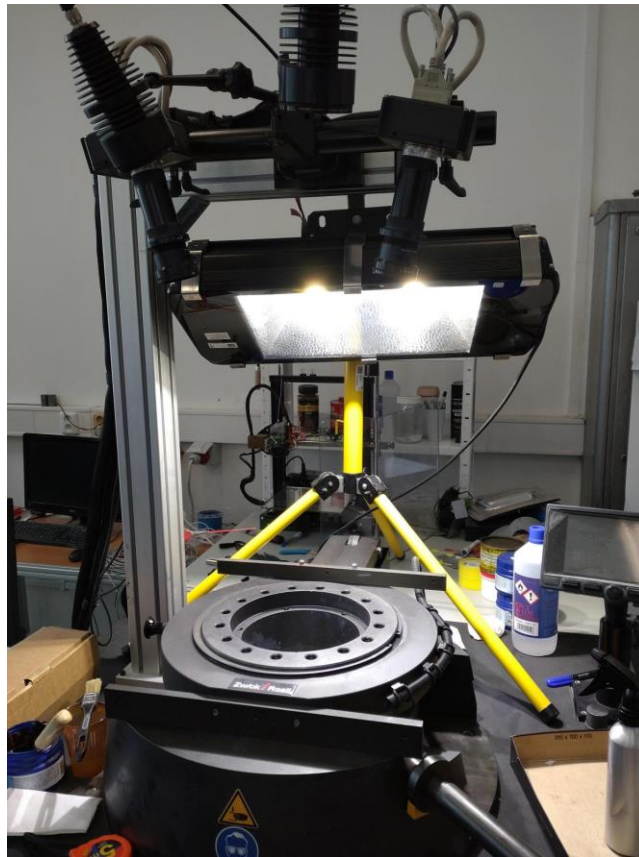
Barva na vodní bázi s plastickými částicemi vytvářející granitový efekt se osvědčila velmi dobře. Jako podklad jsem zvolil základový sprej bílé barvy viz obr. 41. Díky tomuto základovému spreji další vrchní barva lépe přilne a zabrání se tak nepříznivému loupání barev před dokončením zkoušky.



obr. 41 Kombinace barev ve spreji pro tvorbu stochastické sítě

8.2 Zkušební zařízení

Měření se provádělo na zkušebním stroji německé značky ZwickRoell pro zkoušení plechů. Jednalo se o stroj typu BUP. Tento stroj slouží pro různé technologické zkoušky tvárnosti plochých polotovarů. Lze na něm kromě FLC křivek provádět zkoušku rozšiřování otvoru, zkoušku kalíškovací a zkoušku podle Erichsena. Fakulta strojní má v laboratoři stroj BUP 600, kde nám číslo 600 značí maximální sílu v kN, kterou je stroj schopný vyvinout. Výrobce uvádí, že sílu 600 kN lze vyvinout jak na přídržovači, tak i na nástroji. Vzorky, které jsem připravil pro zkoušku dle Nakajimy měly tloušťku 0,7 mm, nicméně stroj BUP 600 zvládne vzorky do tloušťky 10 mm a průměru 250 mm. Dále je v dokumentaci ke stroji uvedeno, přesnost tvářecí síly i síly na přídržovači je 0,01 kN. Stroj je schopný vyvinout maximální rychlost tažení 1000 mm/min. Výrobce doporučuje chlazení vodou teploty 20 °C s průtokem 7 l/min. Zmiňuji to, protože stroj se velmi zahřívá, obzvlášť při měření vyššími rychlostmi nástroje. Podobně jako u předchozího měření i zde se zaznamenával a vyhodnocoval průběh zkoušek pomocí systému ARAMIS. Při vysoké rychlosti 17 mm/s jsem opět přidal externí LED reflektor za kamery viz obr. 42, aby byl vzorek dostatečně osvětlen. Získal jsem tak stabilnější výsledky a docílil lepší čitelnosti kvality náhodné sítě na vzorku. Při nižší rychlosti zatěžování 10 mm/s se u této konfigurace kamer viz obr. 43 reflektor nemusel použít a stačilo pouze více otevřít clony u světelných nastavitelných základně kamer. Vzorek, který byl umístěn ve stroji bylo možné lépe osvětlit, protože nebyl tolik ovlivněn vnějším prostředím, jako u zkoušky tahem.



obr. 42 Konfigurace s přidáním LED reflektorem



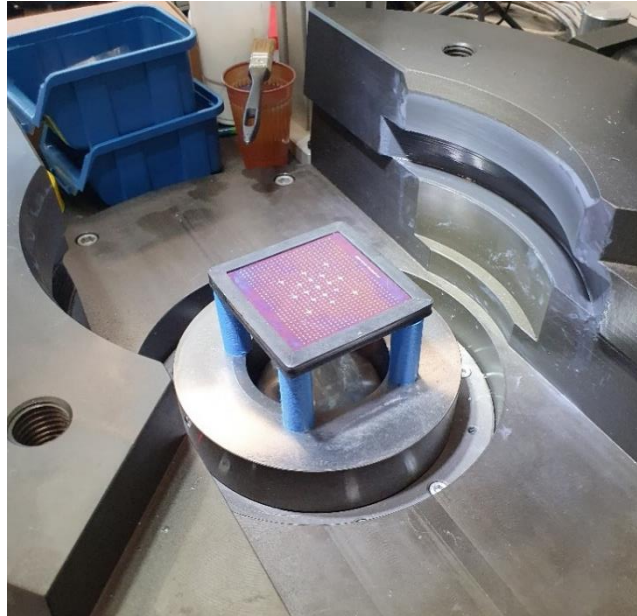
obr. 43 Zkušební stroj BUP 600

8.3 Postup měření

Nejprve se provedla kalibrace optického systému ARAMIS, jako u předešlého experimentu. Kalibrační protokol je k dispozici viz příloha 2. Ovšem zde se kalibrovaly kamery přímo v prostoru přídržovače, kam se následně umísťovaly vzorky. Bylo nutné zkalibrovat kamery tak, aby správně rozpoznávaly síť na vzorku v počáteční i konečné poloze zkoušky. Z cvičného měření jsem zjistil přibližně maximální výšku deformovaného plechu po zkoušce. Potom jsem pomocí technických dat dodaných výrobcem zjistil potřebnou hloubku ostrosti pro požadovaný měřený objem. Data, se kterými jsem pracoval jsou viz Tabulka 13. Na 3D tiskárně jsem si vytiskl válečky pro kalibraci (viz obr. 44) vysoké 15 mm, 53 mm a 91 mm. Následovala kalibrace vedená softwarem ARAMIS a různým otáčením kalibrační destičky v jednotlivých polohách dle pokynů. Na rozdíl od kalibrace kamer pro měření zkoušek tahem, zde kalibrace trvala přibližně 15 minut a mohl jí provést jeden člověk.

Tabulka 13 Některá technická data ke kalibraci systému ARAMIS

Senzor: ARAMIS 45 rev03; Objektivy: Titanar 100 mm	
Měřená plocha [mm x mm]	80 x 60
Min. vzdálenost vyložení [mm]	500
Distanční kroužky [mm]	12.5
Vzdálenost měření [mm]	785
Vzdálenost kamer [mm]	318
Úhel kamer [°]	25
Kalibrační objekt	CQ/CP20 55x44
Hloubka ostrosti (clona 16) [mm]	38



obr. 44 Kalibrace

Po úspěšně provedené kalibraci následovalo měření, kdy bylo nutné dbát na dodržení tribologického systému, aby vzorky praskaly v oblasti max 15 % průměru tažníku od vrcholu. Pro geometrie s užším dřikem (cca do oblasti rovinné deformace) stačilo následující:

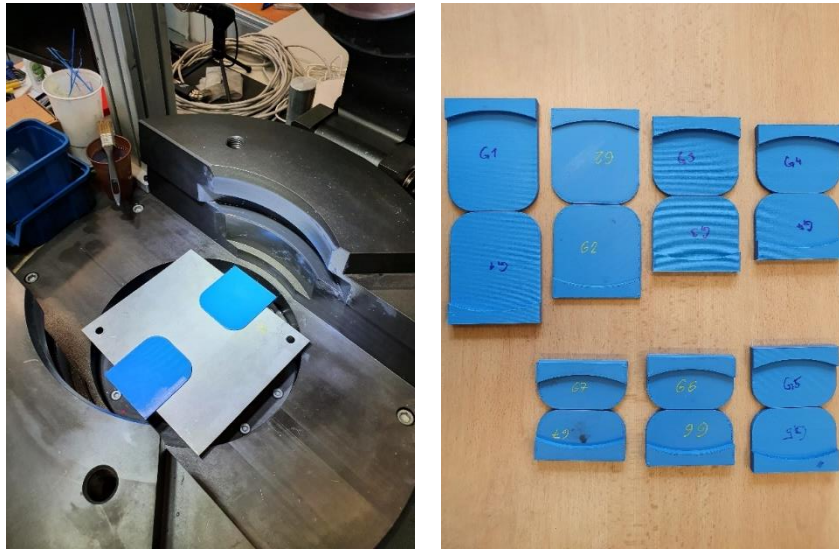
- Potřít tažník olejem
- Přes tažník položit tři proužky teflonové pásky
- Lehce přetřít olejem
- Na tažník položit čtverec vystřižené PE folie

Pro vzorky s širším dřikem bylo potřeba použít následující tribologický systém:

- Potřít tažník tuhým mazivem na ložiska
- Přes tažník položit tři proužky teflonové pásky
- Nastříkat přes proužky teflonové mazivo
- Na tažník položit čtverec vystřižené PE folie
- Lehce uprostřed potřít vzorek zespoda tuhým mazivem na ložiska

Kvůli poměrně vysoké ceně výroby vzorků pomocí WDEM se nevyplatilo vyřezat je do kruhového tvaru. Při zakládání vzorků ve tvaru písmene „H“ na přídržovač, bylo náročné správně je umístit. Proto se opět vyrobily přípravky pomocí 3D tiskárny na

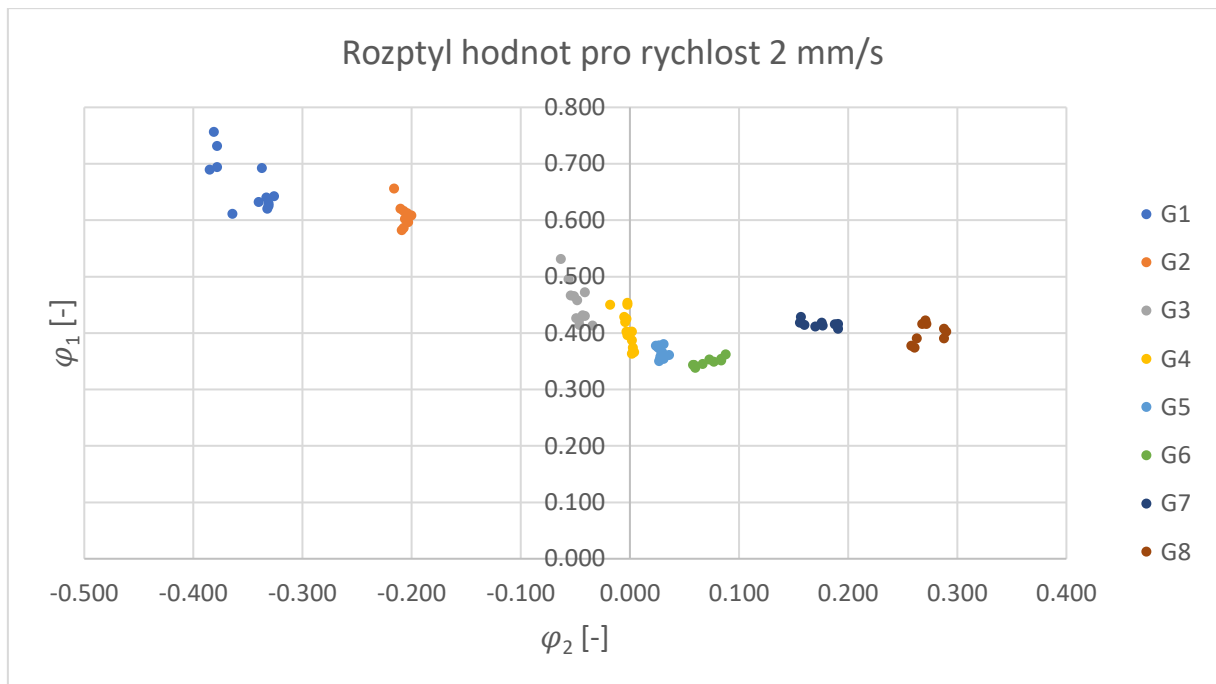
vystředění vzorků v přidržovači viz obr. 45. Po vystředění vzorků se mohla provést zkouška, kdy síla na přidržovači byla u všech měření nastavená na 300 kN.



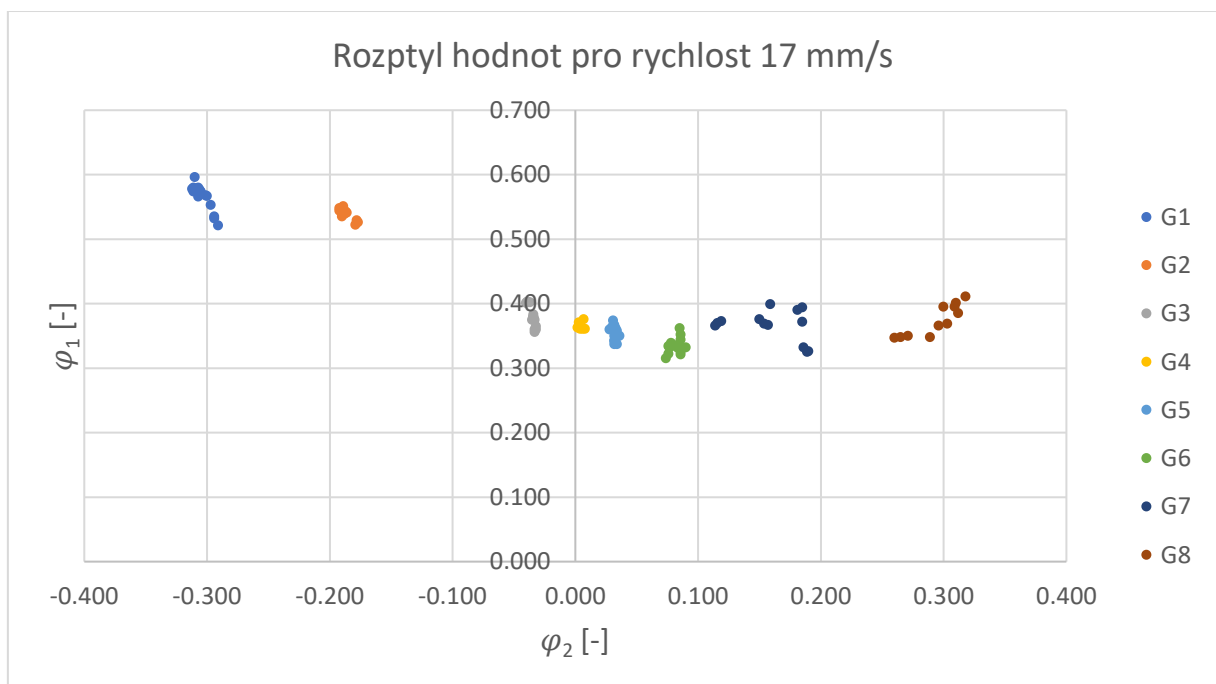
obr. 45 Pomocné přípravky na zakládání vzorků

8.4 Vyhodnocení křivek mezních deformací

Naměřená data jsem se ze systému ARAMIS nahrál do excelu, kde jsem je následně zpracoval. Výsledky rozptylu hodnot pro jednotlivé geometrie je možné vidět na následujících grafech. Následně se ještě provedla korekce pro hodnoty geometrie, u které vycházely nejnižší hlavní napětí. Důvodem je použitý tažník dle Nakajimy, kdy kvůli půlkulovému tvaru dochází k nelineární deformační cestě.



Graf 8 Rozptyl naměřených hodnot pro FLC křivku při rychlosti zatěžování 2 mm/s



Graf 9 Rozptyl naměřených hodnot pro FLC křivku při rychlosti zatěžování 17 mm/s

Zprůměrované hodnoty pro různé rychlosti i geometrie po korekci jsem následně vložil do grafu, kde byla kvůli korekci vynechána geometrie číslo pět. Body jsou proloženy přímkou viz Graf 10, aby bylo dobře vidět, jak zvyšující se rychlost tažníků koreluje

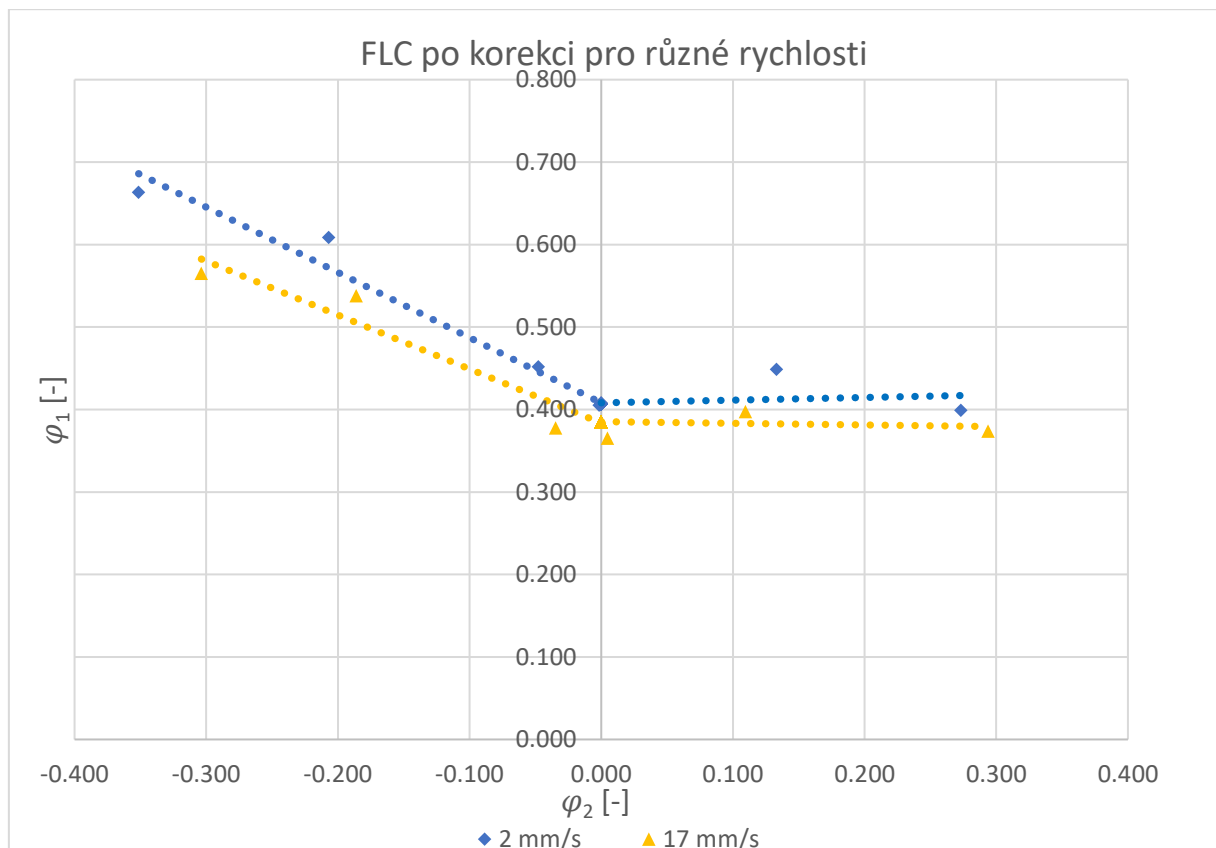
s rychlostí deformace negativně ovlivňuje zásobu plasticity a zmenšuje se tak bezpečná oblast pro tváření v rovině hlavních deformací.

Tabulka 14 Hodnoty hlavních deformací pro různé rychlosti

Průměrné hodnoty pro jednotlivé geometrie				
Rychlost tažníku:	2 [mm/s]		17 [mm/s]	
Deformace:	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]
Geometrie 1	0.663	0.351	0.565	0.304
Geometrie 2	0.609	0.207	0.538	0.186
Geometrie 3	0.452	0.048	0.378	0.035
Geometrie 4	0.405	0.002	0.366	0.005
Geometrie 5	0.364	0.029	0.354	0.032
Geometrie 6	0.349	0.072	0.334	0.082
Geometrie 7	0.416	0.174	0.366	0.160
Geometrie 8	0.399	0.273	0.374	0.294

Tabulka 15 Hodnoty hlavních deformací po korekci

Průměrné hodnoty po korekci				
Rychlost tažníku:	2 [mm/s]		17 [mm/s]	
Deformace:	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]
Geometrie 1	0.663	0.351	0.565	0.304
Geometrie 2	0.609	0.207	0.538	0.186
Geometrie 3	0.452	0.048	0.378	0.035
Geometrie 4	0.405	0.002	0.366	0.005
Geometrie 5	0.407	0.000	0.385	0.000
Geometrie 6	0.449	0.133	0.398	0.110
Geometrie 7	0.399	0.273	0.374	0.294



Graf 10 Porovnání FLC křivek po korekci pro různé rychlosti zatěžování

Na obrázcích níže jsou zobrazeny vzorky po dokončení zkoušek, kde je dobře vidět, že se podařilo nastavit dostatečný tribologický systém a vzorky praskaly na správném místě. Dále je ještě obrázek, na kterém je vidět množství vzorků potřebných pro naměření jedné rychlosti.



obr. 46 Vzorky se správnou polohou vzniku trhliny



obr. 47 Vzorky po kompletním naměření jedné rychlosti

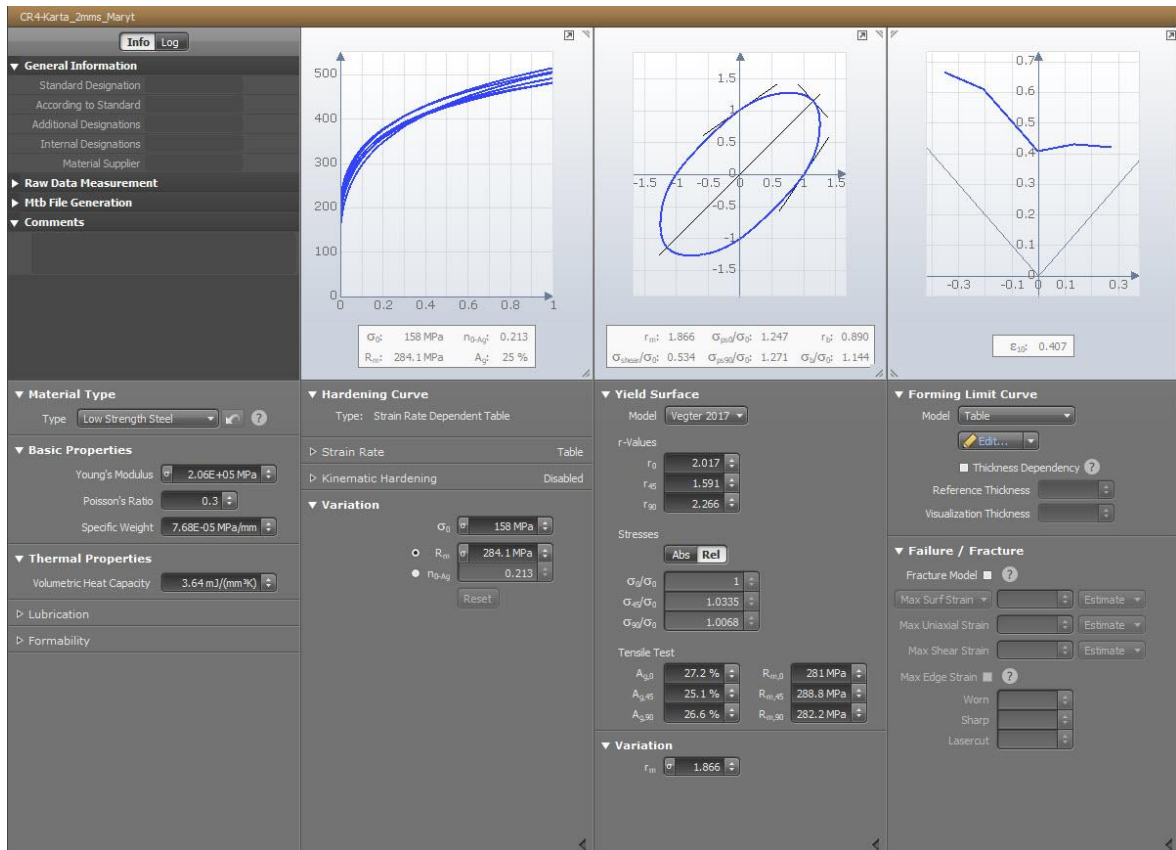


9 Sestavení materiálové karty v AutoForm

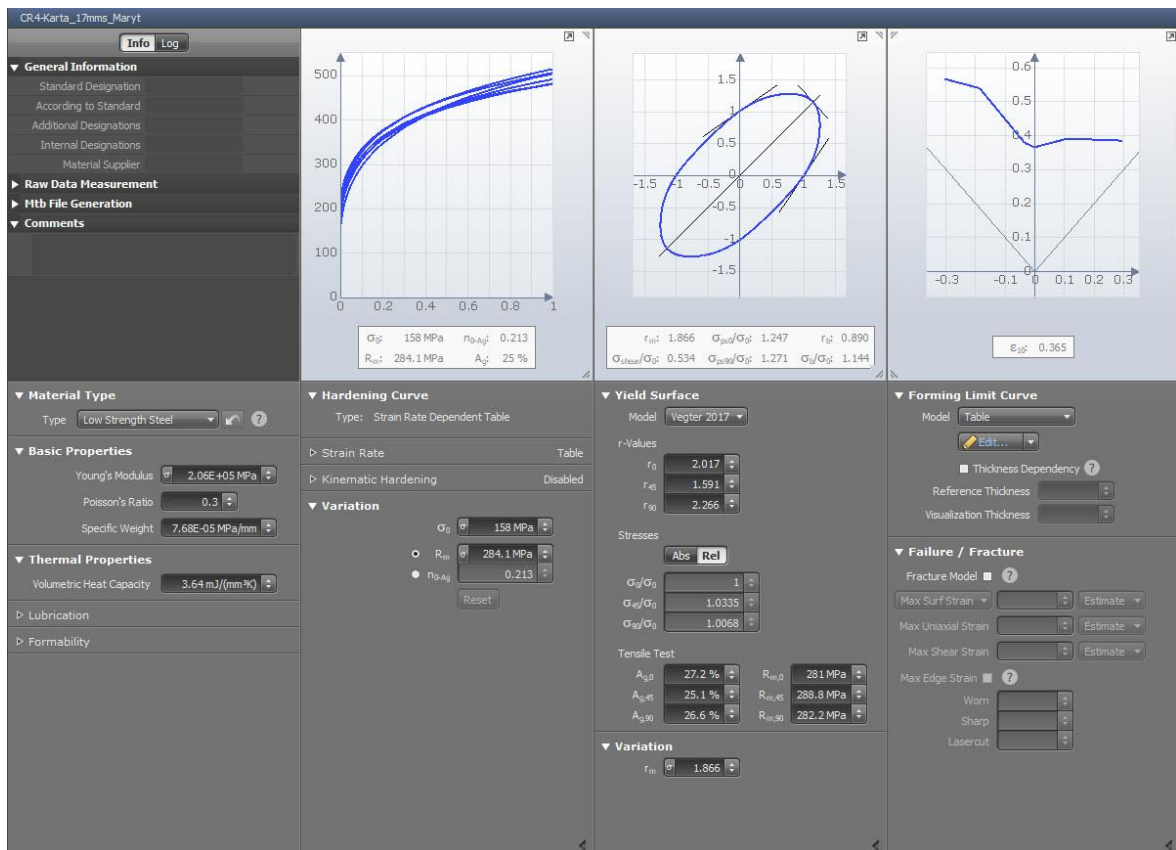
Naměřená data z obou experimentů byla po zpracování naimportována do programu AutoForm, kde se z nich sestavily dvě materiálové karty. Důvodem proč se vytvořily dvě karty je ten, že v AutoFormu nelze do jedné materiálové karty vložit více FLC křivek pro různé rychlosti najednou. Obě karty poté obsahují křivky zpevnění pro různé deformační rychlosti.

V případě, že je zapotřebí vytvořit materiálovou kartu s více křivkami zpevnění, je nutné si nejprve v textovém editoru nachystat potřebná data, která budou nahrána do AutoFormu. Data z průběhu zkoušek tahem, pro jednotlivé deformační rychlosti, skutečné deformace a skutečné napětí se naformátují do požadované podoby, aby bylo možné s nimi v materiálovém editoru dále pracovat. Kvůli autorské ochraně softwaru AutoForm, není možné uvést přesnou podobu dat. Poté se ještě doplní příslušné deformační rychlosti v materiálovém editoru.

Dalším krokem bylo již doplnění mezního kritéria plasticity, kdy jsem si zvolil kritérium Vegter 2017. V teoretické části byly shrnuty jeho výhody oproti ostatním kritériím. Navíc hodnoty koeficientu anizotropie i plastické tažnosti jsem měl k dispozici ze zkoušek tahem. Nakonec se nahrály data pro křivku mezních deformací. FLC křivky pro rychlost 2 mm/s a 17 mm/s se nahrály již po korekci. Výsledné materiálové karty sestavené v softwaru AutoForm jsou na obrázcích níže.

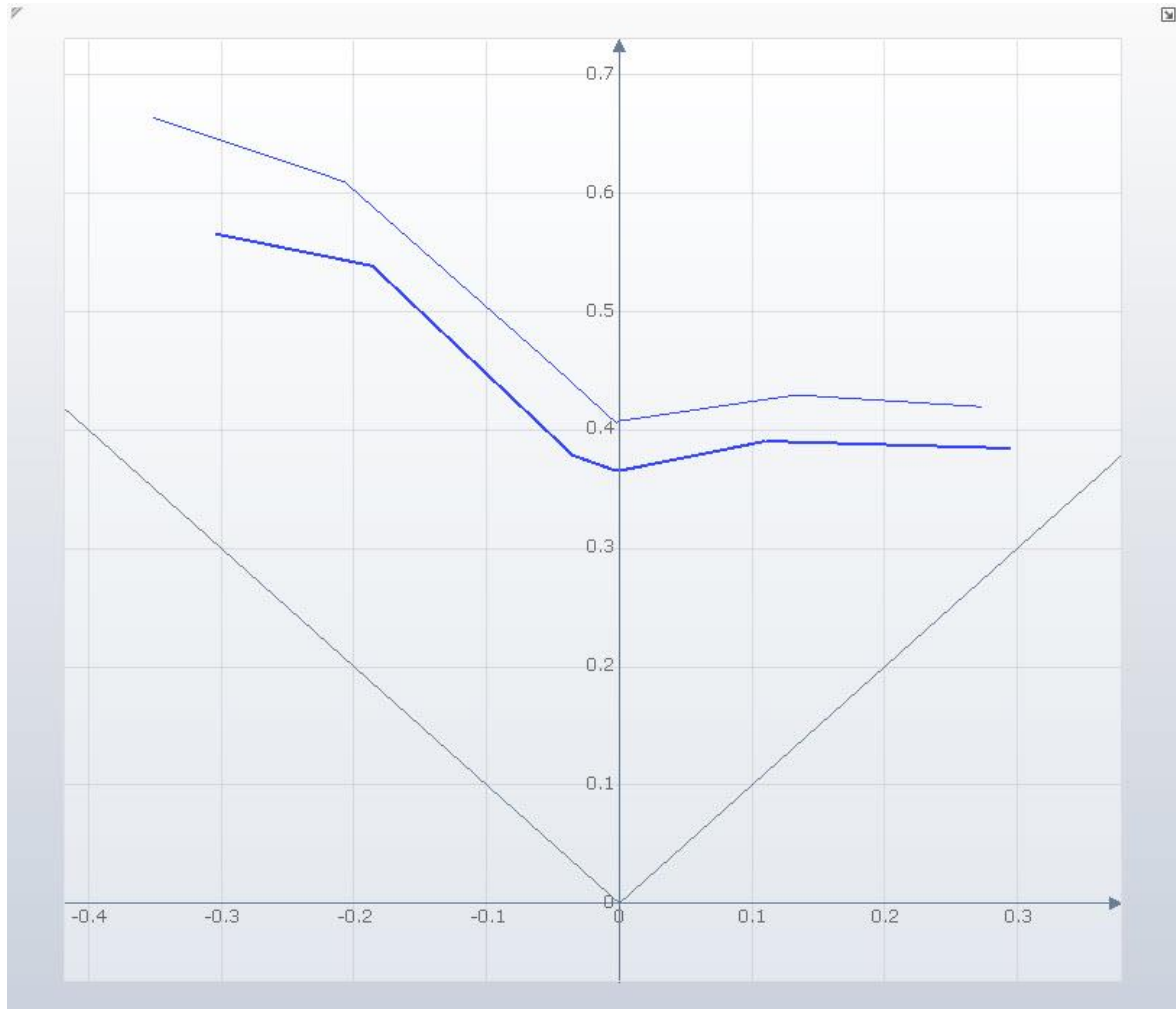


obr. 48 Materiálová karta s FLC při rychlosti 2 mm/s



obr. 49 Materiálová karta s FLC při rychlosti 17 mm/s

Ačkoliv simulační program AutoForm neumožňuje použít dvě FLC křivky v jedné materiálové kartě, je možné si materiálové karty porovnat, tudíž se zobrazí i porovnáni křivek. Na obr. 50 jsou vidět pro porovnání obě FLC křivky. Spodní křivka je pro rychlost 17 mm/s a horní je pro rychlost 2 mm/s.



obr. 50 Porovnání FLC křivek pro dvě různé rychlosti zatěžování

10 Závěr

Obsahem této diplomové práce je tvorba materiálových karet pro materiálovou jakost CR4 ve spolupráci se ŠKODA AUTO. V dnešní době se numerické simulace stávají nedílnou součástí, jak konstruktérů, tak i technologů. Proto je velmi důležité, aby vstupní data do simulací odpovídala reálnému procesu. Data v materiálových kartách musí být měřena při vyšších rychlostech zatěžování, tudíž i deformace.

Obsahem teoretické části je základní seznámení s problematikou tváření, kde je popsáno rozdělení technologie tváření. Poté následuje úvod do numerických simulací plošného tváření, ve kterém popisují základní metody řešení. Dále jsou zde představeny i dva běžně komerčně využívané softwary pro simulace plošného tváření. Následuje teorie k materiálovým vlastnostem, které jsou z hlediska plošného tváření zásadní. Dále jsou představeny různé materiálové modely plasticity, které jsou často využívány v numerických simulacích. Nakonec je shrnuta teorie digitální korelace obrazu pro měření deformací.

V praktické části jsem se zabýval návrhem experimentu, který se skládal z měření zkoušek tahem a zkoušek dle Nakajimy. Tyto zkoušky byly vybrány na základě zvolené metody tvorby materiálové karty pro numerické simulace. Po důkladném prostudování materiálových modelů plasticity používaných v numerických simulacích, jsem se rozhodl pro použití modelu Vegter 2017. Hlavním důvodem bylo, že se jedná o velmi přesný materiálový model a pro tvorbu mezního kritéria plasticity dle Vegter 2017 stačilo naměřit pouze zkoušky tahem. Dalším potřebným vstupem pro tvorbu materiálové karty jsou křivky zpevnění, které jsem opět získal z měření zkoušek tahem. A nakonec bylo potřeba získat FLC křivku pro danou materiálovou jakost, kterou jsem naměřil pomocí zkoušky dle Nakajimy. Jelikož bylo cílem přiblížit se při tvorbě materiálové karty reálnému procesu tváření, bylo měření prováděno při normalizované (2 mm/s) a nejvyšší možné rychlosti, které zařízení BUP 600 dokáže vyvodit (17 mm/s).

Jak zkoušky tahem, tak i zkoušky dle Nakajimy byly měřeny a vyhodnocovány pomocí optického systému ARAMIS. Během experimentu bylo zapotřebí vytvořit metodiku měření a vyhodnocení. Systém ARAMIS funguje na principu digitální korelace obrazu, která byla popsána v teoretické části. V průběhu obou měření jsem se potýkal s problémy dostatečné přilnavosti „*patternu*“. Bylo nutné najít ideální kombinaci barev ve spreji pro vytvoření stochastické sítě na vzorcích. Dále se vyskytl problém při měření vysokými rychlostmi zatěžování. Kamery které snímaly deformace vzorků nedokázaly dostatečně

kvalitně snímat „*pattern*“. To vedlo k zvětšení intenzity osvětlení pomocí přidávaných LED reflektorů spolu se zvýšenou snímkovací frekvencí. U zkoušek tahem ještě navíc docházelo k prokluzování tenkých vzorků v čelistech trhacího stroje, a to hlavně při vysokých rychlostech zatěžování. Při měření FLC křivek zase docházelo k praskání vzorků mimo oblast, kterou předepisuje norma, proto bylo zapotřebí nastavit správně tribologický systém. Obecně se zkoušky při vyšších rychlostech zatěžování prováděly mnohem obtížněji, než ty při nízké rychlosti.

Na výsledcích ze zkoušek tahem je vidět, že se potvrdil předpoklad, kdy s rostoucí rychlostí deformace klesá zásoba plasticity. Dále při vyšších rychlostech zatěžování dochází k intenzivnějšímu zpevnování a roste mez pevnosti spolu s mezí kluzu, přičemž se hodnoty meze kluzu blíží k mezi pevnosti. Opačný trend má však tažnost při rostoucí rychlosti deformace.

Výsledky z měření křivek mezních deformací je zřejmé, že s rostoucí rychlostí zatěžování klesá poloha křivky vymežující bezpečnou oblast pro tváření. Potvrdil se opět předpoklad, že FLC křivka pro nižší rychlost zatěžování bude v FLD digramu položena výše nad křivkou pro rychlost vyšší. Tudíž se zásoba plasticity s rostoucí rychlostí zmenšuje.

Výsledkem jsou poté materiálové karty pro rychlost zatěžování 2 mm/s a 17 mm/s, kde je vidět značný vliv rozdílné rychlosti zatěžování. Karty jsou dvě, jelikož není možné definovat v softwaru AutoForm dvě FLC křivky do jednoho FLD diagramu. Hodnoty z obou měření byly upraveny do požadované podoby, aby bylo možné je vložit do materiálového editoru softwaru AutoForm. Poté byly karty v softwaru vytvořeny a jsou připravené pro následné použití.

Možné pokračování pro další výzkum je měření požadovaných vlastností v závislosti na různé poloze svítku plechu. Poté by se mohl zkoumat vliv teploty, která odpovídá podmínkám při lisovacím procesu, na tvářecí proces. Je třeba si uvědomit, že v průběhu tváření se nástroje vlivem deformace a deformační rychlosti zahřívají. Teplo se z nástroje poměrně snadno převede na tenký plech používaný v automobilovém průmyslu. Dosažená teplota je sice pod hranicí pro tváření za tepla, ale na chování a vlastnosti materiálu bude mít vliv. Výsledky by se poté zakomponovaly do materiálové karty pro numerické simulace. Dále by bylo vhodné měřit data i pro jednotlivé dodavatele či šarže (tavby) materiálu. Výsledkem by mohlo být několik materiálových karet, které by byly k dispozici



a uživatel by si akorát vybral požadovaného dodavatele. Výsledky z těchto simulací by poté měly mnohem přesněji odpovídat skutečnému výrobnímu procesu a nemělo by docházet ke tvorbě vad v průběhu výroby.

Seznam použité literatury

- [1] SEMIATIN, S.L. *ASM Handbook, : Volume 14B - Metalworking: Sheet Forming*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2006. ISBN 978-0-87170-710-9.
- [2] LENFELD, Petr. *Technologie II: Tváření kovů* [online]. In: . Technická univerzita Liberec [cit. 2022-07-27]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/obsah_kovy.htm
- [3] ABLAT, Muhammad Ali a Ala QATTAWI. Numerical simulation of sheet metal forming: a review. *The international journal of advanced manufacturing technology* [online]. 2017, **89**(1-4), 1235-1250 [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-016-9103-5
- [4] MAKINOUCI, A., C. TEODOSIU a T. NAKAGAWA. Advance in FEM Simulation and its Related Technologies in Sheet Metal Forming. *CIRP Annals* [online]. 1998, **47**(2), 641-649 [cit. 2022-01-29]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/S0007-8506(07)63246-6
- [5] *AutoForm: Forming Reality* [online]. [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: <https://www.autoform.com/en/>
- [6] *ESI-group: PAM-STAMP* [online]. [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: <https://www.esi-group.com/products/sheet-metal-forming>
- [7] PETRMICHL, Rudolf. Počítačová simulace tváření plechů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pocitacova-simulace-tvareni-plechu>
- [8] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [9] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [10] KOTOUČ, Jiří. *Teorie a metodika tváření: Návody ke cvičení*. 1. vydání. Praha: ČVUT, 1992. ISBN 80-01-00842-8.
- [11] TATÍČEK, František. Vliv materiálu na kvalitu výlisku. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vliv-materialu-na-kvalitu-vylisku>
- [12] *Vlastnosti a zkoušení materiálů* [online]. In: . [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_014/Vlastnosti%20a%20zkou%C5%A1en%C3%AD%20materi%C3%A1l%C5%AF/02%20Text%20pro%20e-learning/Vlastnosti%20a%20zkou%C5%A1en%C3%AD%20materi%C3%A1l%C5%AF%2003.pdf
- [13] PETRUŽELKA, Jiří a Pavel SONNEK. *TVAŘITELNOST KOVOVÝCH MATERIÁLŮ*. Ostrava, 2006. poslední aktualizace 9.1.2007. VŠB-Technická univerzita Ostrava.
- [14] SCHINDLER, Ivo a Petr KAWULOK. *Deformační chování materiálů* [online]. In: . První. Ostrava, 2013 [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/deformacni-chovani-materialu/Schindler_Kawulok_Deformacni_chovani_materialu.pdf
- [15] ALTAN, Taylan a A. Erman TEKKAY. *Sheet Metal Forming - Fundamentals* [online]. ASM International, 2012 [cit. 2022-01-29]. ISBN 978-1-62198-304-0. Dostupné z: <https://app.knovel.com/kn/resources/kpSMFF0001/toc>
- [16] JANOVEC, Jiří, Petr ZUNA a Karel MACEK. *Fyzikální metalurgie*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02935-2.
- [17] EN ISO 12004-2. *Kovové materiály - Stanovení křivek mezní tvařitelnosti pro plechy a pásy - Část 2: Stanovení křivek mezní tvařitelnosti v laboratoři*. 2021.
- [18] NOVÁK, V., M. VALEŠ, F. TATÍČEK, J. ŠANOVEC a L. CHRÁŠŤANSKÝ. *The effect of strain rate on position of forming limit curve* [online]. 2019, 450-454 [cit. 2022-08-11]. ISSN 2694-9296. Dostupné z: doi:10.37904/978-80-87294-92-5

- [19] NOVÁK, V., M. VALEŠ, F. TATÍČEK, J. ŠANOVEC a L. CHRÁŠŤANSKÝ. *Analysis of forming capacity of HCT490X and DX57D depending on strain rate* [online]. 2021 [cit. 2022-08-12]. ISSN 1757-899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/1178/1/012045
- [20] BANABIC, Dorel. Plastic Behaviour of Sheet Metal. In: BANABIC, Dorel. *Sheet Metal Forming Processes* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, s. 27-140 [cit. 2022-02-07]. ISBN 978-3-540-88112-4. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-540-88113-1_2
- [21] PIJLMAN, HERMEN, MEINDERS, CARLEER a VEGTER. *The implementation of the vegter yield criterion and a physically based hardening rule in finite elements* [online]. 1998 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/237473051_The_implementation_of_the_vegter_yield_criterion_and_a_physically_based_hardening_rule_in_finite_elements
- [22] VEGTER, Henk, Carel TEN HORN a Michael ABSPOEL. The Vegter Lite material model: simplifying advanced material modelling. *International Journal of Material Forming* [online]. 2011, **4**(2), 85-92 [cit. 2022-03-21]. ISSN 1960-6206. Dostupné z: doi:10.1007/s12289-010-1006-7
- [23] VEGTER, Henk, Carel TEN HORN a Michael ABSPOEL. The corus-vegter lite material model: simplifying advanced material modelling. *International Journal of Material Forming* [online]. 2009, **2**(1), 511-514 [cit. 2022-03-21]. ISSN 1960-6206. Dostupné z: doi:10.1007/s12289-009-0640-4
- [24] ABSPOEL, M, M E SCHOLTING, M LANSBERGEN a B M NEELIS. Accurate anisotropic material modelling using only tensile tests for hot and cold forming. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2017, **896** [cit. 2022-04-04]. ISSN 1742-6588. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/896/1/012049
- [25] ABSPOEL, Michael, Marc E. SCHOLTING, Marcel LANSBERGEN, Yuguo AN a Henk VEGTER. A new method for predicting advanced yield criteria input parameters from mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2017, **248**, 161-177 [cit. 2022-04-04]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.05.006
- [26] VEGTER, H. a A.H. VAN DEN BOOGAARD. A plane stress yield function for anisotropic sheet material by interpolation of biaxial stress states. *International Journal of Plasticity* [online]. 2006, **22**(3), 557-580 [cit. 2022-08-12]. ISSN 07496419. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijplas.2005.04.009
- [27] YUAN, Shan. *Digital image correlation and edge detection: applications in materials testing*. Coral Gables, Florida, 2014. PhD Thesis. University of Miami.
- [28] GÓRSZCZYK, Jarosław, Konrad MALICKI a Teresa ZYCH. Application of Digital Image Correlation (DIC) Method for Road Material Testing. *Materials* [online]. 2019, **12**(15) [cit. 2022-01-29]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma12152349
- [29] ZAJÍČEK, Vít. *POROVNÁNÍ DEFORMACÍ STANOVENÝCH METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ A OPTICKÝM MĚŘÍCÍM ZAŘÍZENÍM*. Brno, 2011. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [30] *Digital Image Correlation: Overview of Principles and Software* [online]. In: . [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: <http://www.correlatedsolutions.com/supportcontent/condensed-shortcourse.pdf>
- [31] *ARGUS: Optical Solution for Forming Analysis* [online]. In: . [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: <https://www.gom.com/en/products/3d-testing/argus>
- [32] OZTURK, Fahrettin. Grid Marking and Measurement Methods for Sheet Metal Formability. In: *5th International Conference and Exhibition on Design and Production of MACHINES and DIES/MOLDS* [online]. 41-49 [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/265982204_Grid_Marking_and_Measurement_Methods_for_Sheet_Metal_Formability
- [33] ARAMIS: 3D Camera Systems. In: *GOM* [online]. [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: <https://www.gom.com/en/products/3d-testing/aramis-3d-camera>
- [34] ARAMIS: Technologie pro 3D optické měření pohybu a deformací. In: *MCAE* [online]. [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: https://www.mcae.cz/wp-content/uploads/2020/10/GOM_brochure_ARAMIS_CZ_nahled_.pdf
- [35] VW 50065. *Výrobky z ploché oceli určené pro tváření za studena*. Volkswagen, 2014.



[36] VDA 239-100. *Flacherzeugnisse aus Stahl zur Kaltumformung/Sheet Steel for Cold Forming*. 2016.

Seznam obrázků

obr. 1 Schéma tažení	6
obr. 2 Porovnání smluvního a skutečného diagramu	13
obr. 3 Smluvní diagram s plastickou tažností při zatížení A_{gt}	14
obr. 4 Součinitele anizotropie a rozložení vzorků	15
obr. 5 Porovnání zpevňování monokrystalu v závislosti na typu mřížky	16
obr. 6 Aproximace křivky zpevnění a) Hollomon b) Swift c) Ludwik	18
obr. 7 Závislost R_m a $R_{p0,2}$ na přetvoření	19
obr. 8 Keeler-Godwin FLD diagram	19
obr. 9 Rozdílné vzorky pro různé materiály	21
obr. 10 Porovnání podmínek plasticity Tresca a HMH	22
obr. 11 Vliv r a σ_u na polohu mezní plochy	24
obr. 12 Mezní plocha podle různých typů zatížení a Beziérova interpolace	27
obr. 13 Mezní plocha Corus Vegter Lite a Nurbsova interpolace	28
obr. 14 Porovnání mezních ploch pro 2 různé materiály měřené ve směru válcování	29
obr. 15 Porovnání limitních diagramů pro 2 různé materiály	29
obr. 16 Schéma 2D DIC	32
obr. 17 Princip obrazové korelace	33
obr. 18 Schéma 3D DIC	33
obr. 19 Kalibrace 3D DIC	34
obr. 20 Kódované značky a kalibrační	34
obr. 21 Měření vylišovaného dílu pomocí systému ARGUS	35
obr. 22 Vyjádření deformace kruhového prvku	36
obr. 23 ARAMIS Adjustable (vlevo), ARAMIS 3D Camera (vpravo)	38
obr. 24 Měření pomocí systému ARAMIS	38
obr. 25 Tvorba materiálového modelu v AutoForm	40
obr. 26 Nástříhový plán	42
obr. 27 Přístříh 3V5 827 107B	43
obr. 28 Schéma vzorku	43
obr. 29 Loupaní barev náhodného vzoru	44
obr. 30 Použité kombinace barev ve spreji	45
obr. 31 Zkušební stroj LabTest 5.100SP1	46
obr. 32 Laserový průtahoměr LE-05	47
obr. 33 Konfigurace systému ARAMIS pro měření tahových zkoušek	49
obr. 34 Ověření kvality stochastické sítě	50
obr. 35 Úvodní stránka z protokolu s informacemi o nastavení kamer	61
obr. 36 Vyhodnocená materiálová data se snímkem při prasknutí vzorku	62
obr. 37 Vygenerovaný smluvní a skutečný diagram	62
obr. 38 Sedm geometrií vyrobených pomocí WEDM ve tvaru FLC	63
obr. 39 Vzorky před a po čištění	64
obr. 40 Isopropylalkohol 99.8% a čistič CL07	65
obr. 41 Kombinace barev ve spreji pro tvorbu stochastické sítě	65
obr. 42 Konfigurace s přidaným LED reflektorem	67
obr. 43 Zkušební stroj BUP 600	67
obr. 44 Kalibrace	69
obr. 45 Pomocné přípravky na zakládání vzorků	70
obr. 46 Vzorky se správnou polohou vzniku trhliny	73
obr. 47 Vzorky po kompletním naměření jedné rychlosti	73
obr. 48 Materiálová karta s FLC při rychlosti 2 mm/s	75
obr. 49 Materiálová karta s FLC při rychlosti 17 mm/s	75
obr. 50 Porovnání FLC křivek pro dvě různé rychlosti zatěžování	76



Seznam tabulek

Tabulka 1 Kvalitativní porovnání metod vytváření měrné sítě	37
Tabulka 2 Označení jakostí dle různých norem	41
Tabulka 3 Chemické složení materiálů DX56 a DC05	42
Tabulka 4 Mechanické vlastnosti pro materiály CR 4	42
Tabulka 5 Vybraná technická data LabTest 5.100SP1	46
Tabulka 6 Technické údaje k systému ARAMIS 4M	47
Tabulka 7 Naměřené hodnoty pro orientaci 0° a nižší rychlosti	51
Tabulka 8 Naměřené hodnoty pro orientaci 0° a vyšší rychlosti	52
Tabulka 9 Naměřené hodnoty pro orientaci 45° a nižší rychlosti	53
Tabulka 10 Naměřené hodnoty pro orientaci 45° a vyšší rychlosti	54
Tabulka 11 Naměřené hodnoty pro orientaci 90° a nižší rychlosti	55
Tabulka 12 Naměřené hodnoty pro orientaci 90° a vyšší rychlosti	56
Tabulka 13 Některá technická data ke kalibraci systému ARAMIS	68
Tabulka 14 Hodnoty hlavních deformací pro různé rychlosti	72
Tabulka 15 Hodnoty hlavních deformací po korekci	72



Seznam grafů

Graf 1 Kalibrační křivka.....	48
Graf 2 Křivky zpevnění pro různé rychlosti zatěžování a orientaci 0°	57
Graf 3 Křivky zpevnění pro různé rychlosti zatěžování a orientaci 45°	57
Graf 4 Křivky zpevnění pro různé rychlosti zatěžování a orientaci 90°	58
Graf 5 Křivky zpevnění pro tři různé orientace a rychlost zatěžování 10 mm/min	58
Graf 6 Křivky zpevnění pro tři různé orientace a rychlost zatěžování 600 mm/min	59
Graf 7 Závislost poměru $R_{p0,2}/R_m$ na rychlosti zatěžování	59
Graf 8 Rozptyl naměřených hodnot pro FLC křivku při rychlosti zatěžování 2 mm/s.....	71
Graf 9 Rozptyl naměřených hodnot pro FLC křivku při rychlosti zatěžování 17 mm/s.....	71
Graf 10 Porovnání FLC křivek po korekci pro různé rychlosti zatěžování	72



Seznam příloh

Příloha 1 Kalibrační protokol pro zkoušky tahem

Příloha 2 Kalibrační protokol pro zkoušky dle Nakajima