



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH PŘÍPRAVKU PRO ZJIŠŤOVÁNÍ KŘIVEK MEZNÍ TVAŘITELNOSTI

DESIGN OF A DEVICE FOR DETERMINING FORMING LIMIT CURVES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Jindrák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Řiháček, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Martin Jindrák
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	Ing. Jan Řiháček, Ph.D.
Akademický rok:	2024/25

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh přípravku pro zjišťování křivek mezní tvažitelnosti

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o návrh a ověření funkčnosti přípravku pro zjišťování křivek mezní tvažitelnosti. Předpokládá se využití ověřeného vzoru Nakajima testu dle ČSN EN ISO 12004. Součástí návrhu bude i kontrolní měření pro konkrétní materiál s vyhodnocením křivky mezní tvažitelnosti (FLC) pomocí 3D optického systému DIC (Digital Image Correlation).

Cíle diplomové práce:

- Vypracování aktuální literární rešerše se zaměřením na metody zjišťování křivky mezní tvažitelnosti a použití DIC pro vyhodnocení rozložení deformací,
- návrh přípravku včetně výkresové dokumentace,
- ověření funkčnosti přípravku provedením kontrolních měření.

Seznam doporučené literatury:

ASM INTERNATIONAL. Metal Handbook Volume 22B: Metals process simulation. Materials Park, Ohio: American Society for Metals, 2010. ISBN 978-161-5030-057.

HOSFORD, William a Robert CADDEL. Metal Forming: Mechanics and Metalurgy. New York : Cambridge University Press, 2007. 365 s. ISBN 978-0-521-88121-0.

MARCINIAK, Zdislaw, John, DUNCAN a Jack HU. Mechanics of Sheet Metal Forming. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. 211 s. ISBN 07-506-5300-00.

PERIE, Jean-Noel a PASSIEUX, Jean-Charles. Advances in Digital Image Correlation (DIC). Toulouse: Applied Sciences, 2020. 252 s. ISBN 978-3-03928-514-3.

PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu II. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-720-4248-3.

YOSHIZAWA, Toru. Handbook of optical metrology: principles and applications. Velká Británie: Taylor & Francis, 2015. 919 s. ISBN 978-146-6573-598.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem a ověřením funkčnosti experimentálního přípravku pro stanovení křivek mezní tvařitelnosti dle normy ČSN EN ISO 12004. Přípravek je konstrukčně uzpůsoben pro lis CBJ 500–6 a doplněn o brzdné žebro. Pro experiment je zvolena metoda Nakajima a jako vzorky pásky plechu z materiálu DR 520 CA o tloušťce 0,2 mm. Měření a vyhodnocení deformace probíhá s využitím digitální korelace obrazu. Funkčnost přípravku je nejprve ověřena pevnostní analýzou v softwaru ANSYS, která potvrzuje, že při zatížení nedochází k trvalé deformaci konstrukce. V programu Simufact Forming je v první fázi simulace prokázáno, že zvolený způsob upnutí zajišťuje pevnou fixaci vzorku bez jeho porušení při síle cca 8,5 kN. Ve druhé fázi simulace je potvrzeno očekávané ztenčení vzorku v jeho středové oblasti a následný výskyt porušení. Následně je v práci provedeno experimentální testování a vyhodnocení ve dvou fázích, které poskytují data pro konstrukci FLC. Pro ověření je rovněž teoreticky vypočten mezní bod **FLC₀**, přičemž výsledné křivky se protínají v jeho blízkosti, což potvrzuje správnost měření i vyhodnocení a funkčnost navrženého přípravku.

Klíčová slova

experimentální přípravek, FLC, Keeler–Goodwin, Nakajima, DIC analýza, numerická simulace, MKP

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the design and verification of a functional experimental fixture for determining forming limit curves in accordance with the ČSN EN ISO 12004 standard. The fixture is structurally adapted for the CBJ 500–6 press and equipped with a restraining ring. The Nakajima test method is selected for the experiment, and the test samples consist of sheet metal strips made of DR 520 CA material with a thickness of 0,2 mm. Deformation measurement and evaluation are carried out using the digital image correlation method. The functionality of the fixture is first verified by a strength analysis in ANSYS software, which confirms that no permanent deformation of the structure occurs under load. In the Simufact Forming software, the first phase of the simulation demonstrates that the selected clamping method ensures firm fixation of the sample without failure at a force of 8,5 kN. In the second simulation phase, the expected thinning of the sample in its central region and the subsequent occurrence of fracture are confirmed. The thesis further includes experimental testing and evaluation in two phases, which provide the data necessary for the construction of forming limit curves. For validation, the theoretical limit point **FLC₀** is also calculated, and the resulting curves intersect in its proximity, confirming the accuracy of the measurement, the correctness of the evaluation process, and the functionality of the proposed fixture.

Keywords

experimental fixture, FLC, Keeler–Goodwin, Nakajima, DIC analysis, numerical simulation, MKP

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JINDRÁK, Martin. *Návrh přípravku pro zjišťování křivek mezní tvařitelnosti*. Online, diplomová práce. Jan ŘIHÁČEK (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/165587>.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Návrh přípravku pro zjišťování křivek mezní tvařitelnosti vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

Brno, 22.05.2025

místo, datum

Martin Jindrák

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu své diplomové práce Ing. Janu Řiháčkovi, Ph.D. za velmi cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za neustálou podporu během mého studia a při vypracování této práce.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
2 DIAGRAM MEZNÍ TVAŘITELNOSTI	12
2.1 Tvorba FLC	14
2.2 Experimentální stanovení deformace	21
2.2.1 Metoda deformačních sítí	21
2.2.2 Digitální korelace obrazu.....	25
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	31
3.1 Mechanické vlastnosti zkoušeného materiálu	31
3.2 Princip a návrh přípravku	33
3.3 Ověření funkčnosti přípravku numerickou simulací	37
3.4 Příprava experimentu	50
3.5 Nastavení základních parametrů	54
3.6 Vyhodnocení měření	55
3.6.1 Vyhodnocení fáze prvotní iniciace trhliny	56
3.6.2 Vyhodnocení fáze těsně před vznikem trhliny	58
3.7 Konstrukce křivky mezní tvařitelnosti	61
ZÁVĚR.....	63

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam příloh

Seznam výkresů

ÚVOD

Proces tváření jako výrobní technologie, ve které dochází k přeměně polotovaru na požadovaný výrobek o předepsaných rozměrech a mechanických vlastnostech, tvoří nedílnou součást průmyslového odvětví. V současnosti dochází k postupnému nahrazování běžně používaných materiálů novými moderními variantami, jež při zachování stejné nebo vyšší pevnosti poskytují nižší hmotnost a lepší deformační vlastnosti. Nedílnou součástí procesu nahrazování materiálů je pečlivý popis jejich chování, který je důležitý pro zajištění spolehlivé funkčnosti v průběhu výroby. Pro popis vlastností a získání informací o materiálu se používají nejrůznější materiálové zkoušky. Určené vlastnosti materiálu následně pomáhají při optimalizaci celého procesu tváření a pochopení deformačního chování materiálu, při němž může dojít až k porušení součásti. [1]

Mezi nejdůležitější charakteristiky materiálu patří popis jeho porušení, který je zásadní pro zachování celistvosti tvářeného dílce. Pro lepší pochopení chování dílce během namáhání a vytvoření představy o hranici defektů se používají nejrůznější procesní okna nebo limitní diagramy. Pomocí limitních diagramů, které obvykle využívají maximální dovolené přetvoření nebo napětí v různých směrech materiálu, lze předpovědět vznik trhlin nebo jiných defektů v průběhu tváření. Jedním z nejčastěji využívaných diagramů, který se používá pro jeho snadné a přehledné grafické znázornění, je diagram mezní tvařitelnosti – FLD (Forming Limit Diagram). [2]

Diagramy mezní tvařitelnosti využívají tzv. limitní křivky, které slouží k definici meze porušení pro daný materiál s ohledem na jeho tloušťku a mechanické vlastnosti. Na základě několika možných cest, jako je teoretický výpočet nebo experimentální stanovení, lze získat data potřebná k určení mezních křivek v diagramu. Při experimentálním vyhodnocení křivek mezní tvařitelnosti lze uplatnit moderní metody obrazové analýzy, jež přispívají ke zlepšení přesnosti měření a rovněž ulehčují vyhodnocování. Jedná se o bezkontaktní optické měření, kdy se vzorky snímají kamerami a následně se porovnává sekvence pořízených snímků před a po deformaci, s cílem vyhodnotit vzniklou deformaci. Typickým zástupcem bezkontaktní obrazové analýzy je digitální korelace obrazu známá pod zkratkou DIC (Digital Image Correlation). Aplikace metody DIC lze vidět na obr. 1. [2; 3]



Obr. 1 Aplikace metody DIC [4].

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Hlavním tématem práce je návrh experimentálního zařízení, které bude použito pro zjišťování křivek mezní tvařitelnosti s tím, že u navrženého přípravku bude ověřena jeho funkčnost pomocí série zkušebních testů na vzorcích různého tvaru a rozměrů. Veškeré zkoušky, provedené na vzorcích, za účelem stanovení mezních křivek, budou použity pro simulace plošného tváření, tudíž se předpokládá využití polotovaru v podobě plechů. Před samotnou výrobou jednotlivých součástí bude zařízení jako funkční celek nutné ověřit z hlediska nezbytných pevnostních výpočtů, a to z toho důvodu, aby během zkušebních testů nedošlo k nevratné deformaci některé z částí přípravku, např. prohnutí sloupků. U konstrukce experimentálního přípravku, včetně zkušebních testů, se předpokládá využití normy ČSN EN ISO 12004, podle které je vhodné postupovat. Norma totiž specifikuje možnosti aplikace jednotlivých zkoušek a systém vyhodnocování pro zjištění křivek mezní tvařitelnosti. [2]

Pro ověření přípravku bude provedena série testů na vzorcích, přičemž se předpokládá využití materiálu DR 520 CA, STONE FINISH dodávaného společností U. S. STEEL Košice, s.r.o. Novější ekvivalentní značení oceli podle EN je TH520 (1.0384). Zkoumaný plech o tloušťce $s = 0,2$ mm je pokrytý z obou stran cínem s plošnou hmotností povlaku $2,0/2,0$ g·m⁻². Povlak cínu poskytuje účinnou ochranu proti korozi za předpokladu, že povrchová vrstva cínu zůstane souvislá a jednotná. Cín za příznivých podmínek vytváří oxidy SnO₂ a SnO, jež výborně odolávají atmosférickému prostředí a působení vlhkosti. Výběr materiálu (pocínovaného plechu) byl zvolen z důvodu přímého porovnání výsledků s paralelně řešenou diplomovou prací, která je zaměřena na inkrementální tváření a na limity spojené s tímto druhem specifického tváření. Proto se nabízí možnost srovnání dosahovaných limitů tváření formou diagramu mezní tvařitelnosti. Chemické složení pocínovaného plechu je uvedeno v tab. 1 a mechanické vlastnosti jsou zobrazeny v tab. 2. [5; 6; 7]

Tab. 1 Chemické složení pocínovaného plechu [8].

C [hm.%]	Si [hm.%]	Mn [hm.%]	Ni [hm.%]	Cr [hm.%]
0,04–0,08	max. 0,03	0,18–0,35	0,08	max. 0,08

Pocínovaný plech nachází své využití především v potravinářském průmyslu jako obalový materiál, z něhož se zpracovávají např. plechovky na potraviny a nápoje, aerosolové nádoby nebo různé průmyslové obaly. Cínový povlak tvoří ochrannou bariéru proti působení kyslíku, vlhkosti a dalším nepříznivým vlivům, čímž udržuje obsah nádoby chráněný před znehodnocením. Plech je snadno tvarovatelný a lze ho formovat do obalových nádob různých velikostí, tvarů a designů. Produkty z pocínovaného plechu mají nízkou hmotnost, což z nich vytváří finančně výhodnou a zároveň ekologicky šetrnou variantu balení. Pocínovaný plech nabízí kromě svých funkčních předností rovněž dobré estetické vlastnosti, které přispívají k celkově lepšímu vzhledu výrobku. [5; 6; 7; 9]

Tab. 2 Mechanické vlastnosti pocínovaného plechu [7; 8].

Pevnost v tahu R_m [MPa]	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Tažnost A_{80} [%]
540	520	4

V rámci vybavení dílen ÚST FSI VUT v Brně se předpokládá využití lisu CBJ 500–6, viz obr. 2, do jehož dutiny se upne přípravek. Při konstrukci bude nutné experimentální přípravek co nejvíce přizpůsobit lisu, zejména rozměrům jeho horní a spodní upínací desky, a také maximálnímu pracovnímu zdvihu. Tento jednočinný hydraulický lis se vyznačuje čtyřsloupovou vertikální konstrukcí, která zajišťuje vysokou stabilitu a opakovatelnost během výrobního procesu.



Obr. 2 Lis CBJ 500–6.

Stroj je navržen s horním působením tlaku, který pomáhá k jeho rovnoměrnému rozložení na polotovar. Vedení pracovní desky lisu je zajištěno pomocí čtyř sloupků uchycených v pouzdrech, které jsou vybaveny maznicemi pro zajištění pravidelného mazání. Pro upnutí nejrůznějších nástrojů, forem nebo přípravků jsou pracovní stoly opatřeny tzv. T drážkami, jež se nacházejí ve spodní i horní části stolu. Pomocí drážek lze snadno a rychle uchytit nástroje, což zajišťuje jejich pevné a přesné upnutí. Základní technické parametry lisu jsou vypsány v tab. 3.

Tab. 3 Technické parametry lisu CBJ 500–6 [10].

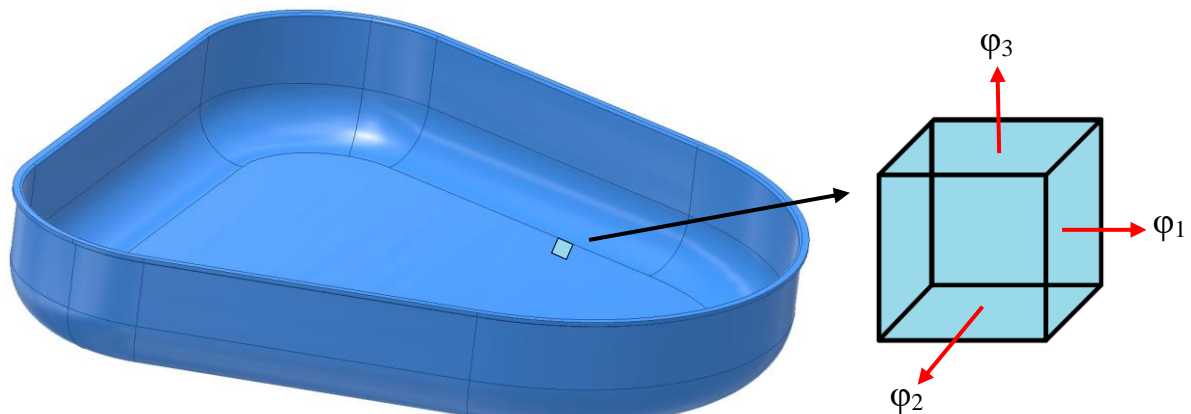
Výkon hlavního elektromotoru [kW]	8
Hmotnost stroje [kg]	12 465
Jmenovitá lisovací síla [kN]	500
Pracovní délka stolu [mm]	1 000
Pracovní šířka stolu [mm]	1 000
Výška sevření [mm]	1 020
Rozměry stroje d × š × v [mm]	2 200 × 1 500 × 3 970

Při experimentálním měření, za účelem stanovení křivky mezní tvařitelnosti, se předpokládá využití bezkontaktní optické analýzy. Konkrétně bude použita metoda DIC ve spolupráci se společností X-Sight s.r.o. Firma se specializuje na oblast optických extenzometrů a bezkontaktního měření deformací. Její hlavní činností je vývoj, rozvoj a prodej systémů DIC. Jedná se o nadnárodní společnost s více než desítkou poboček po celém světě a s dlouholetou působností na trhu. [11]

2 DIAGRAM MEZNÍ TVAŘITELNOSTI

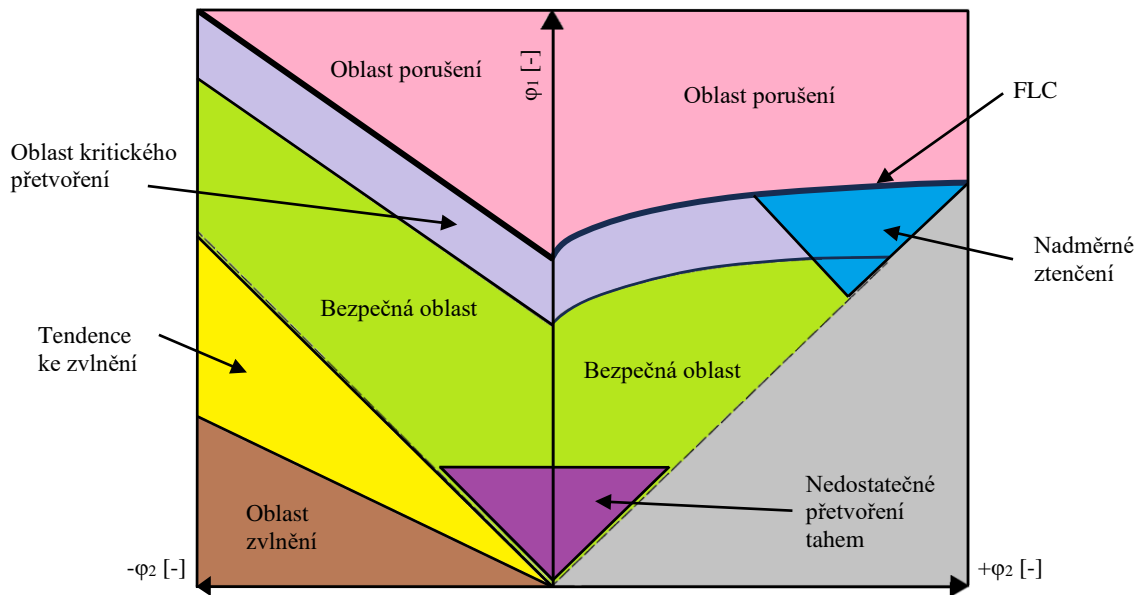
Během procesu plošného tváření je důležité pochopit chování materiálu (plechu, trubky), což znamená ozřejmit, jakým způsobem dochází k jeho deformaci a jaké kombinace přetvoření vedou k porušení. Z každého tvářeného dílce lze v jakémkoli místě vytknout element, viz obr. 3, který popisuje lokální stav napjatosti a přetvoření. U vytknutého elementu existují tři složky přetvoření. V případě vyjádření deformace pomocí logaritmického přetvoření, se tedy jedná o složky hlavní φ_1 , vedlejší φ_2 a terciální φ_3 . V rámci roviny plechu se nachází hlavní a vedlejší přetvoření, zatímco terciální je orientováno ve směru kolmo k rovině plechu, tedy ve směru tloušťky. Charakteristika plošného tváření se vyznačuje tím, že použitý polotovar v podobě plechů má násobně větší délku a šířku oproti své tloušťce. Lze tedy v průběhu plastické deformace, kdy změna tloušťky materiálu je prakticky neměnná (malé φ_3), přistoupit ke zjednodušení procesu v podobě zanedbání účinku terciální složky přetvoření φ_3 . Dochází tedy k předpokladu působení pouze rovinné napjatosti, což je typický přístup pro hodnocení mezní tvařitelnosti. [12; 13; 14]

V průběhu procesu plošného tváření se v jednotlivých místech přetvářené součásti vyskytují různé kombinace hlavního (φ_1) a vedlejšího (φ_2) přetvoření, které se průběžně mění. Ze zkoumání vyplývá, že při určitých kombinacích zmíněných přetvoření dochází za určitých podmínek k lokalizaci plastické deformace vedoucí až ke vzniku trhliny. Jednotlivé kombinace přetvoření závisí na konkrétním stavu napjatosti, jenž v daném místě materiálu převažuje, tedy na poměru hlavního a vedlejšího přetvoření. Například pokud bude materiál namáhán pouze jednoosým tahem ($\varphi_2 = 0$), nastane porušení při jiné hodnotě φ_1 , než když na materiál bude působit rovinný tah ($\varphi_1 = \varphi_2$). [12; 13; 14]



Obr. 3 Příklad vytknutého elementu se stavy napjatosti [1].

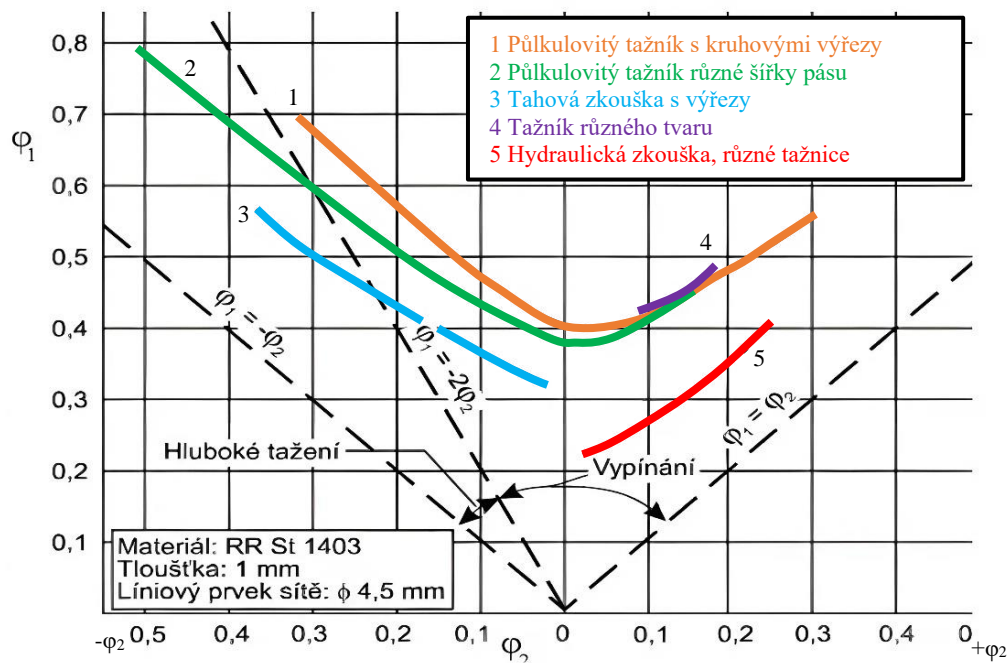
Z důvodu snadnějšího vyhodnocení a predikce chování materiálu, včetně jeho porušení, se začalo používat grafické znázornění v podobě diagramů mezní tvařitelnosti dle Keelera a Goodwina, známé jako Keeler–Goodwinův diagram nebo FLD (Forming Limit Diagram). Pomocí FLD lze rozlišit přechod mezi bezpečnou oblastí tváření a oblastí, ve které již dochází k lokalizaci přetvoření a následné porušení materiálu. Přejít mezi oblastmi jasně oddělují tzv. křivky mezní tvařitelnosti – FLC (Forming Limit Curve). Na obr. 4 jsou vyznačeny základní oblasti FLD, včetně vnesené křivky FLC. Souřadný systém FLD je definován hodnotami představující hlavní a vedlejší poměrná (ε_1 a ε_2), resp. logaritmická přetvoření (φ_1 a φ_2). Každý vnesený bod v diagramu představuje jednu specifickou kombinaci hlavního a vedlejšího přetvoření, a pokud takový bod leží nad tzv. křivkou mezní tvařitelnosti, dochází k porušení. Body v diagramu lze na základě zatížení povrchu lisovaného dílce stanovit cestou početní, pomocí numerické simulace, nebo experimentálně. Kromě základních křivek určujících porušení materiálu (vznik trhlin) lze v diagramu vymežit i jiné oblasti, v nichž dochází k výskytu dalších defektů, jako je např. nadměrné ztenčení materiálu apod. [12; 13; 14]



Obr. 4 Základní oblasti diagramu mezní tvařitelnosti [15].

K určení limitních křivek lze využít několik základních přístupů, jako je např. teoretická metoda vycházející z matematických modelů nebo kombinovaná cesta s použitím numerické simulace. Nejčastěji využívaným způsobem k určení křivek mezní tvařitelnosti však nadále zůstává experimentální přístup. Obr. 5 znázorňuje FLD, ve kterém je porovnání různých limitních křivek, jež jsou získány pomocí odlišných experimentálních zkoušek, jež budou následně detailněji rozebrány. [12; 13; 14; 17; 18]

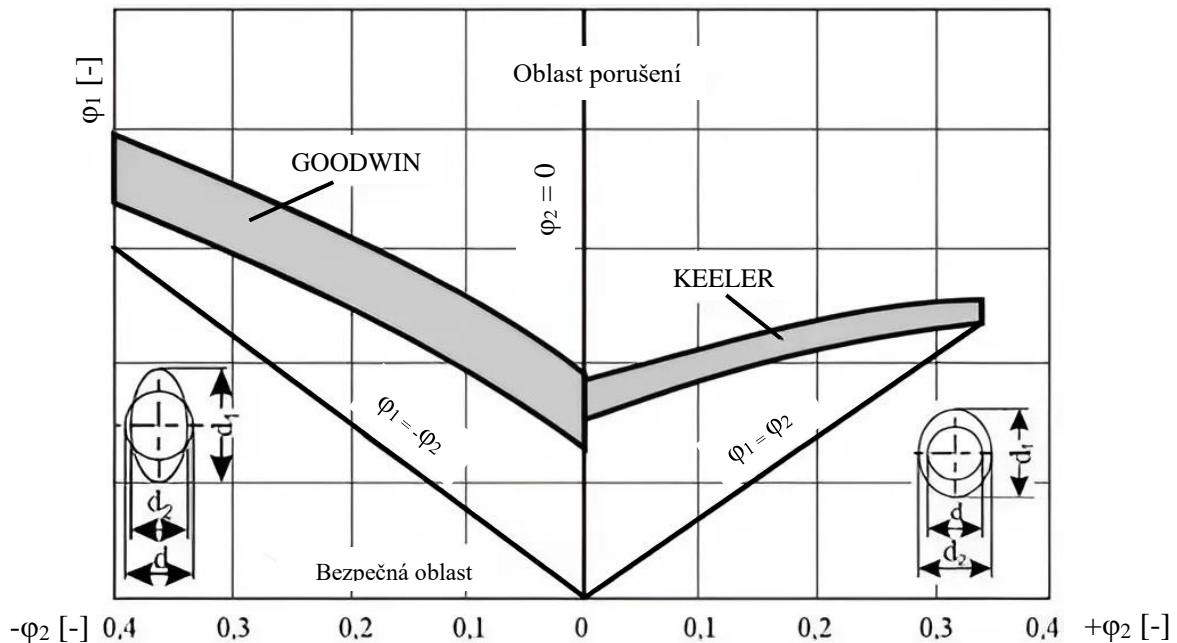
Při experimentálním stanovení křivek v Keeler–Goodwinově diagramu se vychází z předpokladu, že defekt na součásti, trhlina, vzniká v oblasti s největším lokálním ztenčením materiálu. V oblasti maximálního ztenčení plechu dochází k tvorbě tzv. krčku, tedy k lokálnímu plastickému přetvoření (difuzní a následně lokální zaškrcování). Pro určení takového kritického místa na výlisku a k vyhodnocení hlavních a vedlejších přetvoření se nejčastěji aplikuje tzv. metoda sítí anebo zkoumání povrchu obsahující nahodilé obrazce pomocí tzv. metody DIC. [12; 13; 14; 17; 18]



Obr. 5 FLD vytvořený pomocí odlišných experimentálních metod [14].

2.1 Tvorba FLC

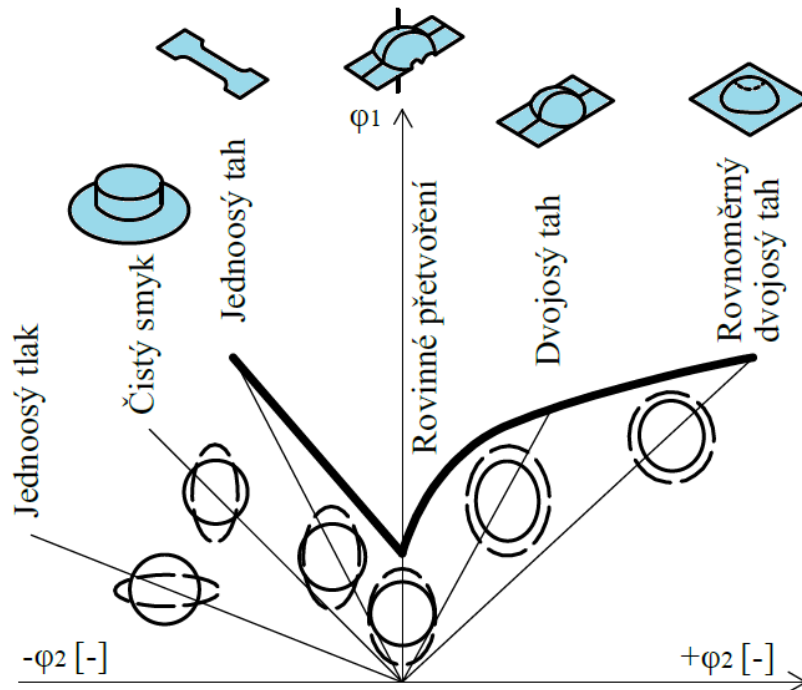
V rámci rovinného přetvoření materiálu existují dva základní systémy zatěžování, viz vytknutý element v obr. 3. Může nastat varianta, kdy obě přetvoření jsou tahová, tj. systém tah–tah, nebo je jedno z nich tlakové, což odpovídá systému tah–tlak, a jiného systému není možné dosáhnout. Vzniklé přetvoření lze experimentálně znázornit a sledovat pomocí např. kružnicové sítě nanesené na povrch materiálu. Pro oba zmíněné stavy je možné následně vykreslit křivku mezní tvařitelnosti při proměnném zatěžování součástí, viz obr. 6, na němž je zobrazen mezní diagram dle Keeler–Goodwina společně s popsány stavy přetvoření kružnic, které jsou znázorněny v rozích. [12; 13; 14; 17; 18]



Obr. 6 Keeler-Goodwinův diagram zobrazený na základě skutečných deformací [14].

Cílem je vyvolat různé stavy napjatosti v materiálu, protože čím širší rozsah deformací je pokryt, tím přesnější a efektivnější jsou výsledné FLC. Proto je nezbytné při jejich experimentálním stanovování vycházet ze základních materiálových zkoušek, které odpovídají různým proměnlivým stavům napjatosti (deformace), jež se mohou vyskytovat při reálném zatěžování tvářeného dílce v průběhu výrobního procesu, zejména u technologií plošného tváření, jako je hlubokého tažení. Z toho vyplývá potřeba různého zatěžování i různých tvarů zkušebních vzorků, které jsou patrné v grafu na obr. 7. Zde je možné vidět i různé stavy napjatosti a tomu odpovídající umístění limitních kombinací ϕ_1 a ϕ_2 v mezním diagramu. [12; 13; 14; 17; 18]

Poloha křivek mezní tvařitelnosti u Keeler–Goodwinova diagramu je závislá na vlivu jakosti tvářeného plechu, přičemž klíčovými faktory jsou jeho chemické složení, tepelné a metalurgické zpracování. Dále se jedná o tloušťku plechu a mechanické vlastnosti, zejména exponent deformačního zpevnění, přičemž se zvyšujícími se hodnotami tloušťky nebo tohoto exponentu se křivky posouvají k vyšším hodnotám ϕ_1 . Normálová anizotropie je faktor, který rovněž ovlivňuje průběh křivky, zejména v oblasti $\phi_1 < 0$ tak, že způsobuje její posun směrem k vyšším hodnotám ϕ_1 s rostoucí hodnotou. Prvky jako mazivo nebo historie deformace nemají jednoznačný vliv na dosažení vyšších hodnot ϕ_1 a ϕ_2 . [12; 13; 14; 17; 18]

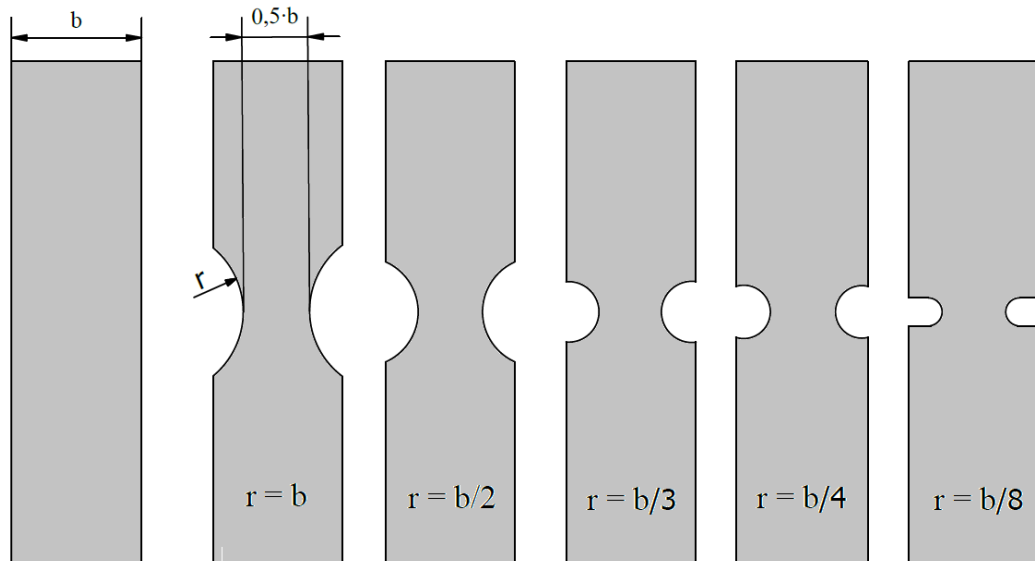


Obr. 7 FLD vytvořený pomocí odlišných experimentálních metod [19].

Norma ČSN EN 12004-1 umožňuje při experimentálním stanovení křivek mezní tvařitelnosti použití v podstatě veškerých zkušebních systémů (zařízení), za předpokladu, že během plastické deformace zkoumaného dílce dojde k vyvolání různých stavů napjatosti, a to do stavu jeho porušení, při užití tažného nástroje včetně přidržovače. Ovšem pro přesnější provedení laboratorního určení mezní křivky Keeler-Goodwinova diagramu však slouží norma ČSN EN 12004-2. [2; 12; 13; 14; 17; 18; 20]

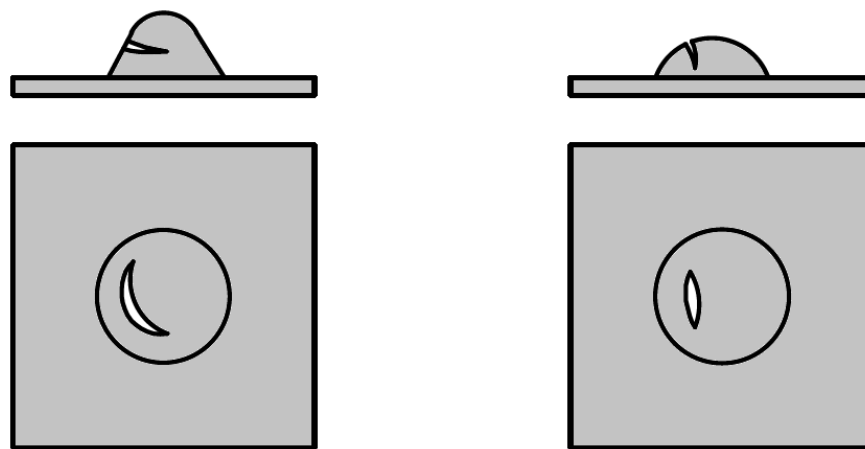
V konečném důsledku lze k experimentálnímu stanovení křivky mezní tvařitelnosti využít několik možných zkušebních metod. Jedná se o nejrůznější technologické zkoušky, jež simulují podmínky během procesu tváření a slouží k ověření chování materiálu. Rozdíl spočívá ve způsobu získání oblasti křivky, protože některé metody umožňují stanovit křivku mezní tvařitelnosti v celém jejím rozsahu, a to včetně kladných i záporných hodnot φ_2 , zatímco jiné poskytují pouze část rozmezí mezní křivky nebo jen její bod. Obr. 5 znázorňuje FLD, v němž je porovnání různých limitních křivek, které jsou získány pomocí odlišných experimentálních zkoušek. Ke stanovení křivek mezní tvařitelnosti lze např. využít následujících metod: [2; 12; 13; 14; 17; 18]

- Tahová zkouška – patří mezi jednu z nejpoužívanějších a nejjednodušších zkoušek pro stanovení mechanických vlastností daného materiálu, jako je např. křivka zpevnění nebo křivka mezní tvařitelnosti. Princip spočívá v upnutí normovaného vzorku do čelistí testovacího zařízení, kde postupně dochází k zatěžování tahovou silou až do okamžiku jeho porušení (přetržení). Pro získání různých napěťových stavů, a tedy i deformačních stop v FLD, se obvykle používají zkušební vzorky s půlkruhovým výřezem o různých poloměrech, jak je znázorněno na obr. 8. Vzorky se pohybují v různém rozmezí šířky od 5 mm až do 30 mm. Oproti jiným metodám je hlavní výhodou tahové zkoušky možnost využití univerzálních testovacích zařízení včetně poměrně snadné přípravy zkušebních vzorků. Ovšem metoda má značnou nevýhodu, a to v podobě omezené oblasti v Keeler–Goodwinově diagramu, kde tahová zkouška definuje mezní křivku pouze v oblasti $\varphi_2 < 0$. [13; 14; 17; 18]

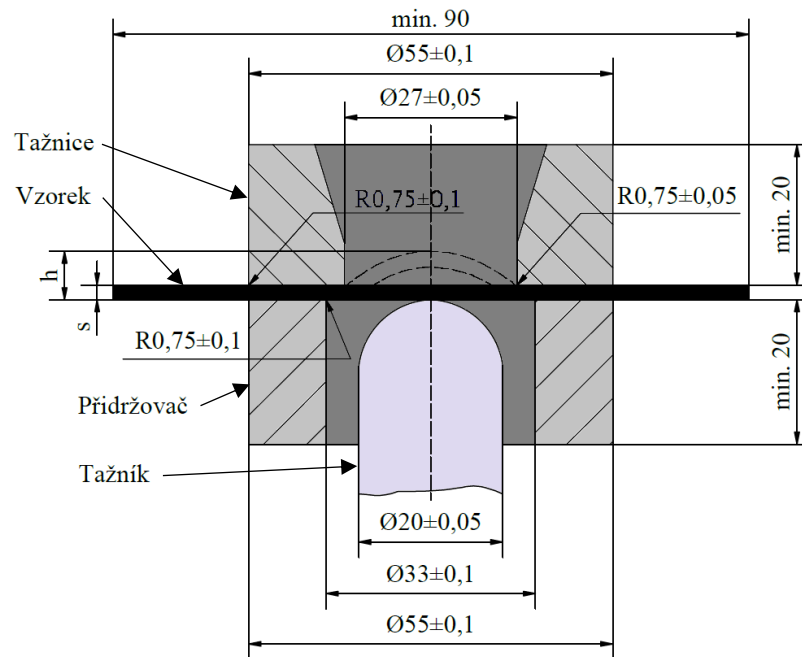


Obr. 8 Různé vzorky pro tahovou zkoušku [18].

- Zkouška hloubením dle Erichsena – metoda se často používá pro technologické posouzení hlubokotažnosti tenkých plechů. Mezi tažnicí a přidržovačem je upnut zkušební vzorek. Tažník s polokulovým zakončením táhne vzorek o průřezu čtverce, který je přidržován silou 10 kN, rychlostí $5\text{--}20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a vytváří prohloubení do té doby, než vznikne trhlina. Posuv tažníku je tvořen mechanicky nebo hydraulicky. Kritériem tvařitelnosti daného materiálu je velikost vyboulení, během kterého se poprvé na vzorku objeví trhlina (obr. 9), jež prochází celou tloušťkou zkušebního plechu. [14; 17; 18]

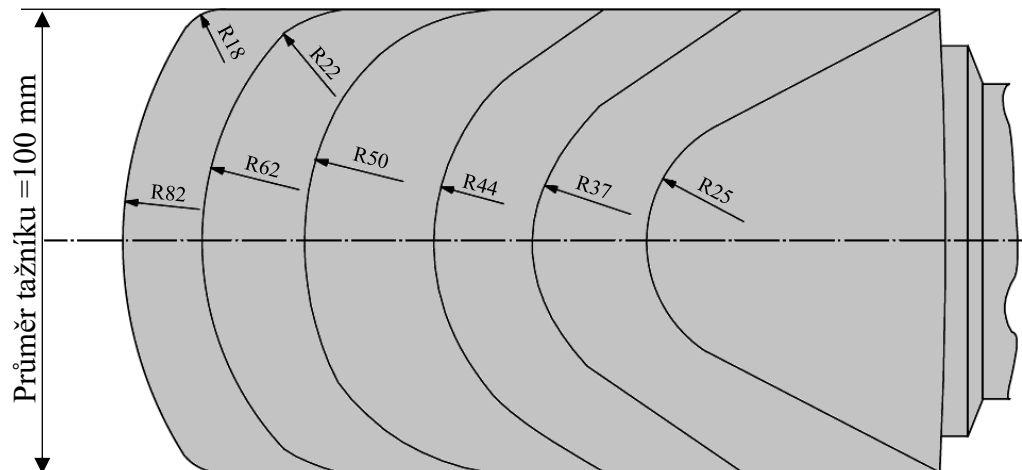

 a) typický tvar pro hlubokotažný plech b) nevhodný plech k hlubokému tažení
 Obr. 9 Tvar trhliny při zkoušce dle Erichsena [17].

Princip zkoušky je možné vidět na obr. 10. Jednou z nevýhod je např. využití ručního zatěžování, protože naměřené hodnoty mohou být do určité míry ovlivněny obsluhou zařízení, neboť hloubka vyboulení závisí na plynulosti a rychlosti pohybu tažníku. Za další nevýhodu metody se považuje tření, které vzniká mezi nástrojem a testovacím vzorkem, a aby byl třecí účinek minimalizován, používají se různá maziva. Zkouškou dle Erichsena lze stanovit bod příslušející křivce mezní tvařitelnosti, který se nachází v blízkosti rovinného stavu přetvoření $\varphi_2 = 0$. Celá zkouška spadá pod normu ČSN EN ISO 20482. [14; 17; 18]



Obr. 10 Schéma Erichsenovy zkoušky [16; 17].

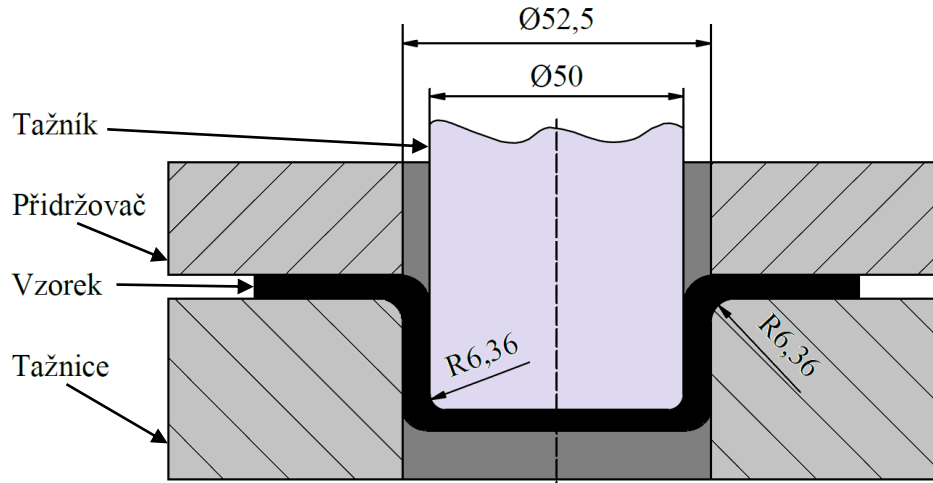
- Zkouška dle Keelera – princip zkoušky spočívá v tom, že plech je tažen pomocí nástroje s různými tvary tažníku až do doby, než dojde k vzniku trhliny. Tažník je totiž zhotoven pokaždé s jiným zaoblením, což vede k různým stavům napjatosti zkoušeného materiálu a tím k stanovení rozsáhlejší části limitní křivky. Odlišná geometrie tažníku ovšem zvyšuje časovou náročnost na provedení zkoušky, což představuje jednu z nevýhod dané metody. Na obr. 11 jsou graficky zobrazena odlišná koncová zaoblení tažníku Keelerovy zkoušky. Stálé rozměry testovaného materiálu představují určitou výhodu ve srovnání s jinými metodami. Zkouška dle Keelera umožňuje stanovit křivku mezní tvažitelnosti pouze pro hodnoty $\phi_2 > 0$. [18]



Obr. 11 Tvary tažníku dle Keelera [17; 18].

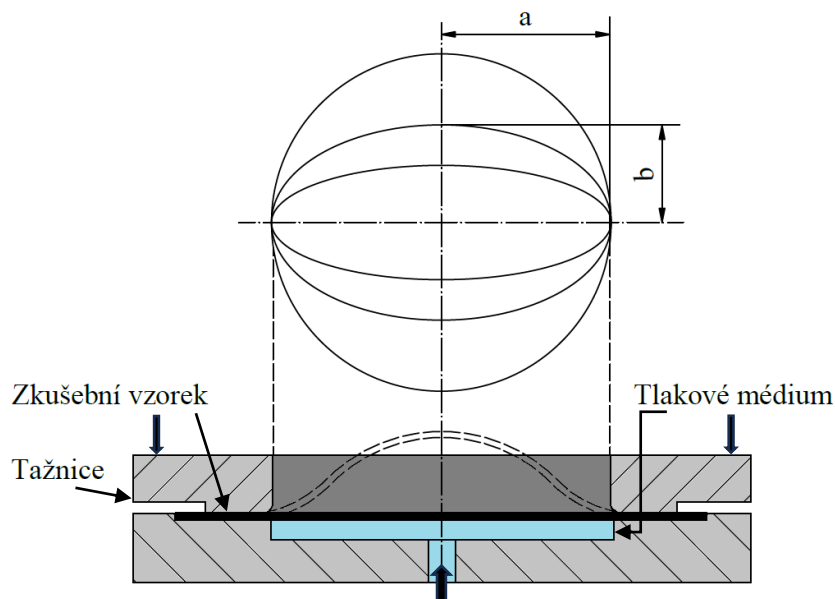
- Swiftova (kalíškovací) zkouška – metoda se řadí mezi typ zkoušek, které jsou založeny na základním principu hlubokého tažení plechu, jak znázorňuje schéma na obr. 12. Základní princip zkoušky spočívá v tažení testovaného materiálu, jenž je zároveň během procesu přidržován mezi tažnicí a přidržovačem. Metodou se primárně určuje maximální přípustný průměr výtažku, který je možný bez vzniku porušení vytáhnout, příp. mezní součinitel tažení, který udává poměr finálního průměru výtažku k referenčnímu. [14; 17]

Pokud dojde k porušení testovaného vzorku, používá se daná zkouška rovněž k vyhodnocení křivky mezní tvářitelnosti, spíše bodu jí příslušející. Tvar tažníku může být obměněn nebo nahrazen různými typy geometrie, které jsou vhodné k výrobě odlišných tvarů výtažků, jako jsou např. čtyřhranné výtažky vedoucí k různým napěťovým stavům. [14; 17]



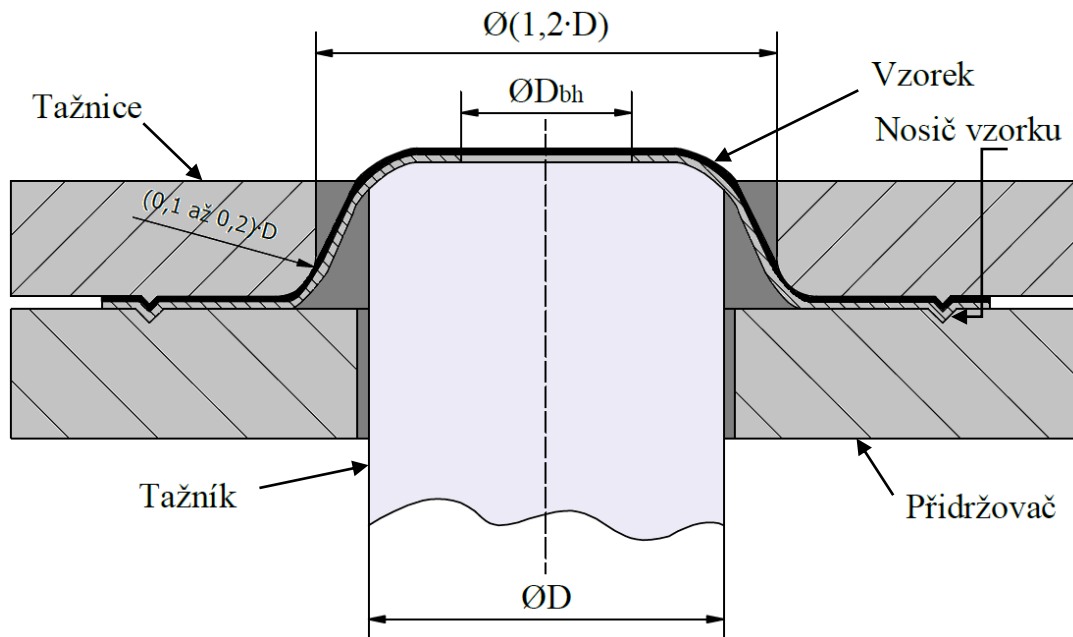
Obr. 12 Schéma Swiftovy zkoušky [16; 17].

- Hydraulická zkouška vyboulováním – metoda slouží k určování křivek mezní tvářitelnosti a zároveň, podobně jako výše zmíněná jednoosá tahová zkouška, se využívá k vyhodnocení křivky zpevnění materiálu. Ovšem zatěžování probíhá ve dvou osách. Průběh zkoušky je zobrazen na obr. 13. Testovaný materiál je upnut do nástroje a následně deformován do vypouklého stavu za využití tlakového média, nejčastěji ve formě oleje. V momentě, kdy dojde k porušení plechu, je naměřen bod FLC. Pro rozšíření části křivky mezní tvářitelnosti v případech, kdy je potřeba zajistit proměnlivý stav napjatosti, se tvar tažnice modifikuje z kruhového na eliptický. Hlavní předností užití hydraulické zkoušky vyboulením je nepřítomnost tření v průběhu procesu tváření. Metodu nelze považovat za univerzální, protože křivku mezní tvářitelnosti lze určit pouze v oblasti $\phi_2 > 0$. Ve srovnání s metodou hloubení dle Erichsena je hydraulická zkouška vydutím méně časově náročná a poskytuje objektivnější výsledky. Naopak náročnější požadavky na zařízení se považují za nevýhodu. [17; 18]



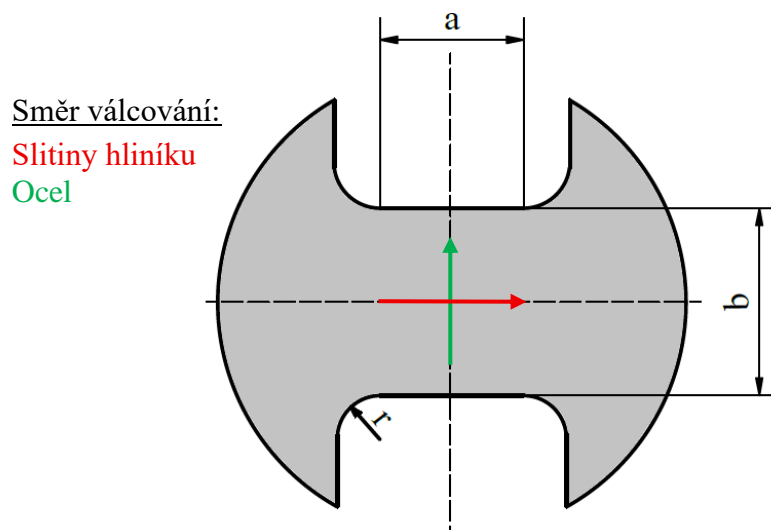
Obr. 13 Schéma zkoušky hydraulického vydutí [16; 17; 18].

- Zkouška dle Marciniaka – tato metoda je standardizována normou, konkrétně ČSN EN ISO 12004-2. K deformování základního materiálu se používá plochý tažník. Vzniklé porušení však musí nastat ve správné poloze, jíž je rovina tažníku, a aby toho bylo dosaženo, aplikuje se jeden nebo více tzv. nosičů (obr. 14) s dírou o průměru D_{bh} (32 až 34) mm. Nosiče jsou zhotoveny z materiálu s tažností stejnou nebo vyšší než u testovaného vzorku. Provádí se to z důvodu, aby se zabránilo poškození nosiče před tím, než nastane samotné porušení vzorku. Pro definování celé oblasti křivky mezní tvařitelnosti se aplikují různé geometrické úpravy vzorků nebo tažníků. [2; 14; 18]



Obr. 14 Schéma zkoušky dle Marciniaka [2; 16].

- Nakajima test – metoda dle Nakajimy spadá do kategorie univerzálních zkoušek, což znamená, že metodu lze použít pro určení křivky mezní tvařitelnosti v celém jejím intervalu, včetně kladných i záporných hodnot ϕ_2 . Pro celý rozsah se použijí vzorky různých tvarů a geometrií, přičemž je doporučeno užít délky dřívku vzorku (obr. 15) $a = 25$ až 50 mm a poloměru $r = 20$ až 30 mm. Zelená a červená šipka představují doporučený směr válcování dle zvoleného materiálu. [2; 14; 18]



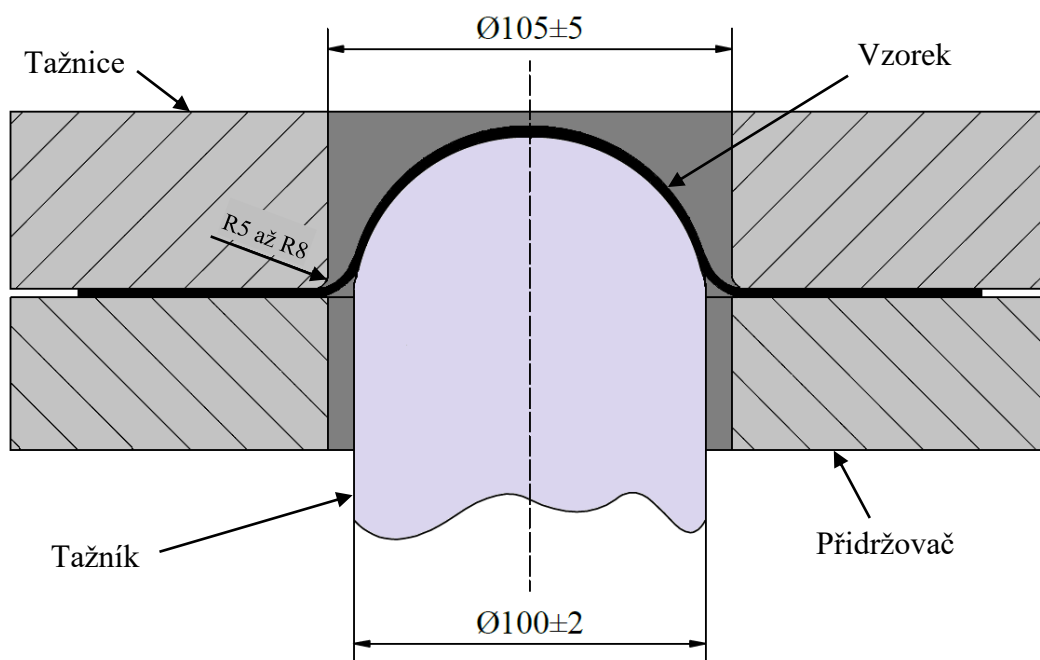
Obr. 15 Geometrie zkušebního tělesa [2].

Pro určení oblasti křivky mezní tvařitelnosti u tvárných materiálů lze použít vzorky s absencí dříku, jako např. polokruhové výřezy s odlišnými poloměry, viz obr. 16, nebo pásky plechu ve tvaru obdélníků s různými šířkami. Nevýhodou však je možnost praskání pásek v oblasti hrany tažnice. Základní princip zkoušky spočívá v tažení testovaného vzorku, který je upnut mezi přídržovač a tažnici pomocí polokulového tažníku. [2; 14; 18]



Obr. 16 Různé geometrie zkušebního tělesa [21].

Na obr. 17 je uvedena doporučená geometrie nástroje. U metody je důležité zajistit vhodné a dostatečné mazání během procesu z toho důvodu, aby porušení nastalo co nejbližší vrcholu vyboulení. Zkouška se především využívá pro laboratorní stanovení křivek mezní tvařitelnosti. Proto se doporučuje postupovat dle předepsané normy ČSN EN ISO 12004-2, v níž je specifikovaný celý postup od návrhu až po vyhodnocování. Mezi výhodu testu patří především relativní jednoduchost nástrojů, jednoduchý tvar vzorků, a jak již bylo zmíněno, pokrytí celého intervalu FLC. [2; 14; 18]



Obr. 17 Zkouška dle Nakajimy [2; 16].

Výše popsanými zkouškami lze zkonstruovat křivky diagramu mezní tvařitelnosti. Jednotlivé body diagramu, tedy hodnoty hlavních přetvoření ve sledovaných oblastech výlisku, se následně stanoví pomocí numerické simulace nebo již zmíněnou metodou deformačních sítí (kružnicové obrazce), kdy se na povrch měřeného vzorku před zatěžováním nanáší nejčastěji pravidelné síť s kruhovými elementy, jejichž deformace se následně po přetvoření proměří (manuálně). Další možností experimentálního stanovení deformace je využití metody sítí společně s optickými vyhodnocovacími systémy, jako je např. Argus, nebo využití i jinou metodu, tzv. digitální korelace obrazu. Ta snímá a následně vyhodnocuje nahodile rozmístěné obrazce na povrchu materiálu, a navíc umožňuje pozorování deformace v reálném čase. [14; 17; 22]

2.2 Experimentální stanovení deformace

Pro experimentální určování křivek mezní tvařitelnosti se využívá několik měřících metod, přičemž je zásadní přesně určit rozložení hlavních a vedlejších přetvoření na povrchu zkoumaného dílce. V současnosti se k tomuto účelu nejčastěji využívá optické bezkontaktní měření, které umožňuje vysoce přesné a efektivní zkoumání deformace. Mezi nejčastěji používané techniky k vyhodnocení přetvoření patří např. metoda deformačních sítí nebo digitální korelace obrazu. Oba přístupy se využívají v oblasti experimentálních analýz, zejména během testování plechových součástí v leteckém nebo automobilovém průmyslu. [14; 17; 22]

U metody deformačních sítí se na povrch zkoumaného vzorku předem aplikuje pravidelná síťová struktura, která se při plastické deformaci mění. Změnu lze vyhodnotit manuálně měřicí páskou nebo na základě optického snímání, zpravidla pomocí fotoaparátu s vysokým rozlišením. Při využití fotoaparátu vyhodnocení probíhá na základě tzv. fotogrammetrie, jež umožňuje z pořízených dvourozměrných snímků následně vytvořit a rekonstruovat 3D deformovanou geometrii tělesa. [14; 17; 22]

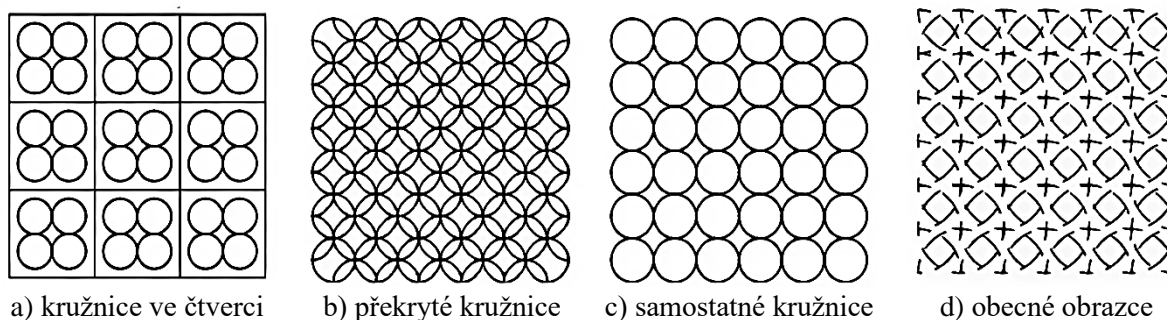
Při použití metody digitální korelace obrazu se využívá k zaznamenávání deformace na povrchu vzorku jedné nebo dvou kamer. V případě použití jedné kamery se jedná o 2D DIC, které umožňuje pozorování deformace pouze v rovině. Pokud jsou využity dvě kamery, jedná se o 3D DIC systém s využitím principu tzv. stereoskopie, což umožňuje sledování deformace ve 3D prostoru. DIC pozoruje změny posunu a deformace v předem naneseném nahodilém vzoru na povrchu dílce, přičemž metoda umožňuje měření deformace i v čase. [22; 23]

Obě zmíněné metody využívají různé optické měřící systémy, které mají specifické vlastnosti a nachází uplatnění v různých oblastech aplikací. Slouží nejen k ověření geometrie a konečných rozměrů součástí, ale také k analýze deformačního chování materiálu v průběhu času experimentálních zkoušek. Dále mohou být využity pro finální kontrolu schopnosti montáže jednotlivých komponent. Mezi významné dodavatele snímacích systémů patří společnost Zeiss, která nabízí pokročilé systémy pro 2D a 3D optické snímání deformace. V oblasti aplikace metody DIC patří k předním zástupcům firma X-Sight. Dodávané systémy od uvedených společností umožňují snímat deformaci tělesa jak v oblasti kritických hodnot přetvoření, tak zároveň globálně, tedy v rámci veškerého přetvořeného tělesa. [4; 22]

2.2.1 Metoda deformačních sítí

Jak již bylo výše zmíněno, jednou z metod pro vyhodnocování hlavních a vedlejších přetvoření během experimentálního určování křivek mezní tvařitelnosti je např. metoda deformačních sítí. Její princip spočívá v nanesení pravidelných obrazců na povrch plechového polotovaru ještě před samotným procesem tváření. Nejčastěji využívané jsou obrazce tvaru kružnice s různými průměry, které se v průběhu deformace materiálu přetvářejí na elipsy. [12; 14; 17; 24]

Na základě výsledné geometrie elipsy lze určit směr a velikost logaritmických přetvoření (φ_1 a φ_2), a tím i možnost přiřadit danému místu odpovídající bod v diagramu mezní tvařitelnosti. Oblasti, ve kterých deformované elementy zůstávají zcela nebo téměř kruhové, případně mírně eliptické a jsou ve vzdálenosti jednoho nebo více průměrů od kritického místa porušení, jsou považovány za bezpečné. Ukázky aplikace různých tvarů obrazců deformačních sítí jsou zobrazeny na obr. 18. [12; 14; 17; 24]



a) kružnice ve čtverci b) překryté kružnice c) samostatné kružnice d) obecné obrazce
Obr. 18 Příklady tvarů obrazců deformačních sítí [17].

Typ obrazců, jejich geometrie a rozměry závisí na velikosti vylisku, složitosti jeho tvaru, ale i na použité vyhodnocovací metodě. Kromě výše uvedených sítí s kruhovými prvky, často v kombinaci se čtverci, se v praxi využívají i jiné varianty, viz obr. 18d, které jsou aplikovány podle požadované přesnosti. Pro mohutnější díly je lepší aplikovat obrazce o větších rozměrech, zatímco u menších součástí nebo v detailních oblastech je vhodné využít jemnější sítě. Deformační sítě lze nanášet na materiál pomocí různých metod. Některé z nich, včetně posouzení jejich výhod a nevýhod je možné vidět v tab. 4. [12; 14; 17; 24]

Tab. 4 Metody nanášení měrných sítí [17].

Metoda nanášení	Orýsování	Sítotisk	Fotograficky	Fotochemicky	Elektrochemicky
Výhody	jednoduchost a přesnost	rychlost a vyhovující přesnost	vysoká přesnost	vysoká přesnost	vysoká rychlost a přesnost
Nevýhody	značná pracnost	omezené rozměry	vyšší pracnost	vyšší pracnost	nákladné zařízení

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1 (obr. 6), mohou nastat z pohledu přetvoření geometrie kružnicového prvku deformační sítě dvě odlišné možnosti změny jeho tvaru, viz obr. 19. Na základě rozměrů deformovaných prvků je možné pomocí přepočtů určit hodnoty složek logaritmického nebo poměrného přetvoření a získané hodnoty následně slouží pro konstrukci bodů v diagramu mezní tvařitelnosti. [12; 13; 17; 24]

Obecný výpočet pro stanovení přetvoření kružnicové sítě vychází ze vztahu [13; 17; 24]:

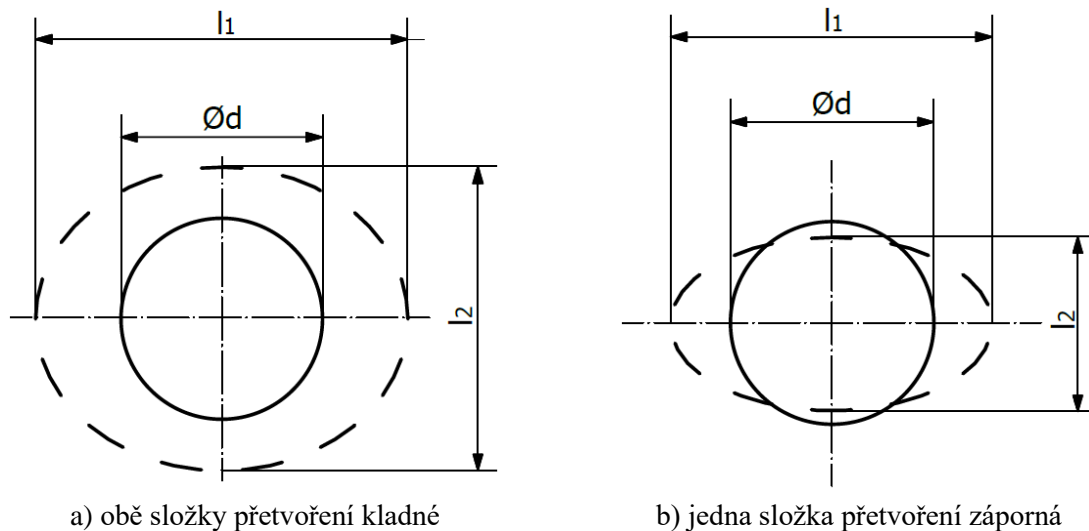
$$\varphi_i = \ln \frac{l_i}{d} = \ln \frac{d + \Delta l_i}{d} = \ln(1 + \varepsilon_i), \quad (2.1)$$

kde: φ_i – logaritmické přetvoření (hlavní nebo vedlejší) [-],

l_i – odpovídající rozměr osy elipsy [mm],

d – výchozí průměr kružnice [mm],

ε_i – hlavní poměrné přetvoření [-].



Obr. 19 Změna tvaru prvku kružnicové sítě [24].

Dle vzorce (2.1) lze složky (směry) přetvoření (φ_1 a φ_2) stanovit pomocí vztahů (2.2) a (2.3) [13; 17; 24]:

$$\varphi_1 = \ln \frac{l_1}{d} = \ln(1 + \varepsilon_1), \quad (2.2)$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{l_2}{d} = \ln(1 + \varepsilon_2). \quad (2.3)$$

Pokud by byla zkoumána i změna tloušťky materiálu, při které je nezbytné znát složku φ_3 , lze zbylé přetvoření jednoduše určit pomocí zákona zachování objemu ze vzorce [13; 17; 24]:

$$\varphi_3 = -(\varphi_1 + \varphi_2). \quad (2.4)$$

Jestliže je zvolena metoda deformačních sítí, lze vyhodnocení deformovaných prvků sítě na přetvořeném vzorku či tvářeném dílci provést několika různými postupy. „Ruční“ vyhodnocování FLD (FLC) pomocí tradiční konvenční metody je velmi časově a technicky náročné. Důvodem je skutečnost, že nanosená síť je po deformaci značně porušená, což výrazně ztěžuje přesnou detekci místa, kde došlo k lokalizaci deformace, tedy k tzv. formování krčku. Významný pokrok ve vyhodnocování nastal s rozvojem výpočetního systému, který umožnil přeměnu fyzického modelu nebo hotového dílce do virtuálního modelu v počítači. Transformace do digitálního modelu se provádí pomocí obrazové analýzy a systému reverzního inženýrství, což lze zjednodušeně popsat jako skenování reálného modelu a vytvoření jeho virtuální kopie. Proto se stále častěji využívá optických měřicích systémů, které umožňují bezkontaktní, přesné a rychlé vyhodnocení deformační sítě s použitím různých specializovaných softwarů. [14; 22; 25; 26]

K propracovanějším systémům 3D optického snímání deformovaného povrchu testovaného vzorku patří např. Argus od společnosti Zeiss, jež se specializuje na jejich vývoj. Systém Argus využívá principu tzv. fotogrammetrie, což je metoda, při které je určován tvar a prostorové umístění tělesa pomocí pořízených fotografií (dvourozměrných) z různých pohledových úhlů, viz obr. 20. [22; 26; 27; 28]



a) pořizování fotografií



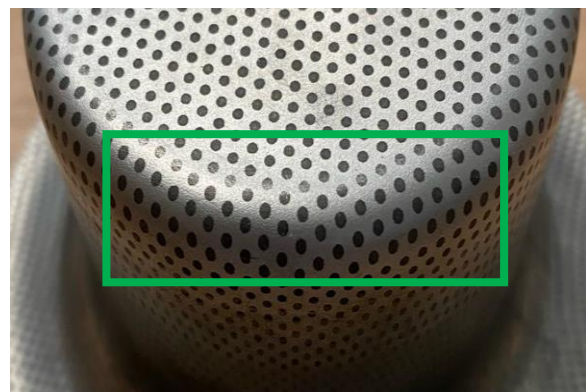
b) snímací zařízení

Obr. 20 Systém Argus [27].

I v případě aplikace metody fotogrammetrie se ještě před samotným procesem tváření nanáší na povrch zkoumaného vzorku, nejčastěji elektrochemickou cestou, deformační síť, která je tvořena pravidelně rozmístěnými kruhovými obrazci (obr. 21a) o známém průměru a vzdálenostech. V průběhu deformace mění kruhové obrazce svůj tvar na eliptický (obr. 21b) a následně pomocí výpočtů lze stanovit velikost a směr deformací. [25; 26; 27; 28]



a) kruhová deformační síť



b) změna tvaru na elipsu

Obr. 21 Nanesená deformační síť u metody Argus.

Záznam deformace a pořízení fotografií probíhá pomocí fotoaparátu s vysokým rozlišením, který snímá měřený objekt z různých pohledových úhlů. Pro správné určení úhlu a polohy fotoaparátu během pořizování snímků využívá metoda fotogrammetrie speciálně definované značky známé jako markery (obr. 22), jež se umisťují v blízkém okolí měřeného objektu. Markery lze popsat jako jedinečné referenční kódované značky, které ve svém vzoru nesou binární kód jedinečný pro konkrétní bod. V pořizovaných snímcích se na základě identifikace daného bodu pomocí výpočtů určuje orientace fotoaparátu v prostoru. [25; 26; 27; 28; 29]



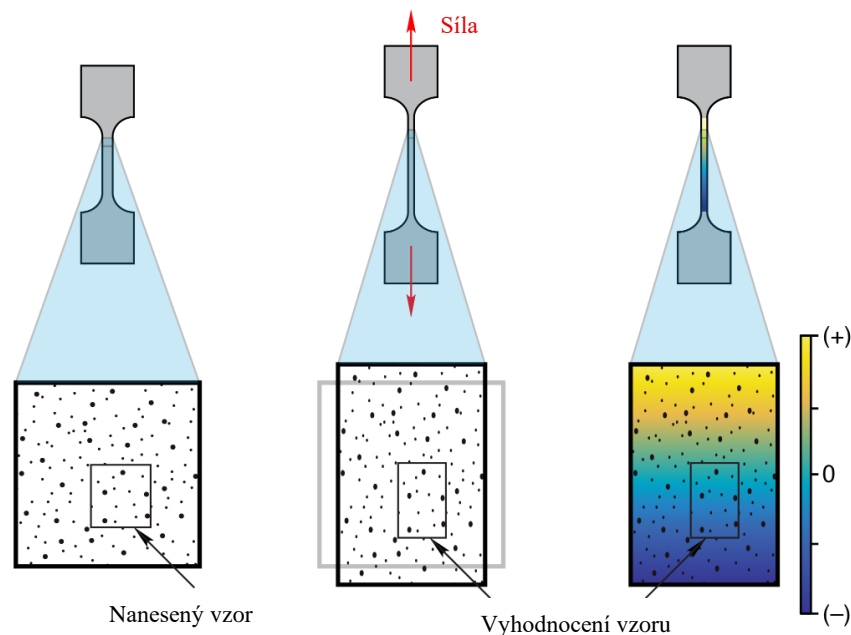
Obr. 22 Využití markerů [29].

Ze série pořízených dvourozměrných snímků se výpočetními algoritmy vytvoří 3D model deformovaného povrchu. Proces se nazývá triangulace, díky níž lze velmi přesně určit 3D souřadnice jednotlivých bodů deformační sítě na zkoumaném objektu a tím jeho lokální přetvoření. Pokud jsou k dispozici data o počátečním a konečném stavu deformace tělesa, lze přesně vyhodnotit změnu v jeho přetvoření a případně i ztenčení stěn materiálu. [25; 26]

Přestože metoda deformačních sítí, která je vyhodnocena pomocí systému Argus, poskytuje dostatečně přesné výsledky pro konstrukci křivky mezní tvařitelnosti, je její přesnost ve srovnání s metodou digitální korelace obrazu menší. Metoda digitální korelace obrazu nabízí velmi přesné a univerzální použití, které nachází uplatnění v široké škále aplikací. [22; 23; 30]

2.2.2 Digitální korelace obrazu

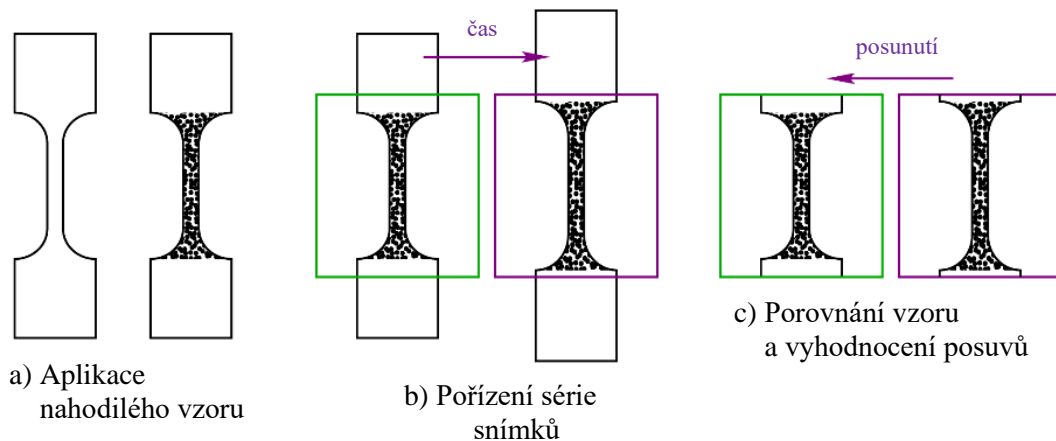
DIC představuje pokročilou měřicí techniku, která byla poprvé představena již v 80. letech minulého století. Metoda našla uplatnění v různých oblastech inženýrských měření, kde slouží ke sledování např. posuvů nebo deformací tělesa během jeho zatěžování (obr. 23). K rozšíření této metody přispěl především vývoj v oblasti záznamu fotografií a výpočetní techniky. V dnešní době DIC nachází uplatnění jak pro analýzu malých vzorků o velikosti v řádu centimetrů nebo milimetrů, tak i pro rozsáhle strukturální zkoušky, např. pro měření ploch rotorových lopatek nebo křídel větrných turbín, a to i z velké vzdálenosti. [31; 32; 33]



Obr. 23 Metoda DIC [30].

Na rozdíl od tradičních metod měření, jako jsou tenzometry nebo extenzometry, nabízí metoda DIC možnost vytvoření tzv. deformační mapy a získání širších dat o velikosti a směru hlavních složek napětí a deformací. Digitální korelace obrazu pracuje na principu sledování, zakódování a následném pozorování bloků pixelů v čase, což umožňuje analyzovat pohyb a deformace zkoumaného objektu. Digitální korelace obrazu probíhá v několika základních krocích, viz obr. 24: [30; 31; 32; 33; 34]

1. příprava povrchu vzorku,
2. kalibrace měřicího zařízení,
3. pořízení snímků vzorku před a během zatěžování, tedy tzv. korelace,
4. vyhodnocení snímků v softwaru a výpočet deformace.



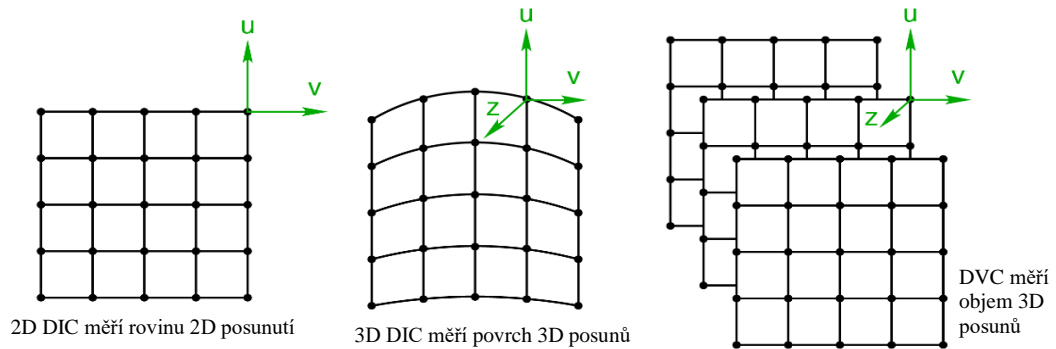
Obr. 24 Základní princip DIC [30].

Povrch zkoumaného tělesa musí být pokryt vzorem s náhodným rozložením odstínů šedé barvy, která se v průběhu deformace mění spolu s objektem, a nese tak informace o deformacích. Vzor může být přirozenou součástí povrchové struktury materiálu, nebo může být na zkoumaný dílec dodatečně nanesen, přičemž uměle vytvořený vzor bývá aplikován častěji. Pro přípravu zkoumaného povrchu lze využít různé metody, ale nejčastější postup spočívá v aplikaci bílé barvy jako podkladu, na niž se po zaschnutí nastříká černá barva, ideálně menší černé tečky, čímž vznikne požadovaný vzor, viz obr. 25. Důležité je, aby výsledný vzor byl kvalitně provedený a barva měla dobrou přilnavost k povrchu. Parametry, jež ovlivňují přesnost měření a jsou vybírány podle specifikace a nastavení kamery, zahrnují např. hustotu, tvar, velikost černých skvrn (teček) nebo kontrast barev. [30; 31; 32; 33]



Obr. 25 Detail náhodně vytvořeného vzoru nástřikem.

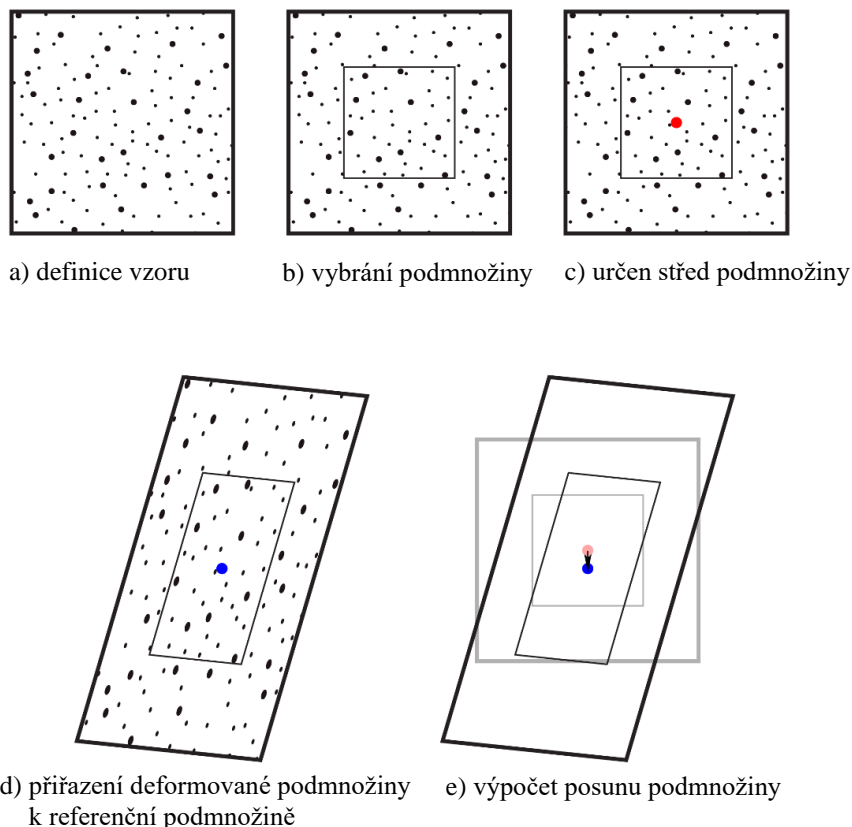
Metoda DIC se rozděluje na 3 základní typy algoritmů: 2D, 3D a metoda Digital Volume Correlation (DVC), přičemž každá z variant se uplatňuje pro jiný druh měření. Při 2D metodě se pro snímání používá pouze jedna kamera a naměřené posuvy deformací jsou omezeny pouze na rovinu rovnoběžnou s kamerou. Příkladem typického uplatnění je využití při tahové zkoušce. K zachycení posuvů složitých těles na povrchu ve všech 3 osách, včetně zakřivení plochy, se využívá 3D DIC, které pro pozorování používá dvojici kamer pracujících na zmíněném principu stereoskopie. Využití kamer s vysokou snímkovou frekvencí dále umožňuje zkoumat i dynamické děje či vibrace, což rozšiřuje možnosti aplikace metody. Poslední uvedená metoda (DVC) je velmi specifická, protože dokáže zaznamenat posunutí i uvnitř materiálu, což vyžaduje patřičné rozšíření jejích algoritmů. Děje se to např. v kombinaci s rentgenovou tomografií. Srovnání mezi metodami je uvedeno na obr. 26. [30; 31; 35]



Obr. 26 Rozdíl mezi 2D, 3D a DVC variantami metody DIC [30].

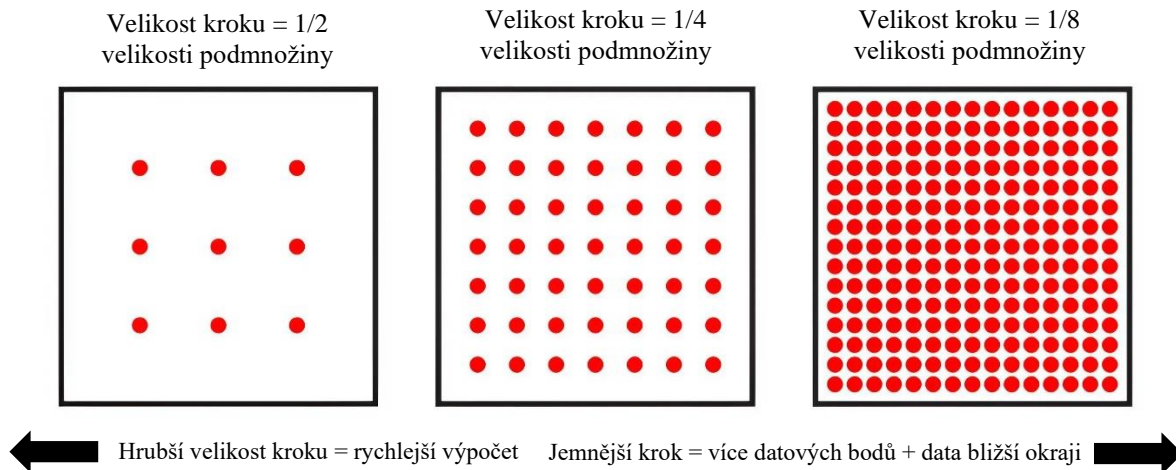
Základním principem metody DIC je klíčová fáze označovaná jako korelace. Jedná se o vzájemné porovnání sekvence obrazů v průběhu měření. První snímek je definován jako referenční a je brán jako základní pro výpočet. Na druhém snímku se hledají sledované prvky a na základě jejich polohy a změny tvaru se určují posuvy a deformace. DIC tedy porovnává pokaždé unikátní vzor, který nejde zaměnit a lze ho vždy jednoznačně identifikovat mezi referenčním a deformovaným obrazem. [30; 32; 35]

Zjednodušený princip korelace DIC je znázorněn pomocí obr. 27. Na obr. 27a je znázorněn výchozí snímek, který má unikátní vzor prvků, který bude pozorován. Obr. 27b, zde je pro účely sledování stanovena oblast vzoru, tzv. podmnožina, také označována jako fazeta. Obr. 27c, střed podmnožiny představuje prostor v referenčním snímku, ze kterého se bude počítat posun. Uvnitř středu je zobrazena červená tečka, která ovšem není součástí vzoru a slouží pouze k lepší orientaci. Obr. 27d, Po deformaci objektu se fazeta z deformovaného snímku porovná s podmnožinou z výchozího obrazu. Obr. 27e, po přiřazení podmnožiny DIC spočítá relativní posun podmnožiny mezi referenčním a deformovaným snímek. Posunutí je na obr. 27d znázorněno malým rozdílem mezi modrým a červeným bodem, mezi nimiž vede šipka. [30; 32; 35]



Obr. 27 Zjednodušený princip korelace metody DIC [30].

Výsledky získané metodou DIC do značné míry ovlivňuje zkušenost a nastavení provedené odpovědnou obsluhou zařízení. Při výpočtu DIC hrají důležitou roli velikost podmnožiny a velikost kroku, přičemž oba parametry se udávají v pixelech. Velikost podmnožiny lze definovat jako výšku a šířku ve formě čtverce v referenčním snímku (obr. 27b) a volí se na základě rozlišení podoblasti a velikosti prvků tvořících vzor. V případě, že jsou zvoleny příliš velké podmnožiny, výrazně se prodlužuje časová náročnost daného výpočtu. Velikost kroku představuje vzdálenost mezi středy jednotlivých podmnožin a má vliv na hustotu vyhodnocených datových bodů. Na obr. 28 je uveden příklad dopadu nastavení velikosti kroku a velikosti podoblasti. [30; 32; 35]



Obr. 28 Vliv velikosti kroku na výpočetní čas při zachování jednotné velikosti podoblasti [30].

Pro praktické měření deformací metodou digitální korelace obrazu se komerčně využívají např. systémy X-SIGHT 2D a X-SIGHT 3D od již zmíněné firmy X-Sight, která se specializuje na vývoj optických měřicích systémů, a to včetně příslušného softwarového vybavení. V případě použití X-SIGHT 2D se využívá snímání pomocí jedné kamery, viz. obr. 29, přičemž pozorování přetvoření je umožněno pouze v rovině a techniku lze využít pro aplikace, kde není potřeba prostorové měření. [36; 37]



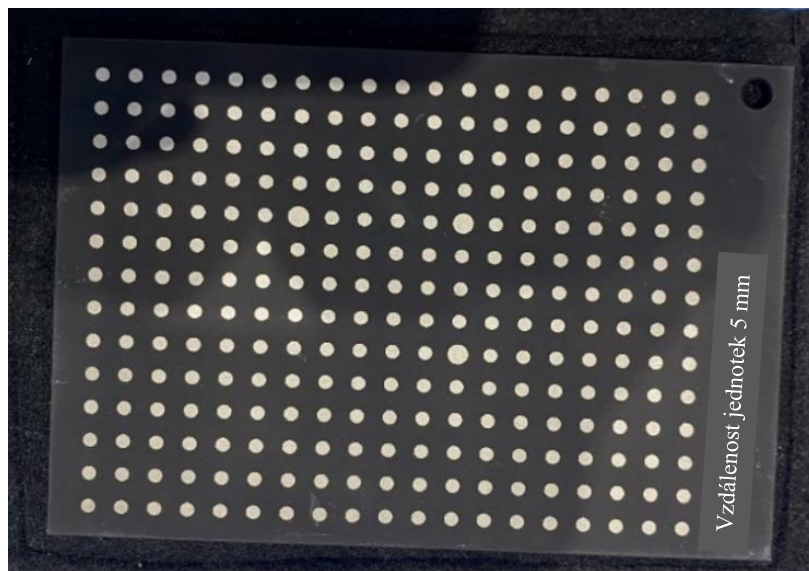
Obr. 29 Systém X-SIGHT 2D [36].

Naproti tomu při použití dvou kamer, které tvoří základ systému X-SIGHT 3D (obr. 30), dochází k využití tzv. stereoskopie, kde kamery mají vůči sobě přesně definovanou polohu a sklon. Aby však bylo možné metodu 3D DIC použít s požadovanou přesností, je nutné po vytvoření náhodného vzoru na snímaném povrchu objektu provést kalibraci DIC příslušenství, tj. vytvoření a nastavení modelu kamery. Nastavení kamery obsahuje sadu dat, které charakterizují použité technické prostředí jednotlivých kamer, jako je např. křivost CCD čipu, ohnisková vzdálenost nebo zkreslení objektivu. Všechny zmíněné faktory jsou následně důležité pro výpočet, který musí opravovat chyby vzniklé zkreslením obrazu způsobené např. nedokonalostmi kamery nebo vadou objektivu. [30; 31; 34]



Obr. 30 Systém X-SIGHT 3D [37].

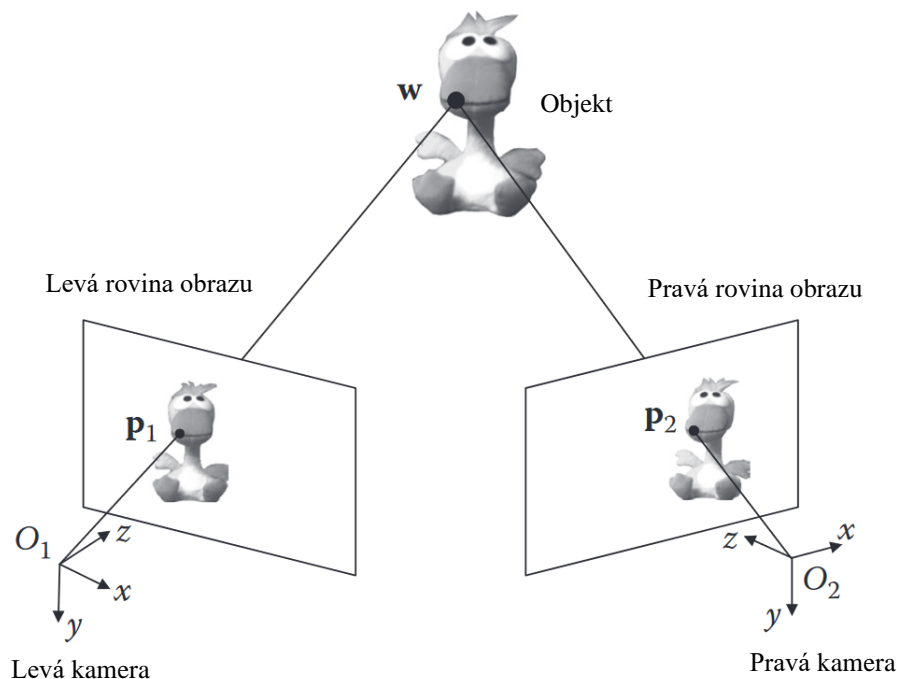
Korekční faktory zahrnuté ve výpočtu DIC se určují prostřednictvím jednoduchého kalibračního postupu. Obvykle se provádí pomocí kalibračního objektu o známé geometrii a rozměrech. Nejčastěji jsou to desky obsahující kalibrační mřížku, viz obr. 31, která je na desku nanášena např. pomocí laserového gravírování. Celý proces spočívá v pořízení snímků kalibrační desky, která je umístěna pod různými úhly (získá se zkreslených snímků), a následném porovnáním desky v její ideální výchozí poloze. [30; 31; 34]



Obr. 31 Kalibrační deska.

Princip stereoskopie je způsob měření, který umožňuje získat na základě dvojice pořízených snímků informace o trojrozměrném obrazu (scéně) a prostorové hloubce. Stereoskopie, inspirována lidským zrakem (viděním), využívá skutečnosti, že dva různé pohledy na stejný objekt z odlišných pozic obsahují malé rozdíly, tzv. disparitu. Zmíněnou disparitu lze vyhodnotit a následně interpretovat na informaci o hloubce neboli vzdálenosti bodů ve scéně od kamery. Díky tomu může DIC pozorovat změnu pohybu povrchu součásti a vyhodnocovat lokální či globální deformace bezkontaktním způsobem. [25; 26; 37]

V základním nastavení se systém stereoskopie skládá ze dvou identických kamer, jež snímají obraz (scénu) z mírně odlišných úhlů. Jak je možné vidět na obr. 32 3D bod W na povrchu pozorovaného objektu se promítá do obrazových rovin kamer. Dva dvourozměrné (2D) body p_1 a p_2 v obrazových rovinách představují průměty bodu W . Zde nastává problém korelace při nalezení bodů p_1 a p_2 mezi stereoskopickými obrazy. [25; 26]



Obr. 32 Schéma stereoskopie [25].

Úkolem tedy je nalézt odpovídající body v obou obrazech, k čemuž slouží proces stereopárování, anglicky nazývaný stereo matching, který vyžaduje velké množství výpočtů. Ke snížení výpočetní náročnosti procesu stereopárování by se 3D geometrie stereoskopického systému měla zohledňovat tak, aby byl proces omezen pouze na určité oblasti. Rozdíl v poloze bodu na levém a pravém snímku je způsoben již zmíněnou disparitou a její velikost je přímo úměrná vzdálenosti pozorovaného objektu od kamery. [25; 26]

Pro zajištění správného fungování je nutné provést kalibraci systému kamer, což znamená, určit jejich vzájemnou polohu a vnitřní parametry jako např. zkreslení nebo ohniskovou vzdálenost. Dalším důležitým prvkem je tzv. epipolární geometrie, která zajišťuje, že hledání odpovídajících bodů lze redukovat pouze na jednu linii (epipolární), což taktéž výrazně zjednodušuje a urychluje výpočet. Pokud je známa poloha kamer a souřadnice náležitých bodů na snímcích, lze vypočítat jejich skutečnou prostorovou polohu pomocí tzv. procesu triangulace. [25; 26]

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Jak již bylo zmíněno v úvodu, práce bude zaměřena na návrh experimentu, jehož cílem je vytvoření diagramu mezní tvařitelnosti a následné stanovení křivky mezní tvařitelnosti pro zvolený materiál DR520 CA, STONE FINISH dodávaný společností U. S. STEEL Košice, s.r.o. Zvolený materiál má tloušťku 0,2 mm a na jeho povrch je nanesena rovnoměrná vrstva cínu s plošnou hmotností povlaku 2,0/2,0 g·m⁻². V experimentální části budou využity teoretické poznatky uvedené v přechozích kapitolách. Největší pozornost bude zaměřena na konstrukci přípravku a provedení praktického měření s cílem získat a vyhodnotit naměřená data. Pro experimentální test a určení FLC byla vybrána metoda Nakajima, která patří mezi nejčastěji používané a nejvíce rozšířené zkoušky pro tento typ měření.

Návrh přípravku bude muset být přizpůsoben s ohledem na zvolenou metodu, tedy pro konstrukci vedení funkčních částí (tažníku) a sevření vzorku, a zároveň bude navržen tak, aby byla zajištěna určitá reprodukovatelnost měření. Požadavky vybrané zkoušky jsou popsány pomocí normy ČSN EN ISO 12004-2, jež definuje geometrii zkušebních těles, testovacího zařízení a průběh samotné zkoušky. Součástí návrhu přípravku musí být také přizpůsobení jeho konstrukce možnostem vybavení dílen ÚST FSI VUT v Brně, tj. dostupnému hydraulickému lisu CBJ 500–6, který bude použit pro experimentální testování a do jehož dutin bude upnut přípravek. V rámci konstrukčního řešení musí být zohledněny nejen funkční a geometrické požadavky, ale také pevnostní a tuhostní nároky jednotlivých částí nástroje.

Před samotnou výrobou experimentálního přípravku bude jeho 3D model podroben pevnostní analýze pomocí numerické simulace v prostředí softwaru ANSYS 2021R. Smyslem simulace bude zejména ověření, jestli nedojde během praktického testu ke kritickému namáhání vedoucímu až k deformaci některé z částí přípravku, jako je např. prohnutí nebo prasknutí sloupků. Na základě ověření pomocí numerické simulace může dojít k úpravě testovacího zařízení, aby byla zajištěna jeho funkčnost.

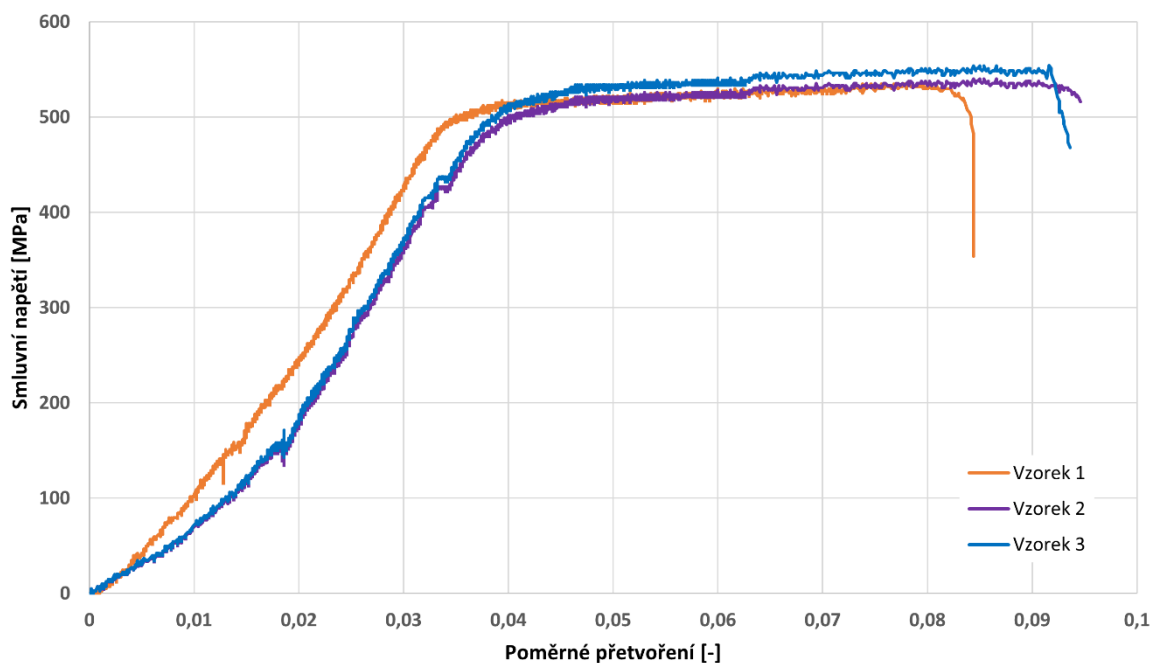
Celý proces měření, od záznamu průběhu zatěžování vzorku až po vyhodnocení, bude proveden pomocí systému digitální korelace obrazu. Využití DIC jako bezkontaktní optické metody umožňuje přesné snímání porušovaného vzorku v reálném čase. Následné zpracování získaných dat z DIC analýzy se využije pro lokalizaci momentu vzniku trhliny a určení bodu k vykreslení FLC. Veškeré snímání pomocí metody DIC a následné vyhodnocení v samotném softwaru bude probíhat ve spolupráci se společností X-Sight s.r.o.

Navržený experimentální test bude tedy komplexní proces, který v sobě bude zahrnovat praktický návrh zkušebního přípravku, přípravu vzorků a provedení měřicích zkoušek včetně vyhodnocení získaných dat. Výsledky budou sloužit nejen pro ověření funkčnosti přípravku, ale především k stanovení požadované FLC pocínovaného materiálu.

3.1 Mechanické vlastnosti zkoušeného materiálu

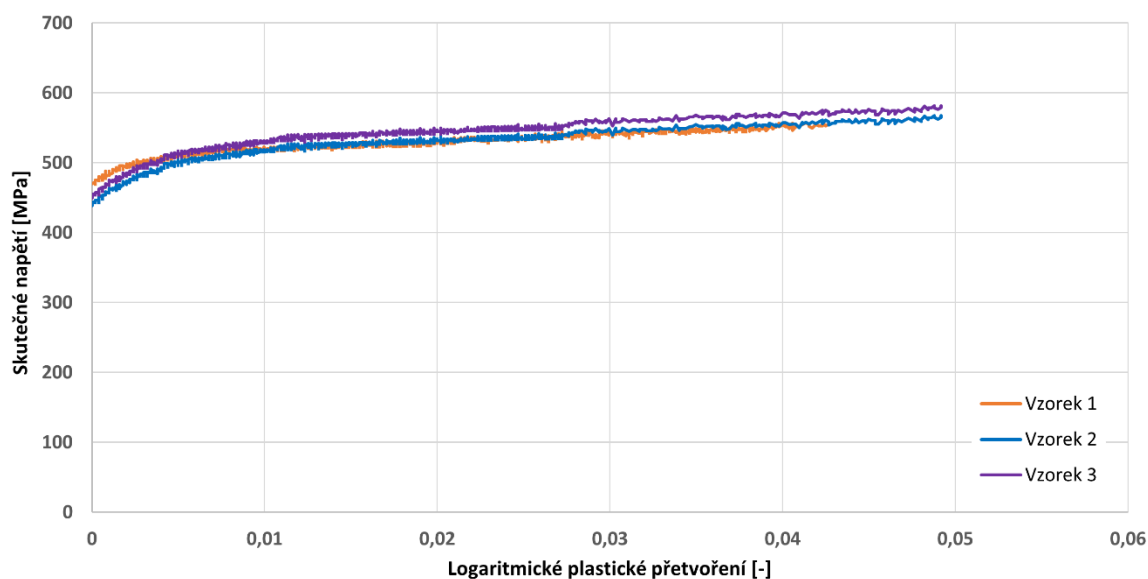
Pro lepší porozumění chování zvoleného materiálu DR 520 CA a pro získání informací o jeho základních mechanických vlastnostech byla provedena tahová zkouška. Ta sloužila nejen k určení hodnot jako jsou mez kluzu, mez pevnosti nebo tažnost, ale také jako vstupní orientační krok před samotnou tvorbou křivky mezní tvařitelnosti. Získané výsledky poskytují představu o tom, jak se materiál chová při plastické deformaci a jaký lze očekávat průběh výsledné FLC (např. zda bude ležet výše či níže). Navíc je možné provedenou zkouškou ověřit, zda odpovídají skutečné mechanické vlastnosti materiálu hodnotám předepsaným dodavatelem, které jsou uvedeny v tab. 2. Z popsaných důvodů byla tahová zkouška zařazena jako nedílná součást experimentálního postupu.

Níže uvedený obr. 33 znázorňuje základní průběh tahové zkoušky provedené na zkušebních vzorcích z materiálu DR 520 CA. Na vodorovné ose x je vyneseno poměrné přetvoření a na svislé ose y odpovídající smluvní napětí v MPa. Tahová zkouška byla provedena celkem pro tři testované vzorky, jejichž průběhy jsou v grafu barevně odlišeny (oranžová, modrá a fialová). Tvary křivek bez výrazné meze kluzu odpovídají běžnému chování standardních nízkouhlíkových ocelí.



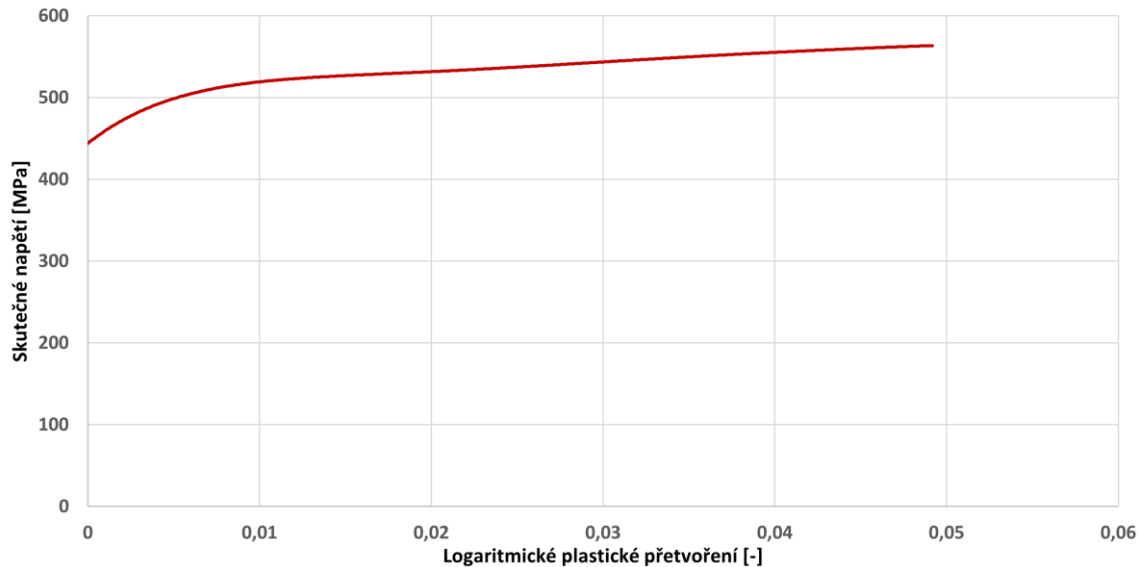
Obr. 33 Průběh tahové zkoušky.

Na základě výsledků zpracované tahové zkoušky byly všechny tři zaznamenané průběhy (oranžová, modrá a fialová) dále přepočteny na plastické přetvoření. Výsledkem je graf na obr. 34, kde na vodorovné ose x je vyneseno logaritmické plastické přetvoření a na svislé ose y odpovídající skutečné napětí v MPa. Přepočtení umožňuje získat detailnější informace o chování materiálu za plastické deformace a slouží jako podklad pro určení parametrů, např. materiálová konstanta K a exponent zpevnění n .



Obr. 34 Přepočtené napět'ové deformační křivky.

Z přepočtených průběhů tahové zkoušky byla provedena průměrná aproximace, jejímž výsledkem je střední křivka znázorněna červeně na obr. 35. Výsledná křivka byla následně proložena mocninou funkcí, z níž se určila zmíněná materiálová konstanta K a exponent zpevnění n , které popisují chování materiálu při plastické deformaci. V tab. 5 jsou uvedeny veškeré výstupy a výsledné hodnoty získané z provedené tahové zkoušky.



Obr. 35 Zprůměrovaná napěťově deformační křivka.

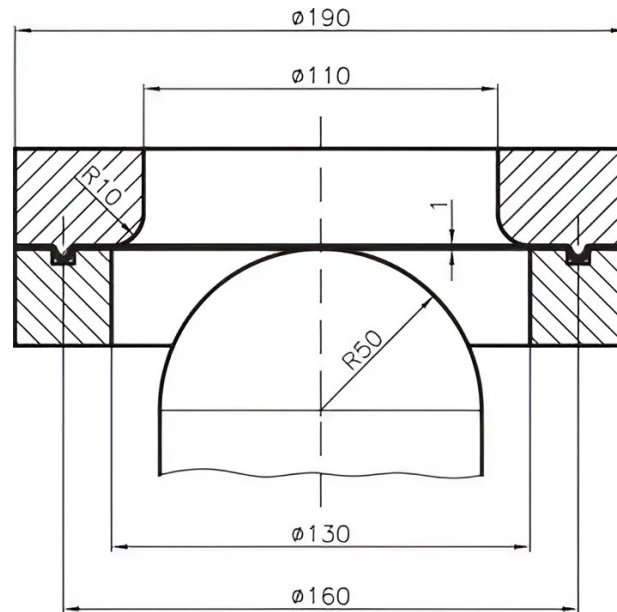
Tab. 5 Výsledné hodnoty získané tahovou zkouškou

Vzorek	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{50} [%]	n [-]	K [MPa]
1	523	533	3,8	0,030	601,5
2	533	538	4,1	0,045	643,7
3	535	543	4	0,035	661,2
Průměr	530	538	4	0,037	635

3.2 Princip a návrh přípravku

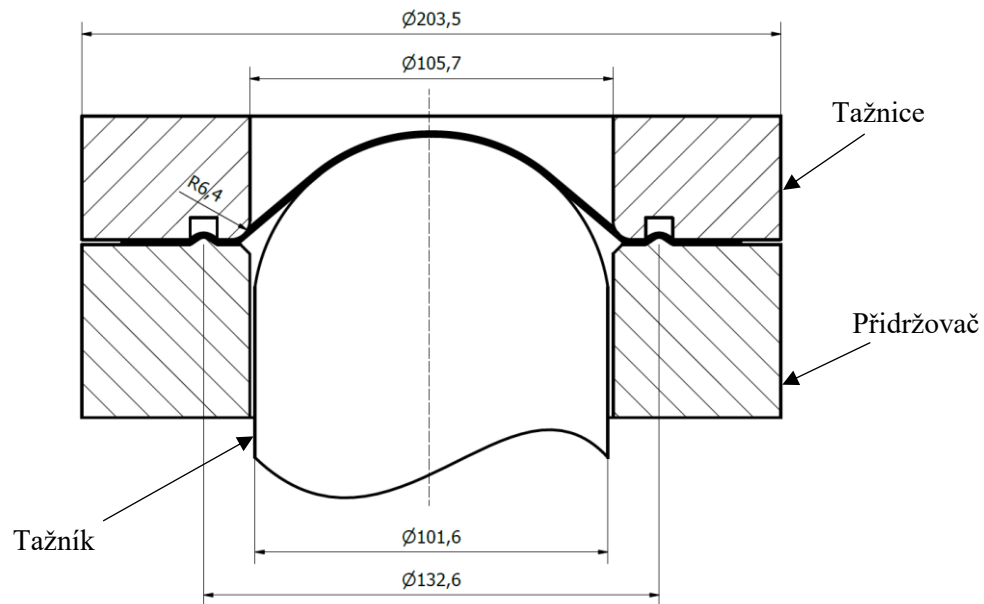
Celý návrh přípravku byl proveden s ohledem na zvolenou metodu Nakajima, která je definována normami ČSN EN ISO 12004-1 a ČSN EN ISO 12004-2 a vychází ze základního konceptu (obr. 17), jenž byl dále modifikován na základě již publikovaných zařízení dle článků [38; 39; 40; 41]. Uvedené zdroje používají základní koncept víceméně v nezměněné podobě a liší se od něho pouze v systému přidržování. Místo hladké tažnice a přidržovače se v člancích navíc využívá přidavného zařízení v podobě brzdného žebra, které je nejčastěji součástí přidržovače, zatímco v tažnici se nachází drážka odpovídající jeho negativnímu tvaru.

Na obr. 36 je znázorněno schéma experimentálního přípravku podle článku [40]. Ve srovnání s výchozím konceptem, který definuje norma ČSN EN ISO 12004-2, zde nedošlo k výrazným odchylkám v rozměrech jednotlivých částí nástroje až na zaoblení tažnice. Tažnice byla konstruována se zaoblením R10, přičemž tato rozměrová odchylka může souviset s tím, že dřívější vydání normy připouštělo zaoblení v rozmezí R5 až R10. Přidržovač byl v literatuře navržen s vnitřním průměrem 130 mm, přičemž norma neuvádí jeho doporučený rozměr. Hlavní rozdíl však spočívá v použitém systému přidržování, kde je využito již zmíněného brzdného žebra, které je součástí tažnice, zatímco drážka je zhotovena v přidržovači.



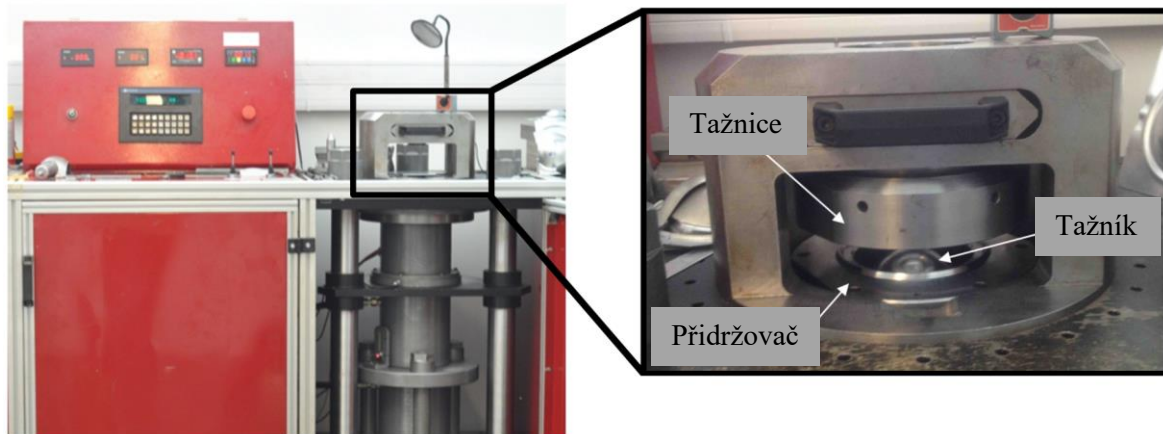
Obr. 36 Schéma použitého experimentálního přípravku [40].

Také zdroj [41] při konstrukci nástroje vychází ze základního konceptu popsaného v příslušné normě. Schéma s rozměry přípravku je uvedeno na obr. 37. Podobně jako v předchozím návrhu je i zde do přidržovací soustavy implementováno brzdné žebro, jehož účelem je zabránit přílišnému vtahování materiálu do tažnice. V tomto případě je však brzdné žebro umístěno v přidržovači, zatímco odpovídající drážka se nachází v tažnici.



Obr. 37 Schéma nástroje [41].

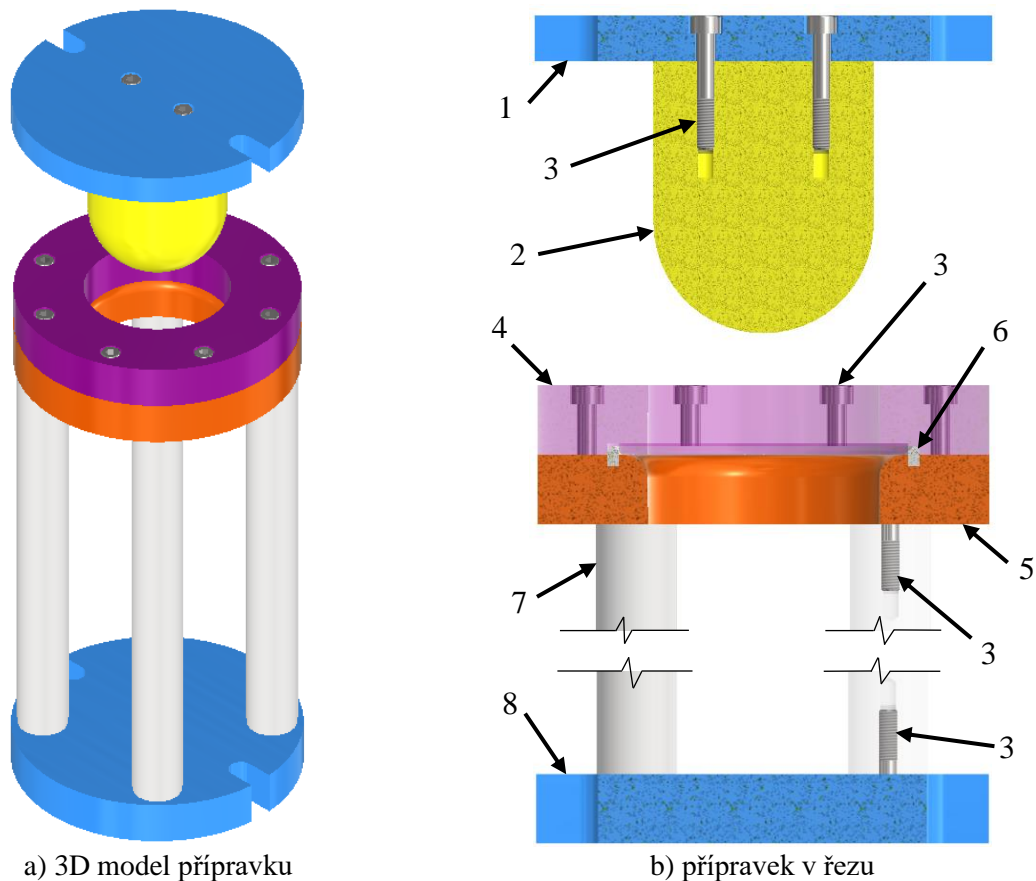
Zdroj [41] dále uvádí celou sestavu použitého experimentálního zařízení přímo namontovaného na hydraulickém zkušebním stroji, které je zobrazeno na obr. 38. Dle literatury je sestava nástrojů zaměnitelná v závislosti na typu experimentu. Tření mezi tažníkem a vzorkem bylo minimalizováno pomocí teflonové fólie, jež byla umístěna na horní polokulové části tažníku, a kromě toho se na povrch materiálu neneslo mazivo Ferrocoat N 6130.



Obr. 38 Použité zařízení a přípravek [41].

Na základě poznatků a rešerše ze zmíněných článků byla konstrukce přípravku dále přizpůsobena praktickým požadavkům experimentálního prostředí, neboli zajištění vhodného upnutí nástroje do vybraného lisu CBJ 500–6. Lis je vybaven T drážkami pro upevnění o šířce 17 mm, jež se nacházejí jak v horní, tak v spodní pracovní desce a umožňují tak flexibilní a pevné uchycení nástroje. Zároveň byl přípravek konstruován s důrazem na jednoduchou obsluhu a s ohledem na praktické využití při reálných zkouškách měření.

Přípravek, viz obr. 39b, se skládá ze dvou částí, z horní pohyblivé a spodní nepohyblivé. Horní část je složena pouze ze 3 komponent, tedy z horní desky (1), tažníku (2) a šroubů (3). Spodní nepohyblivá část se skládá z přidržovače (4), tažnice (5), brzdného žebra (6), 4 sloupků (7), spodní desky a opět šroubů (3). Pro jednodušší montáž jednotlivých částí se u přípravku použije stejná délka i velikost šroubů $M8 \times 40$. Do horní základové desky se vyvrtají dvě díry pro šrouby, jimiž se k desce přišroubuje tažník, který bude svou polokulovou částí namáhat vzorek až do stavu jeho porušení. Na bocích má deska vyfrézované symetrické drážky, jež umožňují její upnutí do horního beranu lisu za použití kombinace matek a šroubů velikosti 17 mm. Šrouby se dotáhnou do upínacích kostek, tvarově kopírujících T drážky, vložených do horního beranu lisu. Spodní část sestavy tvoří deska opatřená stejnými drážkami pro šrouby M17 jako horní deska, přičemž šrouby společně s matkami slouží k jejímu uchycení ke spodní části beranu lisu. Po obvodu má vyvrtané 4 otvory určené pro montáž sloupků. K horní části sloupků se napevno uchytí tažnice, a to šroubovým spojem. Tažnice je vyrobena jako monolitický celek. Obsahuje vyfrézovanou drážku určenou pro vložení a pevné usazení brzdného žebra s uložením H8/h7. S přidržovačem se sešroubuje 8 šrouby. Přidržovač slouží k fixaci vzorku k tažnici a obsahuje vyfrézovanou drážku, do které se natlačí okraj vzorku při dotahování. Přidržovač spolu s brzdným žebrem slouží k co největšímu zpomalení vtahování materiálu do tažnice v průběhu působení tažníku na vzorek. Pro dosažení zmíněného efektu je brzdné žebro opatřeno dvěma sraženými o rozměru $2 \times 45^\circ$.



a) 3D model přípravku

b) přípravek v řezu

Obr. 39 Experimentální přípravek.

U konstrukce přípravku bylo rovněž zapotřebí vybrat vhodný materiál na výrobu jednotlivých součástí podle jejich funkce. Pro sloupky, horní a spodní upínací desku, brzdné žebro a přidržovač byla uvažována ocel 12 050. Pro tažník a tažnici, u kterých se předpokládá větší mechanické zatížení, se zvažovalo použití oceli 19 436. Nicméně materiál musel být zvolen s ohledem na jeho dostupnost ve skladu dílen ÚST FSI VUT v Brně. Z tohoto důvodu se nakonec zvolila univerzálně pro všechny součásti dostupná ocel 11 600. Podle [42] má ocel mechanické vlastnosti: pevnost v tahu $R_m = 630$ MPa, minimální mez kluzu $R_e = 310$ MPa a tažnost $A_{80} = 13$ %.

U většiny komponent nebyla struktura povrchu zapotřebí nikterak kvalitní, a proto byla u převážné části povrchů stanovena drsnost $R_a = 3,2$ μm dosažitelná metodou soustružení i frézování. Jedinou výjimku tvoří struktura povrchu části polokulového tažníku, u kterého je požadován jemnější povrch s drsností $R_a = 0,8$ μm , aby se minimalizovalo tření mezi tažníkem a zatěžovaným vzorkem.

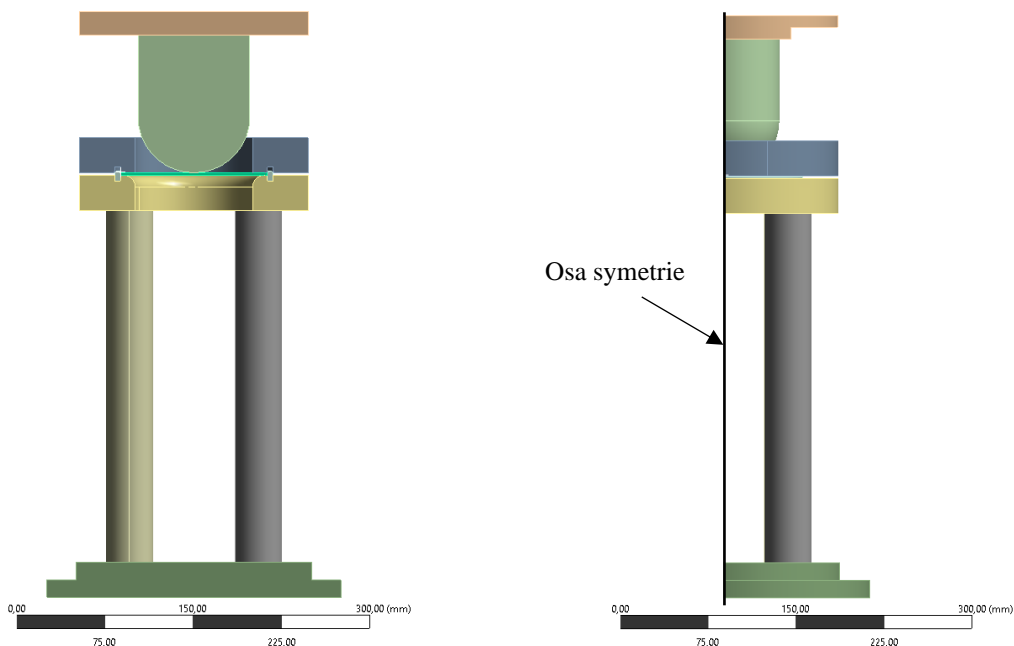
Při návrhu experimentálního přípravku muselo být dbáno na požadavek od firmy X-Sight na zajištění dostatečného pracovního prostoru pro umístění vybavení DIC a především dvojice kamer, jež budou zachycovat deformující se vzorek. Jedná se tedy zejména o prostor mezi nosnými sloupky, jelikož mezi ně bude vloženo speciální upínací zařízení v podobě profilu, který je opatřen dvěma držáky kamer. Pro zajištění stability a zamezení posunu profilu nesoucí kamery v průběhu testování a aby nebylo nutné kamery neustále znovu kalibrovat, se profil přichytí ke sloupkům pomocí svěrek. Dále bylo zapotřebí, aby byl pozorovaný vzorek v definované vzdálenosti od kamer, a to především kvůli zajištění jejich správného zaostření a možnosti snímání celého povrchu vzorku. Proto byla délka nosných sloupků navržena o rozměru 300 mm, což by mělo poskytovat dostatečný pracovní prostor pro dvojici kamer.

3.3 Ověření funkčnosti přípravku numerickou simulací

Před samotnou výrobou experimentálního přípravku se provedla kontrola jeho vyrobitelnosti, jež byla realizována na základě numerické simulace v softwaru ANSYS 2021 R1. Uvedený program využívá metodu konečných prvků (MKP) k výpočetní analýze. Základním principem metody konečných prvků je tzv. diskretizace, tj. rozdělení řešené oblasti na konečný počet prvků (elementů), jež jsou matematicky snadněji popsatelné, a řešení dané úlohy po částech. Hlavním cílem numerické simulace je ověření funkčnosti přípravku, a to především z hlediska pevnostních výpočtů, tj. jestli nedojde během procesu k trvalé deformaci některé z částí přípravku. Nejkritičtější dílcem pravděpodobně budou nosné sloupky, kvůli jejich délce 300 mm, protože může dojít k jejich prohnutí nebo prasknutí. [43] Před spuštěním simulace byl v rámci preprocesingu definován výpočetní model, konkrétně:

- geometrický model (geometrie, výpočetní síť),
- materiálový model (křivka zpevnění, Poissonův poměr, model pružnosti v tahu),
- model kontaktu

Geometrický model přípravku byl převzat z CAD softwaru Autodesk Inventor Professional 2024. Pro účely numerické simulace stačila pouze sestava nástroje bez šroubů. Pouze plech byl vymodelován a ustaven přímo v modeláři ANSYS. Rozměry vzorku jsou: průměr 125 mm a tloušťka 2 mm. Uvedený průměr dostačuje pro ověření přípravku, protože boční stěna plechu a jeho spodní část budou pro zjednodušení a větší stabilitu simulace napevno spojeny s povrchy přípravku. Tloušťka 2 mm byla zvolena zejména z bezpečnostního hlediska, protože představuje předpokládanou maximální hodnotu pro testování v navrženém přípravku. Při bezproblémovém průběhu simulace lze úspěšně předpokládat i spolehlivé výsledky u tenkých plechů. Pro zjednodušení manipulace a definice v dalším průběhu nastavování simulace byly spojeny některé části do jednoho tělesa. Konkrétně se sloučil tažník s horní upínací deskou a obdobně i spodní upínací deska se sloupky, tažnicí, brzdým žebrem a přídržovačem. V posledním kroku byl celý geometrický model z důvodu snížení výpočetní náročnosti zjednodušen, tj. byl použit poloviční model (využívající symetrii okolo plochy), viz obr. 40, přičemž polovina nástroje plně dostačuje pro potřeby deformační analýzy.



a) polovina geometrického modelu zepředu

b) boční pohled poloviny geometrického modelu

Obr. 40 Použitý geometrický model přípravku.

Po nastavení geometrického modelu bylo zapotřebí přiřadit daným komponentům modelu materiálové vlastnosti, tj. nastavit materiálový model. Pro všechny dílce přípravku, kromě vymodelovaného vzorku, byla zvolena z knihovny materiálu běžná konstrukční ocel odpovídající svými elastickými vlastnostmi použitému materiálu. Mechanické a tepelné vlastnosti uvedené softwarem ANSYS o použité oceli jsou uvedeny v tab. 6. Pro plech, který se v průběhu procesu deformuje, byly zvoleny materiálové parametry korozivzdorné oceli s bilineárním zpevněním, které byly opět převzaty z knihovny materiálu ANSYS. Hodnoty materiálového modelu jsou vypsány v tab. 7. Korozivzdorná ocel se použila záměrně (z důvodu předimenzování), protože pokud se přípravek nebude kriticky deformovat při jejím použití, lze očekávat bezproblémovou funkci i při využití materiálu DR 520 CA o tloušťce 0,2 mm.

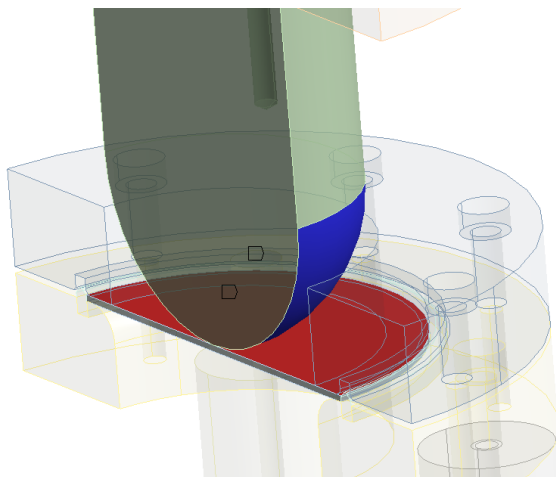
Tab. 6 Materiálové vlastnosti konstrukční oceli z knihovny ANSYS.

Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	7 850
Youngův modul pružnosti [MPa]	$2\cdot 10^5$
Poissonův poměr [-]	0,3
Mez kluzu v tahu [MPa]	250
Měrná tepelná kapacita [$\text{mJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$]	$4,34\cdot 10^5$

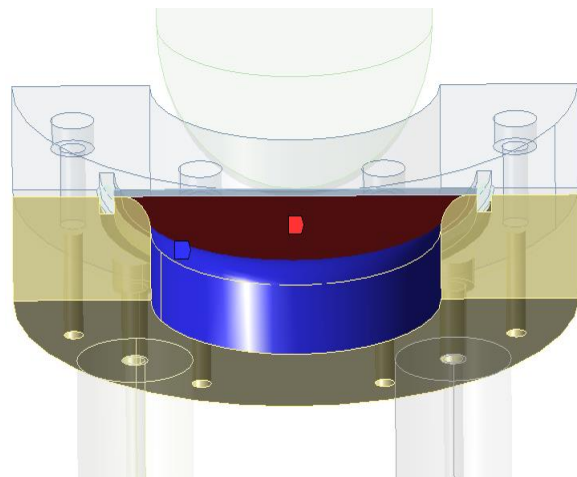
Tab. 7 Materiálové vlastnosti korozivzdorné oceli z knihovny ANSYS.

Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	7 850
Youngův modul pružnosti [MPa]	$1,93\cdot 10^5$
Poissonův poměr [-]	0,31
Mez kluzu [MPa]	220
Modul plasticity [MPa]	1 725
Měrná tepelná kapacita [$\text{mJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$]	$4,8\cdot 10^5$

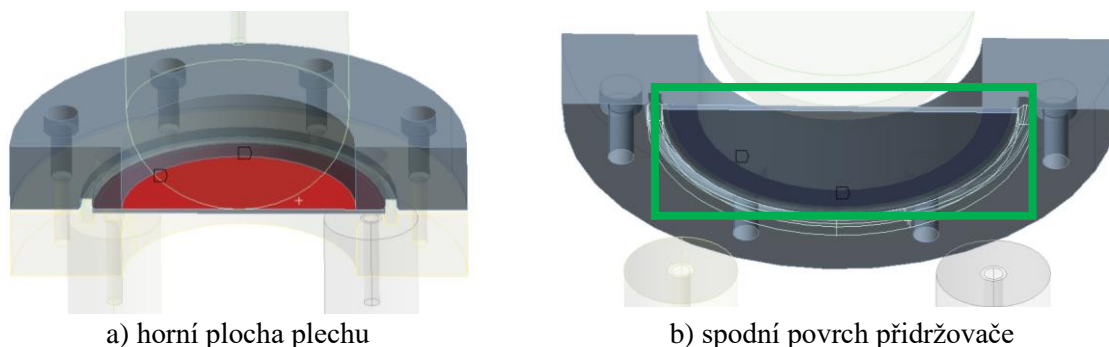
V následujícím kroku bylo zapotřebí pro správné fungování numerické simulace nastavit kontakty mezi jednotlivými dílci modelu a definovat jejich vzájemnou interakci. Celkem bylo vytvořeno pět kontaktů, u nichž byla snaha co nejvíce se přiblížit reálnému chování přípravku během procesu zatěžování. V kontaktech lze definovat jak třecí styky např. mezi nástrojem a vzorkem, tak pevná (vázaná) spojení, jež zabráňují pohybu (posunutí). První třecí kontakt (obr. 41) se vytvořil mezi horní plochou plechu (červená barva) a polokulovou částí tažníku (modrá barva). Druhá interakce mezi povrchy (obr. 42) se definovala jako třecí mezi tažnicí (modrá) a spodní plochou plechu (červená). Poslední třecí styk byl zajištěn mezi spodním povrchem přidržovače (černá), který je označen zeleným obdélníkem (obr. 43b), a horní plochou plechu (červená). U všech třecích vazeb se součinitel tření nastavil na 0,1.



Obr. 41 Třecí kontakt mezi tažníkem a plechem.



Obr. 42 Třecí kontakt mezi tažnicí a plechem.

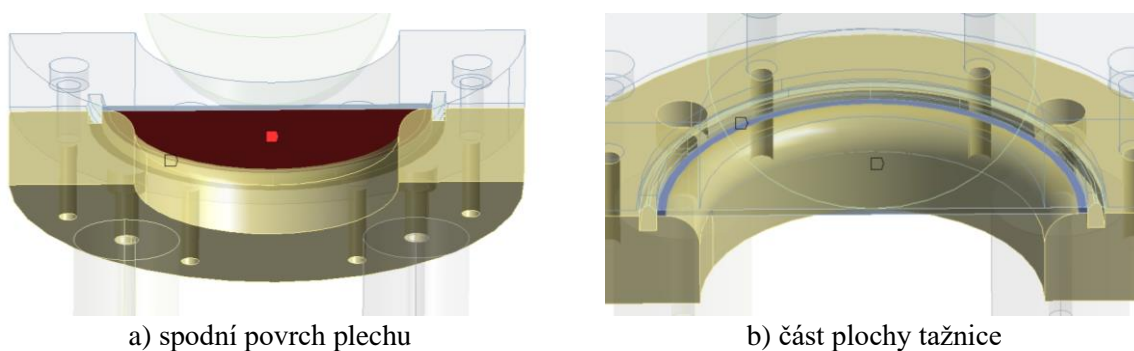


a) horní plocha plechu

b) spodní povrch přídržovače

Obr. 43 Třecí kontakt mezi přídržovačem a plechem.

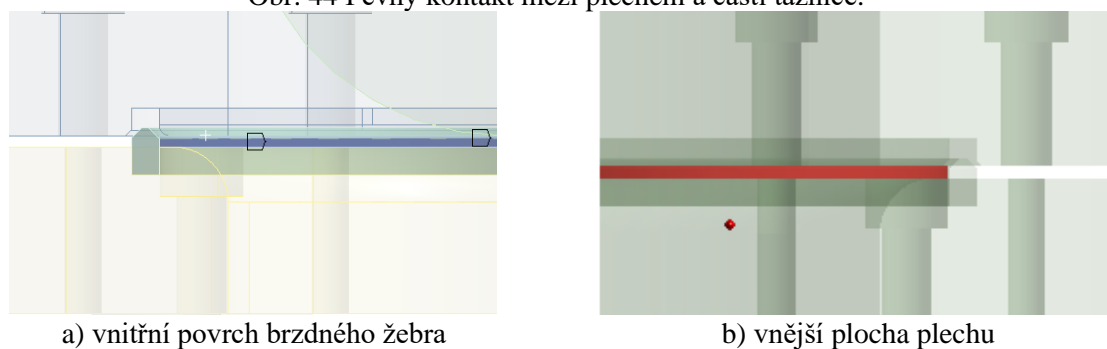
Následovalo definování dvou pevných kontaktů, jež byly důležité pro fungování numerické simulace, protože zajistili, že materiál zůstane v určených místech pevně upnut. Zvolené fixace jsou nezbytné, neboť jak již bylo zmíněno, simulace pracuje s plechem o průměru pouze 125 mm, což slouží pro její zjednodušení. První z tuhých kontaktů (obr. 44) byl zvolen mezi částí tažnice (modrá) a spodním povrchem vzorku (červená). Interakce byla zvolena z důvodu, aby plech zůstal v jeho okrajích pevně upnut a tím se zamezilo jeho úplnému vtahování. Druhá fixní vazba (obr. 45) se nastavila mezi vnitřním povrchem brzdného žebra (modrá) a vnější boční plochou plechu (červená). Interakce opět slouží k tomu, aby se plech nevtahoval a byl fiktivně pevně upnut.



a) spodní povrch plechu

b) část plochy tažnice

Obr. 44 Pevný kontakt mezi plechem a částí tažnice.

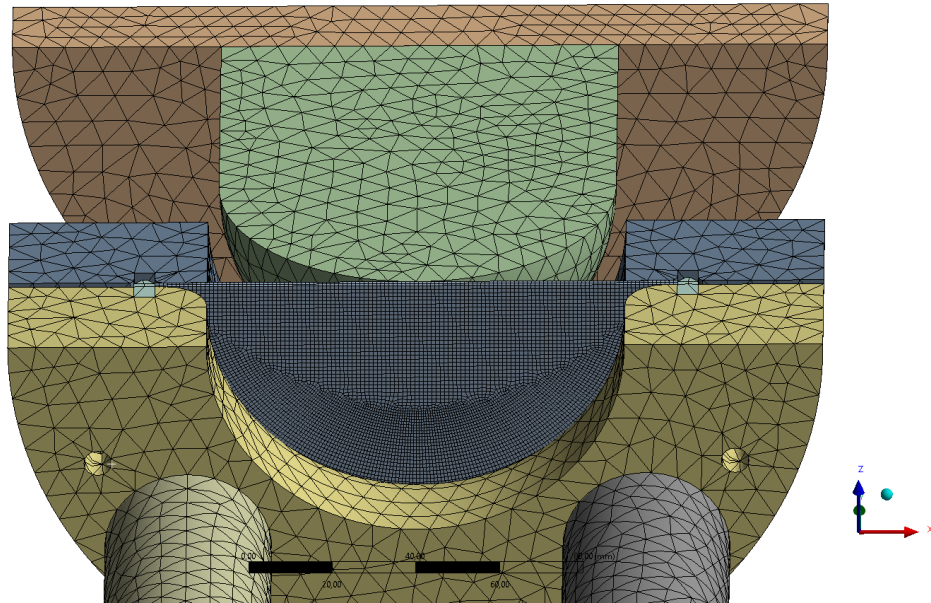


a) vnitřní povrch brzdného žebra

b) vnější plocha plechu

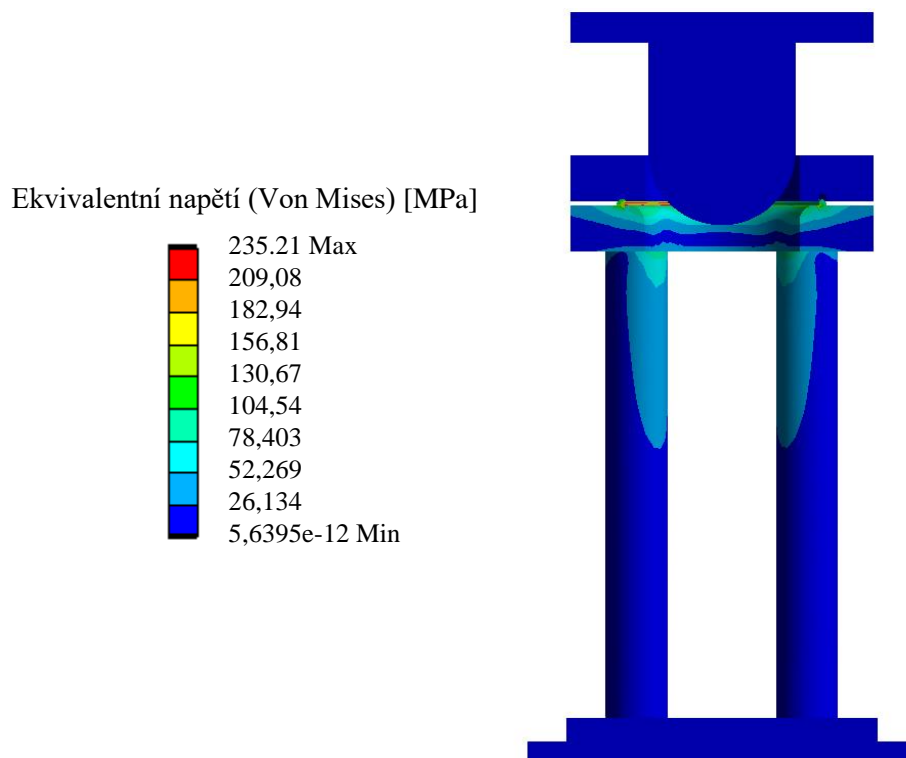
Obr. 45 Pevný kontakt mezi brzdným žebrem a vnější plochou vzorku.

V další fázi numerické simulace se vytvořila výpočetní síť, anglicky tzv. mesh, která je základem pro aplikaci zmíněné metody konečných prvků. Nasítování proběhlo hned dvakrát, zvlášť pro všechny dílce přípravku a následně samostatně pro daný vzorek. Na všechny součásti přípravku, celkově osm komponent, se aplikovala síť o velikosti elementu 7 mm, viz obr. 46, a s nastavením chování typu měkké (v softwaru soft), což znamená automatické zjemnění sítě v kritických oblastech, kde by se jinak prvek sítě nemohl správně vytvořit. Na plech se použila jemnější síť o velikosti prvku 1 mm, viz obr. 46. Zde bylo aplikováno chování typu tvrdé (v softwaru hard), tj. že síť se nemůže automaticky přesíťovat v kritických místech, ale musí se řídit zadanými parametry.



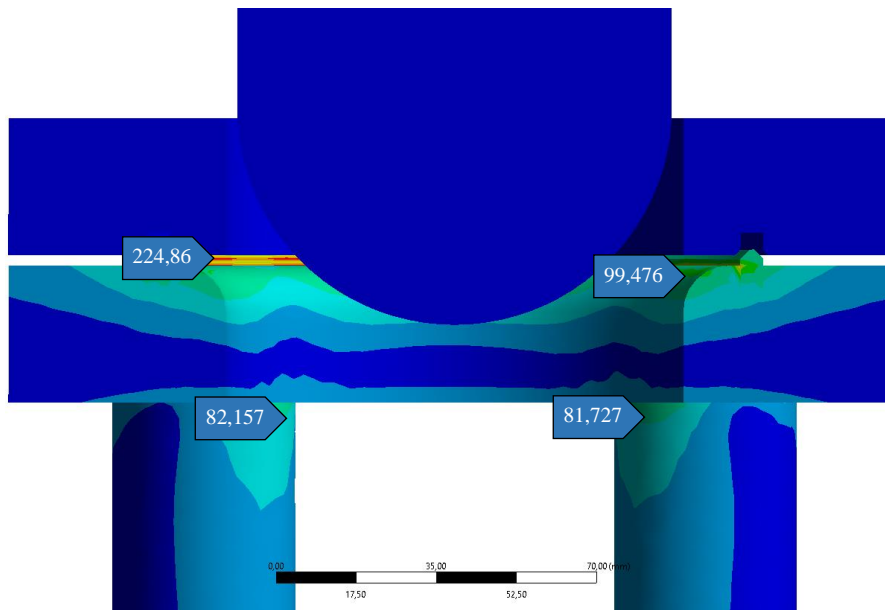
Obr. 46 Vygenerovaná deformační síť.

V simulačním prostředí bylo zkoumáno především mechanické chování přípravku při jeho zatížení, a to prostřednictvím výstupu v podobě barevných map, které umožňují analyzovat širokou škálu veličin a rovněž provádět různé typy analýz. První ověření přípravku numerickou simulací proběhlo pomocí ekvivalentního napětí (von Mises). Zvolené napětí slouží jako zásadní kritérium pro posouzení, zda nastane plastická deformace materiálu v průběhu zatížení. Přestože je materiál součástí numerické simulace, na obr. 47 není zobrazen, aby bylo možné přehledněji sledovat rozložení napětí v ostatních částech sestavy, zejména v oblasti sloupků a mezi upínací částí přípravku. Výsledky ekvivalentního napětí jsou znázorněny na obr. 47, přičemž rozmezí se pohybovalo téměř od 0 do 235,21 MPa.



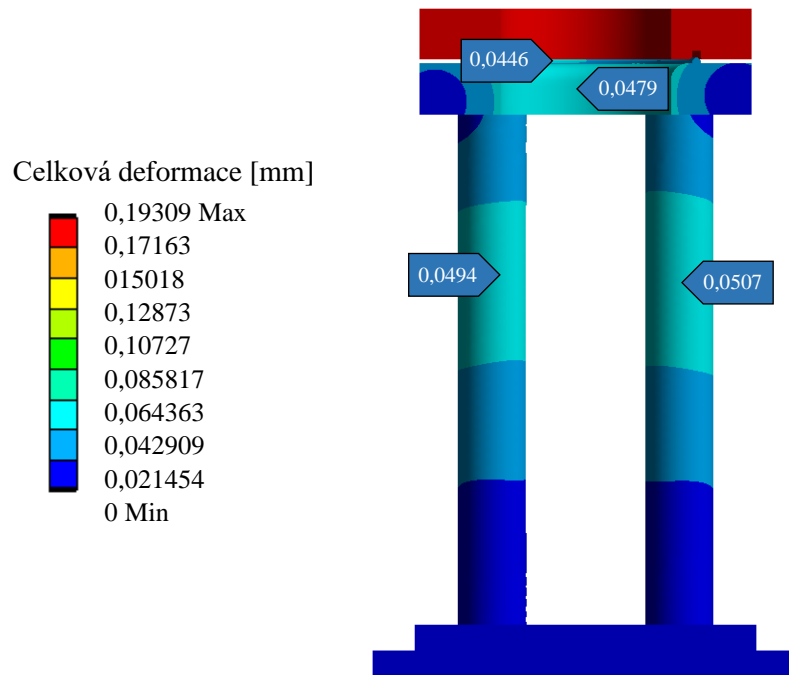
Obr. 47 Rozmezí ekvivalentního napětí.

Hodnoty ekvivalentního napětí se následně porovnaly s mezí kluzu zvolené konstrukční oceli. Jak je možné vidět na barevné mapě na obr. 47 v žádné oblasti přípravku nedošlo k překročení meze kluzu dané oceli. Z grafického vyhodnocení, viz obr. 48, je patrné, že nejvíce zatěžovaným dílcem je brzdné žebro, v jehož vybrané oblasti bylo dosaženo napětí 225 MPa, které je ovšem stále pod mezí kluzu, a konstrukce žebra tedy vyhovuje. Nosné sloupky přípravku disponují hodnotami v rozmezí 81 až 83 MPa, což splňuje požadavky na dostatečnou pevnost a tuhost. Na tažnici se hodnoty napětí pohybují kolem 100 MPa, což je rovněž v bezpečném rozmezí. Po shrnutí výsledků lze konstatovat, že zvolený materiál pro konstrukci experimentálního přípravku vykazuje dostatečnou pevnostní rezervu a je schopen bez trvalé deformace přenést vzniklé zatížení.



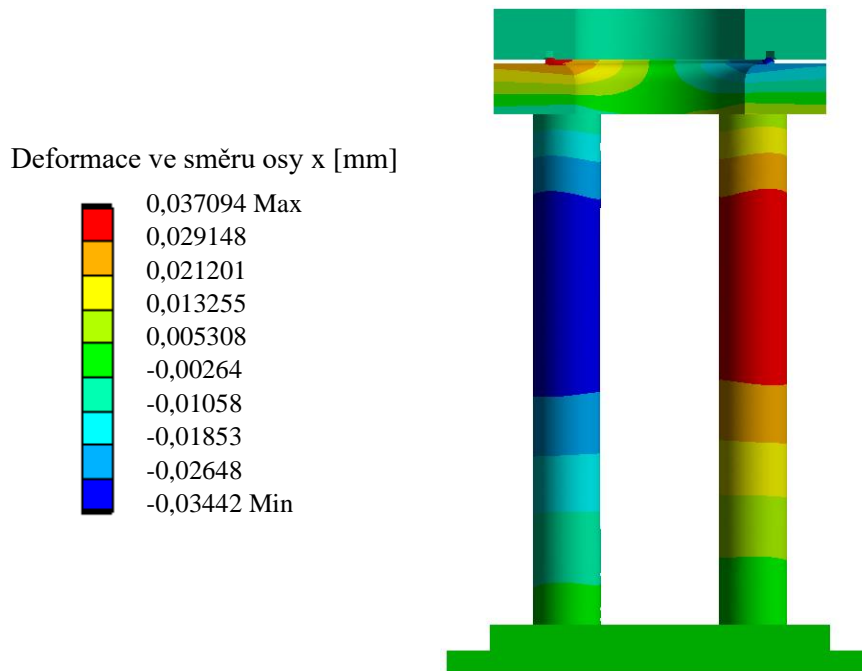
Obr. 48 Ekvivalentní napětí se značkami.

Dalším sledovaným parametrem numerické simulace byla celková deformace, jež popisuje velikost posunutí jednotlivých částí přípravku v reakci na působící zatížení. Vyhodnocení probíhalo opět pomocí barevné škály znázorňujícího rozložení deformací po celé konstrukci. Výstup slouží především k vizuální kontrole, jestli v konstrukci přípravku nevznikají nadměrné deformace, které by mohly ovlivnit funkčnost přípravku nebo mít jakýkoli negativní vliv na průběh samotné zkoušky. Analýza opět proběhla s mírnou úpravou zobrazení, přestože jsou tažník, horní upínací deska i plech součástí numerické simulace, na uvedeném obr. 49 nejsou záměrně vyobrazeny. Zjednodušený a přehlednější pohled byl zvolen pro lepší pozorování průběhu celkové deformace v oblasti upínacího systému a sloupků, jež zajišťují stabilitu celé konstrukce. Nižší uvedený barevný rozsah, viz obr. 49, zobrazuje celý přípravek, přičemž hodnoty deformace se pohybují v rozmezí od 0 mm do 0,2 mm. Nejvyšší hodnoty deformace se nacházejí ve spodní části přípravku. Naopak největší deformace se soustřeďují v horní části sestavy, která je zároveň nejbližší místu působení hlavního zatížení. Vlivem působení hlavního zatížení se sloupky, brzdné žebro a tažnice mírně prohýbají směrem dovnitř. Pohyb vytváří tlak na krajní oblasti přídržovače, který je tímto vytlačován směrem nahoru. Na základě toho vykazuje přídržovač nejvyšší hodnoty deformace, přičemž jeho max. posunutí dosahuje hodnoty cca 0,2 mm. Pomocí vložených štítků jsou vyznačeny různé oblasti s konkrétními hodnotami deformace. Na základě získaných výsledků lze konstatovat, že deformace v rámci celého přípravku se pohybují ve velice nízkých hodnotách, tudíž nedochází k narušení funkčnosti přípravku. Celková tuhost přípravku tedy dostatečně vyhovuje pro daný typ zatížení.



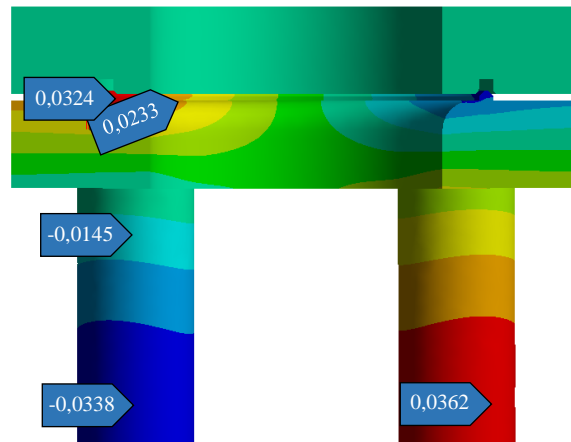
Obr. 49 Celková deformace přípravku.

Následovalo vyhodnocení ukazatele směrové deformace podél osy x, která ukazuje posunutí jednotlivých bodů modelu ve vodorovném směru v reakci na zatěžování. Výsledek slouží k odhalení případných nežádoucích vybočení nebo nerovnoměrných deformací konstrukce, jež by mohly negativně ovlivnit např. kvalitu upnutí vzorku během zkoušky. Na obr. 50 je zobrazeno barevné rozmezí deformace v ose x po celém modelu přípravku. Hodnoty se pohybují v intervalu od -0,034 mm (modře) do 0,037 mm (červeně). Vzhledem k tomu, že počátek souřadnicového systému je v ose symetrie mezi sloupky, lze obr. 50 vyčíst, že deformace mají symetrické rozložení s minimálním rozptylem cca 0,035 mm.



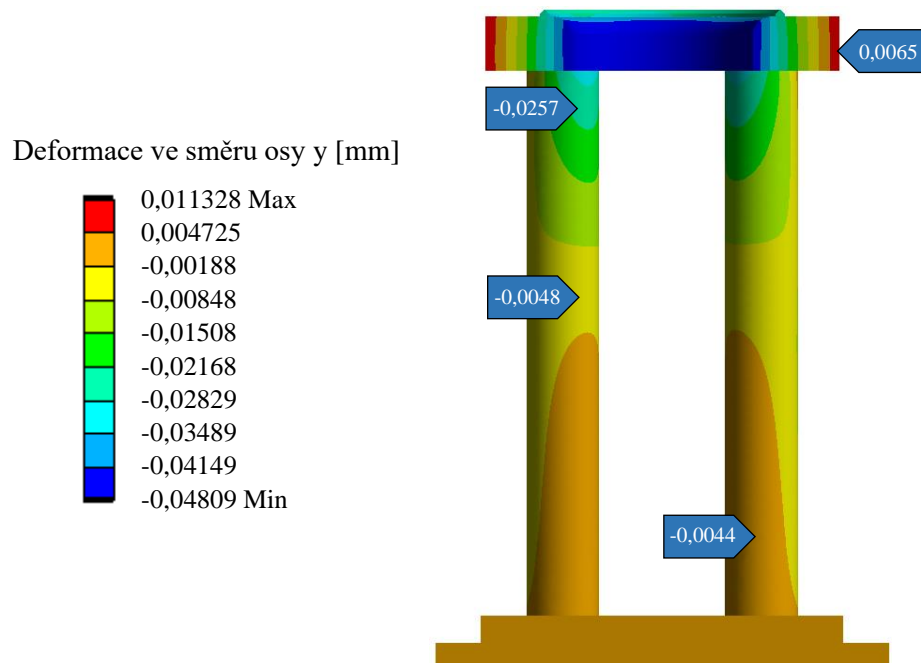
Obr. 50 Směrová deformace podél osy x.

Na obr. 51 je zobrazeno detailnější grafické vyhodnocení deformace ve směru osy x s vybranými oblastmi obsahujícími lokální analýzu v bodech, jež znázorňují konkrétní velikosti deformace. Nejvyšší hodnoty se koncentrují v oblasti brzdného žebra a na obou sloupcích, kde na pravém bylo naměřeno 0,037 mm a na levém -0,034 mm. Naopak nejnižší hodnoty se nachází např. na přídržovači, ale i v dalších oblastech přípravku (spodní deska).



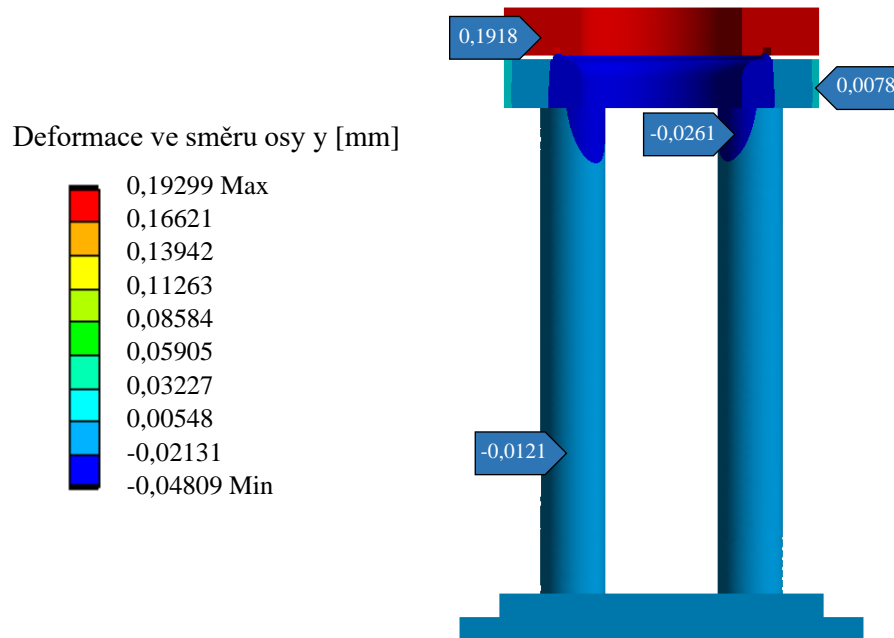
Obr. 51 Deformace podél osy x se značkami.

Obdobná analýza se provedla i pro následující výsledek, pouze se u něho se sledovala směrová deformace ve vertikálním směru, tedy v ose y. Výstup umožnil posoudit, jak se bude konstrukce přípravku deformovat pod vlivem zatěžovací síly směrem dolů, tj. ve směru působení tažného nástroje. Především se vyhodnocovalo vertikální posunutí v oblasti upínacího systému a sloupků. Numerická simulace byla provedena ve dvou variantách, a to jednou s přídržovačem a po druhé bez. Účelem toho je skutečnost, že při použití přídržovače došlo k výraznému soustředění deformace právě do této části, což znamenalo optické potlačení deformací v ostatních částech konstrukce. Opět je to způsobeno stejným principem jako u celkové deformace, tj. vytlačení přídržovače nahoru. Naopak bez přídržovače bylo možné lépe rozlišit interval deformací. Na obr. 52 (bez přídržovače) se deformace pohybují v intervalu od -0,048 mm do 0,012 mm. Barevná škála přehledně ukazuje rozložení deformace po celém přípravku, přičemž jsou patrné rozdíly v míře zatížení jednotlivých dílců sestavy.



Obr. 52 Směrová deformace podél osy y bez přídržovače.

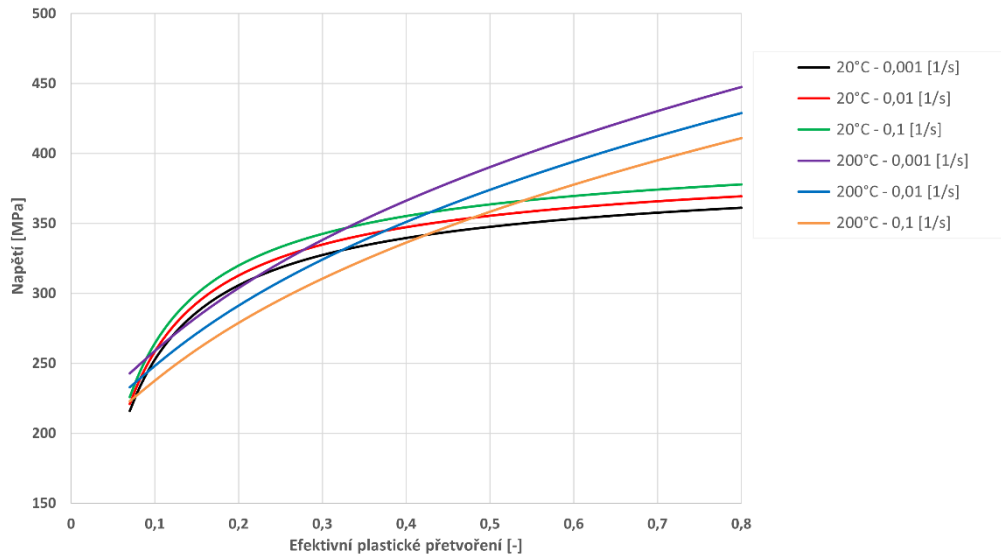
Z obr. 53 (s přídržovačem) vyplývá, že rozsah deformací je podstatně větší od -0,048 mm do 0,193 mm a dominantně se projevuje především v oblasti přídržovače, oproti zbylým částem přípravku vykazujícím minimální změny. Provedená varianta slouží primárně pro ověření chování samotného přídržovače. Obě varianty tak poskytují celkový pohled, přičemž jedna je více zaměřena na deformaci přídržovací oblasti a druhá na chování nosných prvků přípravku.



Obr. 53 Směrová deformace podél osy y s přídržovačem.

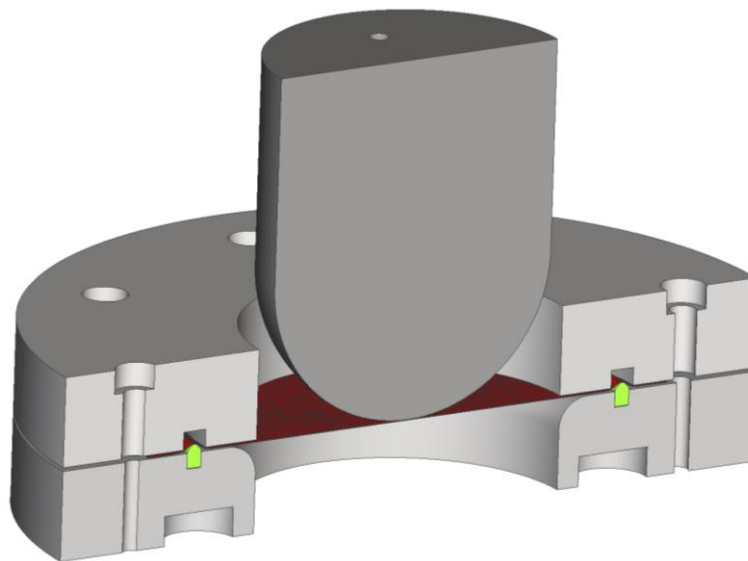
Na základě výsledků získaných z numerické simulace v softwaru ANSYS vyplývá, že návrh přípravku splňuje požadavky z hlediska pevnosti a při zatížení nedochází k žádným trvalým deformacím jeho konstrukce. Pro komplexní ověření funkčnosti nástroje byla následně provedena další doplňková simulace v prostředí Simufact Forming, jež byla zaměřena na validaci celého technologického procesu. Zmíněný software totiž oproti programu ANSYS umožňuje s použitím MKP posouzení celého tvářecího procesu včetně ukazatelů porušení materiálu. Simulace zahrnuje dvě hlavní fáze. V první fázi se nejprve provede upnutí vzorku pomocí přídržovače, a to zalisováním. Druhý krok je zaměřen na samotné tváření materiálu tažníkem, během něhož dochází k vtahování materiálu do prostoru tažnice. Cílem simulace je tedy ověření, jestli i proces upnutí a vtahování vzorku probíhá podle předpokladů. Volba uchycení plechu zalisováním přes okraje brzděného žebra pomocí lisu byla zvolena záměrně, jelikož pouhé upnutí plechu pomocí šroubů by nemuselo být v reálném procesu dostatečně pevné, protože ruční dotažení (použití šestihranného klíče) nemusí vyvinout dostatečnou sílu a zároveň rovnoměrně přitlačit vzorek po celém jeho obvodu. Nedostatečné zajištění vzorku by mohlo vést k nerovnoměrnému uchycení a zároveň i jeho nežádoucímu vtahování během procesu tváření. Právě použitím zalisování pomocí lisu se dosáhne rovnoměrného přitlaku po celé kontaktní ploše mezi plechem a brzděným žebrem, čímž se získá stabilní fixace, a toto je potřeba ověřit pomocí numerické simulace. [44]

Prvním krokem v prostředí Simufact Forming bylo definování materiálového modelu závislého na plastickém přetvoření, teplotě a rychlosti deformace. Základní materiálové vlastnosti materiálu jsou Youngův modul pružnosti $E = 210 \text{ GPa}$ a Poissonův poměr $\mu = 0,3$. Následně se chování materiálu popsalo pomocí tzv. GMT rovnice, která definuje tokové napětí v závislosti na efektivním plastickém přetvoření, teplotě a deformační rychlosti. Parametry rovnice byly nastaveny podle vstupních dat ze softwaru Simufact Forming a výsledkem byly napětíově-deformační křivky, viz obr. 54. Křivky slouží jako vstupní podklad pro simulování procesu tváření a přesně popisují chování materiálu při různých zatěžovacích podmínkách.



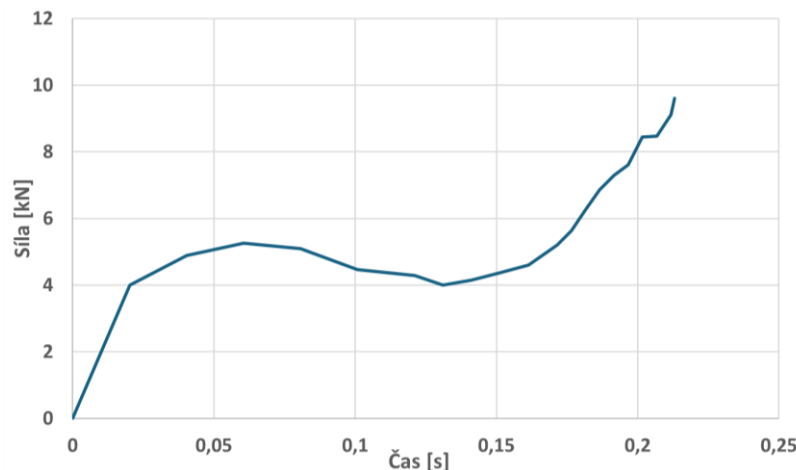
Obr. 54 Napětově-deformační křivky pro různé rychlosti deformace.

Geometrický model nástroje je zobrazen na obr. 55. Model nástroje je v prostředí Simufact Forming definován jako ideálně tuhé těleso, což znamená, že během simulace nedochází k jeho deformování a chová se jako dokonale pevná sestava. Geometrický model nástroje se skládá z tažníku, tažnice, přidržovače, brzdného žebra a zkušební vzorku (červená). Na zkoumaný plech byly aplikovány tzv. solid-shell prvky, které umožňují efektivní a rychlý výpočet tenkostěnných těles, jako jsou např. plechy. U analyzovaného materiálu se v simulaci zvolila tloušťka 0,2 mm a průměr 155 mm, přičemž hodnota součinitele tření mezi nástrojem a vzorkem byla nastavena na 0,1, tedy stejně jako v softwaru ANSYS. Z materiálové databáze programu Simufact Forming byla vybrána pro plech standardní nízkouhliková ocel, která se svými mechanickými vlastnostmi podobá skutečně použitému materiálu (DR 520 CA). Jedním z důvodů této volby byla skutečnost, že vybraný materiál ze softwarové databáze již obsahuje experimentálně stanovenou FLC pro tloušťku 0,2 mm a odpovídající mechanické vlastnosti. Cílem úvodní fáze simulace nebylo přesné napodobení chování použitého materiálu DR 520 CA, ale především posouzení funkčnosti celého procesu. Šlo tedy o ověření, zda nedojde k porušení tenkého plechu během zalisování a jestli následně nastane postupné vtahování materiálu vedoucí ke vzniku trhliny.



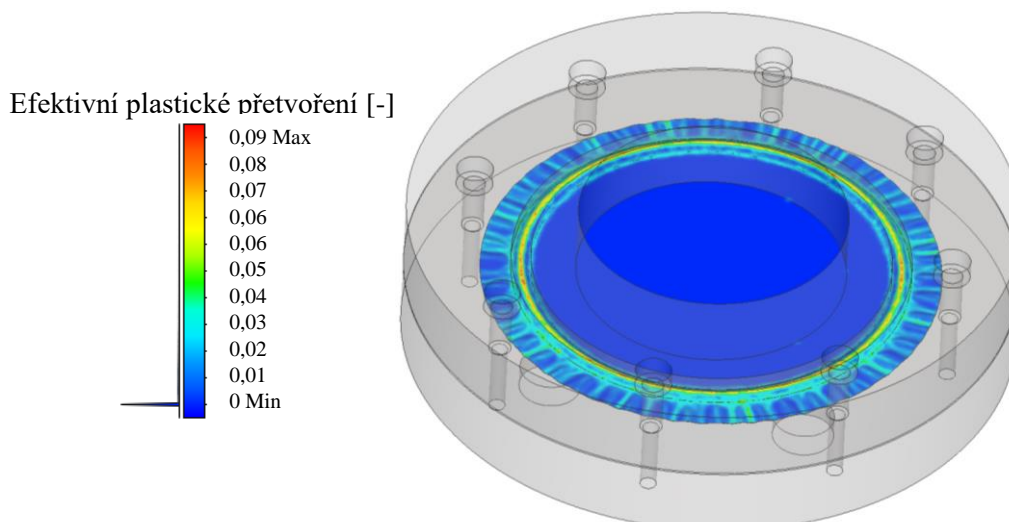
Obr. 55 Geometrický model přípravku v řezu.

Jak již bylo zmíněno, v první fázi se zkoumalo chování materiálu při jeho zalisování. Z obr. 56 znázorňujícího průběh síly je patrné, že k účinnému zalisování plechu je zapotřebí přibližně 8,5 kN. Zjištěná síla má za cíl zajistit rovnoměrné a dostatečně pevné upnutí vzorku mezi částí upínacího systému přípravku, zejména v oblasti brzdného žebra. Pro zajištění takto rovnoměrného upnutí je nezbytné použít právě navržený systém fixace, protože pouhé dotažení šrouby by nedokázalo vyvinout dostatečný tlak, a to ani v případě testování vzorků ze standardní nízkouhlíkové oceli, která je výrazně lépe tvařitelná než např. korozivzdorná ocel. Pokud by tedy byl použit materiál s vyšší pevností, potřebná síla by se pravděpodobně ještě navýšila. Výsledek tedy potvrzuje, že zalisování je nezbytné pro správné a funkční upnutí vzorku. Následně se provede konečné zajištění (dotažení) plechu pomocí šroubů, které budou sloužit jako pojistný prvek pro udržení vzorku v poloze.



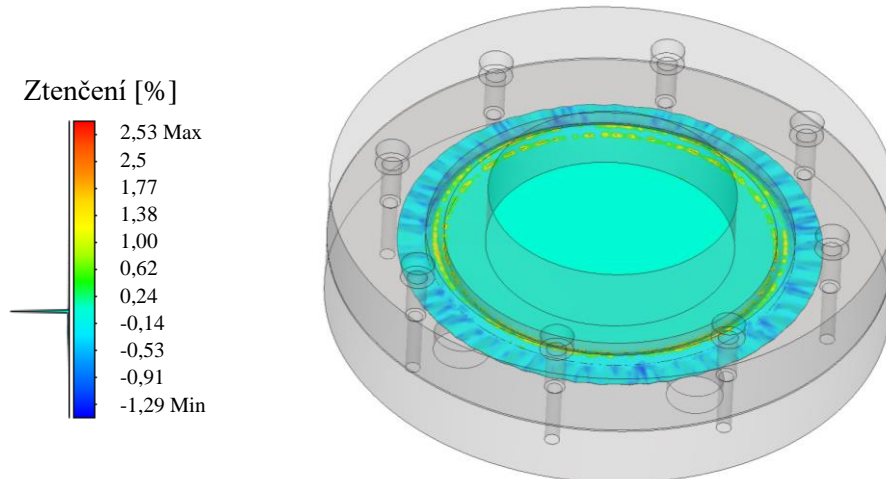
Obr. 56 Průběh síly při zalisování.

Jako prvním analyzovaným výsledkem bylo efektivní plastické přetvoření, které ukazuje místa a míru trvalé (plastické) deformace materiálu vzniklé po zalisování. Jak lze vidět na obr. 57 v průběhu zalisování dochází na okrajích plechu ke vzniku zvlnění, v jehož okolí se vyskytuje tyrkysově modrá barva odpovídající hodnotám plastického přetvoření okolo 0,03 až 0,04. Celkový rozsah přetvoření se pohybuje v rozmezí od 0 až po 0,09. Nejmenší hodnoty se nacházejí ve středové části vzorku (tmavě modrá barva), která během i po upnutí zůstává zcela neovlivněna. Naproti tomu největší plastické přetvoření je dle očekávání soustředěno v okolí kontaktu mezi brzdným žebrem a materiálem, tj. v oblasti největšího mechanického zatížení. Z výsledku je patrné, že použitý způsob upnutí vytváří lokální plastickou deformaci pouze v požadovaných oblastech, zatímco střed vzorku zůstává neměnný.



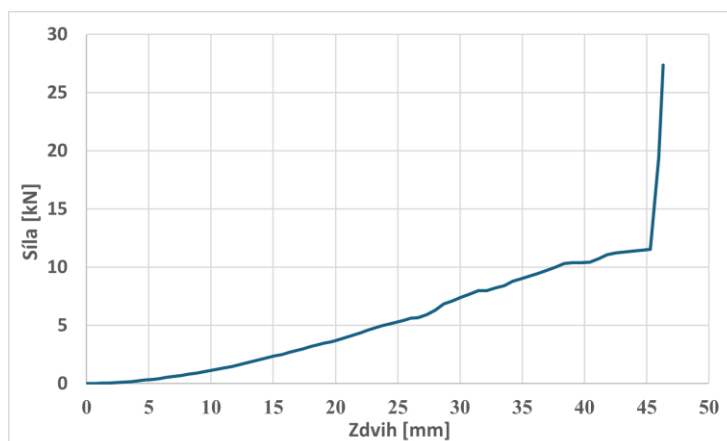
Obr. 57 Efektivní plastické přetvoření.

Dalším pozorovaným výstupem simulace byla míra ztenčení materiálu během upnutí vzhledem k jeho původní tloušťce. Výsledek umožňuje zjistit, zda a kde dochází ke ztenčení plechu, což je důležité z hlediska rizika porušení nebo nadměrné redukce tloušťky materiálu. Na obr. 58 je možné vidět barevnou mapu s rozsahem od -1,29 % do 2,53 %, přičemž největší dosažená redukce nabývá velmi nízké hodnoty. Výsledky ukazují, že k největšímu úbytku tloušťky dochází zejména v prostoru kontaktu mezi brzdným žebrem a plechem. Ve zbylém vzorku zůstává rozpětí prakticky neměnné. Z výsledku je zřejmé, že plechy o tloušťce 0,2 mm lze snadno upnout a při navrženém způsobu uchycení nedochází k jejich porušení. Zjištěný interval potvrzuje, že zvolený systém zalisování je k materiálu šetrný a nezpůsobuje jeho výrazné strukturální oslabení. Analýza změny tloušťky vzorku vyjádřena v mm se nachází v příloze 1.



Obr. 58 Ztenčení materiálu.

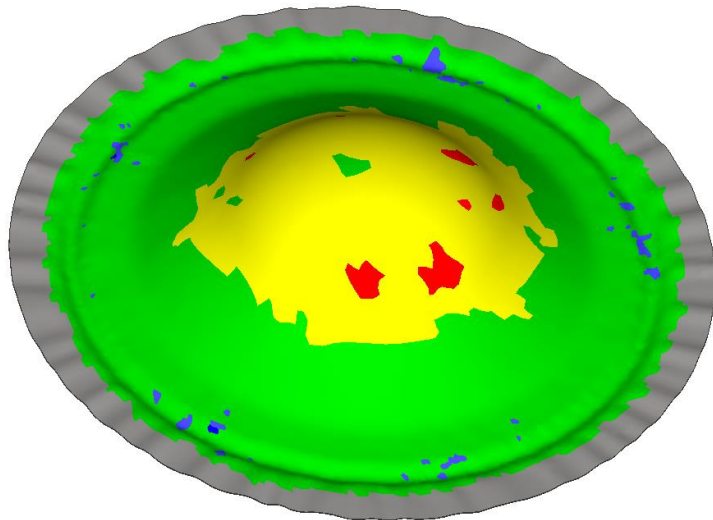
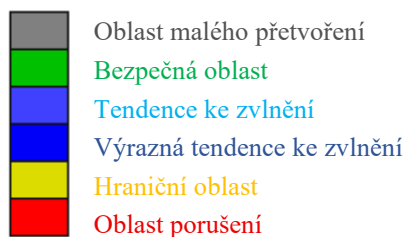
Po dokončení fáze zalisování následovala část simulace, která se zaměřuje na samotný proces tváření, tj. zatěžování materiálu pomocí tažníku. Během procesu dochází k tomu, že tažník tlačí na středovou část vzorku a tím nastane vtahování materiálu do prostoru tažnice, čímž vznikají přetvoření odpovídající skutečnému procesu tažení. Ověření fáze tváření je důležité proto, aby se zjistilo, zda se upnutý vzorek při tváření skutečně správně vtahuje do tažnice, a to zejména přes oblast brzdného žebra, jež má za úkol zpomalit (brzdit) tok materiálu. Dalším cílem je zjistit, zda na konci procesu dojde k chtěnému porušení materiálu (vznik trhliny). Jako první byl sledován průběh tažné síly v závislosti na zdvihu tažníku. Obr. 59 ukazuje průběh síly. Lze na něm pozorovat postupný a plynulý nárůst zatížení až do hodnoty přibližně 12 kN při zdvihu necelých 46 mm. V uvedeném bodě dochází k porušení vzorku, což se následně projeví prudkým a nereálným nárůstem síly. Vzniklý skok již neodpovídá reálnému průběhu síly, jelikož simulace pokračuje i po překročení toho, kdy na materiálu došlo k porušení (trhlina).



Obr. 59 Průběh síly při tažení.

Dalším získaným výstupem ve fázi tváření bylo vyhodnocení vzorku pomocí FLD. Ten slouží k vyhodnocení přetvoření v jednotlivých oblastech materiálu. Na obr. 60 je k vidění barevná analýza vzorku včetně vysvětlení pomocí legendy. Jak je možné vidět, zelená barva označuje oblasti, které se nacházejí v bezpečné zóně, kde nedochází k porušení. Červená barva označuje místa prvotního porušení materiálu, tedy body, v nichž došlo k překročení mezních hodnot tvařitelnosti. Poškozené oblasti se následně propojí do charakteristického tvaru srpovité trhliny. Žlutá barva odpovídá oblastem kritického přetvoření, které se blíží mezi tvařitelnosti. Podle očekávání se červená a žlutá barva objevují především ve středové části vzorku, zatímco barva zelená pokrývá téměř celý zbytek plechu.

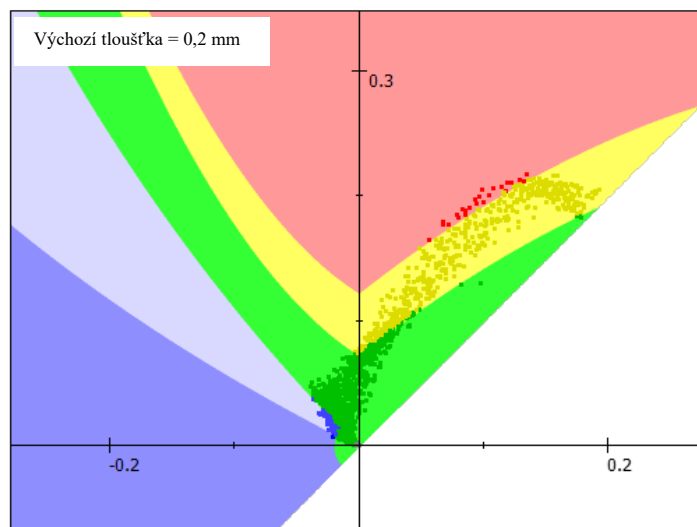
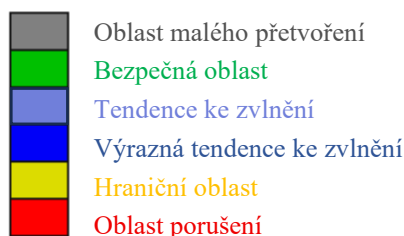
Diagram mezní tvařitelnosti



Obr. 60 Vyhodnocení přetvoření v jednotlivých oblastech.

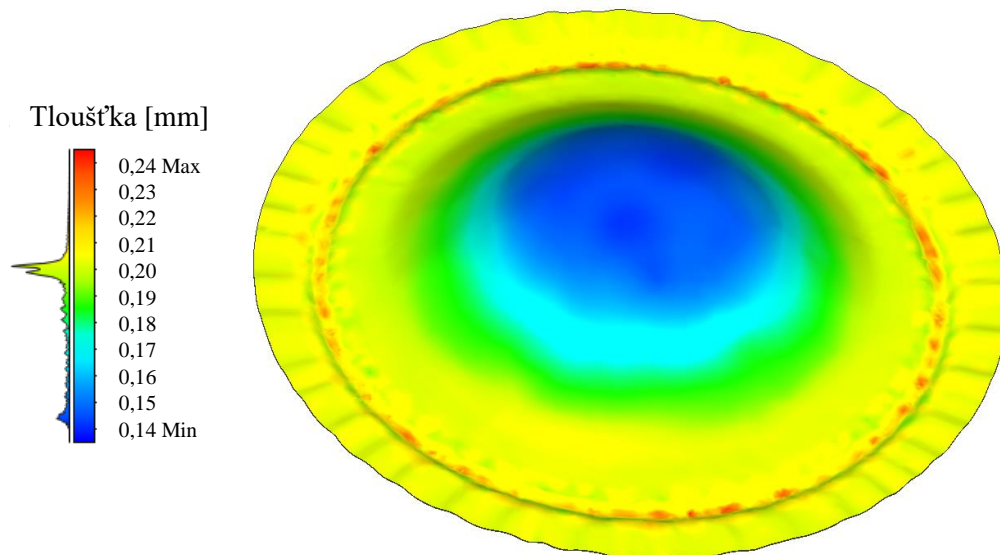
Na obr. 61 se nachází korespondující diagram mezní tvařitelnosti, který graficky znázorňuje rozložení napěťových stavů ve vzorku z obr. 60 ve vztahu k mezním křivkám tvařitelnosti, přičemž hlavní přetvoření byla hodnocena pro střední vrstvu plechu. Jak je možné z FLD vyčíst, značná část bodů spadá do zelené (bezpečné) oblasti. Zároveň se však některé body nacházejí ve žluté zóně, která představuje kritická místa, kde se materiál blíží k meznímu stavu porušení. Malá část bodů se rovněž nachází v modré zóně, ve které má materiál tendenci ke zvlnění. Část bodů se nachází i v červeném prostoru porušení, což odpovídá i přechodnému obr. 60, u něhož se červené oblasti rovněž vyskytují.

Diagram mezní tvařitelnosti



Obr. 61 Vyhodnocení přetvoření v jednotlivých oblastech.

Jedním z dalších výsledků je změna tloušťky materiálu v procesu tažení, jak je možné vidět na obr. 62. Z barevného rozsahu je patrné, že k největšímu úbytku tloušťky dochází v oblasti vyboulení vzorku, kde se hodnoty pohybují v rozmezí přibližně od 0,14 mm do 0,17 mm. Uvedený interval odpovídá předpokladu, že právě v této části vzorku dojde k největšímu přetvoření vedoucímu ke vzniku trhliny. Naopak v místě kontaktu s brzdým žebrem dochází k opačnému jevu, a to k pěchování materiálu. Zde se hodnoty navyšují až do 0,24 mm. Ve zbylých oblastech plechu se tloušťka téměř neliší od výchozí 0,2 mm. Výsledky odpovídají i obrázku v příloze 2, který potvrzuje, že ve středu vzorku nastává ztenčení až o cca 30,5 %, zatímco ve zbytku materiálu je ztenčení víceméně neměnné.



Obr. 62 Změna tloušťky vzorku při procesu tažení.

Z výsledků numerické simulace v prostředí ANSYS lze konstatovat, že konstrukce přípravku z hlediska pevnostní analýzy vyhovuje. Pro simulaci byla záměrně zvolena předdimenzovaná varianta s použitím korozivzdorné oceli o tloušťce 2 mm. I přesto výsledky ukázaly, že v žádné z důležitých částí přípravku, jako jsou sloupky, tažnice, přídržovač nebo brzdné žebro, nedochází při zatížení k překročení meze kluzu, tedy ani k žádné trvalé deformaci konstrukce. Z toho vyplývá, že v případě použití zvoleného plechu pro experiment DR 520 CA o tloušťce 0,2 mm (i příp. větších tlouštěk) by nemělo dojít k žádnému negativnímu ovlivnění přípravku, tj. porušení některé z jeho částí.

Rovněž simulace provedená v prostředí Simufact Forming poskytla kladné výsledky a potvrdila, že navržený přípravek by měl být funkční. Při fázi zalisování dochází k pevnému a rovnoměrnému upnutí vzorku v jeho okrajích, přičemž síla potřebná k jeho zalisování se pohybuje okolo 8,5 kN. Simulace zároveň potvrdila, že i tenké plechy o tloušťce 0,2 mm lze bez porušení zalisovat, a proto lze předpokládat, že ani vzorky s větší tloušťkou nebudou z hlediska fixace představovat problém. Dále proběhla navazující simulace samotného procesu tváření. Výsledky simulace, mezi něž patří např. ztenčení materiálu z původních 0,2 mm na 0,14 mm, spolu s výstupem z FLD, potvrzují, že se deformace následovaná porušením bude nacházet v očekávané středové oblasti vzorku. Obě simulace tedy potvrzují, že přípravek by měl být funkční a může být v navržené podobě vyroben.

3.4 Příprava experimentu

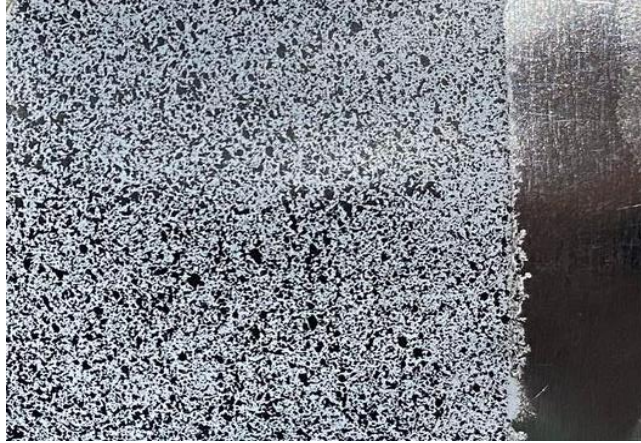
Před zahájením samotného měření je nezbytné připravit sadu vzorků, které budou použity během experimentu podle zvolené metody Nakajima. Plechové vzorky byly zhotoveny z materiálu DR 520 CA o tloušťce 0,2 mm, přičemž geometrie jednotlivých vzorků byla navržena tak, aby pokrývala různé napěťové stavy materiálu. Konkrétně tedy byly připraveny vzorky v podobě plechových pásek různých šířek: 40 mm, 50 mm, 60 mm, 70 mm, 90 mm a jedna sada vzorků ve tvaru kruhu o průměru 155 mm. Každá šířka pásku byla zastoupena třemi identickými kusy, včetně sady o průměru 155 mm. Uvedené sady vzorků umožňují stanovit hodnoty FLC v širokém spektru různých napěťových stavů.

Z orýsované tabule plechu byly vystříženy uvedené pásky za použití pákových nůžek, přičemž byl kladen důraz na rovnoměrný a přesný stříh, aby se minimalizovala deformace okraje vzorku. Stříhání jednotlivých vzorků probíhalo ve svislém směru válcování plechu (viz obr. 15 v kap. 2.1), jak doporučuje příslušná norma ČSN EN ISO 12004-2. Po nastříhání byly hrany všech vzorků pečlivě opracovány pomocí ručního pilníku. Tento krok byl proveden z důvodu odstranění veškerých ostrých hran nebo otřepů, jež by mohly negativně ovlivnit měření nebo poškodit (rýhy) funkční části přípravku během upínání a zatěžování. Dosažení hladkých a zaoblených hran taktéž napomáhá k rovnoměrnému průběhu deformace a zabraňuje vzniku koncentrací napětí. Před nanesením povrchové vrstvy na materiál byly okraje vzorků přelepeny pomocí papírové lepicí pásky, viz obr. 63. Přelepení bylo provedeno z důvodu zamezení ulpívání barvy při upnutí plechu do přípravku mezi přídržovačem a tažnicí, a především na brzděném žeburu, což by mohlo vést k nežádoucímu účinku mazání a tím k lepšímu vtahování materiálu pod tažník v průběhu měření.



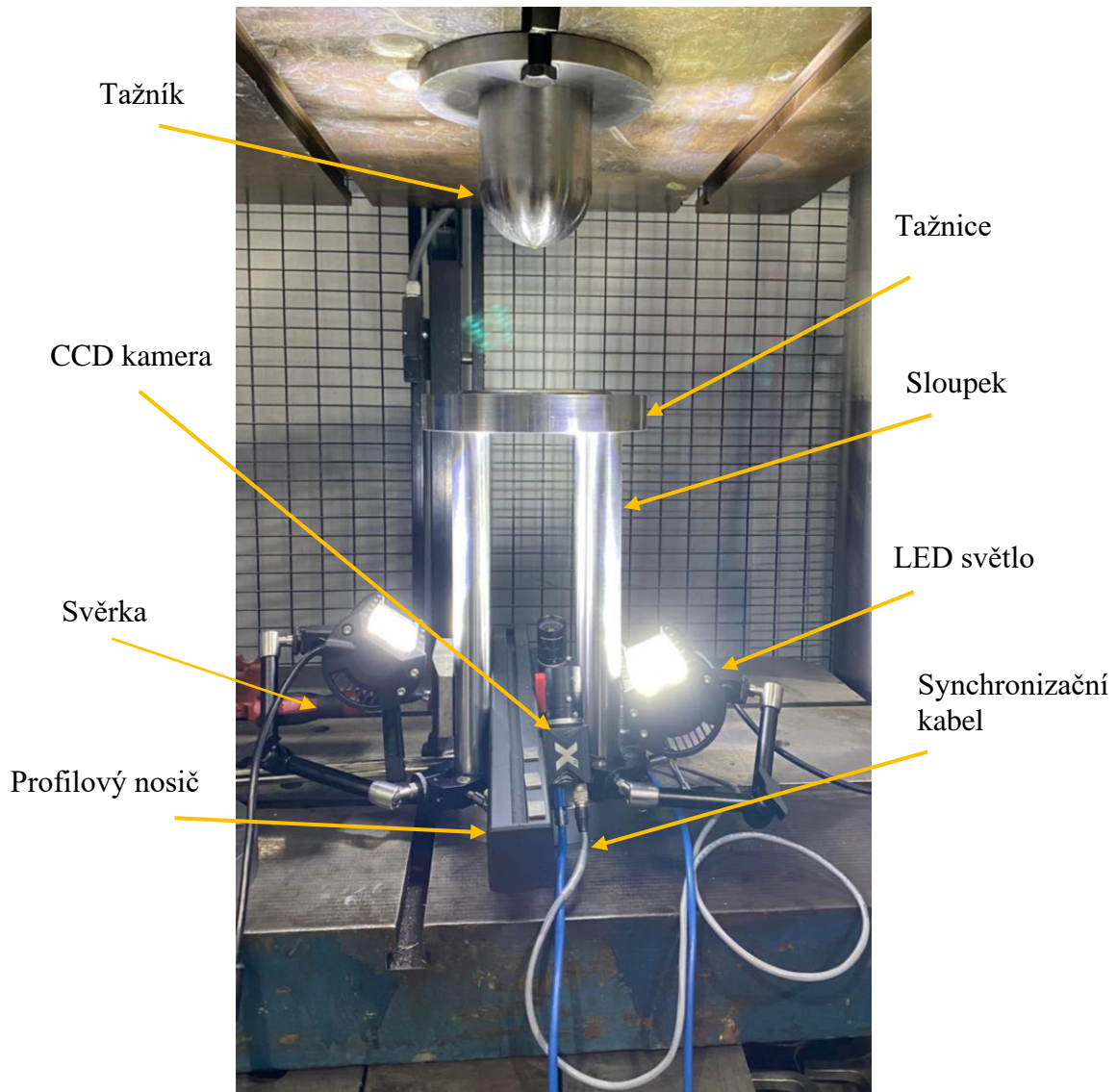
Obr. 63 Oblepení vzorku páskou a nastříkání bílou podkladovou barvou.

Po olepení okrajů se na povrch materiálu aplikoval nepravidelný kontrastní vzor pro vyhodnocení deformace pomocí metody DIC. Jako první byla na povrch nanesena souvislá vrstva bílé podkladové barvy (obr. 63). Po zaschnutí bílé základní vrstvy se na povrch nanesl nepravidelný černý vzor, který byl vytvořen jemným rozstříkem barvy. Vytvořená struktura musí být dostatečně kontrastní a nahodilá, aby bylo možné pozorovat posuny jednotlivých bodů na povrchu vzorku v průběhu zatěžování. Pro nástřík barvy na materiál byly využity spreje dostupné na dílnách FSI, konkrétně univerzální akrylátové spreje. Během aplikace barvy bylo důležité udržet stálou vzdálenost spreje od povrchu vzorku a zajistit rovnoměrné překrytí celé plochy. Detail vytvořeného stochastického vzoru lze vidět na obr. 64.



Obr. 64 Detail vytvořeného nahodilého vzoru po odlepení pásky.

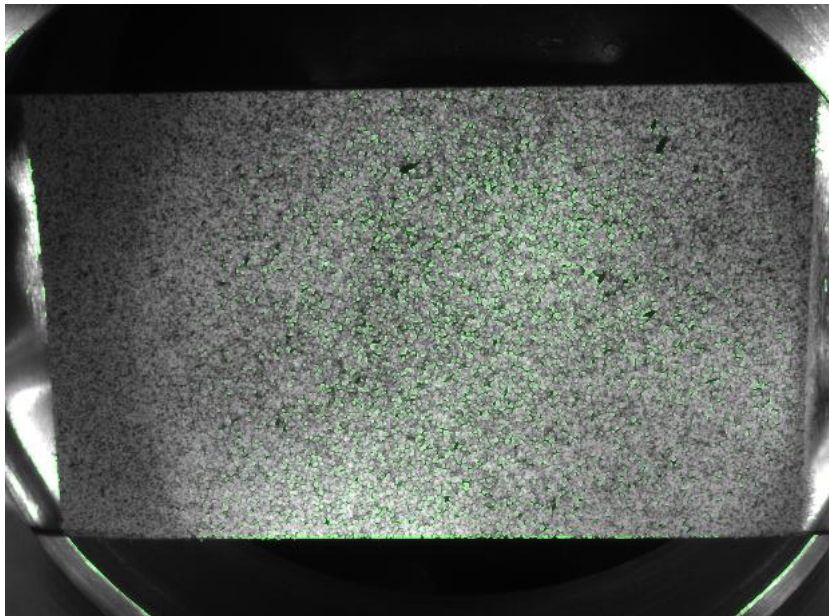
Po vytvoření vzoru na vzorcích se přešlo k samotné přípravě a ustanovení přípravku společně s měřicí technikou. Přípravek se upnul do lisu CBJ 500–6, jak bylo podrobněji popsáno v kapitole 3.1, a následně bylo instalováno měřicí zařízení dodané firmou X-Sight. Kompletní DIC sestava, viz obr. 65, se skládala ze dvou průmyslových CCD kamer s rozlišením 5 Mpx, které byly upevněny na profilovém nosiči pomocí stavitelných držáků.



Obr. 65 Přípravek a měřicí zařízení.

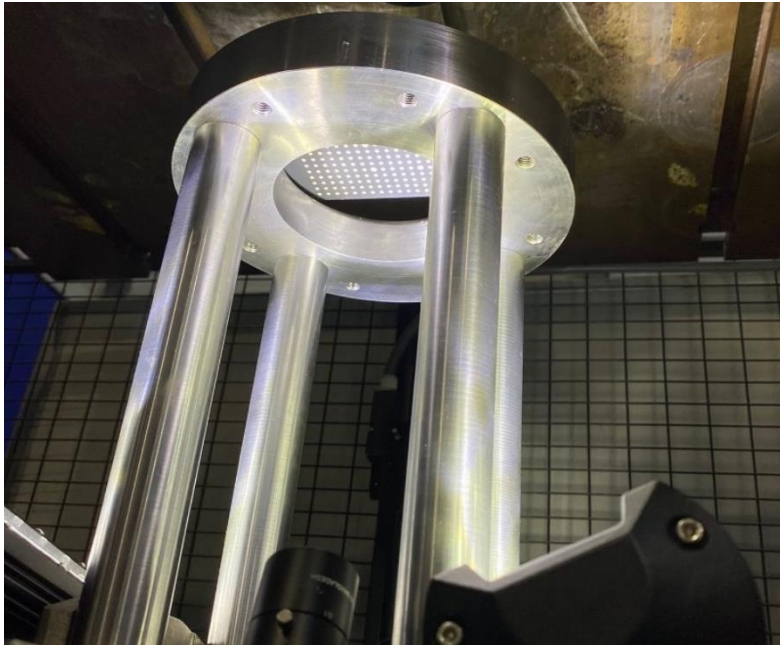
Celý profil byl pevně přichycen ke sloupkům přípravku pomocí svěrky, aby se předešlo jakémukoli pohybu během měření a byla tak zajištěna stabilní poloha kamer po celou dobu snímání. Kamery byly natočeny pod specifickým úhlem, čímž se docílilo stereoskopického uspořádání. První kamera vyhledá bod na povrchu vzorku a druhá hledá tentýž bod z jiného úhlu, tzv. referenci. Aby obě kamery snímaly ve stejný okamžik, je nezbytná jejich synchronizace, kterou zajišťuje šedý kabel. Synchronizace probíhá v režimu, kdy jedna kamera funguje jako tzv. „master“ a druhá jako „secondary“, tj. hlavní kamera (master) dává povel druhé (secondary), aby ve stejný okamžik došlo k pořízení snímku. Měřicí sestavu dále tvoří dvě LED světla pro zajištění rovnoměrného osvětlení a notebook se softwarem Alpha. Fotodokumentace celého pracoviště je uvedena v příloze 3.

Před samotnou kalibrací je nutné precizně zaostřit obě kamery tak, aby měly co nejostřejší obraz v oblasti budoucího měření. Ostření se provádělo ručně pomocí zaostřovacích prstenců na objektivěch kamer, přičemž současně probíhala kontrola přímo v programu Alpha. K usnadnění procesu sloužil automatický nástroj pro doostření, který zobrazuje pokrytí zelenou barvou (obr. 66). Čím větší plocha pokrytá zelenou barvou, tím lepší zaostření. Obě kamery musely být zaostřeny na stejnou hloubku ostrosti, tedy přesně tam, kde se později bude nacházet vzorek nebo kalibrační deska.



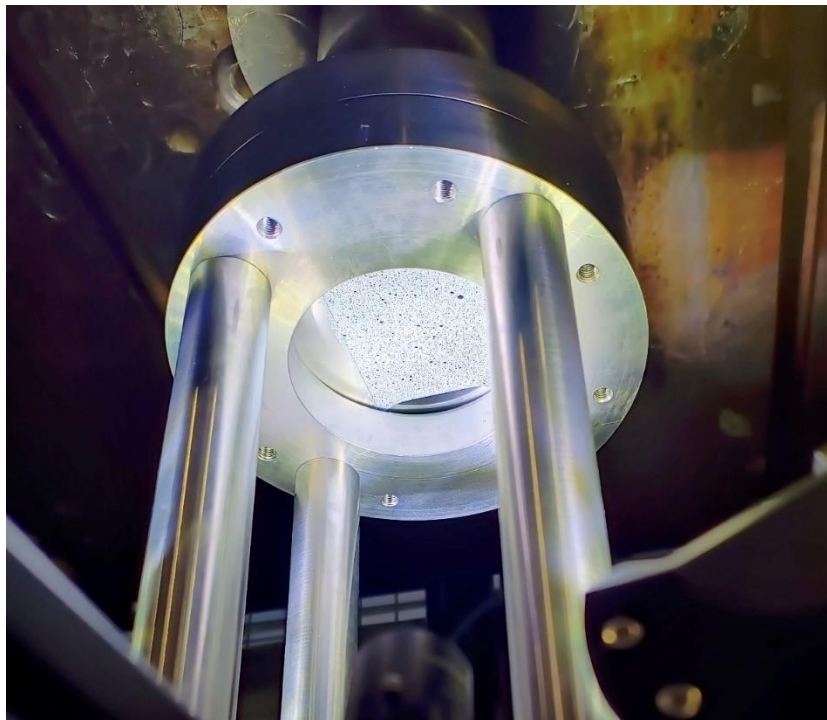
Obr. 66 Doostření obrazu.

Po zaostření měřicí techniky následovala kalibrace zobrazovacího systému DIC, jež probíhala na základě principu popsaného v kapitole 2.2.2. Princip spočívá v pořízení série snímků kalibrační desky umístěné pod různými úhly, čímž dochází k cílenému zkreslení obrazu. Následným porovnáním těchto snímků s ideální výchozí polohou desky systém dopočítá potřebné parametry pro korekci perspektivy a přesné určení prostorových souřadnic bodů na vzorku. Průběh kalibrace s výchozí polohou desky na přípravku je k vidění na obr. 67. Jakmile byla kalibrace dokončena přistoupilo se k přípravě na samotný test. Vzorek se umístil na brzdné žebro přípravku a následně se na něj umístil přídržovač, jenž se v první fázi pouze lehce přitáhl pomocí čtyř šroubů. Ve druhé fázi se mezi přídržovač a horní desku přípravku vložily dva podpůrné elementy, které sloužily k zalisování okraje vzorku.



Obr. 67 Průběh kalibrace.

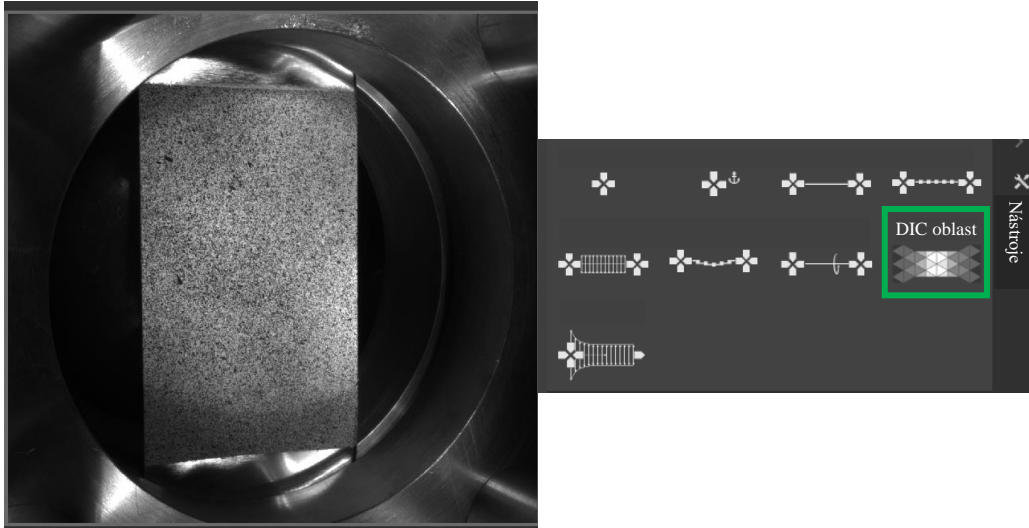
Postupným tlakem došlo k zalisování plechu přes brzdné žebro mezi přídržovač a tažnici. Po fázi upnutí se podpůrné elementy vyjmuly a přídržovač se následně pevně přišrouboval do tažnice pomocí zbylých čtyř šroubů. Všechny šrouby se rovnoměrně dotáhly šestihranným klíčem, čímž se dosáhlo stabilního a rovnoměrného upnutí vzorku. Finální upnutí vzorku v přípravku lze vidět na obr. 68. Na polokulovou část tažníku a horní oblast plechu se nanoslo mazivo typu PROLONG, aby se omezilo tření mezi tažníkem a materiálem. Celý proces začínal současným spuštěním měření a pohybem tažníku směrem dolů. Tažník se postupně vtlačoval do vzorku až do okamžiku vzniku trhliny, kdy se proces zastavil a vzorek se vyjmul z přípravku. Postup se provedl u všech vzorků stejně a následovalo jejich vyhodnocení.



Obr. 68 Upnutý vzorek.

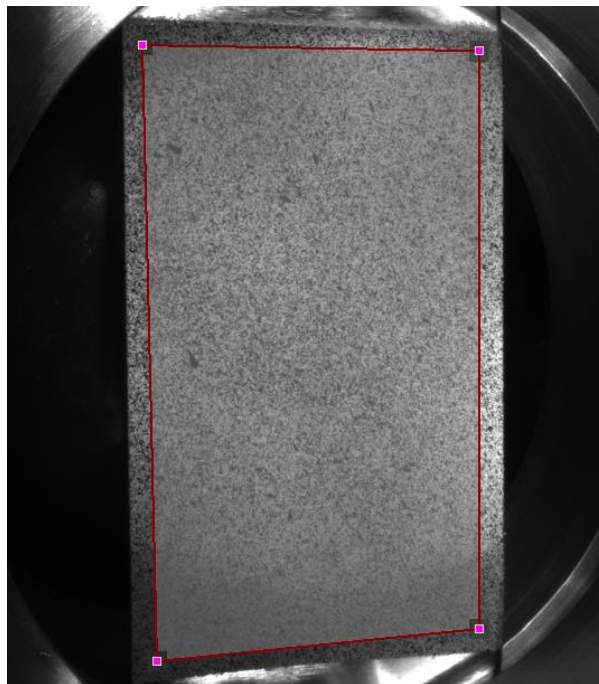
3.5 Nastavení základních parametrů

Po provedení měření všech vzorků se přistoupilo k jejich samotnému vyhodnocení, které probíhalo především v softwaru Alpha, jenž poskytla firma X-Sight. Před samotnou analýzou se muselo provést nanesení deformační sítě a nastavit základní výpočetní parametry. Síť definuje pozorovanou oblast, v níž bude probíhat digitální korelace obrazu neboli sledování změn v textuře vzorku způsobených deformací. Na obr. 69 je v pravé části možné vidět zeleně označenou funkci DIC oblast, která slouží pro výběr počítané lokality.



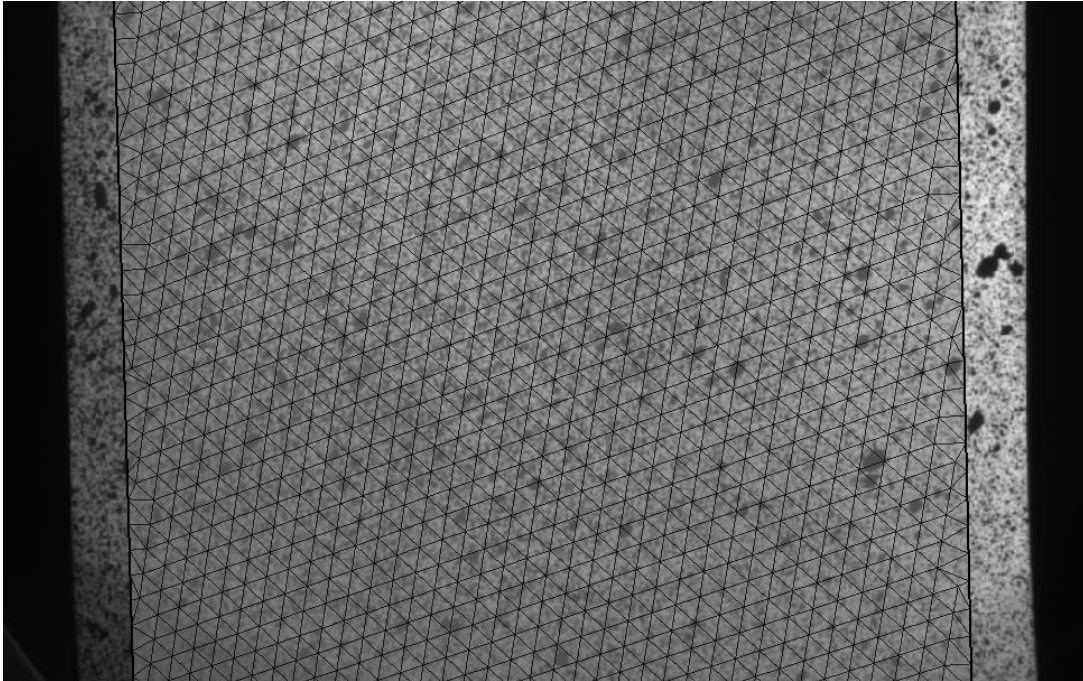
Obr. 69 Vzorek a výběr nástroje DIC oblast.

Výběrem nástroje DIC oblast se na snímek vzorku umístí obdélníkové ohraničení, které definuje rozsah, ve kterém proběhne výpočet deformace. Na obr. 70 je možné vidět, že tvar a velikost obdélníku lze upravit ručně pomocí úchopových bodů ve vrcholech tak, aby přesně odpovídal požadované lokalitě. Vymezený prostor se následně využívá pro sledování přetvoření v rámci DIC. Dále bylo v softwaru potřeba nastavit parametry výpočetní sítě, které určují např. přesnost a hustotu prvků sítě.



Obr. 70 Definice oblasti pomocí úchopových bodů ve vrcholech.

V další části je nutné nastavit počet výpočetních prvků. V tomto případě byla hodnota nastavena na 1 500, čímž se definovala hustota sítě pro výpočet deformace. Na základě počtu prvků sítě se automaticky dopočítala tzv. kroková vzdálenost mezi jednotlivými body sítě. Dále se nastavoval typ výpočetní sítě, přičemž se zvolila síť z rovnostranných trojúhelníků (obr. 71), které umožňují rovnoměrné a přesné pokrytí analyzované plochy. U rovnostranných trojúhelníků se zvolila jejich výška a šířka na hodnotu 37 pixelů, aby bylo dosaženo optimální přesnosti a výpočetního času.



Obr. 71 Zvolená síť z rovnostranných trojúhelníků.

Při vyhodnocování deformace se v softwarovém prostředí standardně volí konkrétní požadované veličiny. Pro účely stanovení FLC byly zvoleny hodnoty hlavního a vedlejšího poměrného přetvoření, které lze dále zpracovávat např. ve formě minimálních, průměrných a maximálních hodnot. Je důležité zmínit, že program Alpha neumožňuje zvolit výstup v podobě skutečného logaritmického přetvoření, ale pracuje pouze s poměrným, což představuje určité omezení. Na základě toho bylo nutné provést přepočítání z dostupného poměrného na logaritmické přetvoření pomocí vztahu (2.2) a (2.3). Zvolený postup lze brát jako jisté zjednodušení, jelikož v oblasti blízké porušení materiálu již neplatí lineární závislost deformace. Nicméně pro orientační vyhodnocení a konstrukci FLC je zvolený přístup akceptovatelný. Popsané nastavení se aplikovalo shodným způsobem na všechny analyzované vzorky.

3.6 Vyhodnocení měření

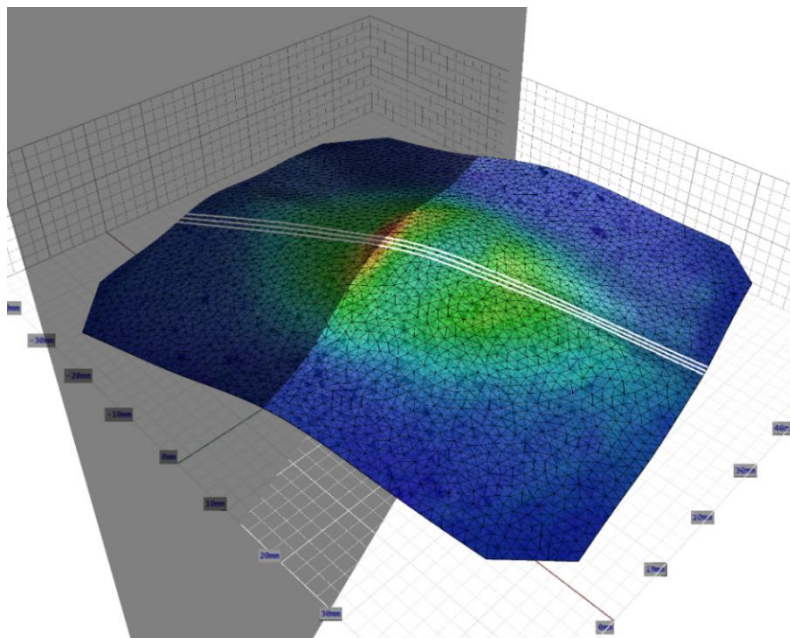
Kapitola je zaměřena na podrobný popis vyhodnocení experimentálně získaných dat, přičemž hlavní pozornost bude věnována především jednomu vybranému reprezentativnímu vzorku (70a) o šířce 70 mm, na němž bude ukázán kompletní postup zpracování a analýzy dat. Důvodem výběru pouze jednoho vzorku je rozsah diplomové práce, neboť kompletní analýza všech testovaných sad by byla obsahově příliš rozsáhlá. Každá sada vzorků, jejichž příprava je popsána výše v kapitole 3.4, obsahovala tři testované a vyhodnocované exempláře, které zaručí ověření opakovatelnosti a spolehlivosti měření. Samotné vyhodnocení probíhalo ve dvou fázích, a to ve stavu bezprostředně po vzniku trhliny a ve fázi těsně před porušením materiálu.

První fáze byla realizována v softwaru Sigma a zaměřovala se na zmíněný okamžik, kdy již dochází k prvotnímu vzniku trhliny. Zde byla identifikována oblast prvotního selhání materiálu, ze které se určily hodnoty hlavního a vedlejšího poměrného přetvoření. Druhá etapa vyhodnocení byla provedena v programu Alpha a zaměřovala se na zmíněný stav těsně před porušením vzorku, tedy okamžik, kdy je materiál maximálně zatížen, ale k iniciaci trhliny zatím nedochází (lokální zaškrcování). I zde byly naměřeny hodnoty hlavního a vedlejšího poměrného přetvoření, a to pro jednu identickou lokální oblast. Jak již bylo výše zmíněno, ani jeden ze softwarů neumožňuje přímé vyhodnocení hodnot logaritmického přetvoření, a proto bylo nutné hodnoty vždy přepočítat.

U obou použitých softwarů, tj. prostředí Sigma a Alpha, bylo před samotným vyhodnocením dat provedeno nastavení základních parametrů a aplikace deformační sítě, jak již bylo detailně popsáno v kapitole 3.5. Veškerá vyhodnocená data získaná ze všech vzorků byla následně zpracována do přehledných tabulek. Získané hodnoty hlavního a vedlejšího poměrného i logaritmického přetvoření se využily k vynesení bodů do diagramu a ke konstrukci výsledné křivky mezní tvařitelnosti.

3.6.1 Vyhodnocení fáze prvotní iniciace trhliny

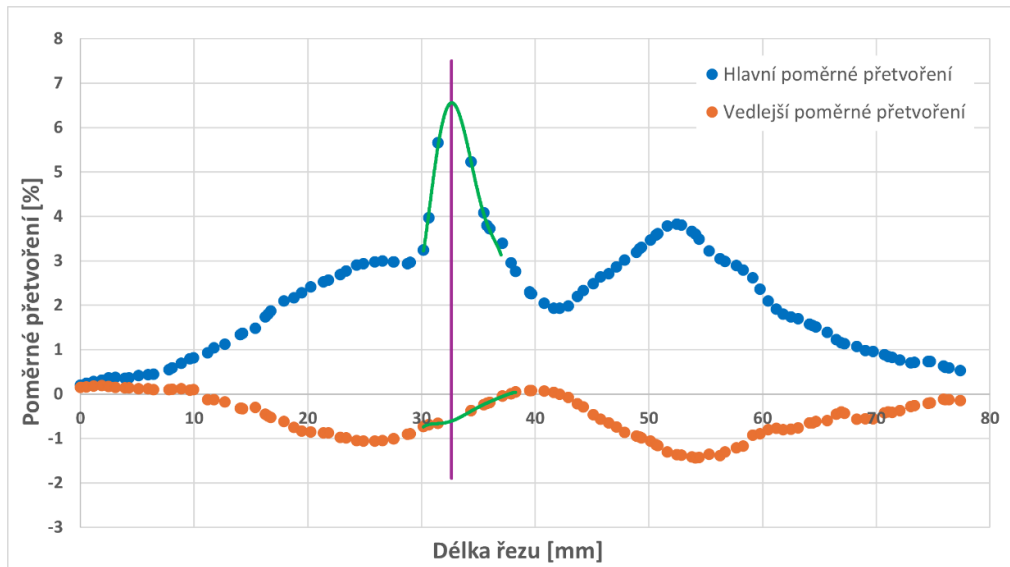
Jak již bylo zmíněno, analýza proběhla v softwaru Sigma, který byl poskytnut firmou X-Sight. Základní nastavení sítě a parametrů bylo provedeno dle postupu v kapitole 3.5. Program Sigma byl použit z důvodu, že nabízí možnost dodatečného vyhodnocení trhliny pomocí proložení vybraného místa řezu, což umožňuje přesné určení lokálních extrémů přetvoření. Pro ukázkové vyhodnocení se zvolil výše uvedený reprezentativní vzorek (70a) o šířce 70 mm, jehož 3D povrch v těsném okamžiku po iniciaci trhliny je zachycen na obr. 72. V místě porušení materiálu (červeně zbarvená oblast) byla aplikována rovina měření, jež interpretuje směr vzniklé trhliny. Kolmo na rovinu byla vedena středová čára představující řez, zatímco krajní čáry slouží jako vizuální pomůcka. Pomocí středového řezu se následně získaly hodnoty hlavního a vedlejšího poměrného přetvoření, které slouží pro přepočet na logaritmické.



Obr. 72 Rovina měření a středová linie představující řez.

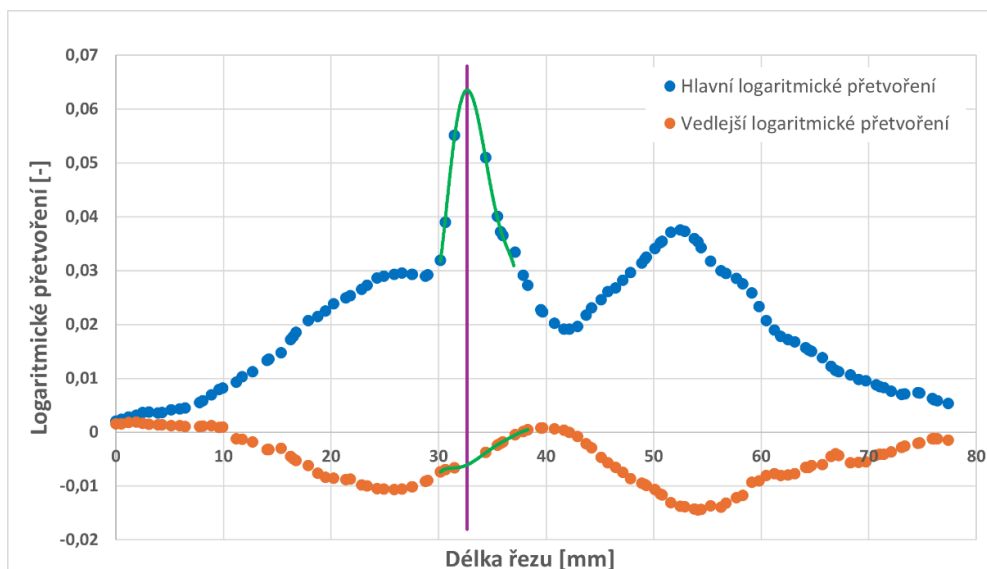
Na výše vytvořenou rovinu s řezem navazuje obr. 73, který znázorňuje graf závislosti délky řezu na hodnotách poměrného přetvoření. Oranžová linie bodů představuje průběh vedlejšího přetvoření, zatímco modrá linie bodů zobrazuje hodnoty hlavního přetvoření. Střed trhliny je v grafu vyznačen fialovou svislou čarou.

Vyhodnocení se provedlo v souladu s normou ČSN EN ISO 12004-2, jež doporučuje regresní proložení bodů v oblasti porušení. Naměřené body v těsné blízkosti trhliny byly proloženy polynomickou křivkou, jež je v grafu znázorněna zeleně. Pomocí průniku křivky proložení a fialové úsečky se pro linii hlavního a vedlejšího přetvoření získaly hodnoty lokálního maxima, resp. minima, které se následně použily k vynesení bodů a konstrukci FLC.



Obr. 73 Závislost délky řezu a poměrného přetvoření.

Následně se hodnoty poměrného přetvoření (všechny body v grafu) přepočítaly na skutečné logaritmické podle vztahů (2.2) a (2.3). Takto přepočtené hodnoty se použily pro sestavení analogického grafu závislosti délky řezu na logaritmickém přetvoření, viz obr. 74. Fialová úsečka opět vyznačuje střed vzniklé trhliny, přičemž body v její blízkosti se proložily polynomickou funkcí, znázorněnou zelenou křivkou. Průnik opět umožnil přesné určení lokálních extrémních hodnot.



Obr. 74 Závislost délky řezu a logaritmického přetvoření.

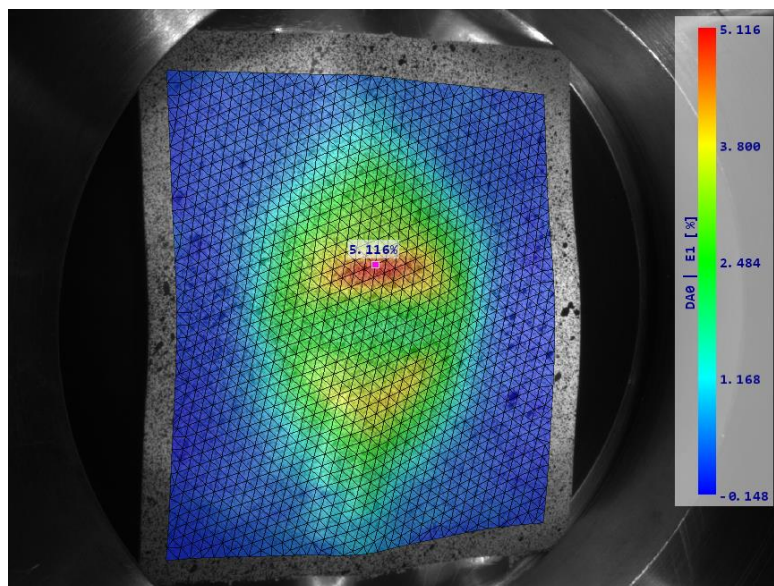
Tímto způsobem, tj. odečtením lokálního maxima, resp. minima, z grafů, se získaly pro všechny vzorky hodnoty hlavního a vedlejšího poměrného i logaritmického přetvoření. Všechny takto získané hodnoty jsou přehledně uvedeny v tab. 8. Hodnoty přetvoření se následně použily pro vynesení bodů a sestavení křivky mezní tvařitelnosti, jak bude posléze provedeno v další části práce.

Tab. 8 Hodnoty získané z lokálních extrémů přetvoření bezprostředně po vzniku trhliny.

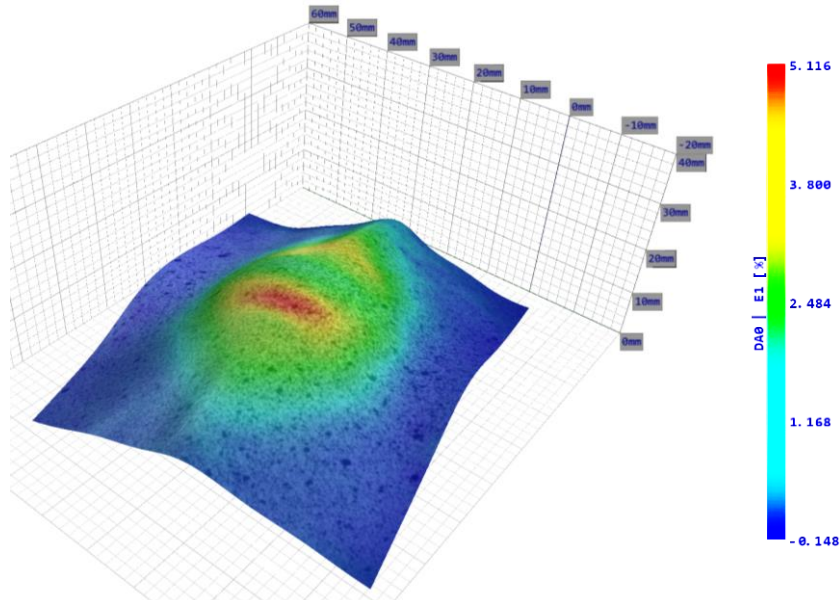
Č. vzorku	ϵ_1	ϵ_2	φ_1	φ_2
40a	8,391	-0,845	0,0806	-0,0085
40b	8,386	-0,836	0,0805	-0,0084
40c	8,379	-0,857	0,0805	-0,0086
50a	5,303	-0,167	0,0517	-0,0017
50b	5,294	-0,147	0,0516	-0,0015
50c	5,311	-0,155	0,0517	-0,0016
60a	8,309	-0,841	0,0798	-0,0084
60b	8,292	-0,828	0,0797	-0,0083
60c	8,301	-0,835	0,0797	-0,0084
70a	6,584	-0,608	0,0638	-0,0061
70b	6,558	-0,589	0,0635	-0,0059
70c	6,602	-0,614	0,0639	-0,0062
90a	5,305	-0,407	0,0517	-0,0041
90b	5,320	-0,417	0,0518	-0,0042
90c	5,286	-0,394	0,0515	-0,0039
155a	21,308	7,188	0,1932	0,0694
155b	21,277	7,215	0,1929	0,0697
155c	21,322	7,235	0,1933	0,0699

3.6.2 Vyhodnocení fáze těsně před vznikem trhliny

Ve druhé části byl opět zpracován reprezentativní vzorek (70a) o šířce 70 mm, tentokrát ovšem v okamžiku těsně před vznikem trhliny. Pro vyhodnocení poměrného přetvoření byl vždy vybrán jeden snímek, který sloužil jako referenční maximum, neboť v následujícím již docházelo k lokálnímu porušení materiálu. Analýza proběhla v softwaru Alpha, kde byla využita definovaná nastavení výpočetní síť a parametrů dle kapitoly 3.5. Na obr. 75 je možné vidět 2D povrch vzorku s barevnou mapou hlavního poměrného přetvoření, na kterém bylo určeno lokální maximum ϵ_1 pomocí růžového čtverečku ležícího na budoucí trhlíně. Hodnota ϵ_1 na snímku dosahuje hodnoty 5,116 %, což odpovídá i globálnímu maximum, a nachází se v červené oblasti, přibližně 4 mm od středu. Ve stejném místě se v návaznosti na to určila odpovídající hodnota ϵ_2 , aby bylo možné určit bod pro sestrojení křivky mezní tvařitelnosti.

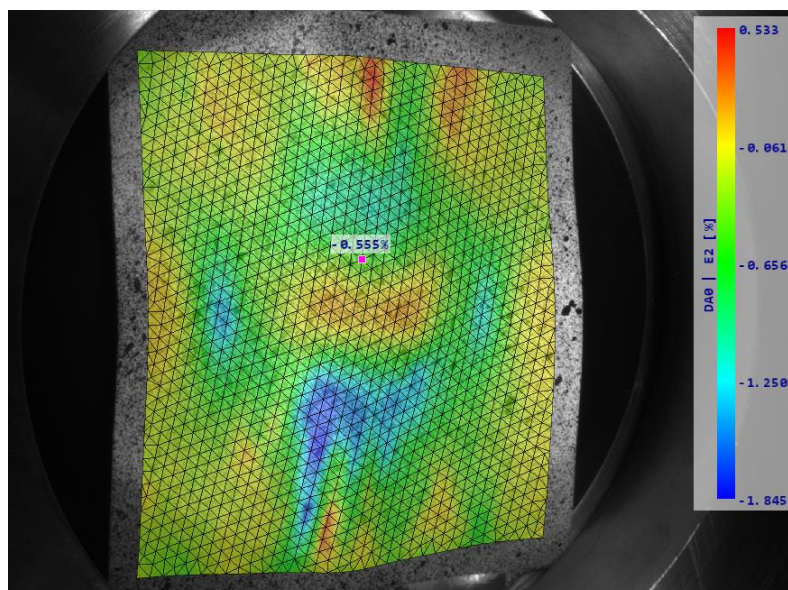

 Obr. 75 Lokální maximum ϵ_1 vzorku 70a.

Díky tomu, že se při měření využila metoda stereoskopie, je kromě barevné mapy přetvoření možné získat také prostorovou 3D rekonstrukci zakřivení povrchu vzorku, viz obr. 76. Pro lepší vizuální pochopení zakřivení povrchu byl použit nástroj možného zvětšení deformace (dvakrát škálováno). Červená oblast opět odpovídá místu, kde v následujícím snímku dochází k porušení materiálu, a nachází se zde také lokální maximum hlavního poměrného přetvoření s hodnotou 5,116 %.



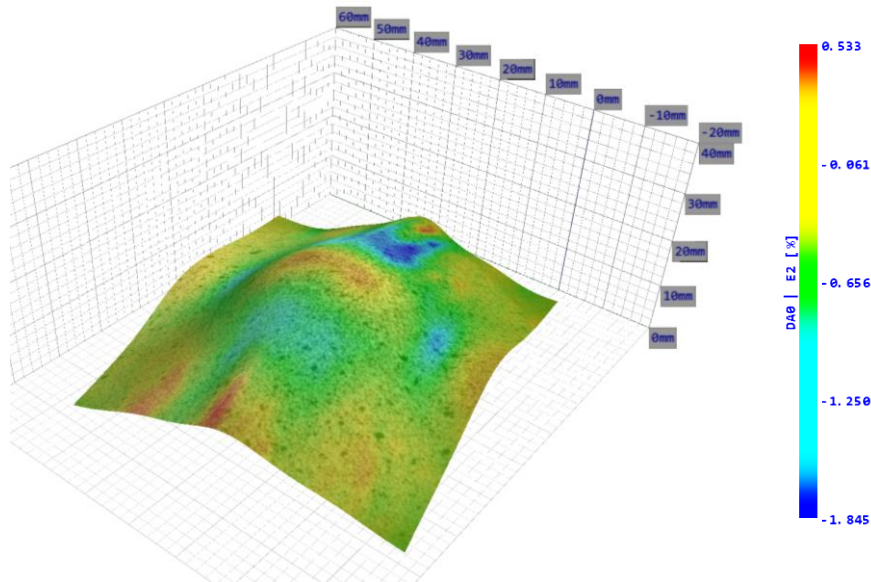
Obr. 76 Rozložení ϵ_1 na zakřiveném povrchu vzorku 70a.

Na obr. 77 je zachycena vizualizace 2D povrchu vzorku s barevnou mapou vedlejšího poměrného přetvoření vyhodnocené opět v softwaru Alpha těsně před vznikem trhliny. Pro zajištění srovnatelnosti výsledků bylo použito stejné nastavení výpočetní sítě jako u vyhodnocení ϵ_1 a rovněž stejný výběrový bod (růžový čtverec) v oblasti budoucí trhliny. Hodnota lokálního maxima, resp. minima ϵ_2 , v tomto místě dosahuje -0,555 %. U ϵ_2 není vhodné zkoumat absolutní globální extrém, protože nejnižší hodnota -1,845 % se nachází mimo budoucí oblast trhliny, konkrétně v modře zbarvené zóně. Na rozdíl od ϵ_1 , kde maximum dobře odpovídá místu porušení, je tedy u vedlejšího poměrného přetvoření potřeba vždy cíleně vyhodnotit konkrétní lokalitu, tedy oblast budoucí trhliny.



Obr. 77 Lokální maximum ϵ_2 vzorku 70a.

Na obr. 78 je možné vidět 3D povrch vzorku (70a) se znázorněním rozložení ε_2 . Opět díky využití metody stereoskopie se mohlo zobrazit zakřivení povrchu vzorku, které je také dvakrát škálováno pro jeho lepší pochopení. Ze znázornění je patrné, že globální minimum vedlejšího poměrného přetvoření se nachází v okrajové modře zbarvené oblasti, která neodpovídá budoucímu vzniku trhliny. Proto se provedlo vyhodnocení lokálního extrému přímo v lokalitě, kde ke vzniku porušení dojde, tj. v okolí středu vzorku.



Obr. 78 Rozložení ε_2 na zakřiveném povrchu vzorku 70a.

Tímto způsobem se vyhodnotily všechny vzorky, a to vždy nejprve určením lokálního maxima ε_1 a následně stanovením odpovídajícího lokálního extrému ε_2 ve stejném bodě v oblasti budoucí trhliny. Zjištěné hodnoty ε_1 a ε_2 se následně přepočítaly podle vztahů (2.2) a (2.3) na logaritmické přetvoření φ_1 a φ_2 . Všechny takto získané hodnoty jsou přehledně uvedeny v tab. 9. Přetvoření byla použita pro vynesení bodů a konstrukci křivky mezní tvařitelnosti.

Tab. 9 Hodnoty poměrného a logaritmického přetvoření těsně před trhlinou.

Č. vzorku	ε_1	ε_2	φ_1	φ_2
40a	6,569	-0,820	0,0636	-0,0082
40b	6,586	-0,815	0,0638	-0,0082
40c	6,519	-0,829	0,0632	-0,0083
50a	5,219	-0,497	0,0509	-0,0050
50b	5,158	-0,513	0,0503	-0,0051
50c	5,285	-0,479	0,0515	-0,0048
60a	5,068	-0,461	0,0494	-0,0046
60b	4,978	-0,475	0,0486	-0,0048
60c	5,181	-0,457	0,0505	-0,0046
70a	5,116	-0,555	0,0499	-0,0056
70b	5,209	-0,539	0,0508	-0,0054
70c	5,092	-0,561	0,0497	-0,0056
90a	4,840	-0,207	0,0473	-0,0021
90b	4,901	-0,218	0,0478	-0,0022
90c	4,779	-0,205	0,0467	-0,0021
155a	14,764	8,138	0,1377	0,0782
155b	14,821	8,255	0,1382	0,0793
155c	14,747	8,201	0,1376	0,0788

3.7 Konstrukce křivky mezní tvařitelnosti

Sestrojení křivek mezní tvařitelnosti (FLC) proběhlo na základě výsledků vyhodnocených ve dvou fázích, a to bezprostředně po porušení vzorku a těsně před vznikem trhliny. Pro obě zmíněné fáze se získaly hodnoty hlavního a vedlejšího přetvoření, a to jak poměrného (ϵ_1 a ϵ_2), tak i logaritmického (φ_1 a φ_2). Všechny hodnoty použité pro konstrukci FLC jsou uvedeny výše v tab. 8 a 9. Z experimentálně získaných hodnot se následně vynesly jednotlivé body do grafu a pomocí jejich proložení se stanovila FLC pro obě fáze deformace.

Ještě před samotným začátkem konstrukce FLC byl teoretickou cestou pomocí příslušného vztahu vypočítán referenční bod mezního přetvoření materiálu známý jako FLC_0 . Bod odpovídá souřadnici hlavního poměrného přetvoření při $\epsilon_2 = 0$, tedy stavu jednoosého tahu. Pro jeho výpočet bylo nutné znát mechanické vlastnosti zkoušeného materiálu, zejména pak exponent zpevnění n . Potřebné vstupní hodnoty do příslušného vztahu se převzaly z tab. 5, uvedené v kapitole 3.1, přičemž pro výpočet se použily pouze průměrné hodnoty. Teoreticky stanovený bod FLC_0 slouží jako reference, pomocí které lze přibližně ověřit, zda se experimentálně získané hodnoty přetvoření vyhodnotily správně a sestrojení FLC tedy proběhlo korektně.

Obecně (např. na základě [45]) lze teoreticky určit pomocí výpočtu zmíněný bod FLC_0 pro poměrné přetvoření ϵ_1 . Přestože uvedený zdroj nabízí několik možných výpočetních přístupů, využil se vztah dle Keelera a Braziera, jehož cílem je validace správnosti experimentálního vyhodnocení. Výpočet FLC_0 je použit pouze jako podpůrný krok, neboť hlavním cílem práce je experimentální stanovení FLC.

Výpočet FLC_{10} pro ϵ_1 podle Keelera a Braziera [45]:

$$\begin{aligned} FLC_{10} &= \left[(23,3 + 14,13 \cdot s) \cdot \frac{n}{0,21} \right] \\ &= \left[(23,13 + 14,13 \cdot 0,2) \cdot \frac{0,037}{0,21} \right] = 4,603 \%, \end{aligned} \quad (3.1)$$

kde: FLC_{10} – mezní bod poměrného přetvoření materiálu [%],

n – exponent zpevnění [-]; $n = 0,037$ dosazeno z tab. 5,

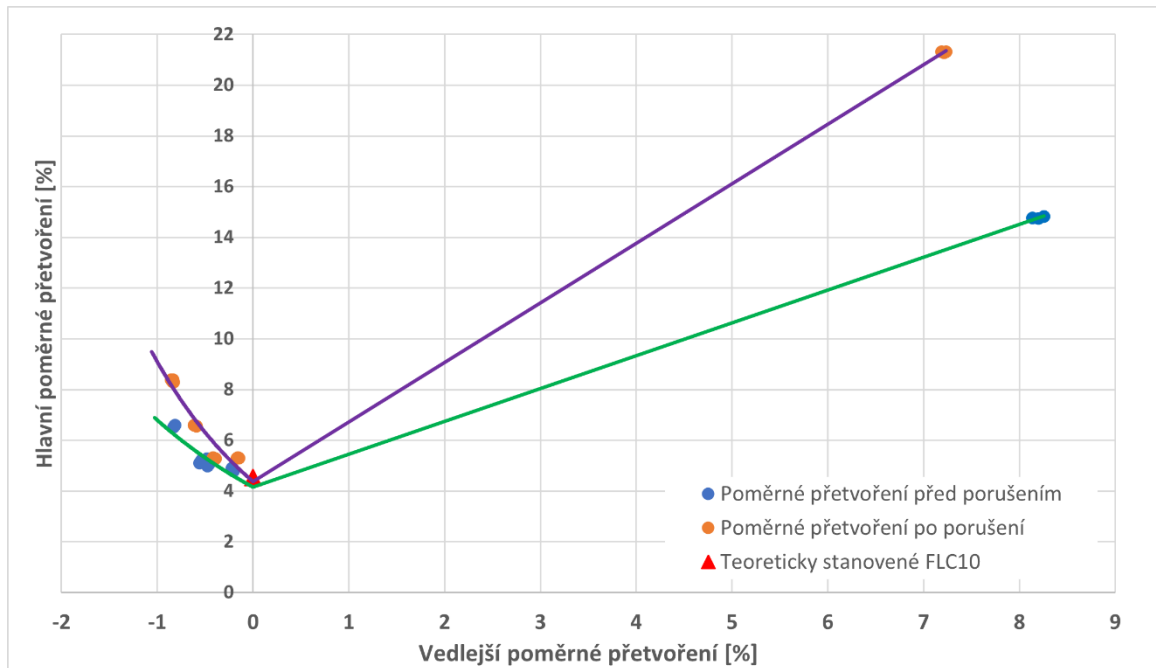
s – výchozí tloušťka materiálu [mm].

Přepočítání FLC_{10} na mezní bod hlavního logaritmického přetvoření se stanoví pomocí vzorce (2.2) z kapitoly 2.2.1:

$$FLC_{10}' = \varphi_1 = \ln(1 + \epsilon_1) = \ln\left(1 + \frac{4,603}{100}\right) = 0,045,$$

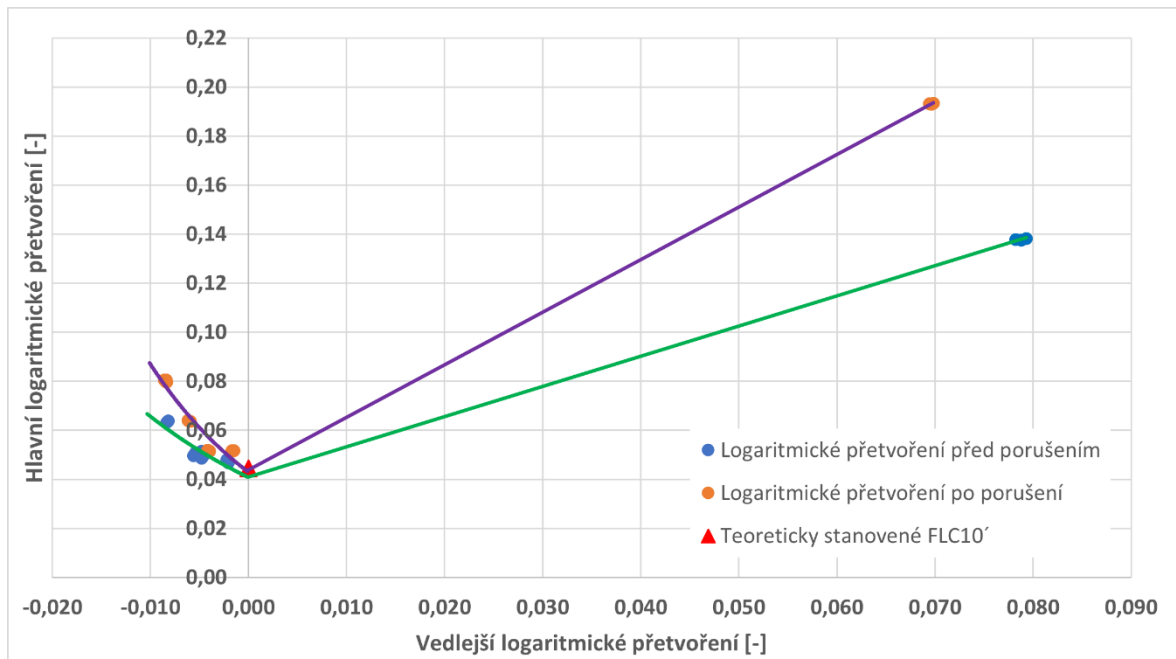
kde: FLC_{10}' – mezní bod logaritmického přetvoření materiálu [-].

Po určení všech hodnot, jež jsou uvedeny v tab. 8 a tab. 9, včetně validačních bodů, se mohlo přistoupit k samotné konstrukci křivek mezní tvařitelnosti. Jako první byl sestrojen diagram poměrného přetvoření, který je zobrazen na obr. 79. Oranžové body reprezentují hodnoty přetvoření bezprostředně po vzniku porušení, jež se posléze proložily vhodnými funkcemi, polynomickou (levá strana) a lineární (pravá strana). Výsledná fialová křivka představuje mezní křivku tvařitelnosti, přičemž po jejím překročení již vždy nastane trvalé porušení materiálu. Stejný postup se aplikoval při zpracování hodnot z fáze těsně před porušením, která jsou v grafu znázorněna modrými body. I v tomto případě došlo k proložení bodů, čímž vznikla zelená křivka, interpretující stav mezní tvařitelnosti před samotným porušením. Červený trojúhelník v diagramu označuje teoreticky stanovený validační bod $FLC_{10} = 4,603 \%$. Jak je z obr. 79 patrné, vzniklé křivky se protínají v jeho těsné blízkosti, tudíž lze předpokládat, že měření a vyhodnocení experimentálních dat bylo provedeno správně a v souladu s normou.



Obr. 79 FLC pro poměrné přetvoření.

Na obr. 80 je zobrazena FLC pro logaritmické přetvoření. Oranžové body znázorňují kombinaci hodnot bezprostředně po vzniku trhliny, přičemž se proložily v levé části polynomicou funkcí a lineární v pravé části grafu, čímž vznikla fialová FLC. Fialová křivka určuje mez, při jejímž překročení dochází k prokazatelnému porušení materiálu. Stejným způsobem se zpracovaly i modré body, které představují stav těsně před vznikem trhliny. Proložení hodnot funkcemi vznikla zelená FLC. Veškeré body ležící pod zelenou křivkou se nacházejí v bezpečné oblasti. V diagramu je opět červený trojúhelník vyznačující teoreticky vypočtený bod $FLC_{20} = 0,045$. Z obr. 80 vyplývá, že obě FLC se protínají v jeho blízkosti, což opět potvrzuje správnost vyhodnocení experimentálně naměřených dat.



Obr. 80 FLC pro logaritmické přetvoření.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo navržení experimentálního zařízení ke stanovení křivek mezní tvažitelnosti. K tomu bylo zapotřebí navrhnout funkční přípravek, který zároveň musel být přizpůsoben pro dostupný lis CBJ 500-6 z dílen ÚST FSI VUT v Brně. Při jeho konstrukci, následném měření a vyhodnocení se postupovalo dle příslušné normy ČSN EN ISO 12004. Pro experimentální testy byla zvolena metoda Nakajima, rovněž specifikována zmíněnou normou. Během návrhu přípravku se tedy vycházelo z jejího základního konceptu, který byl dále rozšířen o prvek v upínacím systému v podobě brzdného žebra. Pro sérii zkušebních testů byly použity pásy plechů různých šířek, přičemž každá z nich obsahovala tři identické vzorky z pocínovaného materiálu DR 520 CA o tloušťce 0,2 mm k zajištění opakovatelnosti. Proces měření deformace, včetně jejího vyhodnocení, probíhal s využitím metody digitální korelace obrazu.

Funkčnost přípravku se ověřila pomocí numerických simulací. V softwaru ANSYS byla zpracována pevnostní analýza, ze které vyplynulo, že konstrukce přípravku se při zatížení nedeformuje a nedochází k porušení či plastickému přetvoření žádného z jeho dílců. Druhá simulace byla provedena v programu Simufact Forming a byla rozdělena do dvou částí. V první fázi bylo ověřeno, že při navrženém systému upnutí pomocí zalisování mezi přídržovač a tažnici s brzdým žebrem nedochází k porušení vzorku a že upnutí je rovnoměrné a pevné při síle cca 8,5 kN. Druhá fáze se zaměřila na samotný proces tažení. Z výstupů vyplynulo, že k největšímu ztenčení materiálu dochází v jeho středové části, a to z výchozí hodnoty 0,2 mm na 0,14 mm, tedy v oblasti, kde je očekáván vznik trhliny. Rovněž výsledek FLD potvrdil, že v místě vyboulení dochází k výskytu porušení. Simulace z obou prostředí tedy prokázaly, že navržený přípravek by měl být funkční a může být vyroben v jeho navržené podobě.

Dále proběhla příprava experimentu, při kterém se vyrobený přípravek upnul spolu s DIC systémem do dutiny lisu a po kalibraci se přistoupilo k samotnému testování vzorků. Došlo k porušení všech vzorků a jejich vyhodnocení ve dvou časových krocích, a to těsně před vznikem trhliny a bezprostředně po jejím vzniku. Naměřená data byla vyhodnocena v systému poměrného i logaritmického přetvoření a sloužila jako podklad pro konstrukci FLC. Před jejich tvorbou byl teoretickým výpočtem stanoven validační (mezní) bod FLC_0 . Poté se sestrojily FLC pro poměrné i logaritmické přetvoření, včetně validačního bodu, vždy pro obě analyzované fáze, přičemž se výsledné FLC protínaly v jeho těsné blízkosti. Z toho je patrné, že měření a vyhodnocení experimentálních dat proběhlo správně a v souladu s požadavky normy. Lze tedy konstatovat, že navržený přípravek je funkční a vykazuje relevantní údaje pro konstrukci křivek mezní tvažitelnosti. Lze tak předpokládat jeho budoucí využití i pro jiné materiály a jiné tloušťky.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. JINDRÁK, Martin. *Návrh výroby krytu motocyklu*. Online, bakalářská práce. Jan ŘIHÁČEK (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství, 2023. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/148812>. [cit. 2025-02-25].
 2. ČSN EN ISO 12004-2, *Kovové materiály - Stanovení křivek mezní tvařitelnosti pro plechy a pásy - Část 2: Stanovení křivek mezní tvařitelnosti v laboratoři*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2021.
 3. CORRELATED SOLUTIONS. *Technology — Correlated Solutions Digital Image Correlation*. Online. C2025. Dostupné z: <https://www.correlatedsolutions.com/technology>. [cit. 2025-04-17].
 4. X-SIGHT. *X-Sight: Advanced High-precision Measurement Systems*. Online. [2024]. Dostupné z: <https://www.xsight.eu/>. [cit. 2025-04-17].
 5. DVOŘÁK, Milan a ZIMOLOVÁ, Markéta. Tin coating on a steel sheet and its influence on basic mechanical properties regardless of sample orientation. Online. *Journal for Technology of Plasticity*. 2004, vol. 29, no. 1-2, s. 61-66. ISSN 0354-3870. Dostupné z: <https://atm-journal.uns.ac.rs/index.php/atm/article/view/jtp.2004.29.1-2.6/1111>. [cit. 2025-04-17].
 6. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
 7. U. S. STEEL KOŠICE. *POCÍNOVANÁ OCEL*. Online. C2023. Dostupné z: <https://www.usske.sk/sk/produkty/pocinovana-ocel>. [cit. 2025-04-17].
 8. EUROPEAN STEEL AND ALLOY GRADES / NUMBERS SEARCHABLE DATABASE. *TH520 / 1.0384 - SteelNumber - Chemical composition, equivalent, properties*. Online. C2011-2024. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=880. [cit. 2025-05-01].
 9. TIANJIN TREE TECHNOLOGY DEVELOPMENT CO.,LTD. *K čemu se pocínovaný plech používá?* Online. 2023. Dostupné z: <https://cz.ttd-steel.com/news/what-is-tinplate-used-for-69156065.html>. [cit. 2025-04-17].
 10. TENDERSYSTEMS. *152: Hydraulický lis CBJ 500-6 - rekonstrukce - TENDER ARENA*. Online. [2012]. Dostupné z: <https://tenderarena.cz/dodavatel/seznam-profilu-zadavatelu/detail/Z0001390/zakazka/28609>. [cit. 2025-04-17].
 11. X-SIGHT. *About Us - Czech Developer of DIC Optical Extensometers*. Online. [2024]. Dostupné z: <https://www.xsight.eu/about/>. [cit. 2025-04-17].
 12. HOSFORD, William F. a CADDELL, Robert M. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. 4th ed. New York: Cambridge University Press, 2011. ISBN 978-1-107-00452-8.
 13. MARCINIAK, Zdzislaw; DUNCAN, John a HU, Jack. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. 2nd ed. Chantilly: Elsevier Science & Technology, 2002. ISBN 9780080496511.
 14. PETRUŽELKA, Jiří. *Tvařitelnost a nekonvenční metody ve tváření*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2000. ISBN 80-7078-635-3.
 15. GUO, Feng; JEONG, Hoyoung; PARK, Donghwi; KIM, Geunho; SUNG, Booyong; KIM, Naksoo. Numerical Optimization of Variable Blank Holder Force Trajectories in Stamping Process for Multi-Defect Reduction. Online. *Materials*. 2024, vol. 17, no. 11. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma17112578>. [cit. 2025-04-22].
-

-
16. ŘIHÁČEK, Jan. *Využití hydroformingu při vytváření strukturovaného povrchu solárního panelu*. Brno, 2017. 109s, 10 příloh. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
 17. DVOŘÁK, Milan; GAJDOŠ, František a NOVOTNÝ, Karel. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4747-9.
 18. BANABIC, Dorel. *Sheet Metal Forming Processes: Constitutive Modelling and Numerical Simulation*. Online. Heidelberg: Springer Berlin, 2010. ISBN 978-3-540-88112-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88113-1>. [cit. 2025-04-22].
 19. PAUL, Surajit Kumar; GANAPATHY, Manikandan a VERMA, Rahul Kumar. Prediction of entire forming limit diagram from simple tensile material properties. Online. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2013, vol. 48, no. 6, s. 386-394. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0309324713488886>. [cit. 2025-04-22].
 20. ČSN EN ISO 12004-1, *Kovové materiály - stanovení křivek mezní tvářitelnosti - část 1: měření a aplikace diagramů mezní tvářitelnosti v lisovně*. Praha: Český normalizační institut, 2009.
 21. FU, Pengcheng; YU, Gaochao; SONG, Dongtao; QI, Shaocong; QIAO, Zheng; ZHANG, Yu et al. A forming limit prediction model based on tensile instability theory for orthotropic sheet metal considering distortion hardening. Online. *Journal of Materials Science*. 2025, vol. 60, s. 3040–3062. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10853-024-10580-0>. [cit. 2025-04-27].
 22. MCAE. *Systémy pro měření pohybu a deformací od společnosti ZEISS*. Online. C2025. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/profesionalni-3d-skenery/deformacni-systemy/>. [cit. 2025-04-27].
 23. EIKOSIM. *Digital Image Correlation – The basics*. Online. 2023. Dostupné z: <https://eikosim.com/en/technical-articles/digital-image-correlation-the-basics/>. [cit. 2025-04-27].
 24. SAMEK, Radko a ŠMEHLÍKOVÁ, Eva. *Speciální technologie tváření. Část I*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010. ISBN 978-80-214-4220-7.
 25. ZHANG, Song. *Handbook of 3D Machine Vision: Optical Metrology and Imaging*. Online. Boca Raton: Taylor & Francis, 2013. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/b13856>. [cit. 2025-04-27].
 26. YOSHIZAWA, Toru. *Handbook of Optical Metrology: Principles and Applications*. Online. 2nd Edition. Boca Raton: Taylor & Francis, 2015. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/b18328>. [cit. 2025-04-27].
 27. ZEISS. *ARGUS: Optical solution for forming analysis | ZEISS*. Online. [2025]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/en/systems/optical-3d/3d-testing/argus.html>. [cit. 2025-04-27].
 28. MCAE. *Optické měření deformací se systémem ARGUS | MCAE*. Online. C2025. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/produkty/argus/>. [cit. 2025-04-27].
 29. ČEPON, Gregor; OCEPEK, Domen; KODRIČ, Miha; DEMŠAR, Matija; BREGAR, Tomaž et al. Impact-Pose Estimation Using ArUco Markers in Structural Dynamics. Online. *Experimental Techniques*. 2023, vol. 48, no. 2, s. 369–380. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40799-023-00646-0>. [cit. 2025-04-27].
-

-
30. DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING, THE UNIVERSITY OF TULSA. *A practical guide to DIC*. Online. Dostupné z: <https://digitalimagecorrelation.org>. [cit. 2025-04-27].
 31. JANELIUKSTIS, Rims a CHEN, Xiao. Review of digital image correlation application to large-scale composite structure testing. Online. *Composite Structures*. 2021, vol. 271. ISSN 0263-8223. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114143>. [cit. 2025-04-27].
 32. ZHAO, Jianlong; SANG, Yong a DUAN, Fuhai. The state of the art of two-dimensional digital image correlation computational method. Online. *Engineering Reports*. 2019, vol. 1, no. 2. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/eng2.12038>. [cit. 2025-04-27].
 33. PERIE, Jean-Noel a PASSIEUX, Jean-Charles. *Advances in Digital Image Correlation (DIC)*. Toulouse: Applied Sciences, 2020. ISBN 978-3-03928-514-3.
 34. ATKINSON, Devan a BECKER, Thorsten. A 117 Line 2D Digital Image Correlation Code Written in MATLAB. Online. *Remote Sensing*. 2020, vol. 12, no. 18. ISSN 2072-4292. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs12182906>. [cit. 2025-04-27].
 35. PAN, Bing; QIAN, Kemao; XIE, Huimin a ASUNDI, Anand. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. Online. *Measurement Science and Technology*. 2009, vol. 20, no. 6, article 062001. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/6/062001>. [cit. 2025-04-27].
 36. X-SIGHT. *X-Sight 2D Digital Image Correlation Optical Measuring System*. Online. [2024]. Dostupné z: <https://www.xsight.eu/digital-image-correlation-optical-measuring-system-xsight-2d-dic/>. [cit. 2025-04-27].
 37. X-SIGHT. *X-Sight 3D Digital Image Correlation Optical Measuring System*. Online. [2024]. Dostupné z: <https://www.xsight.eu/digital-image-correlation-optical-measuring-system-system-xsight-3d-dic/>. [cit. 2025-04-027].
 38. SCHWINDT, Claudio D.; STOUT, Mike; IURMAN, Lucio Iurman a SIGNORELLI, Javier W. Signorelli. Forming Limit Curve Determination of a DP-780 Steel Sheet. Online. *Procedia Materials Science*. 2015, vol. 8, s. 978-985. ISSN 2211-8128. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.159>. [cit. 2025-05-02].
 39. AMREE, Chutwin; PANICH, Sansot a JANTARASRICHA, Tanakorn. Polar effective plastic strain - forming limit diagram of DP 440 steel sheet with application to two-step forming test. Online. *Materialstoday: PROCEEDINGS*. 2023, vol. 77, no. 4, s. 1039-1044. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.385>. [cit. 2025-05-02].
 40. KAMI, Abdolvahed; DARIANI, Bijan Mollaei; VANINI, Ali Sadough; COMSA, Dan Sorin a BANABIC, Dorel. Numerical determination of the forming limit curves of anisotropic sheet metals using GTN damage model. Online. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014, vol. 216, s. 472-483. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.10.017>. [cit. 2025-05-02].
 41. DE SÁ JOSÉ, César; MIRANDA, César; SANTOS, Abel D.; , Abel Dias a , Rui. Formability prediction for AHSS materials using damage models. Online. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017, vol. 843, no. 1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/843/1/012018>. [cit. 2025-05-02].
 42. MAKEITFROM.COM. *EN 1.0060 (E335) Non-Alloy Steel*. Online. C2009-2025. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-1.0060-E335-Non-Alloy-Steel>. [cit. 2025-05-10].
 43. ANSYS. *Ansys | Engineering Simulation Software*. Online. C2025. Dostupné z: <https://www.ansys.com/>. [cit. 2025-05-13].
-

44. HEXAGON. *Simufact Forming*. Online. C2025. Dostupné z: <https://hexagon.com/products/simufact-forming>. [cit. 2025-05-13].
 45. PAUL, Surajit Kumar. Controlling factors of forming limit curve: A review. Online. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. May 2021, vol. 2, article 100033. ISSN 2666-9129. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.aime.2021.100033>. [cit. 2025-05-13].
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbole

Označení	Legenda	Jednotka
A_{80}, A_{50}	celková tažnost	[%]
d	výchozí průměr kružnice	[mm]
D_{bh}	průměr otvoru nosiče	[mm]
E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
f	součinitel tření	[-]
FLC_0	mezní bod přetvoření materiálu	[-]
FLC_{10}	mezní bod poměrného přetvoření materiálu	[%]
FLC_{10}'	mezní bod logaritmického přetvoření materiálu	[-]
K	materiálová konstanta	[MPa]
l_i	odpovídající rozměr osy elipsy	[mm]
n	exponent deformačního zpevnění	[-]
R_a	drsnost povrchu	[μ m]
R_m	mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu	[MPa]
s	výchozí tloušťka	[mm]
ε	poměrné přetvoření	[%]
ε_1	hlavní poměrné přetvoření	[%]
ε_2	vedlejší poměrné přetvoření	[%]
μ	poissonův poměr	[-]
φ	logaritmické přetvoření	[-]
φ_1	hlavní logaritmické přetvoření	[-]
φ_2	vedlejší logaritmické přetvoření	[-]
φ_3	terciální logaritmické přetvoření ve směru tloušťky	[-]

Zkratky

Označení	Legenda
CCD	charged coupled device
DIC	digital image correlation
FLC	forming limit curve
FLD	forming limit diagram
LED	light emitting diode
MKP	metoda konečných prvků

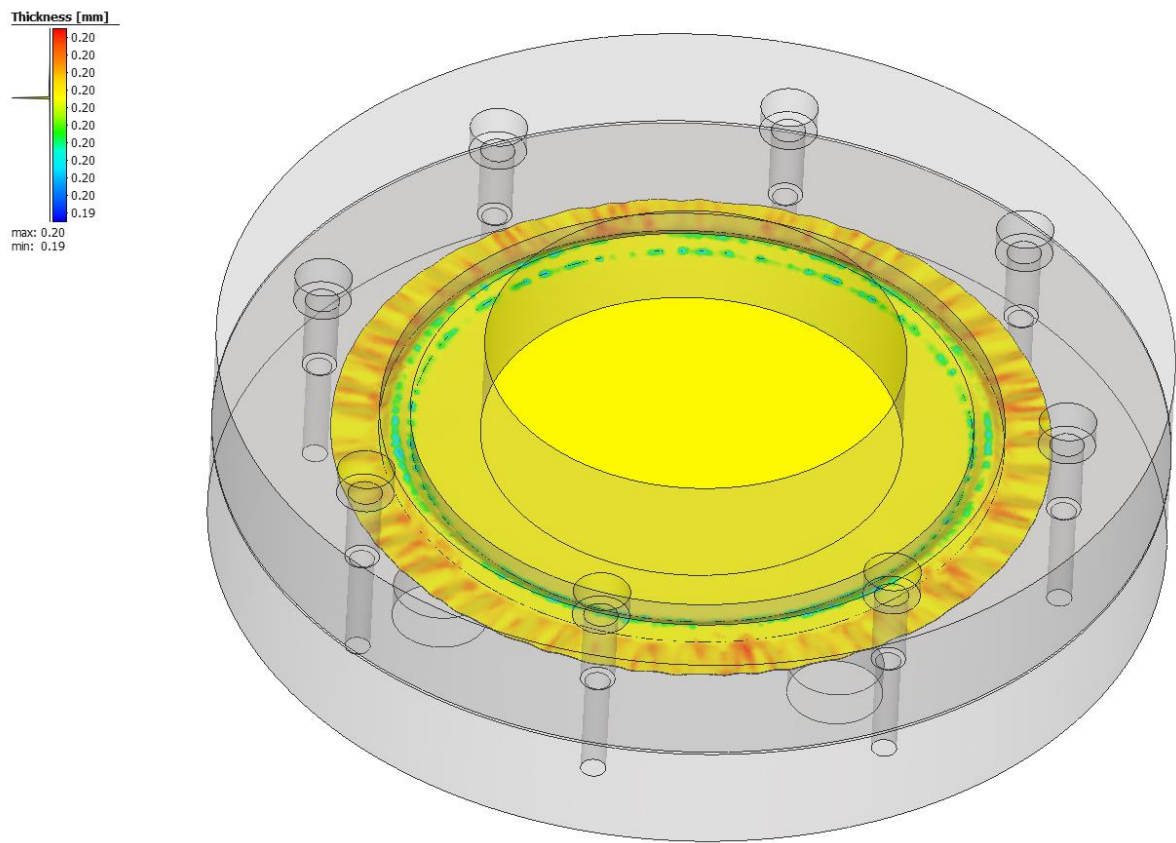
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Tloušťka plechu [mm] po zalisování
Příloha 2	Míra ztenčení [%] materiálu
Příloha 3	Měřicí pracoviště

SEZNAM VÝKRESŮ

Spodní deska	2025-DP-229390-01
Sloupek	2025-DP-229390-02
Tažnice	2025-DP-229390-03
Brzdné žebro	2025-DP-229390-04
Přidržovač	2025-DP-229390-05
Tažník	2025-DP-229390-06
Horní deska	2025-DP-229390-07
Přípravek	2025-DP-229390-08
Kusovník	2025-DP-229390-09

Příloha 1
Tloušťka plechu [mm] po zalisování



Příloha 2
Míra ztenčení [%] materiálu

