



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**VYUŽITÍ HYDROFORMINGU PŘI VYTVÁŘENÍ
STRUKTUROVANÉHO POVRCHU SOLÁRNÍHO
PANELU**

UTILIZATION OF HYDROFORMING TECHNOLOGY TO CREATE A STRUCTURED SURFACE OF
SOLAR PANEL

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jan Řiháček

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2017

ABSTRAKT

ŘIHÁČEK Jan: Využití hydroformingu při vytváření strukturovaného povrchu solárního panelu.

Dizertační práce pojednává o využití technologie hydroformování pro výrobu nového typu solárního absorberu disponujícího přímo protékanou meandrovitou strukturou a strukturovaným povrchem tvořeným jehlanovitými elementy. Jako materiál pro výrobu absorberů je použita austenitická korozivzdorná ocel X5CrNi18-10. V úvodu práce je provedena literární rešerše zaměřená především na jednotlivé metody technologie hydroformování, jejich použití pro danou problematiku, stanovení tvářecích limitů a využitelnost numerických simulací. Na základě provedené literární studie byla navržena technologie výroby s využitím paralelního hydroformování a tato optimalizována numerickou simulací v prostředí ANSYS. Z provedených výpočtů a materiálových testů byly stanoveny parametry hydroformování pro dvě varianty strukturovaného povrchu tvořeného jehlanovitými dutinami s vrcholovým úhlem 90° a 60°.

Klíčová slova: ocel X5CrNi18-10, tváření, hydroformování, solární absorber, numerická simulace, diagram mezní tvářitelnosti

ABSTRACT

ŘIHÁČEK Jan: Utilization of Hydroforming Hechnology to Create a Structured Surface of Solar Panel.

The doctoral thesis deals with utilization of hydroforming technology for manufacturing of a new type of solar absorber, which has directly flow meandering structure and a structured surface consisting of pyramidal elements. Austenitic stainless steel X5CrNi18-10 is used as a material for absorbers production. At the beginning of the thesis, a literary research is performed, which is focused on particular methods of hydroforming technology, their applicability for this problem, forming limits determination and usability of numerical simulation. Based on the literature study, the production technology was developed by using parallel hydroforming technology and it was optimized by using a numerical simulation in the ANSYS software. Hydroforming parameters for two variants of the structured surface with pyramidal cavities with apex angle of 90° and 60° were determined from the calculations and the material tests.

Keywords: X5CrNi18-10 steel, forming, hydroforming, solar absorber, numerical simulation, forming limit diagram

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

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.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou dizertační práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího dizertační práce.

V Brně dne 16. 8. 2017

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji především svému školiteli panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. a dále pak všem zaměstnancům Odboru technologie tváření kovů a plastů a Odboru svařování a povrchových úprav ÚST FSI VUT v Brně za cenné připomínky a rady týkající se zpracování dizertační práce.

Dále děkuji doc. Ing. Danielu Koutnému, Ph.D. za pomoc při digitalizaci výlisků systémem ATOS a Ing. Mojmiru Vaňkovi za pomoc při analýze svařování v softwaru Sysweld. Děkuji rovněž své rodině, známým a přátelům za podporu při studiu.

Tato práce vznikla v rámci projektu TA04020456 „Vývoj nových typů solárních absorberů“ řešeného na ÚST FSI VUT v Brně ve spolupráci s ÚPT AV ČR.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE	10
2 PROBLEMATIKA SOLÁRNÍCH KOLEKTORŮ.....	11
2.1 Ploché solární kolektory	12
2.2 Nový typ solárního absorbéru	14
2.2.1 Simulace absorpce slunečního záření na strukturovaném povrchu	15
2.2.2 Materiál absorbéru.....	17
3 TECHNOLOGIE HYDROFORMOVÁNÍ	21
3.1 Hydroformování trubek	21
3.1.1 Nízkotlaké hydroformování.....	22
3.1.2 Vícetlaké hydroformování	23
3.1.3 Vysokotlaké hydroformování	24
3.2 Hydroformování plechů.....	25
3.2.2 Hydroformování plechů lisovnicí	27
4 STANOVENÍ TVÁŘECÍCH LIMITŮ	31
4.1 Diagram mezní tvářitelnosti	31
4.2 Limitní diagramy technologické tvářitelnosti	39
4.3 Teoretické určení mezní tvářitelnosti	40
5 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	42
5.1 Diskretizace a typy elementů.....	42
5.2 Princip řešení úloh MKP	43
5.2.1 Implicitní algoritmus	44
5.2.2 Explicitní algoritmus	45
5.3 Popis materiálu při simulacích procesů tváření.....	46
5.4 Simulační prostředí analýzy plošného tváření.....	52
5.4.1 Sysweld.....	53
5.4.2 ANSYS	53
5.4.3 LS-DYNA.....	54
5.4.4 LS-PrePost.....	55
6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE	56
6.1 Technologie výroby.....	57
6.2 Vstupní materiálové testy numerické simulace hydroformování.....	64
6.3 Analýza svaru	72
6.4 Numerická simulace hydroformování	78
6.4.1 Ověřovací simulace – výběr metody řešení.....	78
6.4.2 Analýza vyrobitelnosti povrchu s vrcholovým úhlem 90°	89
6.4.3 Analýza vyrobitelnosti povrchu s vrcholovým úhlem 60°	98
7 ZÁVĚRY	108
Seznam použitých zdrojů	
Tvůrčí činnost autora	
Seznam použitých symbolů a zkratek	
Seznam příloh	
Seznam použitých obrázků	
Seznam použitých tabulek	

ÚVOD

V současnosti vedou vzrůstající ceny energií a s jejich výrobou spojená zátěž životního prostředí ke stále většímu důrazu na využití obnovitelných energetických zdrojů. Možným přístupem je využití solární energie, která nachází, krom jiného, uplatnění v oblasti ohřevu kapalin či plynů, a to pomocí solárních tepelných systémů či tzv. solárních kolektorů. Komerčně nepoužívanějším typem jsou potom tzv. ploché solární kolektory.

Konstrukční řešení hlavní funkční části plochých solárních kolektorů, tj. solárních absorbérů, se v poslední době ustálilo do podoby absorpční desky, z níž je absorbované teplo odváděno přes trubkový registr připevněný k její zadní straně. Tato koncepce má však některé principiální nedostatky, které brání vyšší efektivitě využití solárního tepla. Z této skutečnosti plyne i snaha o hledání nových cest, vedoucích ke zvýšení účinnosti plochých solárních absorbérů. Solární absorbér nové generace, jehož vývoj probíhá na ÚST VUT v Brně ve spolupráci s Ústavem přístrojové techniky AV ČR, je tvořen dvěma po obvodě laserem svařenými plechovými výlisky, mezi nimiž proudí ohříváné teplotnosné médium. Ke zvýšení účinnosti a ročního výtěžku tepla tohoto konceptu je v dalším kroku vhodné vytvořit strukturovaný teplosměnný povrch absorbéru, vedoucí k vyššímu tepelnému zisku a dále dosáhnout řízeného toku teplotnosného média tělem absorbéru vytvořením meandrovité struktury. Při vývoji a výrobě uvedeného typu absorbéru nachází své nezastupitelné místo technologie hydroformování plechových polotovarů v součinnosti s dalšími technologiemi.

Technologie hydroformování nalézá své uplatnění v mnoha oblastech, jako je např. automobilní, chemický, drážní, lodní nebo letecký průmysl, a to především při výrobě tvarově složitých výrobků, jako jsou nádrže, sací i výfukové systémy, části karosérií, podvozků, rámu, tvarovek, části osvětlení apod., viz příklady některých dílců z obr. 1. Základní koncepce jednotlivých hydroformovacích systémů jsou známé, ale přesto je možné jejich modifikacemi definovat stále nové způsoby výroby s cílem maximálně zefektivnit výrobní proces.

I proto je tedy cílem aplikovat technologii hydroformování k zefektivnění výroby výše zmíněných solárních absorbérů. Řešení dané problematiky daným systémem s sebou přináší i unikátnost koncepce technologie výroby, neboť v současnosti pro danou oblast existuje v tomto směru jen málo poznatků. V této souvislosti je nutností provedení teoretického rozboru tvářecích pochodů, a to s podporou numerické simulace systémem MKP.



Obr. 1 Příklady tvarových skupin dílců hydroformování plechů [1], [2], [3], [4], [5]

1 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Primárním cílem disertační práce je zaměřit se na možnosti technologie hydroformování a její aplikaci při výrobě strukturovaného povrchu solárního absorbéru nové generace. Uvažují se dvě varianty strukturovaného povrchu tvořeného jehlanovitými prolisy s vrcholovým úhlem 90° a ve druhé variantě 60° . S tím úzce souvisí i problematika zjišťování optimálních parametrů výroby, jako je optimální lisovací tlak, geometrie nástroje, tloušťka polotovaru – plechu i případných defektů, ke kterým může při hydroformovacím procesu docházet.

Na základě zohlednění výše uvedeného bude pro obě zmíněné varianty prolisů (vrcholový úhel 90° a 60°) v rámci disertační práce řešeno především následující:

- bez defektů dosažitelná hloubka vytvářených prolisů,
- potřebný a kritický lisovací tlak,
- problematika porušení přechodu svar – tvářený materiál,
- optimální hodnota zaoblení jehlanovitých elementů lisovací matrice.

Za tímto účelem bude provedena tvorba numerického modelu hydroformovacího procesu v prostředí na bázi metody konečných prvků softwaru ANSYS (ANSYS Workbench), popř. ANSYS LS-DYNA. Teoretické výstupy numerických simulací budou ověřeny experimentální cestou na základě vyhodnocení přetvoření sítí.

Pro uskutečnění daných cílů je třeba zaměřit se na řešení dílčích úkolů, které předznamenávají základní etapy postupu řešení problematiky disertační práce. Pro řešení práce, resp. pro řešení každého z uvažovaných reliéfů strukturovaného povrchu absorbéru lze stanovit následující dílčí cíle:

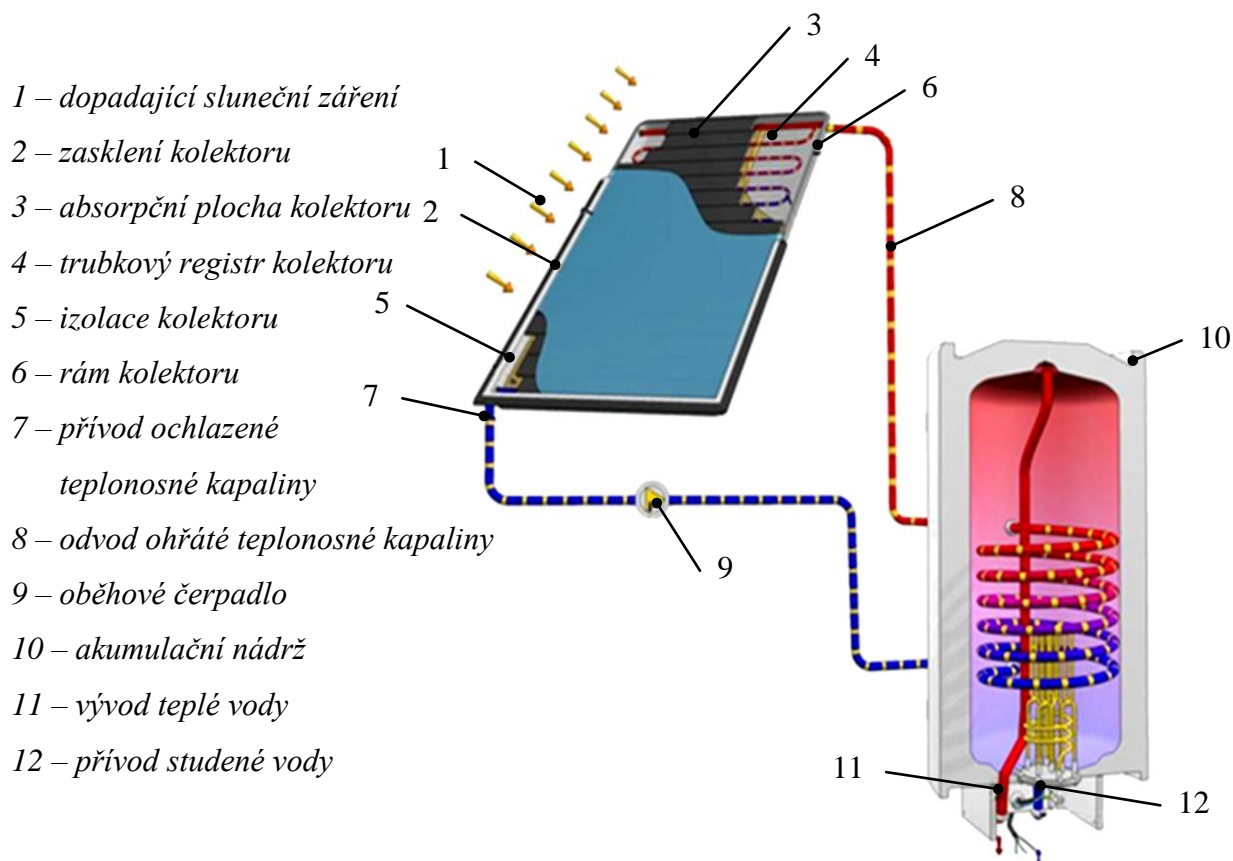
- tvorba materiálového modelu tvářené oceli,
- sestavení teoretického modelu numerické simulace a její vyhodnocení,
- realizace zkušebního lisovacího přípravku,
- vyhodnocení experimentů a porovnání s numerickou simulací,
- posouzení vlivu změny geometrie lisovnice a geometrie svarů na hydroformovací proces (optimalizační činnost).

Práce by měla přinést nové poznatky ve vymezené oblasti a přispět k získání zkušeností a teoretických znalostí s problematikou návrhu a optimalizace hydroformovacích technologií cestou numerické simulace s užitím počítačové podpory. Nové poznatky v řešení problematiky mohou přispět k rychlejšímu vývoji a výrobě nového typu přímo protékajících plochých solárních absorbérů.

Pro řešení disertační práce bude využito vybavení laboratoří Ústavu strojírenské technologie, Odboru technologie tváření kovů a plastů FSI VUT v Brně (laboratoř mechanických zkoušek, zařízení pro měření účinnosti solárních panelů apod.) a Ústavu přístrojové techniky AV ČR.

2 PROBLEMATIKA SOLÁRNÍCH KOLEKTORŮ [6], [7], [8]

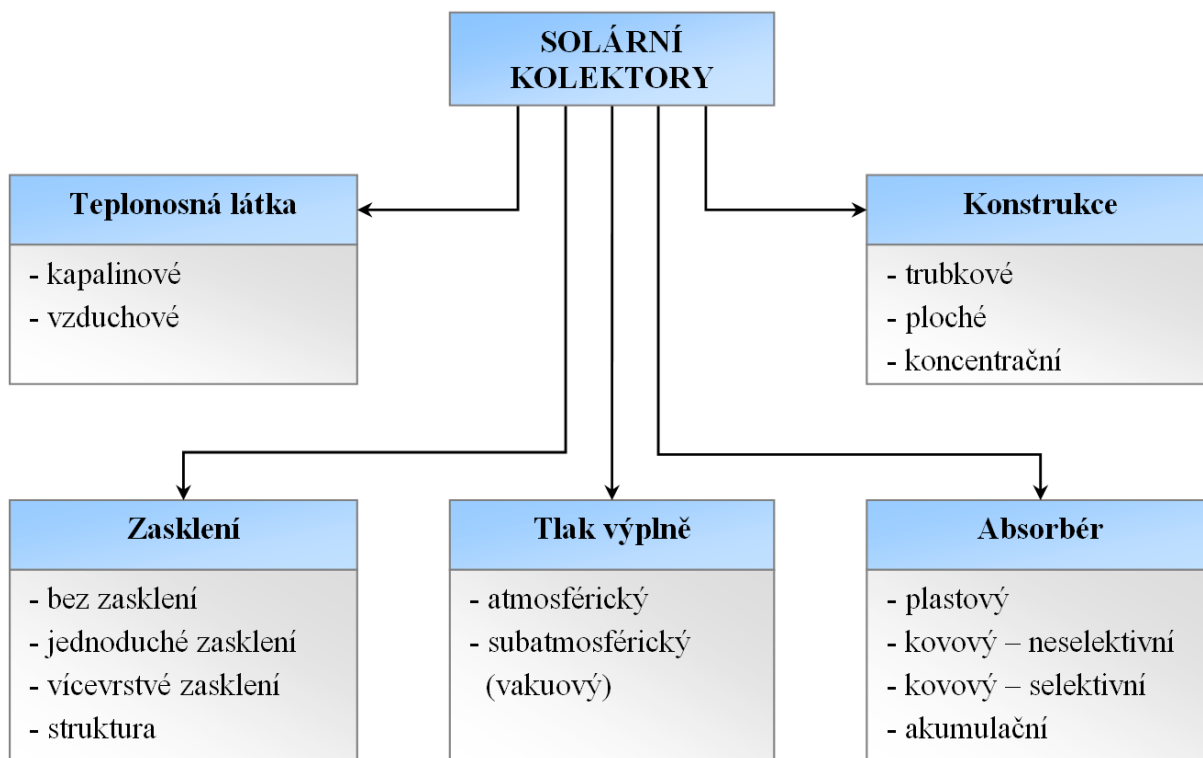
Solární kolektory jsou určeny k absorpci slunečního záření a k přeměně takto získané energie v teplo. Tepelná energie je dále předávána teplotněmu médiu, které protéká tělem solárního kolektoru. Jinak řečeno, jedná se o tzv. fototermální energetickou přeměnu. Teplotně médium odvádí získané teplo přes teplotný výměník do akumuláční nádrže, někdy nazývané solární zásobník. Dle účelu a systému teplotného rozvodu odtud ohřáté médium putuje do vodovodního nebo topného systému. Příklad sestavy jednoduchého solární termálního okruhu uvádí schematický náčrt na obr. 2.



Obr. 2 Schéma činnosti solárního teplotného systému [6]

V zásadě lze říci, že primárním členem každého solárního okruhu je solární kolektor, resp. jeho absorpční část – solární absorbér, a to jako zdroj teplotné energie určené k ohřevu teplotněného média, nejčastěji vody nebo vody s nemrznoucí směsí, odváděného z kolektoru na obr. 2 sítí kanálků. Solární kolektor disponuje kromě absorbéru i dalšími částmi omezujícími teplotné ztráty. Jako výplň rámu kolektoru je užito teplotné izolace a jeho přední strana bývá osazena skleněnou deskou. Tvar, rozložení nebo případná úplná absence výše vyjmenovaných částí kolektoru je odvislá od jeho typu.

Existuje celá řada typů solárních kolektorů, přičemž každý jeden z nich je vhodný pro rozdílné aplikace. V současnosti je k dispozici množství hledisek pro zařazení kolektorů do daných kategorií, ať už se jedná o typ teplotněného média, materiál absorbéru nebo řešení zasklení kolektorů. Jednotlivé základní aspekty pro rozdělení kolektorů uvádí např. [8], viz obr. 3.



Obr. 3 Základní rozdělení solárních kolektorů [8]

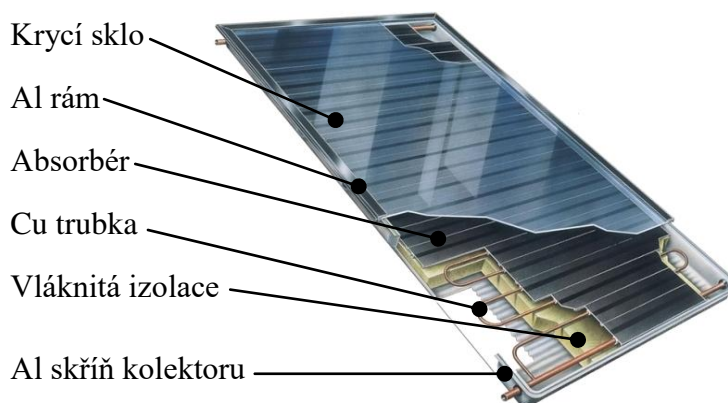
Mezi nejčastěji uváděné možnosti určování typů kolektorů patří nesporně jejich konstrukční řešení. Rozličné konstrukce, které jsou v dnešní době k dispozici, předurčují každý konstrukční typ solárního kolektoru různému využití. Dle konstrukce se tedy rozeznávají kolektory:

- trubicové – jsou tvořeny skleněnými vakuovými trubicemi, do nichž je potrubím přiváděno teplonosné médium, které se v prostoru každé trubice ohřívá,
- koncentrační (soustřeďující) – dochází ke koncentraci slunečního záření na absorpční plochu odrazem za použití zrcadel nebo lomem s využitím čočky,
- ploché – tvoří je rovinná deska (absorbér), nejčastěji hliníková nebo měděná, pod níž se nachází meandrovitá struktura trubek pro přívod a odvod teplonosného média viz obr. 2.

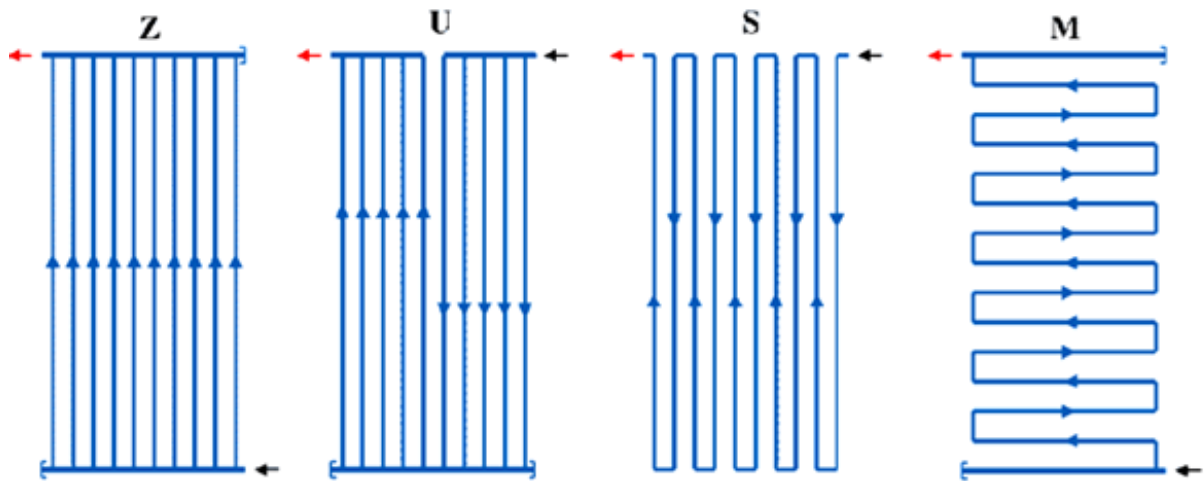
2.1 Ploché solární kolektory [8]

Právě poslední možnost výše uvedeného výčtu, tj. plochý solární kolektor, představuje v současnosti nejpoužívanější konstrukční typ. Navíc literatura [8] uvádí každoroční nárůst dodávek a instalací tohoto typu kolektorů v ČR o cca (25 až 30) %.

Plochý kolektor je tvořen rovnou absorpční deskou (absorbérem) opatřenou absorpční vrstvou. Absorbér je konstruován jednotlivě nebo děleně, tj. formou lamel. Na spodní straně absorbéru je obvykle umístěna síť trubek pro přívod a odvod teplonosné látky, uspořádaná do meandrovité struktury. Schéma plochého solárního kolektoru uvádí obr. 4. Možnosti uspořádání trubkového registru jsou vyobrazeny na obr. 5.



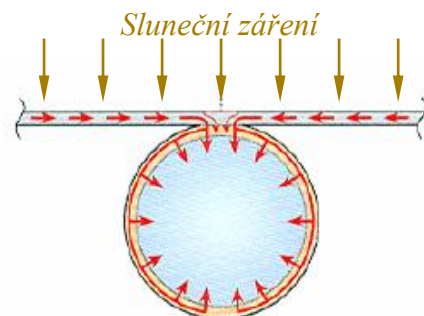
Obr. 4 Schéma plochého solárního kolektoru [6]



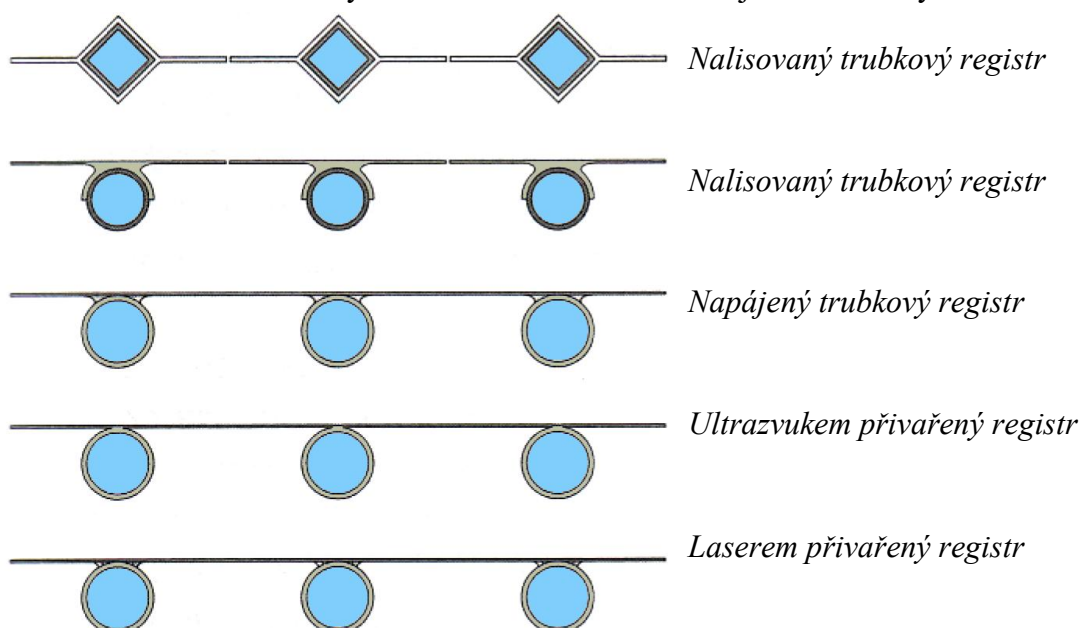
Obr. 5 Varianty trubkového registru plochých kolektorů [6]

Hlavním nedostatkem plochých kolektorů je oproti některým jiným typům, např. trubicovým kolektorům, poměrně nízká tepelná účinnost. Navíc skutečnost, že se kolektor nedělí na volné segmenty, jako např. v případě zmíněných trubicových kolektorů, ale je tvořen pouze plochou, působí často velké problémy při jejich polohování vůči dopadajícím slunečním paprskům.

Kvůli zajištění maximálního tepelného zisku kolektoru z dopadajícího slunečního záření je totiž bezpodmínečně nutné zabezpečit vhodnou polohu a natočení těla kolektoru pro, pokud možno, kolmý dopad slunečních paprsků na absorpční plochu. Další nedokonalostí je téměř liniový kontakt mezi absorberem a trubicou s teplotním médiem – kapalinou (obr. 6), který brání účinnějšímu přestupu tepla z absorberu na teplotní médium. Tento problém u plochých kolektorů dosud přetrvává, a to i přes snahu některých konstrukčních řešení změnit způsob napojení trubkového registru na absorpční část a zvětšit tak kontakt mezi absorberem a trubicou. Vybrané možnosti tohoto řešení jsou zobrazeny na obr. 7.



Obr. 6 Přestup tepla absorber – trubka [6]



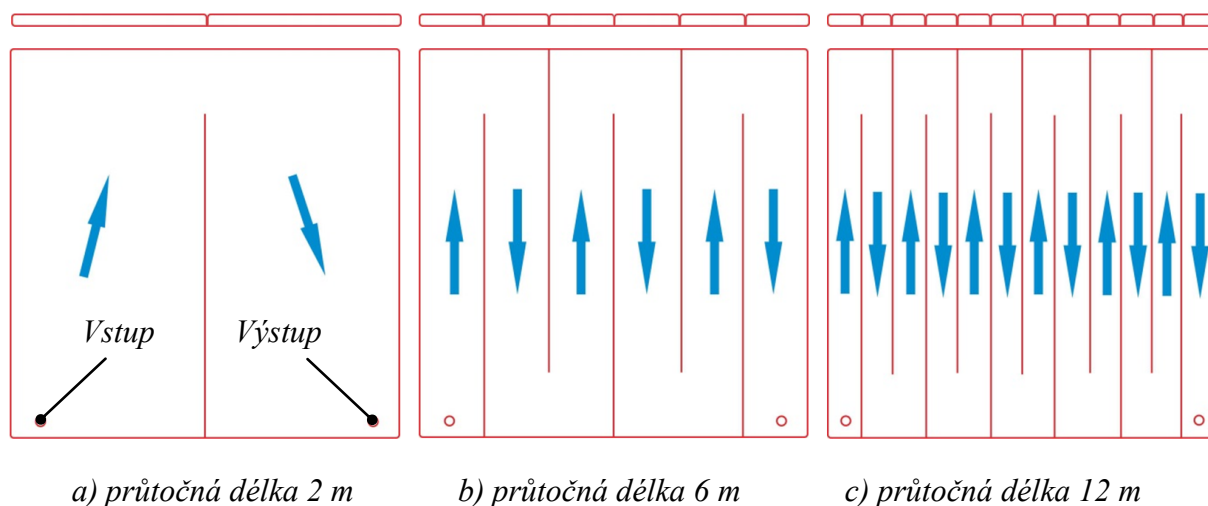
Obr. 7 Možnosti napojení absorber – trubka [6]

2.2 Nový typ solárního absorbéru [6], [7]

Při řešení problému nízké účinnosti plochých kolektorů je nutné se v základu zabývat výše zmíněnými dvěma principiálními konstrukčními nedostatky, tj. pouze liniový kontakt absorbér – trubkový registr a problémové zajištění kolmosti dopadajících slunečních paprsků.

Je zřejmé, že řešení problematiky nedokonalého liniového kontaktu mezi absorbérem a trubkou vede ke zvětšení kontaktní plochy mezi nimi, kdy dochází k lepšímu odvodu tepelné energie směrem k teplotonosné kapalině v trubce. Východiskem je využití tzv. přímo protékané struktury, někdy též označované jako polštářová. Oproti trubkovému řešení je daleko výhodnější, neboť zabezpečuje přestup tepla v mnohem větší ploše a tudíž znamená i vyšší účinnost. Řízený průtok teplosměnného média přes celou plochu absorbéru je potom zajištěn vytvořením meandrovité struktury.

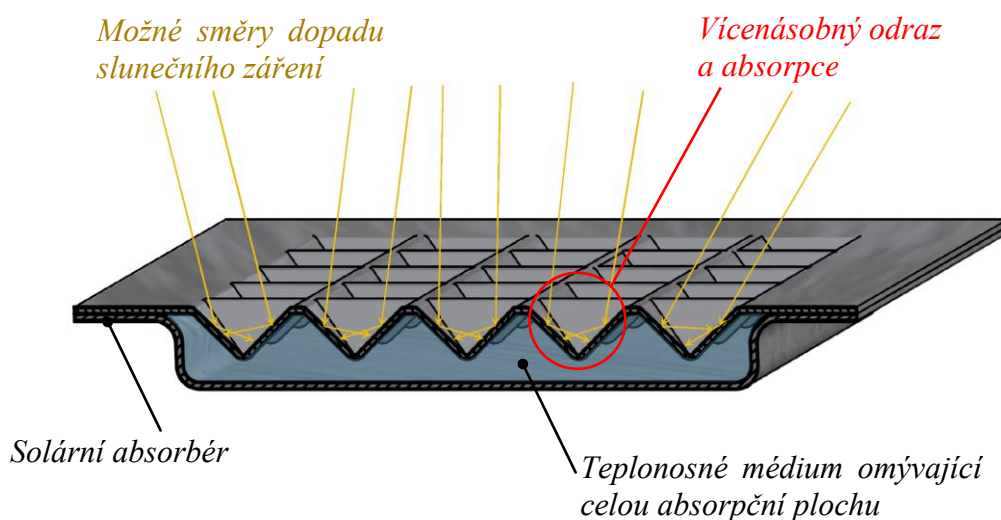
Pokud se předpokládá základní rozměr absorbéru 1000×1000 mm, potom je tímto způsobem možné měnit průtočnou délku, a tudíž i hydraulický odpor, tlakovou ztrátu a rovněž i odolnost kolektoru vůči přetlaku. Příklady možných variant vytvoření paralelní meandrovité struktury uvádí obr. 8.



Obr. 8 Závislost průtočné délky na konstrukci meandrovité struktury absorbéru [7]

Pokud bude navíc povrch absorbéru tvořen topologicky členitým povrchem, potom nerovnosti této struktury umožní zachytit více slunečního záření. Cestou vícenásobných odrazů slunečních paprsků tak bude docházet u strukturovaného povrchu ke zvýšení absorpce. Použitím strukturovaného absorbéru navíc odpadá potřeba nutnosti optimálního nastavení kolektorů směrem ke slunci, která je při použití plochých kolektorů jinak rozhodující vzhledem k jejich výsledné účinnosti.

Prostorová struktura také zvětšuje teplosměnný povrch a tím rovněž množství tepelné energie dále předávané teplotonosnému médiu. Jako nejvhodnější se jeví použití strukturovaného povrchu s dutinami v podobě jehlanů. Principiální schéma uvažovaného řešení strukturovaného povrchu solárního absorbéru s jehlanovitou strukturou, v níž dochází díky vícenásobným odrazům ke zvýšení pohltivosti, uvádí obr. 9.



Obr. 9 Absorbér se strukturovaným povrchem [6]

S uvažováním obou výše zmíněných možností zkvalitnění absorbérů plochých kolektorů lze vyvinout nové typy povrchově strukturovaných absorbérů, které mají napomoci výše popsané nedostatky odstranit a docílit zlepšení účinnostních parametrů.

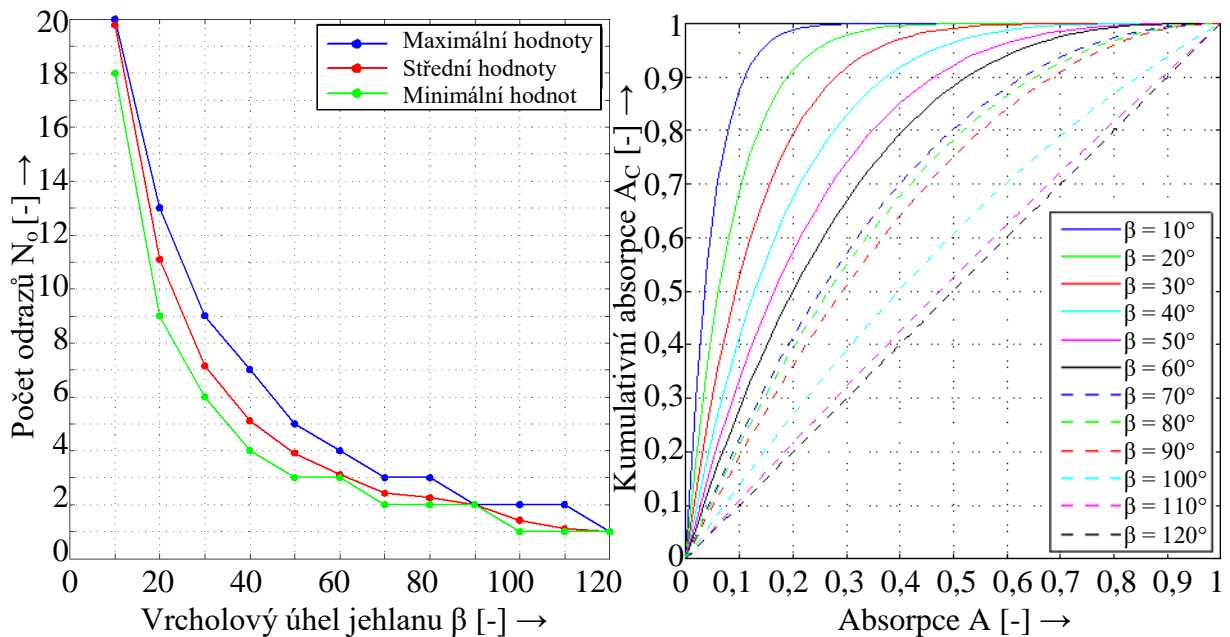
2.2.1 Simulace absorpce slunečního záření na strukturovaném povrchu [9]

Pro koncept absorbéru se strukturovaným jehlanovitým povrchem hovoří i výsledky provedeného teoretického modelování celkové absorpce dopadajícího slunečního záření na povrchu absorbéru. Simulace byla provedena na Ústavu přístrojové techniky AV ČR, kde byl pro solární absorbér se strukturovaným povrchem sestaven program pro určení jeho základních charakteristik umožňující taktéž porovnání s plochou variantou, tj. bez strukturovaného povrchu. Řešení problematiky absorpce je v daném případě velmi obtížná, neboť je závislá hned na několika parametrech, jako je:

- vrcholový úhel jehlanů strukturovaného povrchu,
- ustavení kolektoru (sklon a natočení),
- absorpční koeficient povrchu absorbéru,
- zeměpisné situování,
- denní a roční sluneční aktivita v dané lokalitě.

Studie absorpce slunečního záření s přihlédnutím k uvedeným parametrům byla provedena jako simulace ustáleného stavu v prostředí softwaru MATLAB, resp. s využitím výpočetní metody Monte Carlo, která využívá náhodně generované dopadající sluneční paprsky a jejich odraz dále predikuje na základě metody Raytracing (sledování paprsku). Pokud je hustota uvažovaných dopadajících paprsků dostatečná, potom lze očekávat reprezentativní výsledky. Simulace byly prováděny pro vrcholové úhly strukturovaného povrchu – jehlanů $\beta = 10^\circ$ až 120° .

Ze simulace vyplynula mj. závislost počtu odrazů uvnitř jehlanovité dutiny, která je patrná z grafického vyjádření na obr. 10a. Z ní vyplývá, že se snižujícím se vrcholovým úhlem jehlanů stoupá počet odrazů v jednotlivých jehlanovitých dutinách a tím se zvyšuje i celková absorpce povrchu. Závislost kumulativní absorpce na vrcholovém úhlu jehlanu v dalším uvádí obr. 10b, který rovněž ukazuje na nárůst kumulativní absorpce při zmenšujícím se vrcholovém úhlu jehlanů.



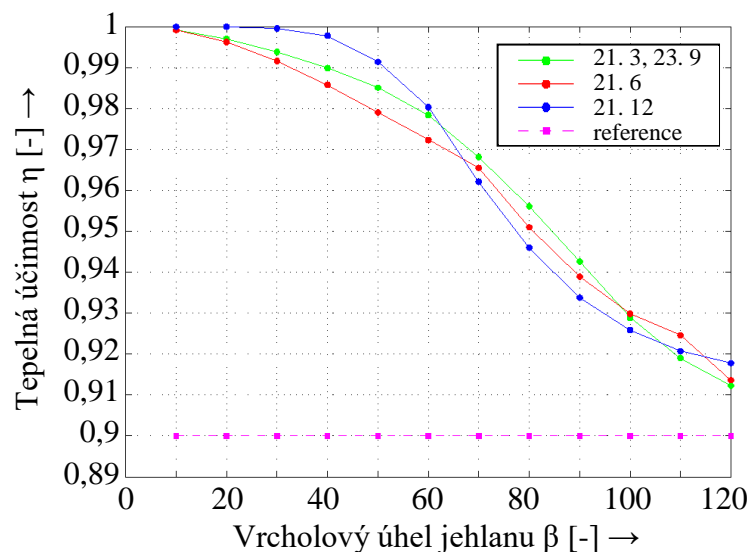
a) počet odrazů uvnitř jehlanovité dutiny

b) kumulativní absorpce

Obr. 10 Změna vlastností v závislosti na vrcholovém úhlu jehlanovité struktury [9]

Dále bylo pro charakteristické dny v roce simulačně stanoveno, jaký vliv má vrcholový úhel jehlanovité struktury na účinnost absorberu, a to pro následující parametry: úhel sklonu 45° , orientace k jihu (azimut 0°), poloha – Brno (zeměpisná šířka $49,191^\circ$), referenční absorpce plošného absorberu 0,9.

Z grafu na obr. 11, který porovnává průběh tepelné účinnosti solárního absorberu v závislosti na vrcholovém úhlu jehlanu pro čtyři charakteristické dny v roce, vyplývá, že oproti referenčnímu plochému absorberu dochází ke zvýšení tepelné účinnosti, a to zejména při ostřejších vrcholových úhlech jehlanovité struktury. V grafu je též zaznamenán strmý nárůst účinnosti v rozmezí cca 60° až 90° . V prvním případě dosahuje povrch průměrné účinnosti cca 0,975. Pro úhel 90° se jedná o průměrnou tepelnou účinnost 0,94.



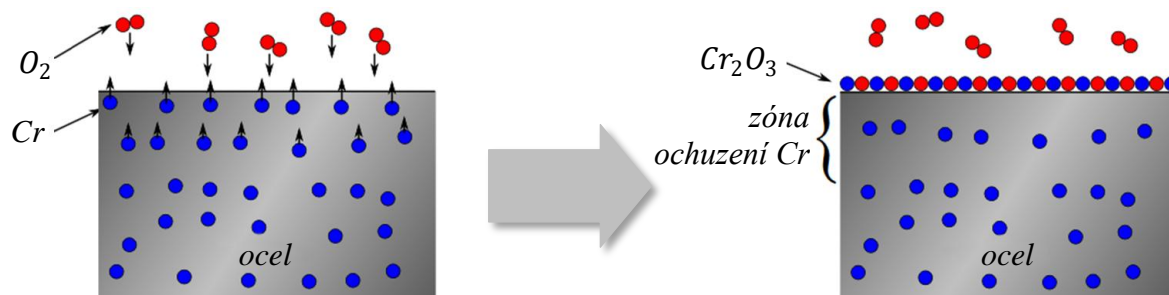
Obr. 11 Závislost účinnosti na vrcholovém úhlu [9]

Z výše uvedených výsledků je zřejmé, že nejlepšími parametry dosahuje jehlanovitý povrch s minimálním vrcholovým úhlem, tedy 10° . Zároveň je ale nutné zohlednit možnosti technologie výroby, kdy není reálné takovéto nízké hodnoty lisováním plechu dosáhnout. Z tohoto důvodu je pro další experimenty a simulace uvažována jehlanovitá struktura pouze s vrcholovým úhlem 90° a 60° .

2.2.2 Materiál absorbéru [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18],[19]

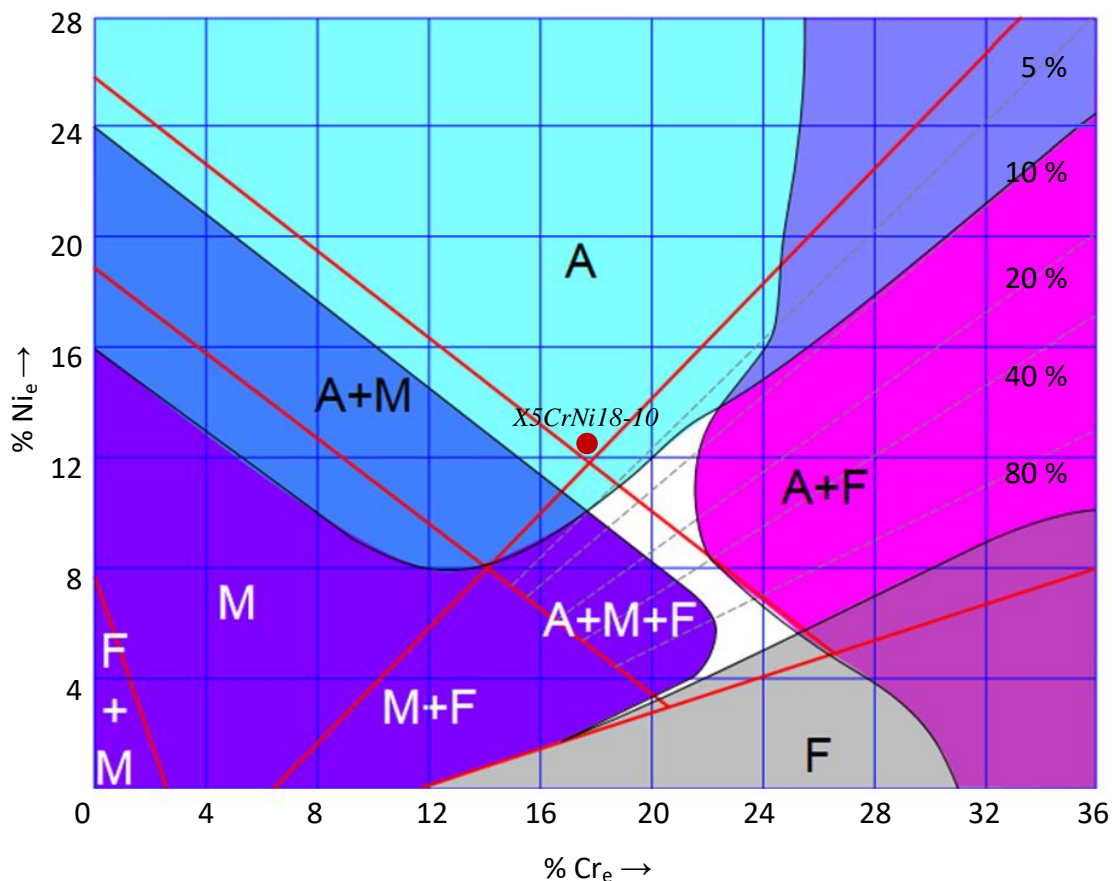
Hlavní požadavky na materiál solárního absorbéru vycházejí z omezení daných výrobními technologiemi i potřeby dosáhnout co možná nejvyšších užitečných vlastností výrobku. Technologické hledisko požaduje především dobrou svařitelnost materiálu, jakož i dobrou tváritelnost, tj. tažnost. Z hlediska funkčnosti absorbéru v rámci celého solárně termálního okruhu je potom kladen důraz na dostatečnou tepelnou vodivost současně s požadavkem na antikorozi ochranu a v neposlední řadě též cenovou dostupnost.

Výše zmíněné požadavky vedou na využití korozivzdorných ocelí, které disponují vhodnými antikoroziními vlastnostmi, a to díky tvorbě tzv. pasivační vrstvy na jejich povrchu. K pasivaci u korozivzdorných ocelí dochází, pokud je jejich povrch vystaven vlivu dostatečného množství kyslíku, viz obr. 12.



Obr. 12 Vznik pasivační vrstvy [20]

Molekuly kyslíku zapříčiní v povrchové vrstvičce oceli vznik oxidu chromu. Ke vzniku této vrstvy je nutné minimálně 11,7% zastoupení chromu v materiálu. To ovšem neplatí, pokud je chrom v oceli obsažen ve formě karbidů. Strukturu korozivzdorných ocelí lze určit na základě Schaefflerova diagramu (obr. 13).



Obr. 13 Schaefflerův diagram [20]

Scheafflerův diagram využívá tzv. přepočtové ekvivalenty, tj. chromový ekvivalent (Cr_e) a niklový ekvivalent (Ni_e), na základě kterých je určen vliv feritotvorných a austenitotvorných prvků na výslednou strukturu korozivzdorných ocelí. Výpočet zmíněných ekvivalentů vyjadřující procentuální zastoupení prvků v oceli je dán vztahy (2.1) a (2.2).

$$\%Cr_e = \%Cr + \%Mo + 1,5 \cdot \%Si + 0,5 \cdot \%Nb + 0,5 \cdot \%Ti \quad (2.1)$$

$$\%Ni_e = \%Ni + 30 \cdot \%C + 30 \cdot \%N + 0,5 \cdot \%Nb \quad (2.2)$$

Dle výsledné struktury vycházející ze Scheafflerova diagramu se poté rozeznává několik typů korozivzdorných ocelí:

- **Martenzitické korozivzdorné oceli** – tvoří je 0,1 až 1,5 % C, 12 až 18 % Cr a případné další legující prvky, jako např. Ni, Mo, Nb. Martenzitické struktury se dosahuje zakalením, tj. rychlým ochlazením austenitické oceli. Martenzitické oceli disponují pouze omezenou svařitelností, a to za podmínky obsahu uhlíku pod 0,2 %. Největší nevýhodou martenzitických ocelí je však náchylnost ke křehnutí, ať už k němu dochází při ohřevu na teploty 350 až 550 °C nebo přítomností vodíku v materiálu. Díky vysoké pevnosti i mezi kluzu nacházejí martenzitické korozivzdorné oceli využití především v energetickém, chemickém či potravinářském průmyslu.
- **Feritické korozivzdorné oceli** – jsou charakteristické obsahem C pod 0,1 % a 13 až 30 % Cr. Dalšími legurami, jako jsou Ti a Nb, lze potlačit hrubnutí zrna při vysokých teplotách. Feritické oceli jsou vhodné ke svařování, i když v okolí svaru dochází ke snížení tažnosti. Jsou nekalitelné, a tedy k ovlivnění jejich mechanických vlastností dochází pouze rekrytalizací nebo tvářením za studena. Při dlouhodobém ohřevu na teploty okolo 700 °C, ale i při pozvolném ochlazení dochází k jejich křehnutí. Proto se při tepelném zpracování zařazuje i krátkodobé žíhání (750 až 850 °C) a rychlé ochlazení. Po žíhání mají relativně nízkou mez kluzu. Feritické korozivzdorné oceli se uplatňují v automobilovém průmyslu, ale i v segmentu kuchyňského vybavení.
- **Austenitické korozivzdorné oceli** – typicky s obsahem 18 až 20 % Cr, 8 až 11 % Ni a do 0,08 % C. I při nízkých teplotách se vyznačují velmi vysokou hodnotou vrubové houževnatosti, jsou dobře svařitelné s vysokou zásobou plasticity. Oproti některým jiným korozivzdorným ocelím však disponují nižšími pevnostními charakteristikami. Vlivem působení tepla, např. při svařování, může u austenitických ocelí docházet k precipitaci karbidů $Cr_{23}C_6$, které způsobují mezikrystalovou korozi. Tomuto stavu lze ovšem předejít, a to snížením obsahu uhlíku pod 0,02 % nebo jeho navázáním na karbidy Ti či Nb, které mají vyšší afinitu k uhlíku oproti Cr. Další alternativou je provedení rozpouštěcího žíhání při teplotách okolo 1050 °C a následné rychlé ochlazení, které zabrání vzniku karbidů chromu. Používají se především v chemickém a potravinářském průmyslu, ale i např. v letectví. Typickým příkladem austenitických materiálů je ocel X5CrNi18-10, viz vyznačený bod v Schaefflerově diagramu (obr. 13).
- **Duplexní korozivzdorné oceli** – jedná se o feriticko-martenzitické, martenziticko-austenitické nebo austeniticko-feritické oceli, které jsou zároveň i nejrozšířenějším typem dvoufázových neboli duplexních korozivzdorných ocelí. Austeniticko-feritické oceli obsahují 40 až 60 % feritu. Z hlediska chemického složení obsahují 20 až 30 % Cr a 3,5 až 8 % Ni s obsahem uhlíku nepřesahujícím 0,03 %. Kombinují v sobě výhody austenitických i feritických ocelí. Jsou tak lépe obrobitelné a disponují vyšší pevností než austenitické oceli, zároveň jsou více houževnaté a lépe svařitelné než v případě feritických ocelí. Díky vysokému zastoupení feritu ovšem dochází, podobně jako u feritických ocelí, k jejich křehnutí při dlouhodobé výdrži v pásmu teplot 350 až 550 °C. Jsou dobře odolné proti koroznímu praskání, stejně jako proti mezikrystalové, bodové i štěrbinové korozi. Proto se používají ve vysoce korozivních oblastech s mořskou vodou, solemi nebo s kyselinami jako je chemický či energetický průmysl.

- **Precipitačně vytvrditelné korozivzdorné oceli** – dosahují lepších pevnostních charakteristik díky fázovému zpevnění intermetalickými precipitáty Mo, Al, Cu, Nb či Ti, tj. vyloučení Ni₃Mo, Ni₃Al, Ni₃Cu apod., které vznikají na základě nízkoteplotního popouštění (400 až 500 °C). Při tom nedochází k oxidaci povrchu materiálu ani k jeho deformacím. Proto je možné takto zpracovávané dílce nejprve obrobit a až poté provést vytvrzovací proces. Zvýší se tak tvrdost materiálu i mez kluzu a pevnosti s tažností dosahující cca 20 %. Precipitačně vytvrditelné oceli je možné dále rozdělit do dvou skupin, a to dle změny struktury při vytvrzovacím procesu. Jsou to:
 - martenzitické precipitačně vytvrditelné oceli, u nichž předně dochází vlivem tepelného zpracování k martenzitické přeměně a poté při popouštění k precipitaci intermetalických fází zvyšujících pevnost oceli,
 - austenitické precipitačně vytvrditelné oceli, u kterých nastává precipitace karbidů, nitridů nebo dalších intermetalických fází Ti, Al či V přímo při teplotách okolo 700 °C bez předešlého tepelného zpracování, a to opět s následkem výrazného zvýšení pevnosti.

Vybrané vlastnosti hlavních typů korozivzdorných ocelí, tedy austenitických, feritických a martenzitických ocelí, jsou souhrnně uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 Orientační přehled vybraných vlastností korozivzdorných ocelí [12], [13], [14]

Vlastnost		Austenitické oceli	Feritické oceli	Martenzitické oceli
Měrná hmotnost	[g·cm ⁻³]	7,8 až 8,0	7,8	7,8
Modul pružnosti v tahu	[GPa]	193 až 200	200	200
Mez kluzu	[MPa]	200 až 400	210 až 400	500 až 1000
Mez pevnosti	[MPa]	500 až 950	400 až 660	700 až 2000
Tažnost	[%]	25 až 50	18 až 25	9 až 20
Tepelná vodivost (100°C)	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	18,7 až 22,8	24,4 až 26,3	28,7
Měrná tepelná kapacita	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	460 až 500	460 až 500	420 až 460
Teplota tavení	[°C]	1 400 až 1 450	1 480 až 1 530	1 480 až 1 530

Z výše uvedené tabulky vyplývá vhodnost austenitických korozivzdorných ocelí, které disponují v porovnání s ostatními lepšími tvářecími vlastnostmi. Především se jedná o vyšší hodnoty tažnosti (řádově v desítkách procent). Z hlediska vyrobitelnosti solárních absorberů je rovněž benefitem jejich zaručená svařitelnost i když se rovněž vyznačují zhoršenou obrobitelností.

Jako výchozí materiál pro výrobu solárních absorberů tak byl zvolen plech z austenitické chromniklové korozivzdorné oceli X5CrNi18-10 (ČSN 41 7240, DIN 1.4301). Orientační chemické složení daného materiálu dle materiálového listu uvádí tab. 2.

Tab. 2 Chemické složení oceli X5CrNi18-10 [15]

%C	%Cr	%Ni	%Mn	%P	%S	%Si	%Co	%Cu	%N
0,069	17,836	8,622	0,790	0,036	0,005	0,440	0,036	0,259	0,062

Uvedený materiál vykazuje při procesu tváření či obrábění zpevňovací tendence díky přeměně austenitu na deformační martenzit. Důsledkem toho dochází rovněž ke zvýšení materiálové pevnosti a s tím spojené snížení tažnosti. Ocel se tak stává částečně feromagnetickou, což ovšem nikterak nenarušuje její korozivzdornost. Orientační mechanické vlastnosti oceli X5CrNi18-10 uvádí tab. 3.

Tab. 3 Mechanické vlastnosti oceli X5CrNi18-10 [13]

Modul pružnosti v tahu	E	[MPa]	$1,99 \cdot 10^5$
Poissonův poměr	μ	[-]	0,3
Smluvní mez kluzu	$R_{p0,2}$	[MPa]	291
Mez pevnosti	R_m	[MPa]	700
Tažnost	A_5	[%]	50

Určujícími, vzhledem k výrobě solárních absorberů, jsou rovněž termofyzikální vlastnosti materiálu, které uvádí tab. 4 v rámci základních fyzikálních vlastností.

Tab. 4 Fyzikální vlastnosti oceli X5CrNi18-10 [13]

Hustota při 20 °C	ρ	[kg · m ⁻³]	$7,9 \cdot 10^3$
Měrná tepelná kapacita	c_p	[J · kg ⁻¹ · K ⁻¹]	500
Tepelná vodivost při 20 °C	λ_t	[W · m ⁻¹ · K ⁻¹]	14,7

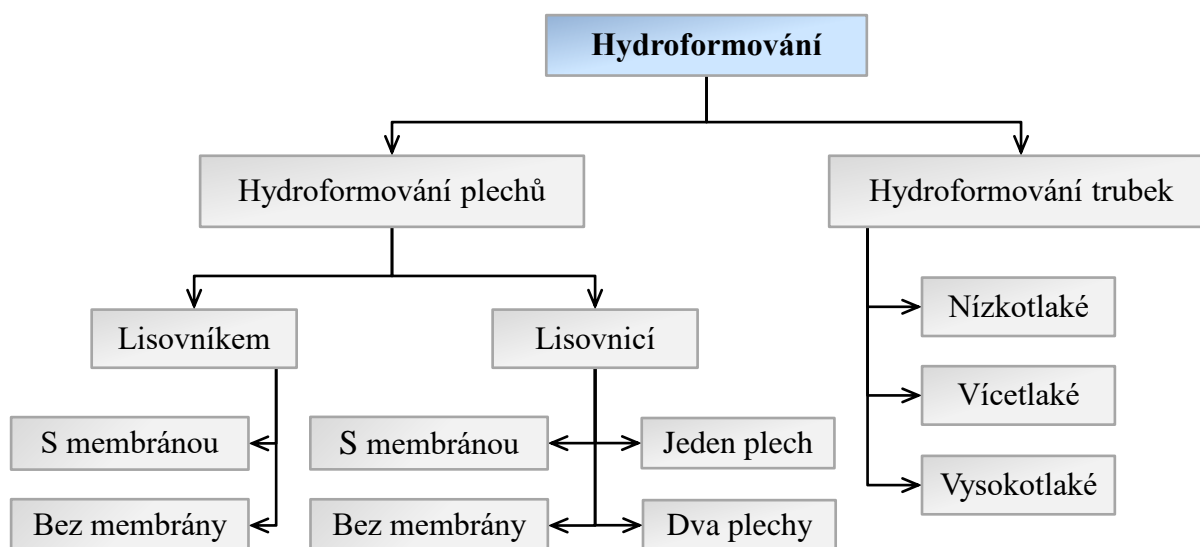
Výroba absorberů akceptující výše uvedené geometrické i materiálové požadavky potom vede při uvažování vysoce složitěho strukturovaného povrchu a velkých rozměrů solárních panelů (1000 × 1000 mm) na využití technologie hydroformování plechových polotovarů v součinnosti s dalšími technologiemi, jako je laserové svařování či termální vrtání.

3 TECHNOLOGIE HYDROFORMOVÁNÍ [12], [21], [22], [23], [24], [25]

Hydroformování nebo také hydroforming představuje metodu plošného tváření, která pro přetvoření polotovaru do požadovaného tvaru užívá namísto pevných nástrojů, jako je tomu např. u metody hlubokého tažení, tlaku kapalinného média. To působí rovnoměrnější rozložení přetvoření po celém povrchu tvářeného dílce. V porovnání s ostatními konvenčními metodami je tak možné touto technikou docílit složitějších tvarů výlisků o větší pevnosti při nižších nákladech na výrobu. Tento fakt plyne ze skutečnosti, že hydroformovací proces redukuje počet výrobních operací, a to obvykle pouze do jediné. Zpravidla se tato skládá z umístění polotovaru do dutiny nástroje, jeho uzavření a aplikace tlaku formovacího média, které zplastizuje polotovar, přičemž obvyklé povýrobní úpravy, jako např. vytvoření otvorů, lze provést v jednom kroku zároveň s hlavní tvářecí operací, kdy je polotovar pod tlakem tvářecího média.

Se zvyšováním formovacího tlaku dochází rovněž ke zvyšování přetvoření. Tvářitelnost materiálu polotovaru je tak do jisté míry závislá na jeho mechanických vlastnostech. S výhodou se proto používají materiály s vyšší hodnotou tažnosti. Krom nízkouhlíkových ocelí jsou užívány rovněž hliníkové slitiny, austenitické a feritické korozivzdorné chromniklové oceli, slitiny mědi a za vyšších tvářecích teplot (200 °C) i slitiny hořčíku. Lze však konstatovat, že materiálové potřeby se liší metoda od metody.

Základní rozdělení hydroformovacích metod, taktéž uvedené na obr. 14, zohledňuje podobu polotovaru a dělí tak danou technologii na hydroformování plechů a trubek. Obě zmíněné oblasti mají svá specifika, příp. nabízejí i další možnosti rozdělení.



Obr. 14 Základní rozdělení hydroformovacích metod [24], [25]

3.1 Hydroformování trubek [12], [22], [24], [25], [26], [27], [28]

Proces hydroformování trubkových polotovarů vychází v principu z přivedení kapaliny do trubky, čímž se tlak uvnitř ní zvýší na úroveň potřebnou pro tváření. Působením tohoto tlaku na vnitřní stěnu trubky dochází k formování polotovaru dle tvaru dutiny lisovnice, ve které je trubkový polotovar sevřen. Mnoho technologií navíc využívá přídavného axiálního působení lisovníků či pomocných bočních nástrojů. Hydroformování trubek lze aplikovat na celou škálu typů trubkových polotovarů.

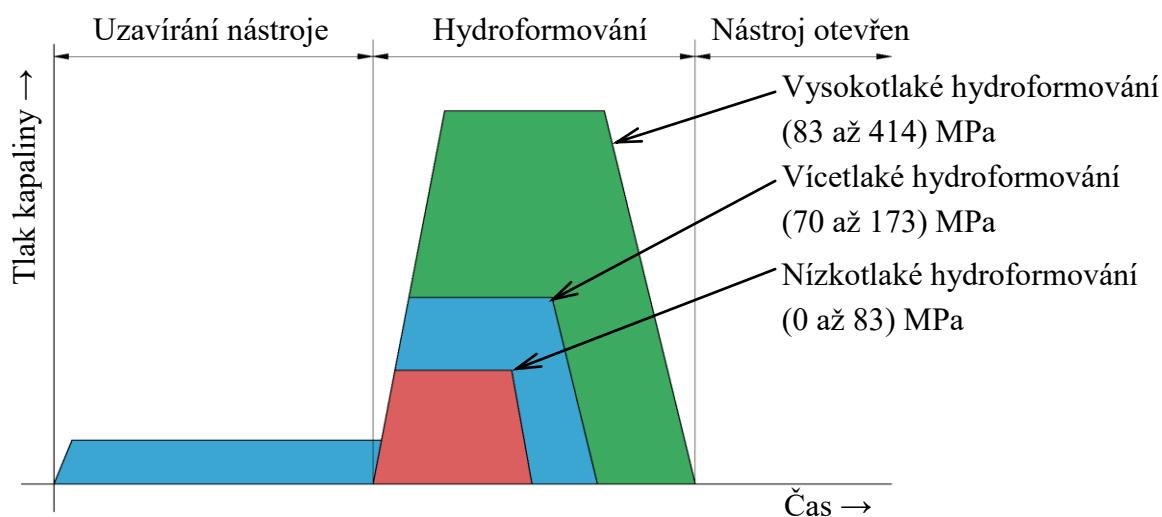
Krom klasických švových nebo bezešvých trubek se jedná např. o kuželové polotovary, trubky svařené z více částí o různých tloušťkách i materiálových vlastnostech nebo duté profily nejrůznějších průřezů i s přírubami s tloušťkami stěn až do 10 mm o průměrech 150 mm i více.

Hydroformováním trubek lze vyrábět dílce rozličných tvarů, jak ukazuje přehled tvarových skupin dílců na obr. 15. Jedná se o výlisky s přímou osou, s osou jednou či vícekrát v ploše lomenou nebo prostorně ohnutou.



Obr. 15 Příklady tvarových skupin dílců trubkového hydroformování [29], [30], [31], [32], [33]

Literatura [12] rozděluje metody hydroformování trubek primárně dle používaných tlaků celkem na tři kategorie: nízkotlaké, vícetlaké a vysokotlaké hydroformování. Orientační průběhy formovacích tlaků jednotlivých metod v závislosti na čase uvádí obr. 16.



Obr. 16 Řízení formovacího tlaku v jednotlivých etapách hydroformování trubek [12]

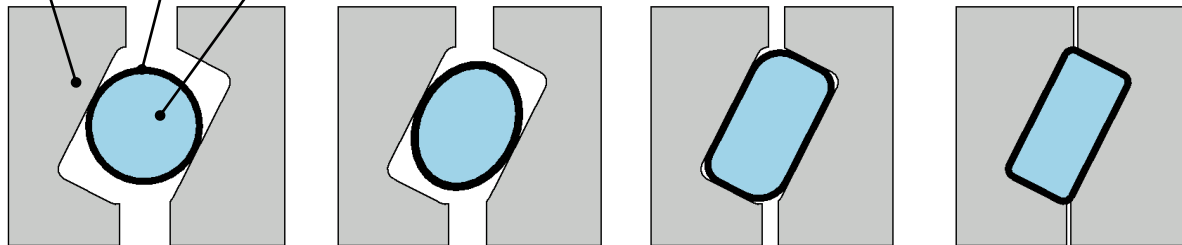
3.1.1 Nízkotlaké hydroformování [12], [24], [25], [34]

Při nízkotlakém hydroformování plní tlaková kapalina uvnitř tvářené trubky spíše pomocnou roli opory průřezu proti jeho zborcení, jak ukazuje obr. 17. K tvářené trubce je nejprve z jedné strany připojena záslepka a ze strany druhé je do ní přivedena kapalina. Tlak v trubce je zatím zanedbatelný. Začne se ovšem zvyšovat, když se nástroj započne uzavírat. Jelikož kapalina uvnitř tvářeného polotovaru zaujímá stále stejný objem, nedojde během tváření ke zborcení jeho průřezu ani ke změně tloušťky stěny.

Rovnoměrné rozložení tlaku kapaliny rovněž přispívá ke zvýšení kvality povrchu tvářené součásti. Při úplném uzavření nástroje v závěru tvářecí operace dojde k řízenému navýšení tlaku kapaliny, čímž se trubka zkalibruje do finálního tvaru.

Obdobný princip lze využít jako stabilizační prvek i v procesu ohýbání trubek a profilů. Zaplnění dutiny ohýbané součásti kapalinou napomáhá zamezení defektů typu zvlnění stěny na vnitřní straně ohybu či vzniku ovality průřezu.

Nástroj Trubka Kapalina



a) předvýrobní fáze

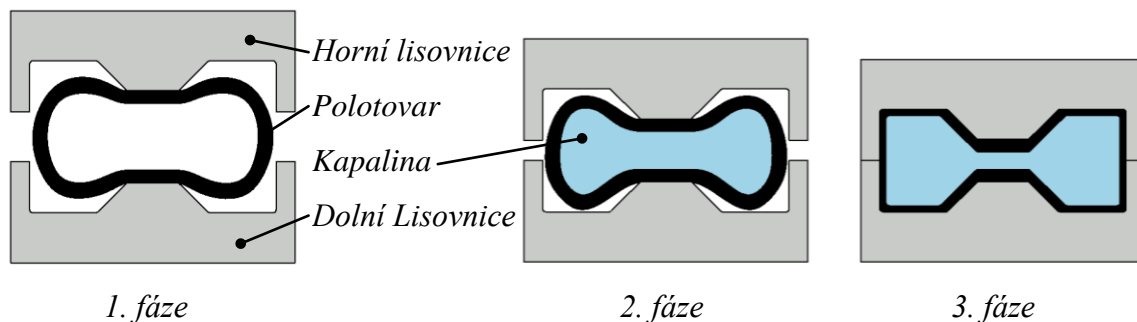
b) uzavírání nástroje – hydroformování

c) kalibrace tvaru

Obr. 17 Princip nízkotlakého hydroformování [25]

3.1.2 Vícetlaké hydroformování [12], [22], [24], [25], [28], [35]

Varianta nízkotlakého hydroformování, tzv. vícetlaké nebo postupové hydroformování, dovoluje výrobu tvarově složitých výlisků i s montážními otvory. Principiální schéma z obr. 18 zobrazuje tři základní fáze této metody. V první etapě je polotovár – trubka založen do nástroje, při čemž dochází k jeho částečnému lisování mezi horní a dolní částí nástroje. Teprve ve druhé fázi je dutina polotovaru naplněna kapalinou. Pracovní tlak, který se tím vyvine na stěny trubky, se pohybuje cca od 35 MPa do 70 MPa. Následuje dovírání nástroje, kdy tlak kapaliny uvnitř dílce usnadňuje materiálový přesun.



1. fáze

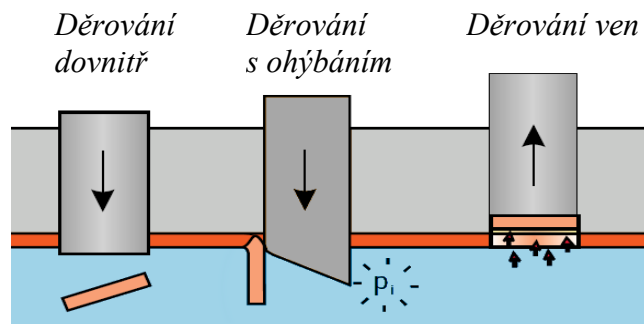
2. fáze

3. fáze

Obr. 18 Princip vícetlakého hydroformování [35]

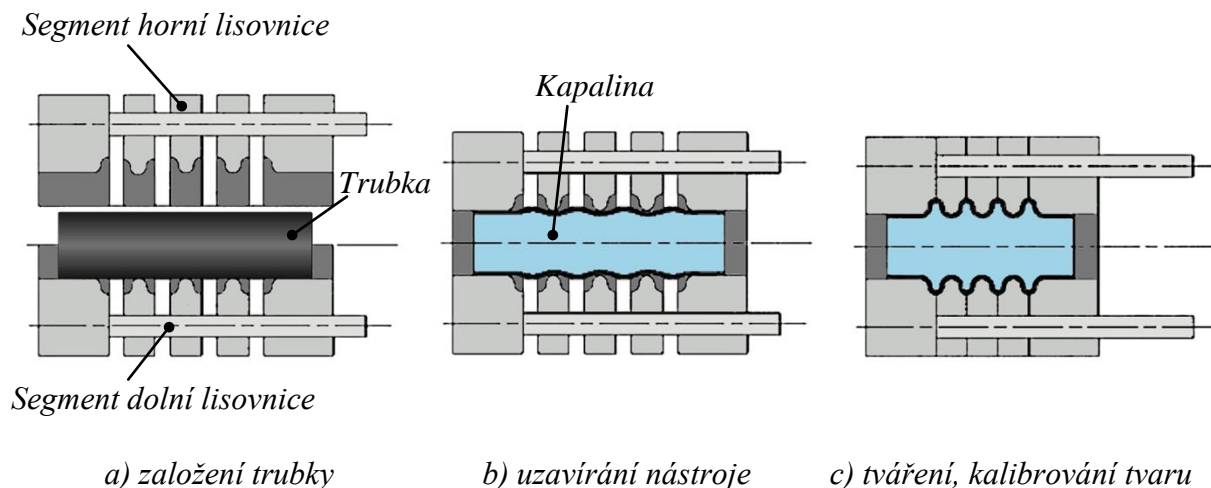
Jakmile je nástroj zcela uzavřen (3. fáze), tlak uvnitř polotovaru se pro dolisování zbylých částí výlisku zvýší na kalibrační hodnotu cca 170 MPa, při které dojde k plnému vylisování požadovaného tvaru součásti.

Užitím vyššího tlaku je také možné v součinnosti se střížnými nástroji zhotovit ve stěně výlisku montážní díry, lemy apod., viz obr. 19. Sdružení operací hydroformování a stříhání (ohýbání) v jedinou zabezpečuje velmi přesnou polohu zhotovených otvorů, neboť odpadají problémy s případným polohováním v přípravcích.



Obr. 19 Děrování s hydroformováním [28]

Pro vytváření složitěji tvarovaných dílců se potom používají segmentové nástroje, jak ukazuje obr. 20 znázorňující výrobu vlnovců. Tato technika je vhodná zvláště pro formování tenkostěnných trubek, u kterých by bylo jakékoliv výraznější ztenčení stěny nežádoucí. Po založení trubky do spodní části nástroje se segmenty horní lisovnice začnou uzavírat, zatím jen v radiálním směru. Současně s uzavíráním nástroje je do trubky přivedena kapalina mírně vydouvající stěny trubky tak, aby usnadnila přesun materiálu do dutin nástroje. V závěrečné fázi jsou k sobě jednotlivé segmenty nástroje stlačeny také v axiálním směru, čímž je materiál zformován. Následuje kalibrační fáze za zvýšeného tlaku kapaliny uvnitř dutiny dílce.



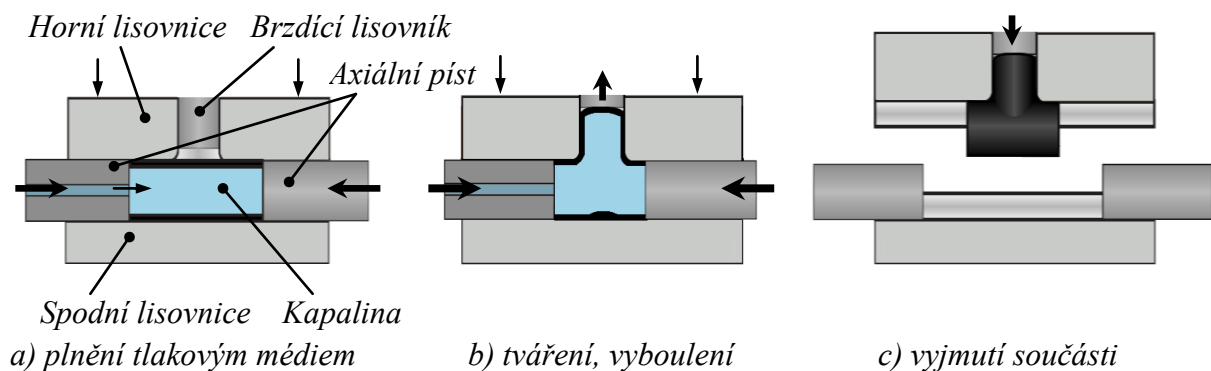
Obr. 20 Princip hydroformování vlnovců [12]

3.1.3 Vysokotlaké hydroformování [12], [22], [24], [25], [26]

Rozsah tlaků používaných při vysokotlakém hydroformování bývá v porovnání s ostatními výše popsány metodami až několiknásobně vyšší (od 83 MPa do 414 MPa). Vyšší tlak umožňuje tvářet polotovary rozšířením jejich průřezů dle tvaru lisovnice až na hranice dovoleného přetvoření – ztenčení stěny, k čemuž dochází především v rohových částech výlisku.

Vyšší tlak a tedy i vyšší přetvoření s sebou přináší i zvýšenou pevnost dílců, menší podíl odpružení a tím také lepší řízení tvaru výlisku. Zároveň ale klade vyšší požadavky na robustnost nástroje a jeho těsnost. Tvářecí proces rovněž vyžaduje vyšší jakost povrchu dutiny nástroje a užití maziv, aby se zamezilo nadměrnému lokálnímu materiálovému ztečení vlivem působení tření. Tomu lze rovněž předcházet dotlačováním konců tvářené trubky do dutiny nástroje v průběhu hydroformování.

Typickým příkladem využití vysokotlakého hydroformování je výroba nejrůznějších typů tvarovek (např. tvar „Y“ nebo „T“), jejíž princip je znázorněn na obr. 21.



Obr. 21 Princip vysokotlakého hydroformování [28]

Trubkový polotovár je založen do nástroje, který se začne uzavírat. Konce trubky jsou utěsněny axiálními písty, jež zároveň plní funkci lisovníků. Při zvýšení tlaku kapaliny na pracovní hodnotu (obr. 21b) dochází k expandování materiálu se současným působením axiálního tlaku lisovníků – pístů. Brzdící lisovník působí proti nekontrolované vybočení střední části dílce. Po skončení lisovací operace při otevření nástroje zároveň usnadňuje vyjmutí dílce.

3.2 Hydroformování plechů [12], [23], [24], [25], [36]

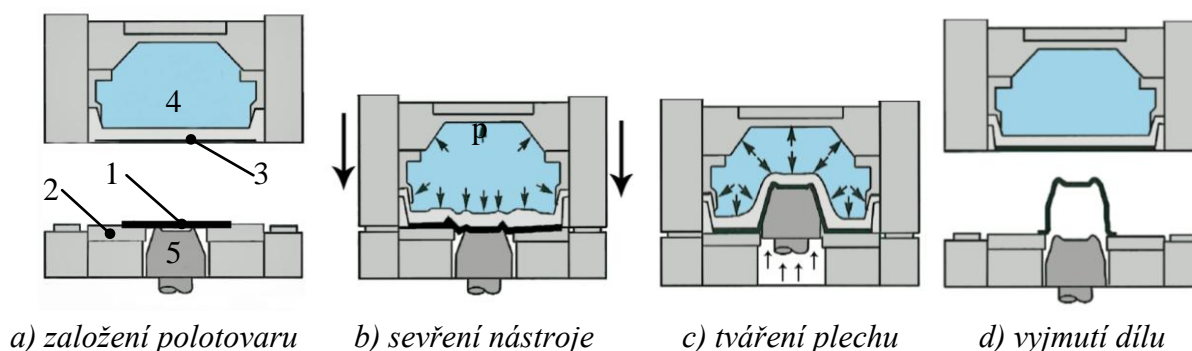
Hydroformování plechových dílů někdy označované jako SHF (z anglického sheet hydroforming) je zaměřeno na tváření jednoho nebo dvou plechových polotovarů tlakem kapaliny v dutině nástroje. Kapalina může působit pouze pomocným protitlakem při tváření lisovníkem, potom lze hovořit např. o tzv. hydromechanickém tažení, nebo způsobuje svým tlakem přetvoření polotovaru přímo v součinnosti s dutinou lisovnice, a to v oboru vysokotlakého hydroformování. Tehdy se jedná přímo o tzv. tváření tlakem kapaliny.

Díly vyráběné hydroformováním plechů mohou dosahovat široké škály tvarů a průřezů. Jedná se především o mělké výlisky používané v automobilovém průmyslu, jako části karoserií, ale také o hluboké výtažky rotačně symetrického i nesymetrického tvaru, taktéž tvarově vysoce členité dílce otevřené nebo duté typu nádrží apod., viz obr. 1, který ukazuje typické představitele dílců tvářených hydroformováním.

3.2.1 Hydroformování plechů lisovníkem [12], [24], [25], [28], [37], [38], [39]

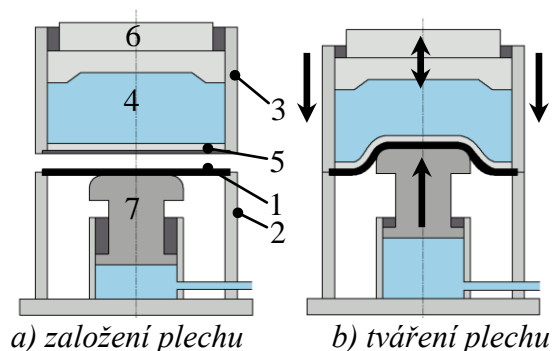
Při tváření hydroformováním s podporou lisovníku je pevná lisovnice, jež se užívá při konvenčních metodách tváření, nahrazena tlakem kapaliny. Ten působí na tvářený materiál buďto přímo, potom je ovšem nutné řešit problémy spojené s těsněním celého systému, nebo přes membránu. Tlak může být řízen externím čerpadlem nebo působit pouze pasivně. V každém případě je ovšem nutné během zdvihu lisovníku tlak kontrolovat a příp. regulovat.

Nejstarší metodou hydroformování s lisovníkem, která rovněž dala celému konceptu tváření za pomoci kapaliny jméno, je metoda Hydroform. Vlastní tvářecí postup uvedený na obr. 22 začíná založením polotovaru – plechového přístřihu (1) přes zakládací dorazy do dolního přídržovače (2). Polotovár může být pro zlepšení lisovacího procesu potažen vrstvou vhodného maziva. Při sevření nástroje dochází k dosednutí membrány (3), jež může být opatřena povlakem snižujícím opotřebení, na polotovár a zvýšení tlaku v lisovací komoře (4) na požadovanou hodnotu. Poté již hydraulicky řízený lisovník (5) vybavený výměnnou tvarovou částí proniká do lisovací komory a dochází tak k tváření polotovaru mezi lisovníkem a membránou, která díky působícímu tlaku (obvykle desítky až stovky MPa) přilne k tvářenému materiálu. Po odlehčení nástroje do původní polohy lze vyjmout hotový dílec.



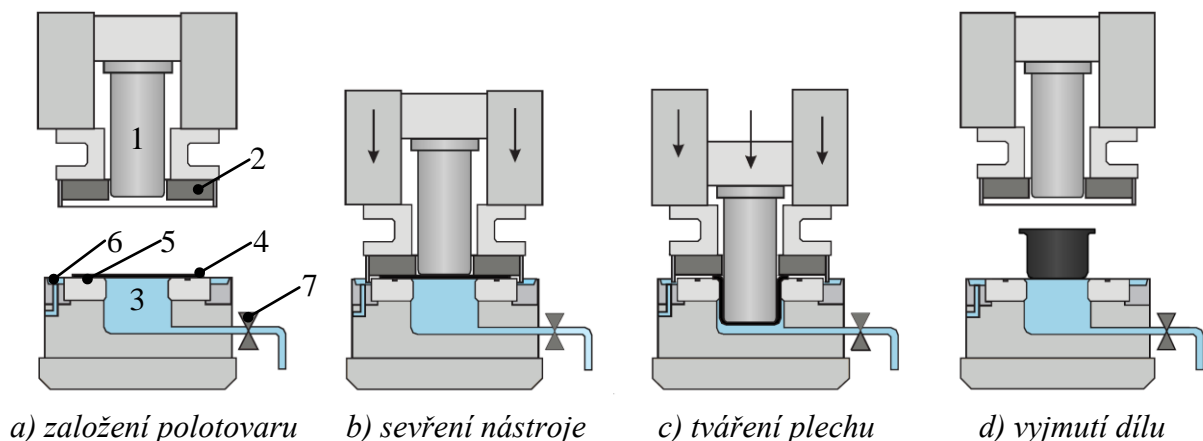
Obr. 22 Princip tváření metodou Hydroform [37]

Za modifikaci systému Hydroform může být považována metoda ASEA, jež byla vyvinuta především pro tváření rozměrnějších dílů. Její princip znázorňuje obr. 23. Po založení polotovaru (1) do spodního rámu nástroje (2) dochází k jeho sevření, při čemž horní rám nástroje (3) slouží jako přidržovač. V horním rámu se rovněž nalézá komora s kapalinou (4), která je utěsněna ve spodní části membránou (5) a v horní části pístem (6) regulujícím tlak uvnitř komory. Přivedením kapaliny pod píst lisovnicku (7) se tento začne vtlačovat do horní komory s tlakovou kapalinou, kde tak roste tlak a dochází k přetvoření polotovaru. V dalším lze pohybem horního pístu směrem dolů vyvodit tzv. kalibrační tlak, a tak dolisovat i ty nejmenší části budoucího výlisku. Nespornou výhodou zmíněných metod je jejich variabilita i schopnost tvářet polotovary rozmanitých tloušťek (0,2 až 10 mm). Delší výrobní časy (přibližně 30 sekund/díl), a to především díky prodlevě při regulaci tlaku, představují naopak jednu z hlavních nevýhod těchto metod. Dalším omezením je vcelku nízká životnost membrány, tj. bez povlakování 500 až 1500 zdvihů podle materiálu.



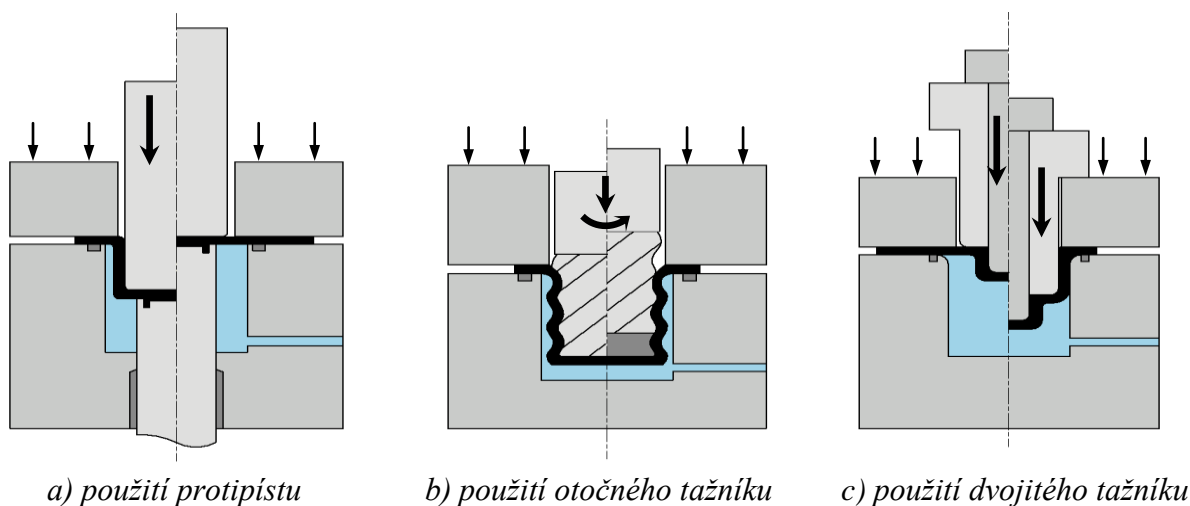
Obr. 23 Princip metody ASEA [38]

Tuto nevýhodu eliminuje tzv. hydromechanické tažení, které úplně odstraňuje zmíněnou membránu. Nástroje užívané pro hydromechanické tažení, viz obr. 24, se tak v základu skládají z lisovnicku – tažníku (1), přidržovače (2) a nádrže s tlakovou kapalinou, tj. s olejem nebo vodní emulzí (3), upnutými do pracovního prostoru dvojčinného nebo trojčinného lisu. Okraje polotovaru (4) jsou při sevření nástroje utěsněny tlakem přidržovače, který jej natlačuje na těsnící pryžové vložky (5). Během lisovacího procesu je tažník vtlačován přes polotovar směrem do nádrže s kapalinou, která na něj působí hydrostatickým tlakem řízeným regulátorem tlaku (7). Absence membrány v tomto případě umožňuje kapalině ideálně kopírovat geometrii tažníku. Oproti membránovým technologiím se ale hydromechanické tažení musí potýkat s obtížnějším utěšňováním proti úniku tlakové kapaliny. Proto je obvykle spodní část nástroje vybavena drážkami pro odvod prosakující kapaliny (6).



Obr. 24 Princip tváření metodou hydromechanického tažení [28]

Zanedbání membrány rovněž umožňuje hydromechanickému tažení použití přidavných nástrojů, které by s membránou jinak nebylo možné aplikovat. Například použití protipístu (obr. 25a) dovoluje tažení tenkých nebo křehkých materiálů, které by jinak nebylo možné tvářet. Zde ale protipíst podpírá dno výtažku, které se tak neutrhne. Další možností je užití otočného tažníku (obr. 25b), a to zejména v těch případech, kdy je třeba tvářet výtažek se šroubovým povrchem. K výrobě odstupňovaného dílce je zase vhodná varianta hydromechanického tažení s dvojitým tažníkem (obr. 25c). Mezi další patří např. varianty zpětného tažení, užití pohyblivé komory apod.



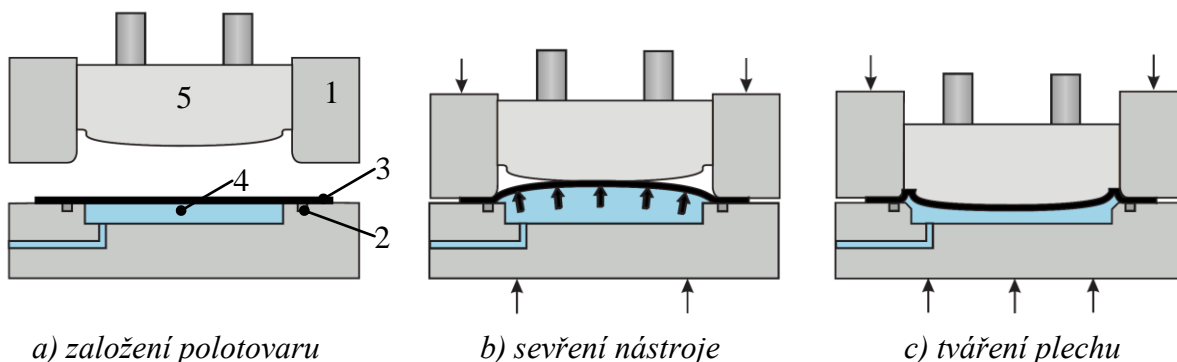
a) použití protipístu

b) použití otočného tažníku

c) použití dvojitého tažníku

Obr. 25 Vybrané varianty hydromechanického tažení [39]

Pro docílení vyššího zpevnění výlisků, obzvláště u mělkých dílců, existuje též modifikace hydromechanického tažení nazývaná aktivní hydromechanické tažení (active hydro-mec). Princip uvedený na obr. 26 je obdobný, jako u klasického hydromechanického tažení. K utěsnění systému před vlastním lisováním opět slouží přidržovač (1) v součinnosti s těsníci elementy (2). Po počátečním sevření plechu (3) ovšem nedochází k tažení, ale tlakem kapaliny v nádrži (4) probíhá nejprve mírné vyduť polotovaru. Teprve ve druhé fázi je tažník (5) beranem lisu uveden do pohybu a probíhá klasické hydromechanické tažení. V závěru tvářecí operace dochází k navýšení tlaku kapaliny, kterým se provádí závěrečná kalibrace tvaru výtažku.



a) založení polotovaru

b) sevření nástroje

c) tvářecí plechu

Obr. 26 Princip tvářecí metodou aktivního hydromechanického tažení [28]

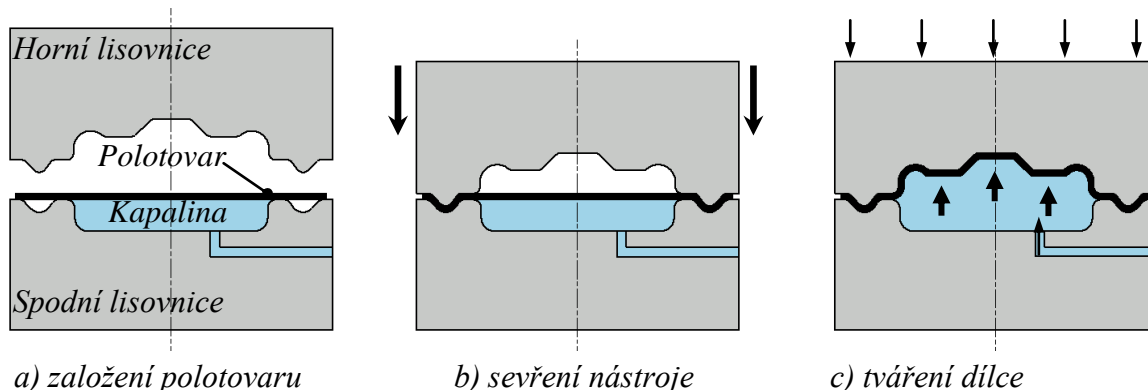
Tímto způsobem lze lisovat poměrně složité tvary s velkou geometrickou přesností pouze jedinou operací. Navíc se při použití optimální tvářecí kapaliny dosahuje poměrně vysoké jakosti povrchu. Lze tak tvářet i materiály, jež jsou dopředu povlakovány. Nevýhodou však, kvůli utěsnění systému, zůstává nutnost tvářet dílce s přírubou.

3.2.2 Hydroformování plechů lisovnicí [2], [12], [23], [24], [25], [40], [41], [42]

Hlavními částmi nástroje při hydroformování polotovaru lisovnicí je hydraulická tlaková komora a lisovnice určující budoucí tvar výlisku. Lisovnice může být dle potřeby umístěna v dolní nebo horní části nástroje. Kapalina se zde již zcela aktivně podílí na přetvoření polotovaru. Výhodou popisovaného systému je fakt, že nástroje nemají žádné pohyblivé lisovací části.

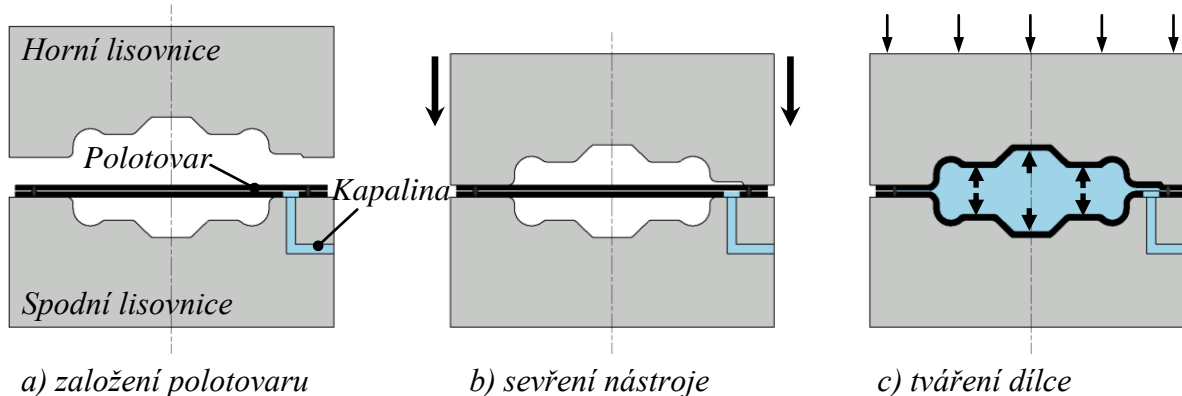
K základním metodám hydroformování lisovnicí patří bezesporu tzv. tvářecí tlakem kapaliny (hydro-stretch forming) viz obr. 27. Po založení přístřihu plechu jsou jeho okraje sevřeny a utěsněny mezi dolní a horní částí nástroje. Tlakem kapaliny se poté plech vytvaruje dle negativního tvaru dutiny nástroje. K tomu je samozřejmě zapotřebí vysokého tvářecího tlaku, který musí překonat odpor materiálu.

Proto klade tato metoda vysoké nároky na přidržovací sílu. Tento proces má ovšem zjevné výhody oproti klasickému řešení, protože absencí potřeby lisovnicku snižuje výrobní náklady a díky kapalině, která eliminuje tření, lze také shodně s hydromechanickým tažením dosáhnout rovnoměrnějšího rozložení tloušťky materiálu.



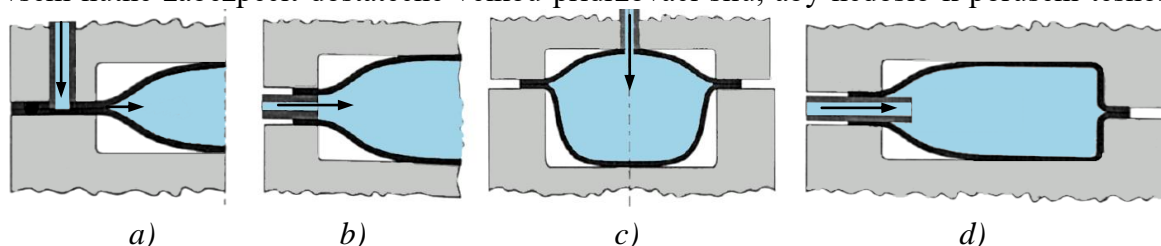
Obr. 27 Princip tváření tlakem kapaliny [12]

V současnosti velmi využívanou variantou uvedeného principu je kapalinné tváření nikoliv jednoho, ale dvou plechů. Metoda s názvem paralelní hydroformování nebo též pillow hydroforming řeší problematiku výroby dutých tvarově složitých součástí. V principu, viz obr. 28, jsou do nástroje vloženy nad sebe dva plechové přístříhy, které jsou většinou po obvodu svařeny. Tím je zabezpečena těsnost systému i správné ustavení plechů vůči sobě. Po sevření horní a spodní části nástroje – lisovnice je do mezery mezi plechy přivedena tlaková kapalina, která začne přetvářet oba plechy. Toto místo je však často zdrojem netěsností, a proto se v některých případech umísťuje do prostoru přívodu kapaliny do plechu šroubení, které se po skončení lisování odstraní. Finální tvar výlisku potom kopíruje geometrii dutiny nástroje, tj. obou lisovnic.



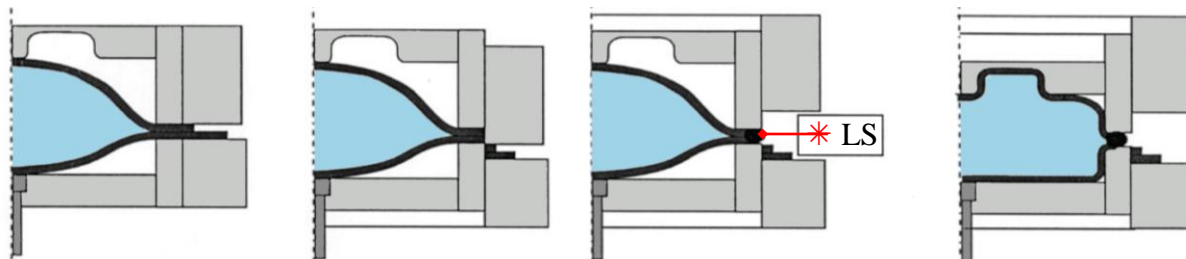
Obr. 28 Princip tváření metodou paralelního hydroformování [12]

Způsoby ustavení plechů v nástroji, jakož i možnosti přívodu tlakového média a utěsnění tvářecího systému proti jeho možnému úniku se mohou různit. Plechy mohou být svařeny s přívodem tlakové kapaliny přes jeden z nich (obr. 29a) nebo lze použít svařené zakroužené plechy (obr. 29b). Polotovary rovněž nemusí být svařeny vůbec (obr. 29c, d). Potom je ovšem nutné zabezpečit dostatečně velkou přidržovací sílu, aby nedošlo k porušení těsnosti.



Obr. 29 Příklady ustavení polotovaru při tváření metodou paralelního hydroformování [21]

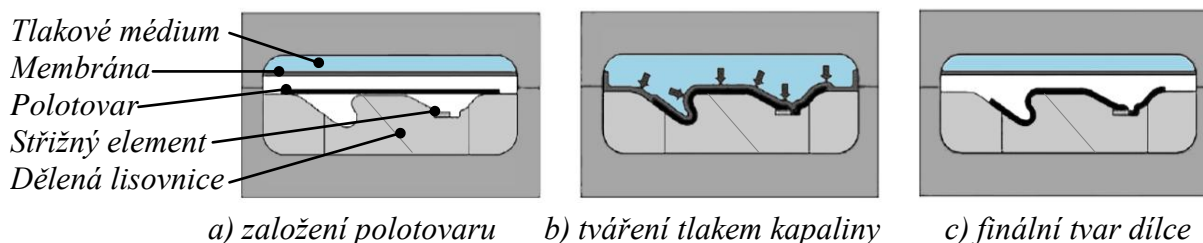
Existuje hned několik výhod systému paralelního hydroformování. Především jde o již zmíněnou možnost produkovat duté výlisky rozmanitých tvarů během jediné operace. Odpadá tak dodatečné spojování obou polovin výrobku, které bývá problematické většinou díky obtížnému přípravkování. Metoda je vhodná zvláště pro výlisky typu nádrží apod., kde se otvor přívodu tlakové kapaliny nemusí odstraňovat a slouží i jako funkční část výrobku. Rovněž lze s výhodou integrovat do jednoho celku několik operací výroby, viz obr. 30.



a) hydroformování b) ostřížení okrajů c) laserové svařování d) hydrokalibrování

Obr. 30 Integrace operací tváření, stříhání a svařování [21]

I v oblasti hydroformování lisovnicí existují postupy využívající pryžové membrány. Jedním ze zástupců zmíněného je metoda Flexform, jež se používá obzvláště tehdy, je-li potřeba vyrobit v jedné operaci dílce s negativním povrchem s malými rádií nebo dokonce s prostříženými částmi. Aby bylo možné takto složitý tvar po skončení tvářecí operace vyjmout, polotovar se lisuje v dutině nástroje s dělenou lisovnicí, viz princip na obr. 31. Činnost lisovnicku zde nahrazuje vysoce rozpínavá pryžová membrána, na kterou působí tlakové médium, většinou olej. Lisovací tlaky mohou vzhledem k tvarové složitosti výlisků dosahovat i cca 140 MPa. To samozřejmě klade vysoké požadavky na pevnost nástroje, především pak na odolnost zmíněné membrány. Po vyformování dílce je uvolněn tlak kapaliny a membrána zaujme výchozí tvar.

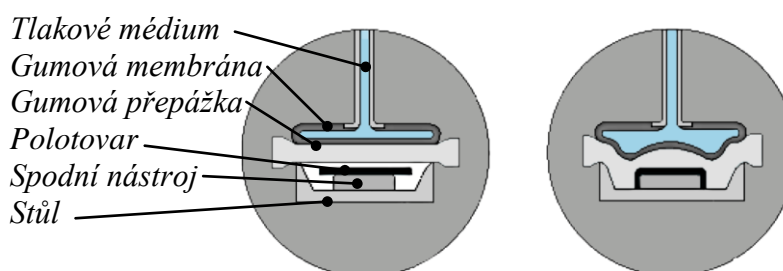


a) založení polotovaru b) tváření tlakem kapaliny c) finální tvar dílce

Obr. 31 Princip tváření metodou Flexform [41]

Další možnost představuje metoda Wheelon někdy též označovaná jako Verson – Wheelon. Ta mimo jiné umožňuje u méně rozměrných dílců zařazení více lisovacích jednotek za sebe a tím také zkrácení výrobního času. Rovněž lze v jednom stroji vyrábět najednou více tvarově odlišných dílů. Koncepce nástroje ve většině případů vychází z tubusového tvaru (obr. 32).

Tlaková kapalina je čerpána do pracovního prostoru a přes gumovou membránu působí na polotovar, který se začne formovat do tvaru dle spodního nástroje. Mezi membránu a polotovar se obvykle umísťuje gumová přepážka prodlužující životnost membrány.



Obr. 32 Princip Tváření metodou Wheelon [42]

Z výše popsaných principiálních schémat jednotlivých metod hydroformování trubek a plechů s uvážením požadavků na výrobu vycházejí hlavní výhody hydroformování. Mezi významné benefity patří:

- lepší tvářitelnost,
- vyšší zpevnění tvářeného materiálu,
- vyšší kvalita povrchu dílců,
- vyšší rozměrová přesnost,
- nižší cena nástrojů,
- redukce počtu tvářecích operací.

Naproti tomu limitace hydroformovacích procesů je do jisté míry dána především závislostí technologie na tlakové kapalině a velikosti tlaku, který je pro tváření potřeba. Nejmarkantnějšími nevýhodami hydroformování tak jsou:

- delší čas výrobního cyklu,
- vyšší silové nároky na výrobní stroje a zařízení (potřeba velké uzavírací síly),
- zvýšené požadavky na těsnost systému.

Z provedené literární rešerše vyplývá pro výrobu solárního absorbéru dle koncepce nastíněné v kap. 2.2 jako nejvhodnější metoda paralelního hydroformování dvojice laserem svařených plechů. Tímto řešením se usnadní výroba, neboť nebude nutné řešit složité ustavování a svařování dvojice již vylisovaných dílců. Dále budou otvory pro přívod tlakového média s výhodou využity i jako funkční části výrobku, tj. pro vstup a výstup teplotnosného média.

Vzhledem k řešené problematice v rámci disertační práce bude v dalším teoretický rozbor omezen pouze pro případy hydroformování plechů.

4 STANOVENÍ TVÁŘECÍCH LIMITŮ [21], [25], [27], [43]

Úspěšnému použití té které metody hydroformování musí předcházet analýza všech prvků systému, které se podílejí na tvářecím procesu a mohou ho tak ovlivnit. Jedná se především o parametry:

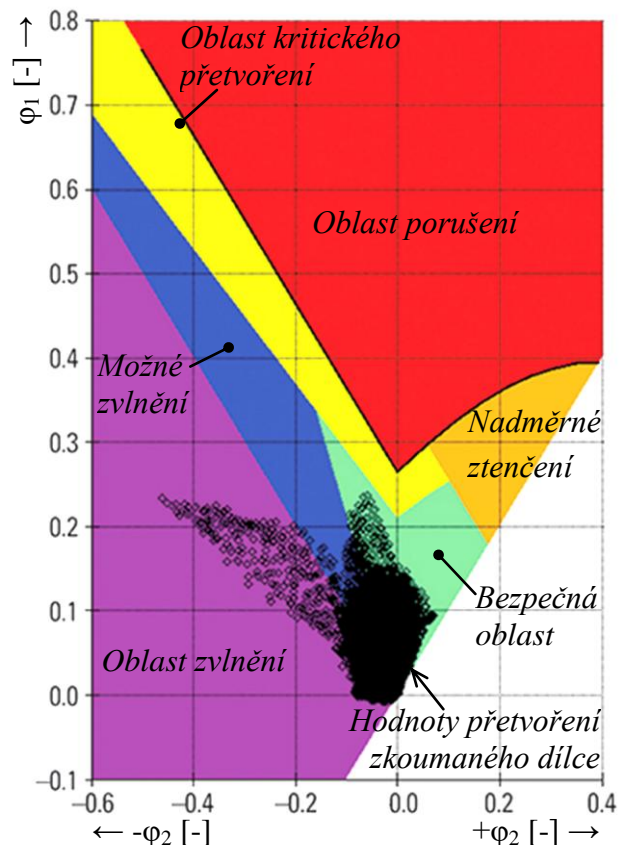
- vyráběných dílů (požadované rozměry a vlastnosti),
- polotovaru (materiál a geometrie),
- nástrojů (materiál, geometrie, počet pohyblivých a nepohyblivých částí, sevření),
- rozhraní polotovaru – nástroj (tření – mazivo, topografie povrchu, těsnost systému),
- výrobního stroje (silové a časové poměry, možnosti řízení procesu),
- procesu výroby (vztah mezi užitým tlakem kapaliny a vnější tvářecí nebo přidržovací silou, rychlostí tváření či zdvihem).

Uvedené parametry musejí být provázány tak, aby bylo dosaženo požadované kvality výlisků a nedocházelo v průběhu tvářecí operace k nežádoucím jevům vedoucím až k možným defektům, tj. zvlnění stěn, tvorba přeložek nebo kritické ztenčení stěn směřující v některých případech až k tvorbě trhlin na těle výlisku. Tato základní problematika bývá řešitelná s využitím celé řady experimentálních, teoreticko-experimentálních nebo teoretických metod vycházejících především ze stanovení napjatostních (deformačních) charakteristik.

4.1 Diagram mezní tvářitelnosti [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51] [52], [53], [54], [55], [56], [57]

Pomine-li se zjišťování mezní tvářitelnosti samotného materiálu polotovaru s využitím elementárních experimentálních analýz, jako je např. tahová zkouška apod., potom typickou analýzou zaměřenou na zjišťování tvářecích limitů materiálu lisovaného dílce představují limitní křivky (pásma) diagramů mezní tvářitelnosti (FLD) dle Keelera a Goodwina, tzv. Keeler-Goodwinův diagram. Na obr. 33 je zobrazen příklad diagramu mezní tvářitelnosti s vyznačením jeho základních oblastí.

V souřadném systému představujícím hlavní poměrná nebo logaritmická přetvoření ε_1 a ε_2 , resp. φ_1 a φ_2 , jsou zkonstruovány křivky, které představují předěl mezi bezpečnou oblastí a zónou porušení materiálu. Kromě základních křivek indikujících porušení materiálu (vznik trhlin) lze rovněž v diagramu určit oblasti výskytu dalších vad, jako je např. oblast zvlnění materiálu.



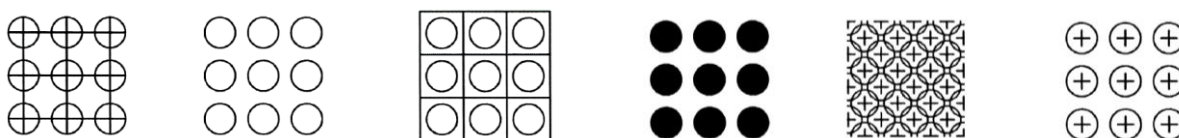
Obr. 33 Diagram mezní tvářitelnosti [45]

Do diagramu se po jeho zkonstruování zakreslují body, tj. hodnoty hlavních přetvoření na zkoumaných místech výlisků. Dle rozmístění bodů v diagramu mezní tvářitelnosti lze identifikovat místa s nevhodnou napjatostí, kritickým ztenčením materiálu nebo jeho porušením apod.

Limitní křivky je možné určit teoreticky, na základě matematických modelů, nebo hybridní cestou s využitím numerické simulace. Nejrozšířenějším postupem je ovšem stále experimentální stanovení křivek mezní tvářitelnosti.

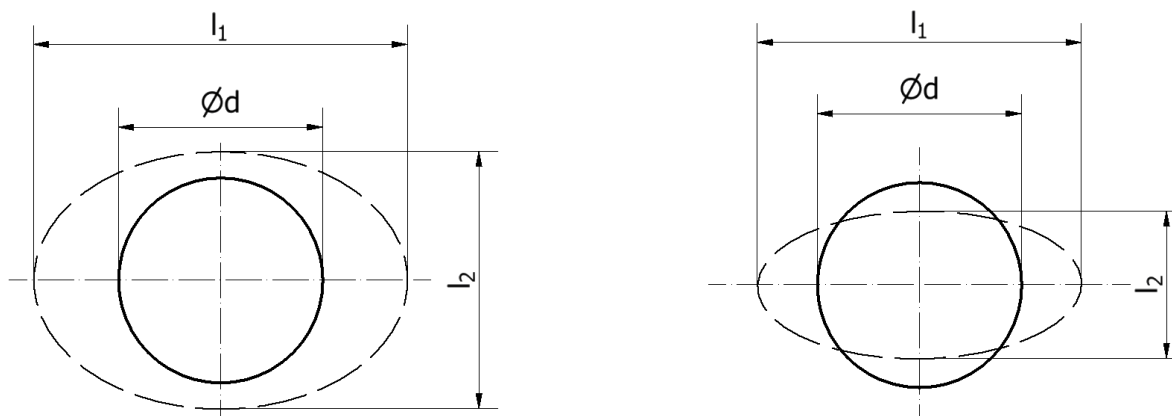
Experimentální cesta konstrukce křivek Keeler-Goodwinova diagramu využívá předpoklad, že k porušení materiálu lisovaného dílce dojde v místě s maximální hodnotou ztenčení plechu. V tomto místě dochází k tzv. zaškrcování materiálu, tj. k lokálnímu přetvoření. K identifikaci tohoto místa výlisku a k vyhodnocení hlavních přetvoření je využívána metoda přetvoření sítě. Na vyhodnocované těleso se před jeho deformací nanese vhodná deformační síť, která se po skončení tvářecí operace vyhodnocuje.

V zásadě lze říci, že se nejčastěji užívají sítě s elementy tvaru kružnice. Její deformací v průběhu tvářecí operace, tedy změnou geometrie kružnice v elipsu, se určují hodnoty hlavních přetvoření a tím i příslušné souřadnice v diagramu mezní tvářitelnosti. Příklady používaných tvarů obrazců deformační sítě ukazuje obr. 34. Typy obrazců i jejich velikost jsou odvislé od geometrie tvářeného vzorku a zvolené metody vyhodnocení křivky mezní tvářitelnosti.



Obr. 34 Používané tvary obrazců deformační sítě [48]

Z hlediska změny geometrie kružnicového elementu deformační sítě může v podstatě dojít ke dvěma případům, viz obr. 35.



a) obě složky přetvoření kladné

b) jedna složka přetvoření záporná

Obr. 35 Změna tvaru elementu kružnicové sítě [43]

Ze získaných rozměrů výše uvedených deformovaných obrazců se přepočtem stanoví hodnoty složek hlavního logaritmického či poměrného přetvoření. Obecný vztah pro určení přetvoření kružnicové sítě uvádí vzorec (4.1).

$$\varphi_i = \ln \frac{l_i}{d} = \ln \frac{d + \Delta l_i}{d} = \ln(1 + \varepsilon_i) \quad (4.1)$$

kde φ_i je hlavní logaritmické přetvoření [-],

ε_i je hlavní poměrné přetvoření [-],

d je počáteční průměr kružnice [mm],

l_i je příslušný rozměr osy elipsy [mm].

Pro jednotlivé složky (směry) hlavních přetvoření (φ_1 a φ_2) lze vzorec (4.1) přepsat do níže uvedených tvarů dle (4.2) a (4.3).

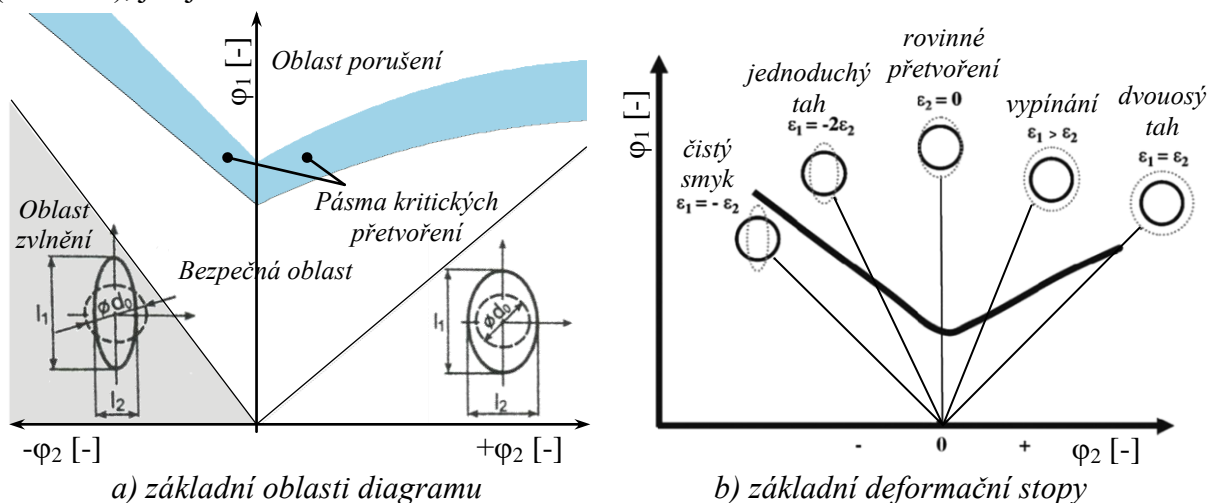
$$\varphi_1 = \ln \frac{l_1}{d} = \ln(1 + \varepsilon_1) \quad (4.2)$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{l_2}{d} = \ln(1 + \varepsilon_2) \quad (4.3)$$

V případě zkoumání změny tloušťky materiálu, kdy je nutné znát též složku φ_3 , se zbylé přetvoření stanoví ze zákona zachování objemu, tedy:

$$\varphi_3 = -(\varphi_1 + \varphi_2) \quad (4.4)$$

Při zajištění proměnného stavu napjatosti zkoušených vzorků se tak zkonstruuje křivka diagramu mezní tvářitelnosti pro oba výše uvedené případy změny tvaru elementu sítě (kružnice), jak je uvedeno na obr. 36a.



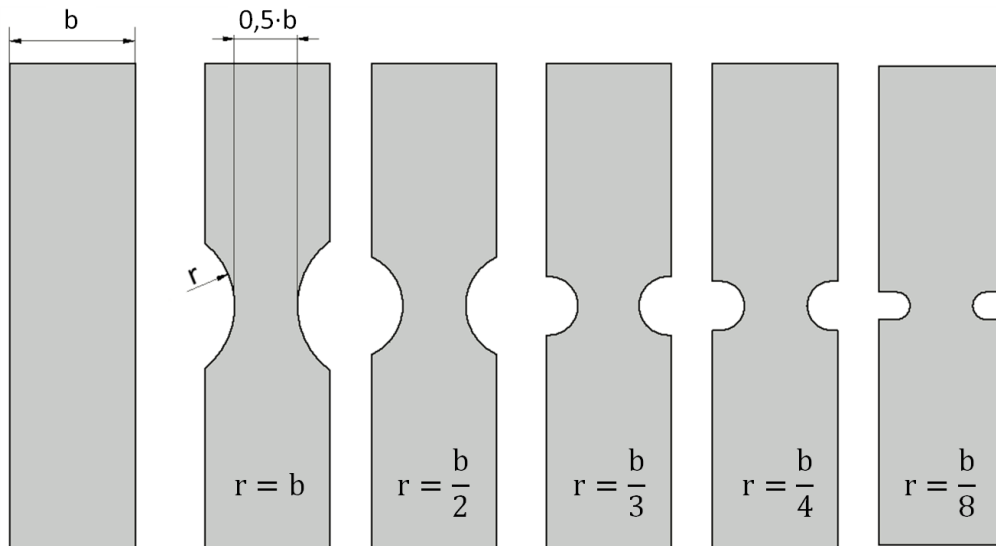
Obr. 36 Keeler-Goodwinův diagram [50]

Konstrukce křivek Keeler-Goodwinova diagramu zohledňuje vícero schémat přetvoření (napjatosti), proto je při jeho experimentálním určení nutné vycházet ze základních materiálových zkoušek, které daným zatěžujícím stavům odpovídají. Hlavní deformační stopy Keeler-Goodwinova diagramu pro definovaný poměr hlavních deformací uvádí obr. 36b.

Norma ČSN EN ISO 12004-1 povoluje pro experimentální určení křivek mezní tvářitelnosti užití víceméně jakýchkoliv zkušebních zařízení, kterými lze s použitím přidržovacího a tažného nástroje docílit různého stavu napjatosti při plastické deformaci zkoušeného dílce, vedoucí až k jeho porušení. Přesnější laboratorní stanovení mezní křivky diagramu dle Keelera – Goodwina potom popisuje norma ČSN EN ISO 12004-2.

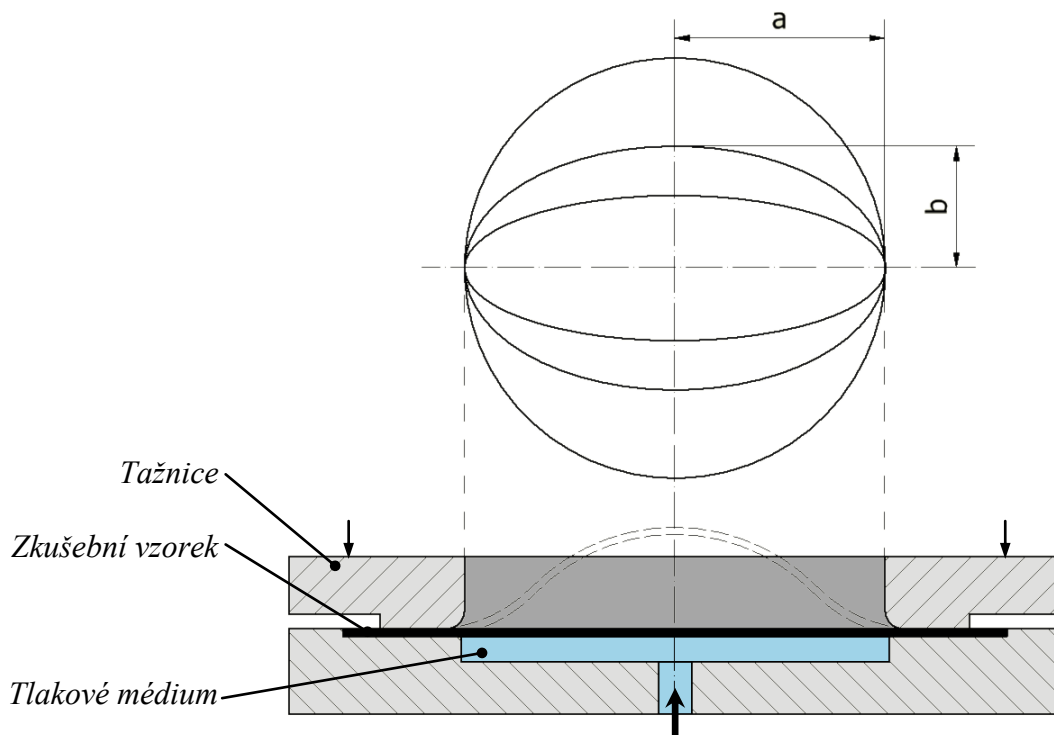
Ve výsledku lze však k experimentálnímu vyhodnocení křivky mezní tvářitelnosti použít celou škálu zkušebních metod. Některé metody slouží k získání křivky diagramu mezní tvářitelnosti v celém jejím rozsahu pro kladné i záporné hodnoty φ_2 , jinými se získá omezená oblast, příp. pouze bod mezní křivky. Vybrané metody zjišťování křivky mezní tvářitelnosti blíže specifikuje níže uvedený výčet.

- **Tahová zkouška** – je jednou z nejjednodušších a také nejpoužívanějších zkoušek pro určení mechanických vlastností daného materiálu, tj. křivky zpevnění, zároveň ale i křivky mezní tvářitelnosti. Vzorky určené pro tahovou zkoušku jsou upnuty do čelistí zkušebního zařízení a zatěžovány tahovou silou až do porušení. K získání různých stavů napjatosti, a tedy i deformačních stop v FLD, jsou většinou vzorky opatřeny vruby s proměnným poloměrem, viz obr. 37. Šířka vzorků se dle potřeby pohybuje od 5 mm až do 30 mm. Hlavní výhodou oproti některým dalším metodám je zde možnost využití univerzálních zkušebních strojů i relativně snadná výroba vzorků. Naproti tomu výraznou nevýhodou je fakt, že v Keeler-Goodwinově diagramu určuje tahová zkouška mezní křivku pouze pro oblast $\varphi_2 < 0$.



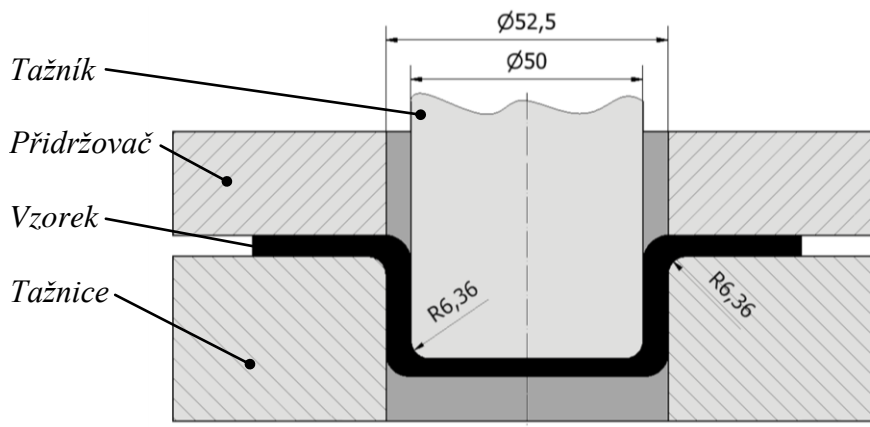
Obr. 37 Tvar vzorků tahové zkoušky [51]

- Hydraulické vyboulování** – je metoda určování křivek mezní tvářitelnosti, kterou lze stejně jako v případě výše zmíněné uniaxiální tahové zkoušky využít i k vyhodnocení křivky zpevnění materiálu, zde ovšem zatěžovaného biaxiálně. Princip zkoušky je schematicky znázorněn na obr. 38. Zkušební vzorek je sevřen v nástroji a tlakovým médiem, nejčastěji olejem, deformován do vypouklého tvaru. Při nastalém porušení je získán bod křivky FLD. K vyhodnocení delšího úseku křivky mezní tvářitelnosti, kdy je třeba zajistit měnící se stav napjatosti, lze použít úpravu geometrie tažnice z kruhového na eliptický tvar (rozměry a , b v obr. 38). Hlavní výhodou hydraulického vyboulování je absence tření během tvářecího procesu. Metoda ovšem není univerzální, tj. mezní křivku tvářitelnosti je možné užitím hydraulického vyboulování identifikovat pouze pro oblast $\varphi_2 > 0$.



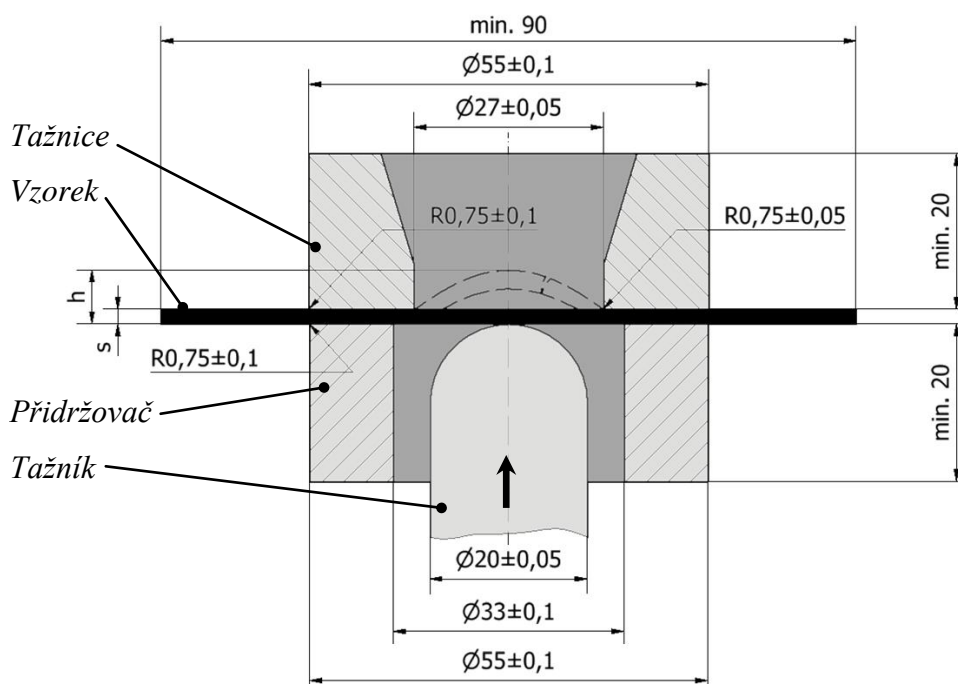
Obr. 38 Princip hydraulického vyboulování [51]

- **Swiftova zkouška** – představuje jednu z řady zkoušek využívajících základní princip hlubokého tažení, viz schéma na obr. 39. Jedná se o tažení zkoušeného tělesa – plechu, které je během tvářecího procesu přidržováno mezi přidržovačem a tažnicí. Zkouškou se předně určuje maximální možný průměr výtažku, který lze bez porušení vytáhnout, příp. mezní součinitel tažení, tj. poměr konečného průměru výtažku k výchozímu. V případě porušení tvářeného tělesa se zmíněná zkouška používá též k vyhodnocení křivky mezní tvářitelnosti, resp. jí náležícího bodu. Krom uvedené geometrie nástroje lze rovněž použít modifikaci jeho tvaru pro různé tvary výtažků, např. čtyřhranné výtažky, s různými stavy napjatosti.



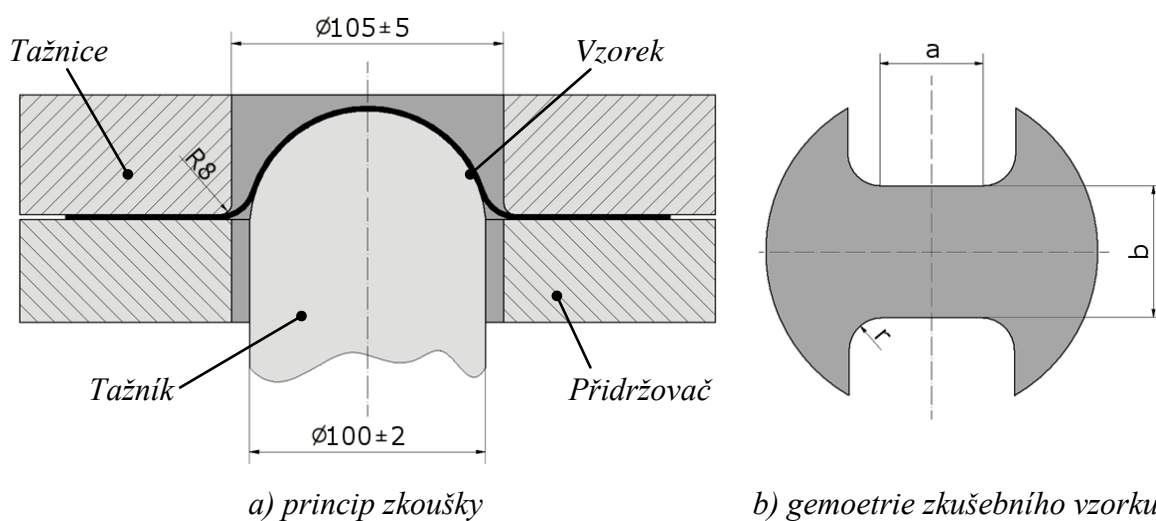
Obr. 39 Princip Swiftovy zkoušky [51]

- **Zkouška hloubením dle Erichsena** – je dána normou ČSN EN ISO 20482. Princip zkoušky popisuje obr. 40. Polokulový tažník táhne vzorek (čtvercový přístřih plechu), který je přidržován silou 10 kN, rychlostí $(5 \text{ až } 20) \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ dokud nevznikne trhлина. Pohyb tažníku je vyvozen mechanicky nebo hydraulicky. Nevýhodou zkoušky bývá vliv tření mezi nástrojem a zkoušeným vzorkem. Ke snížení třecích účinků se používají maziva. Výsledkem zkoušky bývá rovněž tzv. Erichsenův index (IE) určující výšku na vzorku vytvořeného vrchlíku a sloužící jako ukazatel tvářitelnosti daného materiálu. Podobně jako v případě Swiftovy zkoušky je možné Erichsenovým testem určit bod náležící křivce mezní tvářitelnosti, který se nalézá v blízkosti rovinného stavu přetvoření ($\varphi_2 = 0$).



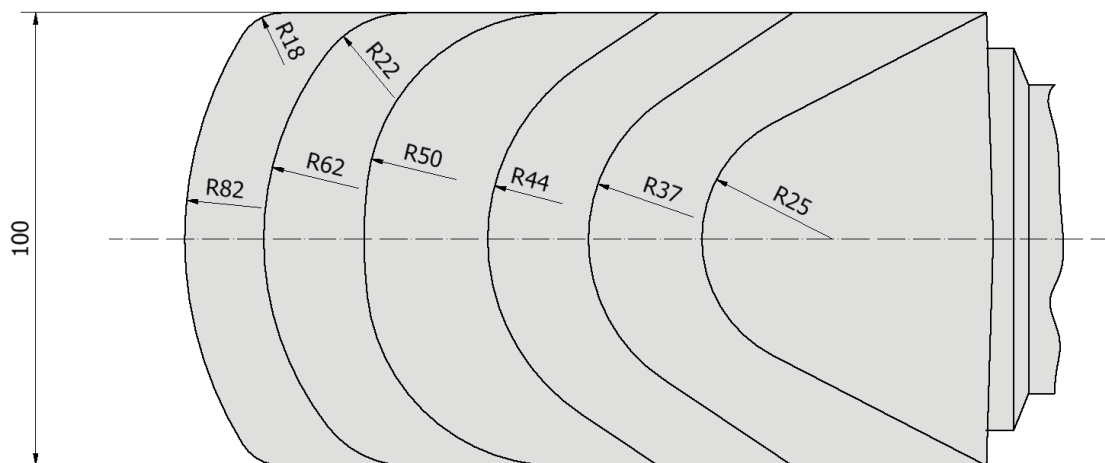
Obr. 40 Princip Erichsenovy zkoušky [52]

- **Zkouška dle Nakajimy** – používá polokulový tažník k přetvoření zkušebního tělesa, které je upnuto mezi přídržovačem a tažnicí s rozměry přednostně dle obr. 41a. Aby došlo k porušení materiálu co možná nejbližše vrcholu tažníku, používá se mazivo. Test dle Nakajimy patří do skupiny univerzálních zkoušek. Jinými slovy řečeno, lze ho použít pro stanovení křivky mezní tváritelnosti v celém rozsahu (pro kladné i záporné hodnoty φ_2), a to v případě použijí-li se různé tvary zkušebních vzorků, viz obr. 41b. Doporučují se hodnoty délky dřívku vzorku $a = (25 \text{ až } 50) \text{ mm}$ a poloměru zaoblení $r = (20 \text{ až } 30) \text{ mm}$. Pro stanovení křivky mezní tváritelnosti v oblasti $\varphi_2 > 0$ je rovněž možné užití vzorků bez dřívku, pouze s polokruhovými výřezy různých poloměrů nebo obdélníkové pásky s různými šířkami (pokud nedojde k prasklině v místě zaoblení tažnice). Zkouška je vhodná pro přesnější laboratorní určování křivky mezní tváritelnosti, proto je k tomuto účelu předepisována normou ČSN EN ISO 12004-2.



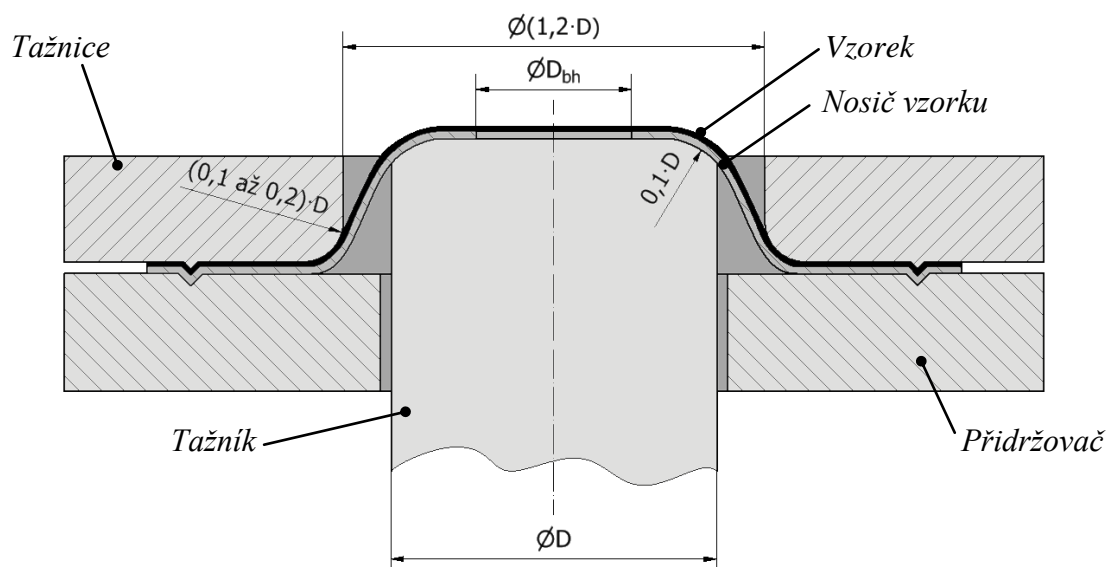
Obr. 41 Zkouška dle Nakajimy [48]

- **Zkouška dle Keelera** – spočívá opět v tažení materiálu vzorku až do iniciace trhliny, v tomto případě však s užitím tažníků různých tvarů, tj. s různými rádií, které vedou k různým stavům napjatosti zkoušeného materiálu, a tím také k určení větší části limitní křivky. Provádění zkoušky s tažníky různých geometrií má ale negativní dopad na její časovou náročnost. Schematicky jsou jednotlivé geometrie tažníků Keelerova testu vyobrazeny na obr. 42. Geometrie vzorku zůstává neměnná, což představuje určitou výhodu oproti jiným zkouškám. Křivka mezní tváritelnosti se tímto testem určuje pouze pro hodnoty $\varphi_2 > 0$.



Obr. 42 Tvary tažníků Keelerova testu [51]

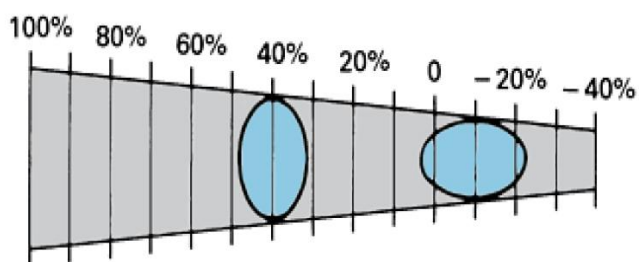
- **Zkouška dle Marciniaka** – přetváří zkušební těleso plochým tažníkem. Stejně jako v případě testu dle Nakajimy, i tato zkouška je definována normou ČSN EN ISO 12004-2. Aby k porušení materiálu docházelo ve správné poloze, tj. na rovinné ploše tažníku, používá se jeden nebo více nosičů vzorku (obr. 43) s otvorem o průměru $D_{bh} = (32 \text{ až } 34) \text{ mm}$. Nosič je vyráběn z materiálu o vyšší nebo alespoň stejné tažnosti jako zkoumaný vzorek, aby nedocházelo k porušení nosiče před vlastním porušením materiálu vzorku. K popsání celého rozsahu křivky mezní tvářitelnosti se používají různé tvarové úpravy vzorků, např. polokruhové výřezy, nebo úpravy průřezu tažníku (kruhový, eliptický, obdélníkový).



Obr. 43 Princip zkoušky dle Marciniaka [48]

Použitím výše zmíněných zkoušek se sestaví křivky diagramu mezní tvářitelnosti. Body diagramu, tj. hodnoty hlavních přetvoření na zkoumaných místech výlisků, se poté určují na základě numerické simulace nebo opět metodou přetvoření sítě nanesených na zkoumaný povrch před vlastním tvářením.

V případě použití metody přetvoření sítě je vyhodnocení deformovaných obrazců sítě přetvořeného zkušebního vzorku nebo tvářeného dílce možné provést hned několika způsoby. Literatura [53] uvádí možnost použití průhledného měřítka (měřicí pásky Mylar), kterým se deformace prvků sítě měří přímo, a to manuálním způsobem, viz obr. 44. Používá se především pro oblasti s vysokou křivostí povrchu dílce, protože při měření jej dokonale kopíruje a tudíž lépe zohledňuje její zakřivení než některé jiné metody. Jedná se o nejjednodušší, ale také nejméně přesnou metodu. Navíc vyhodnocení přetvoření sítě touto metodou je pracné a pomalé.



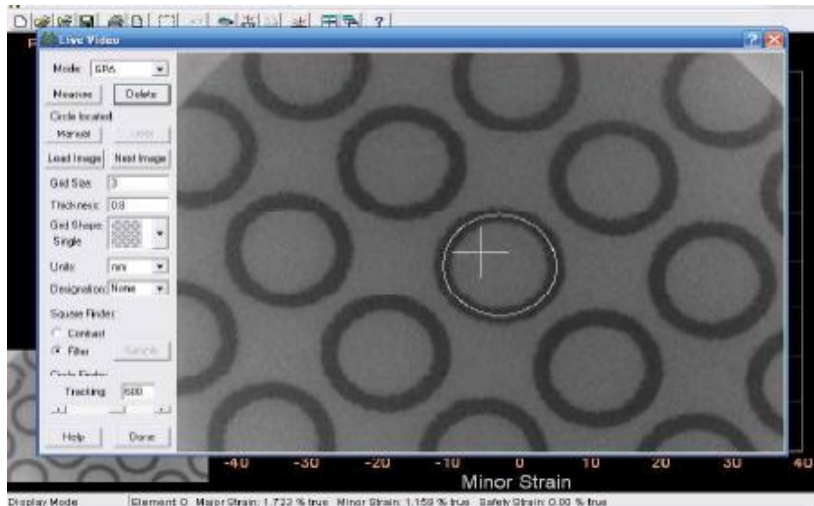
Obr. 44 Měřicí páska určující $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ [53]

Další možností je užití optického (mikroskopického) měření. Zde je možné navíc využít snímání kamerou, což dává možnost, s použitím různých specializovaných softwarů, měření a vyhodnocení přetvoření sítě automatizovat. V dnešní době jsou s výhodou využívány především přenosné či příruční systémy optického snímání povrchu zdeformované sítě.

Příkladem optického snímání může být systém Grid Pattern Analyzer (GPA) od společnosti ASAME technology, který je založen na analýze obrazu snímaného kamerovým systémem při jeho ručním posuvu po nanesené síti. Obr. 45 ukazuje příklad použití zmíněného systému a vyhodnocení zaznamenaného tvaru elementů deformační sítě ve vyhodnocovacím softwaru. Výhodou je snadná přenosnost a použitelnost systému, kdy k vyhodnocení postačuje pouze kamera připojená např. k notebooku.



a) měření systémem GPA

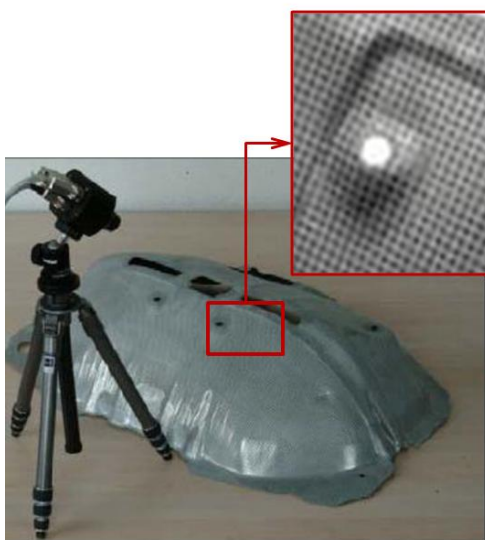


b) použití vyhodnocovacího softwaru

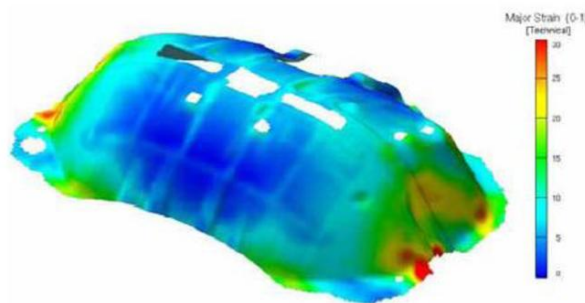
Obr. 45 Systém Grid Pattern Analyzer [54]

Sofistikovanější řešení představuje 3D optické snímání deformovaného povrchu tvářeného dílce (deformované sítě). Systémy Argus či Aramis od společnosti GOM, a jim podobné, umožňují nejen snímat přetvoření sítě lokálně pro vymezenou oblast kritických hodnot přetvoření, ale také globálně, tj. celé přetvořené těleso.

Metoda Argus je založena na fotogrametrii, tedy na snímání zkoumaného objektu pokrytého deformační sítí fotoaparátem s vysokým rozlišením, a to pokaždé z jiného pohledového úhlu a následném vytvoření 3D geometrie ze sady takto pořízených dvourozměrných fotografií, viz příklad použití systému Argus pro zjištění přetvoření výlisku na obr. 46.



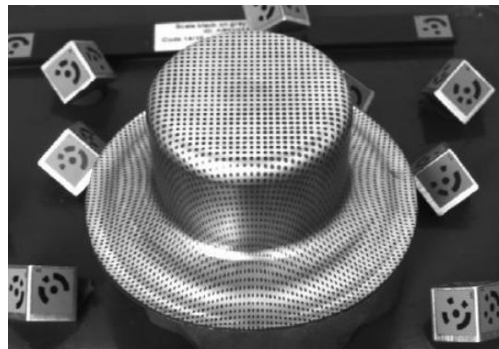
a) snímání přetvořený dílec



b) zjištěné rozložení přetvoření

Obr. 46 Příklad snímání přetvoření sítě na těle výlisku metodou Argus [55]

Pro určení přesné polohy a sklonu fotoaparátu při pořizování fotografií jsou v systému Argus používány speciální přesně definované značky, tzv. markery, které se umísťují do těsné blízkosti zkoumaného tělesa a pomocí kterých lze z každé fotografie určit směr a úhel, pod kterým byla pořízena (obr. 47). Triangulací jsou poté zjištěny 3D souřadnice bodů deformované sítě zkoumaného tělesa. Pokud jsou k dispozici údaje o výchozím a konečném stavu deformace objektu, potom lze vcelku přesně zjistit změnu v jeho přetvoření nebo ztenčení stěny.

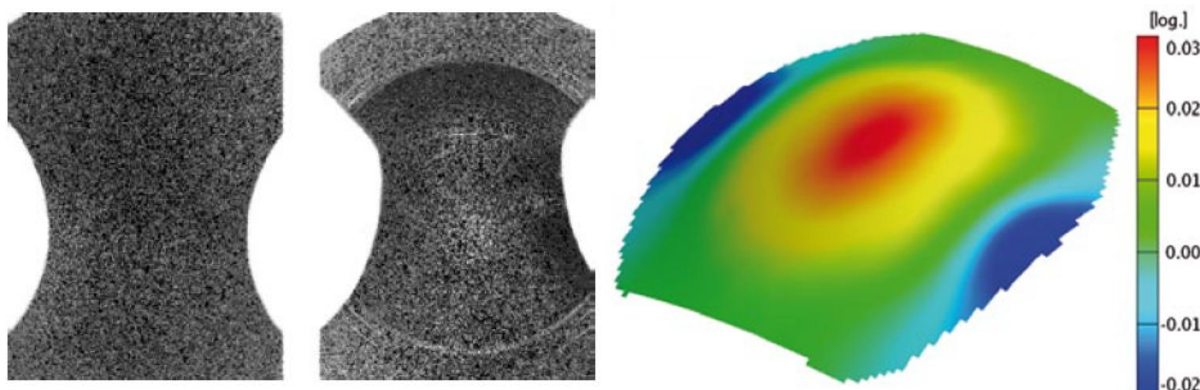


Obr. 47 Příklad použití markerů [55]



Obr. 48 Aparatura systému Aramis [56]

Obdobně pracuje také systém Aramis. Zde se ovšem, na rozdíl od dosud uvedených metod, nepoužívá ke zjištění přetvoření pravidelná síť, ale zcela nahodilý obrazec vzniklý zpravidla posprejováním zkoušeného tělesa bílou (podkladovou) a poté černou barvou. Snímání změny takto vzniklé kontrastní struktury se provádí pomocí dvojice kamer, viz obr. 48. Tyto mají vůči sobě přesně definovanou polohu a natočení, proto je možné přímo snímat 3D geometrii deformovaného dílce, resp. vývoj struktury na jeho povrchu, a tím i jeho přetvoření, viz obr. 49.



a) snímaný povrch dílce

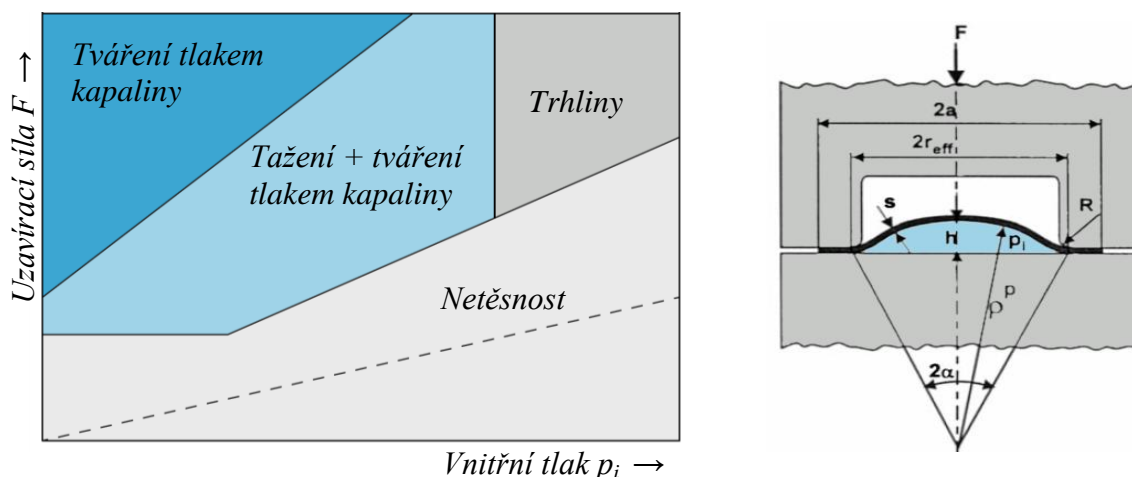
b) zjištěné rozložení přetvoření

Obr. 49 Systém ARAMIS [56], [57]

4.2 Limitní diagramy technologické tvářitelnosti [21], [25], [43]

Možnosti tvářeného materiálu již s přihlédnutím ke konkrétním technologickým podmínkám vyjadřuje tzv. technologická tvářitelnost. Predikce vyrobitelnosti dané součásti bez vzniku vad, popř. optimalizace procesních činitelů, využívá limitní diagramy technologické tvářitelnosti, tzv. procesní diagramy, jež jsou vždy výsledkem teoreticko-experimentální analýzy konkrétní technologie hydroformování.

U hydroformování plechů se ve většině případů sleduje závislost uzavírací síly či síly přidržovače na vnitřním formovacím tlaku kapaliny. Tak je tomu i u metody hydroformování plechů vnitřním tlakem kapaliny, jejíž schematický procesní diagram uvádí obr. 50. Z něj je patrné vymezení oblasti kvalitních výlisků, tzv. procesního okna, jež je ohraničeno nežádoucími oblastmi predikujícími vznik trhlin na výlisku nebo netěsnosti tvářecího systému, a to při nevhodném použití přidržovací síly a tlaku tvářecího média.



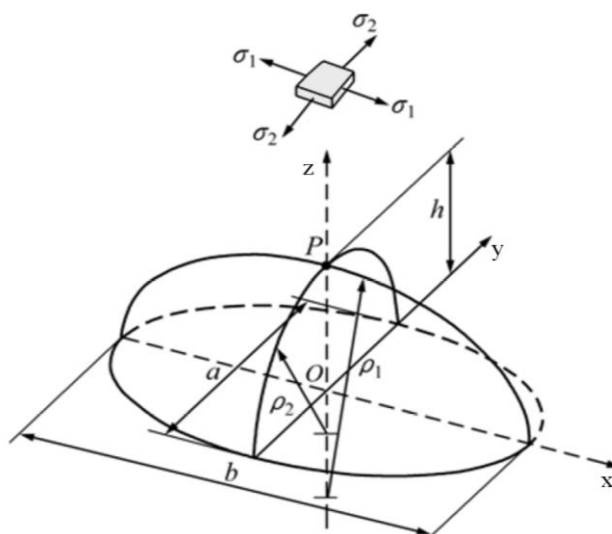
Obr. 50 Procesní diagram hydroformování plechového dílu [21]

Samotné procesní okno je zde rozděleno na dvě oblasti použití. Při vyšších hodnotách uzavírací síly a relativně nízkém formovacím tlaku dochází k tváření pouze tlakem kapaliny. Při zmenšení hodnot uzavírací síly už materiál není tolik přidržován a systém se změní v tažení za podpory tlaku tvářecí kapaliny. Hranice procesních oken se samozřejmě mohou posouvat, a to v závislosti na možné změně některých činitelů tvářecího procesu.

4.3 Teoretické určení mezní tvářitelnosti [43], [49], [51]

Vyjde-li se ve výše popsaném případě vypínání (vyboulování) plechu tlakem kapaliny také z teoretického rozboru na vytknutém elementu tvářeného dílce s využitím membránové teorie dílce (obr. 51), potom je možné obecně určit vztahy mezi hlavními napětími, tvářecím tlakem a geometrickými parametry dle vzorců 4.6 až 4.8.

Membránová teorie vychází z předpokladu, že vytknutý element tvářeného materiálu uvažuje jen síly tečné k jeho rovině. Takové zatížení je potom po tloušťce stěny tvářeného dílce rozloženo rovnoměrně. Jinými slovy řečeno, metoda uvažuje dvouosou napjatost ($\sigma_3 = 0$; $\sigma_1, \sigma_2 \neq 0$). Tento předpoklad lze aplikovat pro malé tloušťky stěn výlisků, kdy je radiální napětí velmi malé, a proto i jeho zanedbání téměř neovlivňuje přesnost výsledků. Řešení vychází z Laplaceovy rovnice rovnováhy (4.5) určené ve směru normály k povrchu.



Obr. 51 Zatížení vypínaného dílce [49]

Pro vytknutý element namáhaný obecně jak vnitřním tak i vnějším tlakem platí rovnice:

$$\frac{\sigma_1}{\rho_1} + \frac{\sigma_2}{\rho_2} = \frac{p_i - p_a}{s}, \quad (4.5)$$

kde σ_1 a σ_2 jsou hlavní napětí [MPa],

p_i a p_a jsou normálové tlaky (vnitřní a vnější) [MPa],

ρ_1 a ρ_2 jsou poloměry zakřivení [mm],

s je tloušťka materiálu [mm].

Uvažuje-li se tvářený materiál jako izotropní a nestlačitelný, tj. platí-li zákon zachování objemu, jsou membránovou teorií určena hlavní napětí dle vztahů:

$$\sigma_1 = \frac{p_i - p_a}{2 \cdot s} \cdot \rho_2, \quad (4.6)$$

$$\sigma_2 = \frac{p_i - p_a}{2 \cdot s} \cdot \left(2 \cdot \rho_2 - \frac{\rho_2^2}{\rho_1^2} \right). \quad (4.7)$$

Za předpokladu $p_i \geq p_a$ literatura [25] definuje i třetí hlavní napětí σ_3 , a to na základě vzorce:

$$\sigma_3 = \frac{1}{2} \cdot (p_i - p_a). \quad (4.8)$$

Ke zjednodušení úlohy dochází, pokud se při hydroformovacím procesu jedná pouze o volné vypínání. Potom je jasné, že platí $p_i \gg p_a$ a pro zjednodušení lze předpokládat $p_a = 0$. Pokud se navíc vypíná rotačně symetrický dílec jako na obr. 50, potom se přidávají další zjednodušení, a sice $\rho_1 = \rho_2 = \rho_{12}$, a tedy $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$. V takovém případě je aktivní tvářecí tlak kapaliny z Laplaceovy rovnice rovnováhy definován jako:

$$p = p_i = \frac{2 \cdot s}{\rho_{12}} \cdot \sigma. \quad (4.9)$$

Velikost kritického vnitřního tlaku, kdy je dosaženo meze pevnosti materiálu, lze následně zjistit dosazením mezní hodnoty napětí na mezi pevnosti do rovnice (4.9).

Je jasné, že při zvyšování tvarové složitosti lisovaných dílů se neúměrně s tím zároveň zvyšuje i náročnost analytického výpočtu. Řešení problematiky analýz hydroformování složitějších výlisků tak vede na využití numerických metod za podpory výpočetní techniky, tj. na numerické simulace. Jedná se o popsání reálného systému prostřednictvím simulačního modelu, který lze chápat jako zjednodušenou podobu řešeného problému. Rozdíly mezi reálným systémem a simulačním modelem potom ovlivňují stupeň přesnosti výsledků provedené simulace.

Numerické metody nenahrazují spojité těleso nekonečným počtem nekonečně malých elementů (bodů), jako v případě klasické teorie, ale naopak počítají s jejich konečnými rozměry, tj. řeší dané těleso nebo oblast tzv. po částech. Z toho zákonitě vyplývá, že numerický přístup dává sice oproti analytickému pouze přibližné řešení, zato ho ale lze využít prakticky pro jakkoliv náročnou úlohu. Využití numerických metod v poslední době narůstá i díky zvyšujícím se možnostem aplikace počítačové podpory.

Cílem numerického modelování tvářecích procesů je obecně popis tvářecích dějů na základě vstupních hodnot tvořících simulační model, tedy modelů geometrických, materiálových a v neposlední řadě též výpočetních. Numerických metod používaných v technické praxi k řešení problémů a analýz spojených s tvářením je celá řada. Každá z nich má své specifické výhody, ale i nevýhody. Níže je uveden výčet těch nejznámějších.

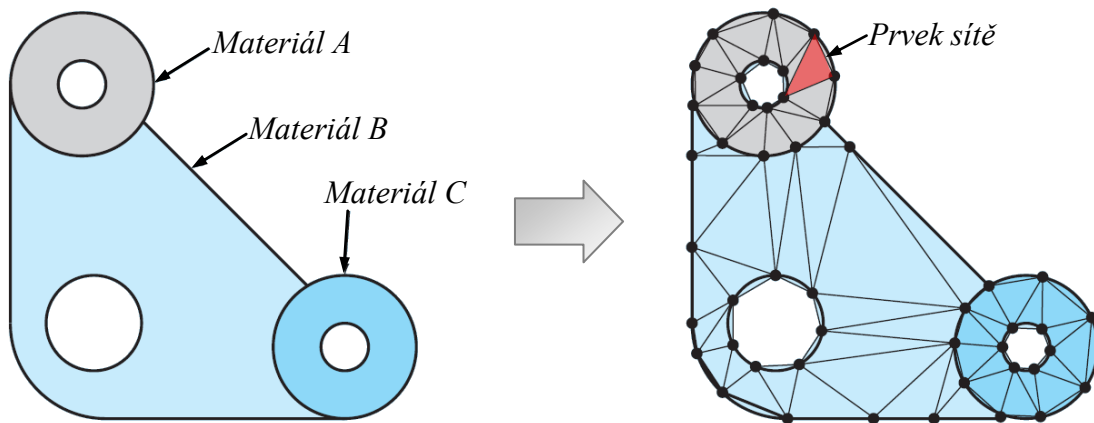
- SPH metoda,
- metoda konečných objemů,
- metoda hraničních prvků,
- metoda konečných prvků.

5 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ [58], [59], [60]

Metoda konečných prvků (MKP) se řadí vůbec k nejuniverzálnějším numerickým metodám. Není proto divu, že její možnosti analýzy pokrývají celou škálu aplikací v různých oborech, a to jak v oblasti statických, tak i dynamických analýz. Zejména se jedná o oblasti leteckého, automobilního průmyslu, biomechaniky, termomechaniky, ale také optimalizační činnost při návrhu vyráběných dílů na základě provedených MKP analýz.

5.1 Diskretizace a typy elementů [60], [61], [62], [63]

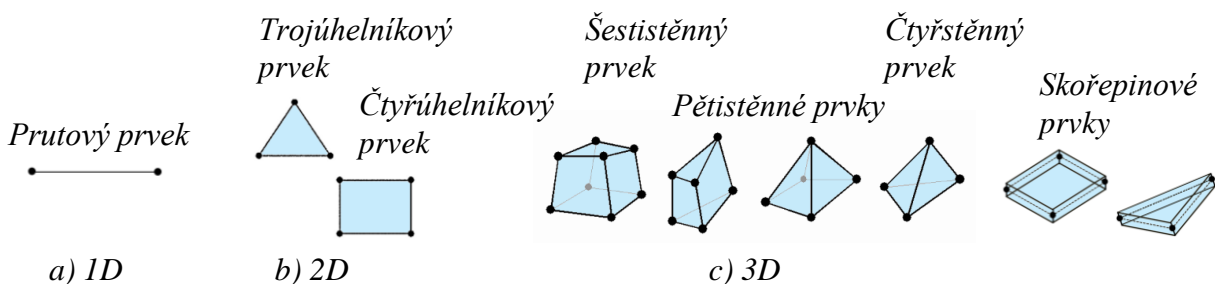
Základní myšlenkou MKP je tzv. diskretizace, což znamená rozdělení řešené oblasti na konečný počet prvků (elementů), které dohromady tvoří tzv. konečnoprvkovou síť (obr. 52). Ta je základním stavebním kamenem celé metody. Při deformaci zkoumané oblasti nebo tělesa se tato síť deformuje společně s ním. A právě na základě deformace jednotlivých prvků, jejich posuvu a rotace jsou dopočítávány další zkoumané veličiny, jako je např. napětí nebo přetvoření. Výsledek je poté hledán ve formě kombinace vhodně zvolených známých funkcí popisujících každý prvek sítě MKP a neznámých parametrů. Diskretizaci tedy lze chápat i jako řešení dané úlohy tzv. po částech.



Obr. 52 Příklad aplikace diskretizace pro 2D úlohu [61]

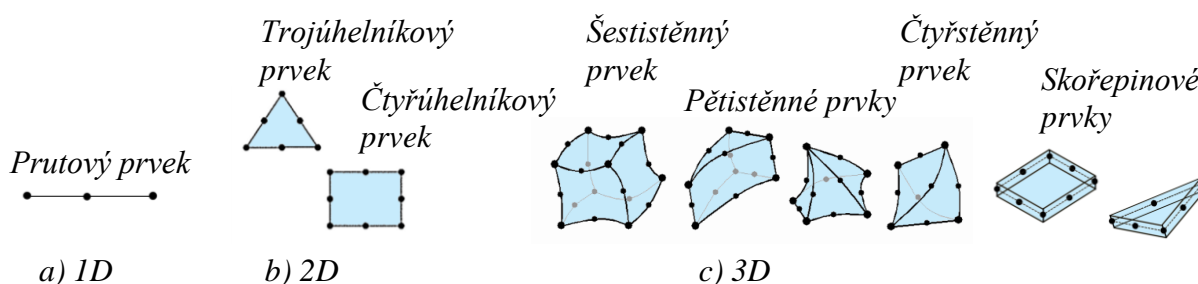
Je jasné, že pro optimální popis geometrie a přijatelnou přesnost výsledků analýzy MKP musí být zkoumané těleso popsáno pomocí většího počtu typů prvků. Proto výpočetní programy MKP nabízejí dle svých možností a interních databází vždy několik základních typů prvků. Každý prvek se sestává ze základních entit, tedy z výpočetních uzlů, hran, popř. stěn, při čemž každý z typ prvků může být tzv. lineární nebo kvadratický.

U lineárních prvků (obr. 53) je vždy každá jejich hrana definována pomocí dvou uzlů (na začátku a na konci hrany prvku). Obecně platí, že se s vyšším počtem uzlů na jednom prvku rovněž zvyšuje i jeho výpočetní přesnost, ale stoupají tak nároky na výpočetní systém, tj. počítačovou vybavenost. Z tohoto hlediska jsou lineární prvky poměrně nenáročné na výpočet, ale jejich popis geometrie zkoumané oblasti není tak dokonalý, jako u kvadratických prvků (obr. 54).



Obr. 53 Základní typy lineárních prvků [61]

Kvadratické prvky zařazují výpočetní uzel i doprostřed každé hrany, která je tak namísto dvou tvořena třemi uzly. Tím se zlepšuje schopnost popisu výpočtové oblasti, což má samozřejmě za následek přesnější výpočtový model a tím i přesnější výsledky. Nevýhodou kvadratických prvků je požadavek vyššího výpočetního výkonu.



Obr. 54 Základní typy kvadratických prvků [61]

Typ, tvar, ale i velikost nebo počet prvků je třeba vybírat takovým způsobem, aby jimi bylo zkoumané těleso nebo oblast co nejlépe popsáno při zachování rozumného výpočtového času.

5.2 Princip řešení úloh MKP [58], [60], [61], [62], [66]

Simulace metodou konečných prvků spočívá v hledání odezvy sledovaného systému v závislosti na okolních vlivech (podmínkách). Sledované subjekty jsou popsány na základě jejich geometrického a materiálového modelu. Okolní vlivy zahrnují popis zatěžujících účinků či podpor zkoumaných těles. Sledovaná odezva systému je potom popsána vypočtenými a dopočtenými hodnotami veličin závislých na druhu prováděné analýzy.

V případě napětově-deformační analýzy jsou hodnoty deformace (posuvů), přetvoření a napětí v základu určeny 15 neznámými parametry:

- složky posuvů (u, v, w),
- složky přetvoření ($\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$),
- složky napětí ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$).

Je zřejmé, že pro určení všech 15 neznámých je zapotřebí 15 rovnic. Vzhledem k výpočtové náročnosti se nikdy neřeší všechny výše uvedené neznámé veličiny (rovnice) najednou, ale postupným dosazováním a eliminací pomocí zmíněných 15 základních rovnic dávajících do vztahu deformace, přetvoření a napětí, lze dospět pouze k jedné skupině tzv. nezávislých neznámých parametrů, kterými je potom řešení úlohy popsáno. Tímto krokem je zároveň určen i tzv. přístup k řešení úloh MKP. Mezi základní přístupy se řadí silový, deformační nebo rychlostní. Přístupy k řešení je možné samozřejmě také kombinovat. V tomto případě lze potom hovořit o tzv. smíšeném přístupu. Převládá ovšem deformační přístup nebo také deformační varianta s využitím variační formulace řešení.

Základem výpočtu je zde tzv. Lagrangeův variační princip. Ten vychází z hledání extrému jistého funkcionálu. V případě napětově-deformační analýzy je to celková potenciální energie řešeného tělesa. Variačním počtem je hledán extrém – minimum daného funkcionálu, tj. takový tvar, pro nějž dosahuje celková potenciální energie stacionární hodnoty a právě při splnění této podmínky je možné nalézt hodnoty neznámých funkcí – realizovaných posuvů.

Řešení úloh MKP je realizováno implicitním nebo explicitním algoritmem. Užití názvy algoritmů jsou svázány se způsobem časové integrace základní pohybové rovnice řešené úlohy. Tvar rovnice se může měnit, a to v závislosti na typu úlohy (analýzy), kdy je možné řešený systém popsat staticky, tj. se zanedbáním setrvačných účinků nebo dynamicky a dále dle míry linearitě úlohy, tzn. dle lineární či nelineární závislosti mezi charakteristikami vnějšího zatížení, napjatostí, popř. přetvořením.

Základní rovnice MKP, sloužící jako základní výpočetní předpis statických lineárních úloh, představuje klasický systém lineárních rovnic řešený v maticovém tvaru:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F}, \quad (5.1)$$

kde \mathbf{K} je globální matice tuhosti,

\mathbf{U} je globální matice deformačních parametrů (neznámých),

\mathbf{F} je globální matice zatížení.

V případě statických (kvazistatických) tzv. nelineárních úloh, které jsou užívané pro řešení tvářecích procesů, je typická nelineární závislost $\mathbf{F} - \mathbf{U}$ daná předpisem:

$$\mathbf{K}(\mathbf{U}) \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F}. \quad (5.2)$$

Při řešení dynamických (nestacionárních) analýz přechodových či ustálených stavů přechází základní pohybová rovnice do tvarů (5.3) nebo (5.4), a to v závislosti na zanedbání nebo naopak zohlednění tlumení soustavy. V obou případech jsou do řešení zahrnuty účinky setrvačných sil.

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F}(t), \quad (5.3)$$

kde \mathbf{M} je globální matice hmotnosti,

$\ddot{\mathbf{U}}$ je globální matice zrychlení.

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F}(t), \quad (5.4)$$

kde \mathbf{C} je globální matice tlumení,

$\dot{\mathbf{U}}$ je globální matice rychlosti.

5.2.1 Implicitní algoritmus [60], [65], [66]

Řešení pohybové rovnice využívající implicitní algoritmus předpokládá znalost výchozího řešení rovnice v čase t_i a určuje (dopočítává) řešení pro danou rovnici v časovém okamžiku t_{i+1} . Pro takto určený časový krok výpočtu tedy platí: $\Delta t = t_{i+1} - t_i$, jak ukazuje obr. 55. Cílem je získat neznámé parametry, tedy v případě deformačního přístupu určit matici posuvů \mathbf{U}_{i+1} . Tvar řešené rovnice tak v případě řešení nestacionárních problémů přechází ze vztahu (5.3) do tvaru:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}}_{i+1} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U}_{i+1} = \mathbf{F}_{i+1}. \quad (5.5)$$

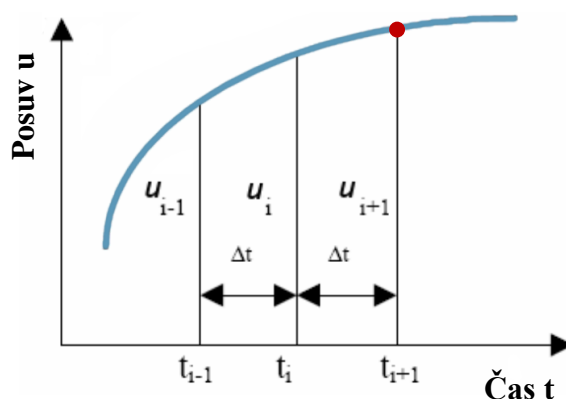
Nejprve je nutné vyjádřit metodou dopředných diferencí zbylou neznámou (matici zrychlení) pomocí zvolené neznámé, tedy maticí posuvů. Získá se tak soustava rovnic k určení posuvů \mathbf{U}_{i+1} ve tvaru:

$$\left(\mathbf{K} + \frac{\mathbf{M}}{\Delta t^2} \right) \cdot \mathbf{U}_{i+1} = \frac{\mathbf{F}_{i+1} + \mathbf{M} \cdot (2 \cdot \mathbf{U}_i - \mathbf{U}_{i-1})}{\Delta t^2}. \quad (5.6)$$

Levá část vztahu představuje součin neznámých posuvů a tzv. dynamické matice tuhosti $\hat{\mathbf{K}}$. Na pravé straně se vyskytuje tzv. dynamická matice zatížení $\hat{\mathbf{F}}$. Stávající rovnici je tak možné zjednodušit do finální podoby:

$$\hat{\mathbf{K}} \cdot \mathbf{U}_{i+1} = \hat{\mathbf{F}}. \quad (5.7)$$

V případě zanedbatelných setrvačných účinků lze zanedbat matici hmotnosti a celý problém zredukovat na řešení statického charakteru. Z výše uvedeného je zjevné, že neznámé posovy v čase t_{i+1} se získávají na základě pohybové rovnice v tomtéž časovém okamžiku.



Obr. 55 Princip implicitního algoritmu [67]

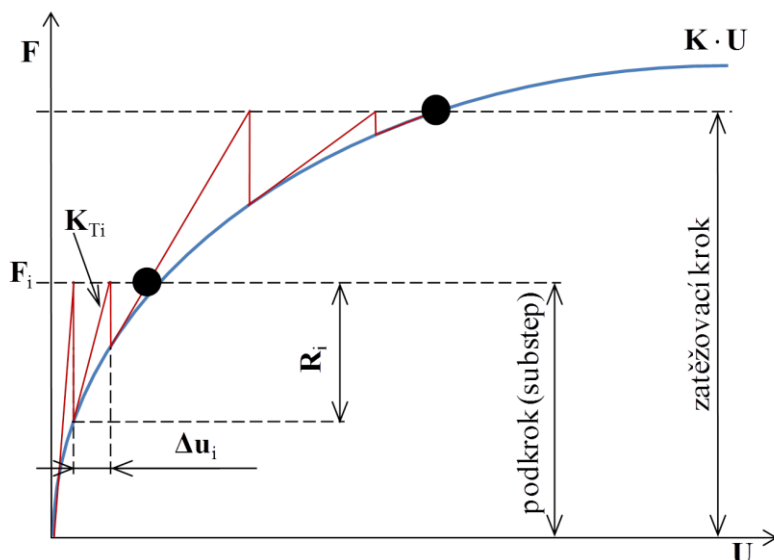
Pro vyřešení posuvů v každém dalším časovém kroku je nutné neustále přepočítávat rovnici (5.7), což v některých případech neúměrně prodlužuje výpočet. Implicitní algoritmus je tzv. nepodmíněně stabilní, tzn. výpočet probíhá stabilně bez ohledu na délku časového kroku. Proto je snaha řešit úlohu s co možná nejmenším počtem kroků. Aplikace velkých kroků ovšem vede na problematiku výpočtů s vysokými hodnotami přírůstků deformací, a proto je výpočet nejčastěji realizován přírůstkově-iteračním algoritmem dle tzv. Newton-Raphsonovy metody, viz obr. 56. Řešení každé z iterací představuje lineární soustavu rovnic určenou pro přírůstek posuvů Δu_i :

$$\mathbf{K}_{Ti} \cdot \Delta \mathbf{u}_i = \mathbf{F}_i - \mathbf{I}_{i-1} = \mathbf{R}_i, \quad (5.8)$$

kde \mathbf{K}_{Ti} je okamžitá matice tuhosti,

$\Delta \mathbf{u}_i$ je přírůstek posuvů,

\mathbf{R}_i je rozdíl mezi vnějším zatížením \mathbf{F}_i a vnitřními silami \mathbf{I}_{i-1} (reziduum).



Obr. 56 Newton-Raphsonova metoda [66]

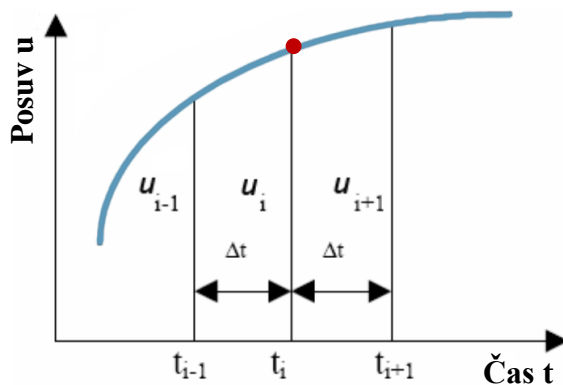
Iterační proces je ukončen za předpokladu, že jsou splněna tzv. kritéria konvergence (δ_F, δ_U), která kontrolují poměr reziduálních sil ku celkovému zatížení či poměr přírůstků posuvů ku celkovému posuvu dle rovnic (5.9) a (5.10).

$$\frac{\mathbf{R}_i}{\mathbf{F}_{\text{celk}}} \leq \delta_F, \quad (5.9)$$

$$\frac{\Delta \mathbf{u}_i}{\mathbf{u}_{\text{celk}}} \leq \delta_U. \quad (5.10)$$

5.2.2 Explicitní algoritmus [60], [65], [66]

Obdobně jako v případě implicitního algoritmu, i zde je výchozím vztah (5.3), tj. pohybová rovnice řešení nestacionárních problémů. K popisu matice zrychlení pomocí zvolené neznámé, tedy matice posuvů, je zde ale použita metoda centrálních diferencí. To v konečném důsledku znamená, že výchozím bodem pro určení aproximace matice zrychlení je časový okamžik t_i jak dokumentuje obr. 57.



Obr. 57 Princip explicitního algoritmu [67]

Jelikož se tak získá vyjádření matice zrychlení v čase t_i , je potřeba k výpočtu použít tvar rovnice (5.3) odpovídající stejnému časovému okamžiku:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}}_i + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U}_i = \mathbf{F}_i \quad (5.11)$$

Soustava rovnic určující posuvy \mathbf{U}_{i+1} má po dosazení zrychlení do pohybové rovnice 3.11 konečný tvar:

$$\frac{\mathbf{M}}{\Delta t^2} \cdot \mathbf{U}_{i+1} = \mathbf{F}_i - \mathbf{K} \cdot \mathbf{U}_i + \mathbf{M} \cdot \frac{(2 \cdot \mathbf{U}_i - \mathbf{U}_{i-1})}{\Delta t^2} \quad (5.12)$$

Výhodou explicitního algoritmu je rychlost výpočtu. Časový krok je v porovnání s implicitním řešením až o několik řádů rychlejší. Na rozdíl od implicitního algoritmu zde ale nelze zanedbat matici hmotnosti. Pokud by se tak stalo, algoritmus přestane být použitelný. Explicitní algoritmus tedy není možné zredukovat na přímé řešení statických úloh a ty se tak formálně musejí řešit jako dynamické. Další omezení představuje fakt, že řešení explicitního algoritmu je tzv. podmíněně stabilní, tj. stabilní výsledky řešení je možné dosáhnout pouze při zachování dostatečně malého časového kroku Δt , kdy platí:

$$\Delta t \leq \Delta t_{\text{krit}} = l \cdot \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (5.13)$$

kde Δt_{krit} je kritická délka časového kroku [s],

l je charakteristický rozměr nejmenšího prvku sítě [m],

ρ je měrná hmotnost materiálu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

E je modul pružnosti v tahu [Pa].

Délka časového přírůstku při řešení explicitním algoritmem je tak v některých případech až $1000\times$ menší než při implicitním řešení, což představuje velký problém obzvláště při řešení pomalých statických nebo kvazistatických úloh, např. analýzy tvářecích procesů. Tuto překážku lze řešit několika možnými postupy:

- a) zadáním vyšší rychlosti pohybu objektů řešené úlohy, tj. např. tvářecích nástrojů, a to pouze tehdy, nezávisí-li v úloze definované materiálové charakteristiky na rychlosti,
- b) zvýšením hodnoty měrné hmotnosti materiálového modelu.

Při užití některé z výše zmíněných zjednodušení je ovšem nutné kontrolovat zachování statického (kvazistatického) charakteru úlohy, kdy musejí být setrvačné síly (kinetická energie) zanedbatelně velké oproti přetvárným silám (deformační energii).

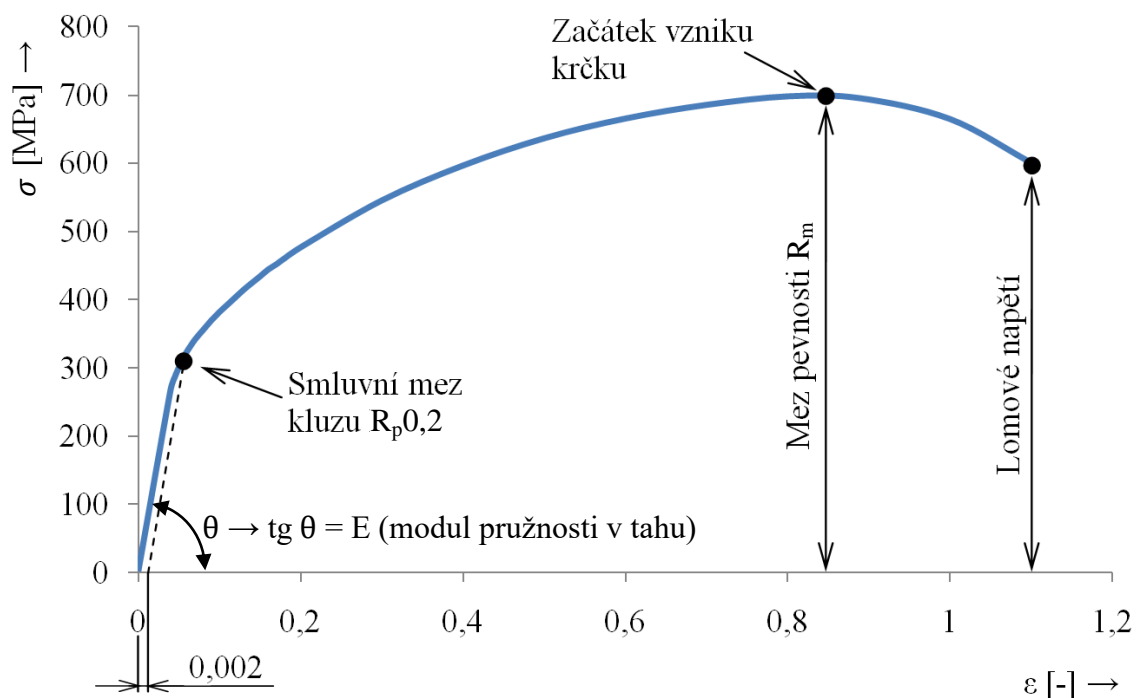
5.3 Popis materiálu při simulacích procesů tváření [17], [45], [51], [64], [66], [68], [69], [70], [71]

Dnešní systémy MKP umožňují, kromě standardního napět'ově-deformačního rozboru, také pokročilé analýzy, jako např. analýzu změny mikrostruktury apod. Na základě toho je potom nutné přizpůsobit požadovaným analýzám i vstupní údaje o materiálu. Na výsledný materiálový model simulace má vliv:

- a) chemické složení,
- b) fyzikální vlastnosti,
- c) mikrostruktura,
- d) mechanické vlastnosti.

Nejdůležitější materiálovou charakteristikou, která přímo ovlivňuje napět'ově-deformační chování materiálu, jsou mechanické vlastnosti. Ty lze pro určité smluvní podmínky určit matematickou aproximací nebo experimentálně na základě křivek napětí – přetvoření získaných ze základních zkoušek mechanických vlastností. V tomto směru je pro popis chování materiálu při plošném tváření nejvyužívanější tahová, nejčastěji jednoosá, zkouška, která spočívá v jednoosém zatěžování zkušební tělesa upnutého do zkušební stroje.

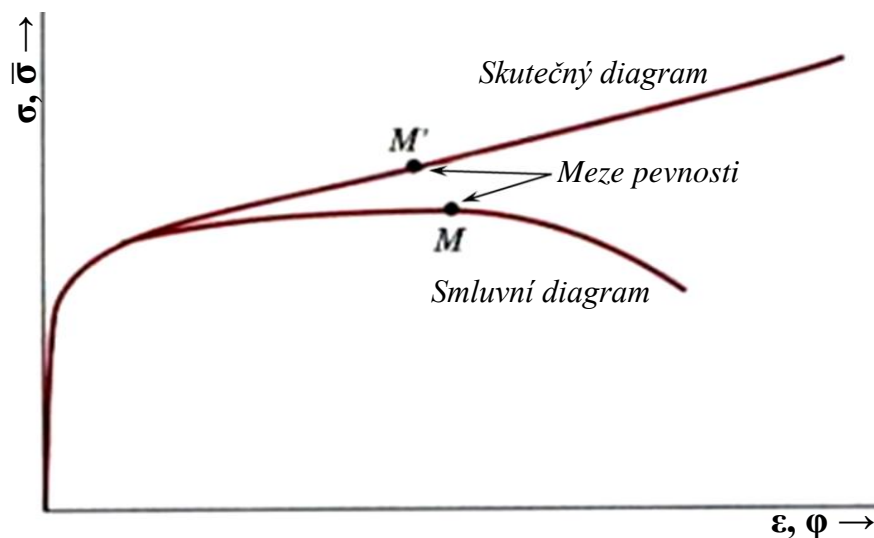
Během tahové zkoušky se zaznamenává závislost síly na prodloužení vzorku, která se dále vyhodnocuje. K základnímu vyhodnocení patří její přepočtení na závislost smluvního napětí na poměrné deformaci. Příklad smluvního diagramu tahové zkoušky uvádí obr. 58.



Obr. 58 Smluvní diagram napětí – přetvoření [17]

Mezi základní napěťové materiálové charakteristiky smluvního tahového diagramu patří mez kluzu, mez pevnosti, tažnost či kontrakce. Nedostatkem smluvního diagramu je především skutečnost, že se při výpočtech smluvního napětí σ , někdy také obecně označovaného jako R , vztahuje síla na počáteční průřez vzorku. Systém smluvní napětí – poměrné přetvoření tak lze využít pouze pro malé hodnoty deformace, u kterých dochází jen k malým změnám tvaru zkušebního tělesa.

Pro zadávání úplných vstupních údajů materiálového modelu do systémů MKP je tak nutné používat závislost skutečného napětí na skutečném (logaritmickém) přetvoření. Zde je již napětí určeno jako podíl síly a okamžité plochy průřezu zkušební vzorku. Rozdíl mezi smluvním a skutečným tahovým diagramem zobrazuje obr. 59.



Obr. 59 Smluvní a skutečný tahový diagram [68]

Pro oblast rovnoměrné (stabilní) deformace tahové zkoušky, kdy dochází k rovnoměrnému protahování zkušebního vzorku, tj. do meze plastické stability na mezi pevnosti, se pro přepočítání smluvních hodnot tahového diagramu na skutečné používají vztahy (5.14) a (5.15).

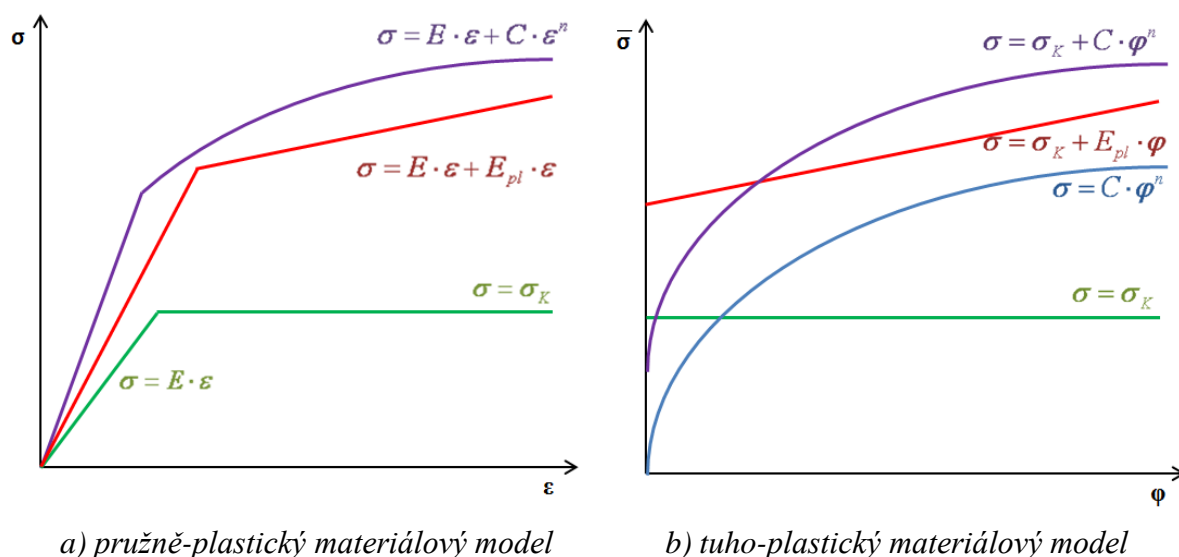
$$\bar{\sigma} = \sigma \cdot (1 + \varepsilon), \quad (5.14)$$

kde $\bar{\sigma}$ je skutečné napětí [MPa],
 σ je smluvní napětí [MPa],
 ε je poměrné přetvoření [-].

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon), \quad (5.15)$$

kde φ je logaritmické přetvoření [-].

Při zadávání materiálových křivek do systémů MKP se rozlišují dle použitého materiálového modelu vlastnosti elastické (modul pružnosti v tahu E a poissonovo číslo μ) a plastické. Pro stanovení elastických vlastností se užívá diagram smluvní napětí – poměrné přetvoření. Plastické vlastnosti již podmiňují zadání hodnot oblasti plastické deformace z diagramu skutečné napětí – logaritmické přetvoření, a to s využitím multilineárního popisu, polynomického proložení, příp. na základě modulu plasticity (zpevnění) apod. V zásadě lze tedy říci, že při použití klasických křivek napětí – přetvoření lze tyto použít s využitím tuho-plastického nebo pružně-plastického modelu, viz obr. 60.



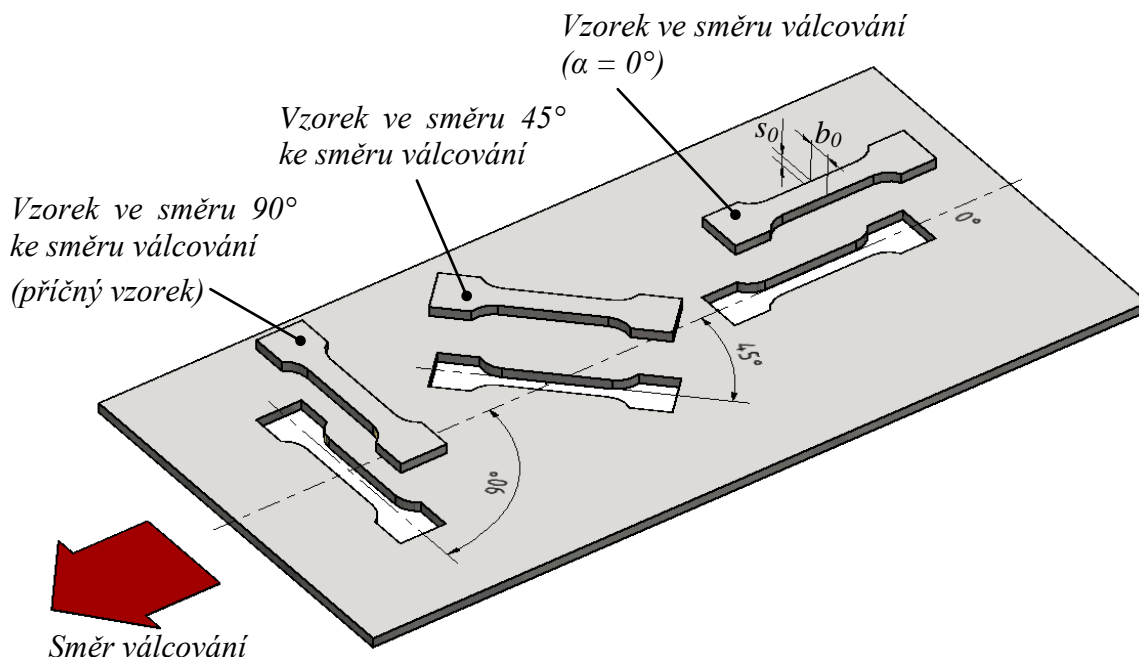
Obr. 60 Materiálové modely [45]

Při zadávání materiálových vlastností jako vstupu simulace MKP je v některých případech třeba zohlednit jejich změnu při odlišných hodnotách teploty a rychlosti přetvoření materiálu, které mohou výrazně ovlivňovat jeho chování.

U simulací plošného tváření je při popisu materiálových vlastností navíc, kromě výše uvedeného, třeba zohlednit i rozdílnost mechanických vlastností materiálu v různých směrech, tj. anizotropii materiálu, která vzniká především v důsledku tepelného zpracování polotovaru či jeho tváření (válcováním). K popisu anizotropních vlastností je možné využít:

- součinitele plastické (normálové) anizotropie,
- součinitele plošné anizotropie.

Pro potřeby numerické simulace v systému MKP je k popisu anizotropie zkoumaného materiálu užíván především součinitel plastické nebo též normálové anizotropie, který vyjadřuje nerovnoměrnost mechanických vlastností v rovině plechu vzhledem ke směru na tuto rovinu kolmou, tedy ve směru tloušťky. Pro zjištění součinitele plastické anizotropie je třeba zohlednit směr testovaného vzorku vůči válcování. Obr. 61 ukazuje typické směry odběru vzorků pro vyhodnocení součinitelů plastické anizotropie.



Obr. 61 Orientace odběru vzorků pro vyhodnocení součinitelů plastické anizotropie [69]

Hodnoty součinitele plastické anizotropie v daných směrech (0° , 45° a 90°) se poté zjišťují na základě provedení tahové zkoušky, a to při 20 % plastické deformace vzorku. Hodnota součinitele plastické anizotropie v příslušném směru je dána vztahem (5.16), tj. podílem hodnoty logaritmického přetvoření ve směru šířky vzorku ku hodnotě logaritmického přetvoření ve směru tloušťky materiálu:

$$r_\alpha = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} = \frac{\int_{b_0}^b \frac{db}{b_0}}{\int_{s_0}^s \frac{ds}{s_0}} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{s}{s_0}} = \frac{\ln \frac{b_0}{b}}{\ln \frac{s_0}{s}}, \quad (5.16)$$

kde r_α je součinitel plastické anizotropie pro úhel α vzhledem ke směru válcování [-],
 φ_b je logaritmické přetvoření ve směru šířky zkušební tělesa [-],
 φ_s je logaritmické přetvoření ve směru tloušťky zkušební tělesa [-],
 b je šířka zkušební tělesa po 20 % plastického přetvoření [mm],
 b_0 je výchozí šířka zkušební tělesa [mm],
 s je tloušťka zkušební tělesa po 20 % plastického přetvoření [mm],
 s_0 je výchozí tloušťka zkušební tělesa [mm].

Souhrnně lze vliv orientace zkoušených vzorků při zjišťování jednotlivých koeficientů r_α vyjádřit střední hodnotou součinitele plastické anizotropie, a to váženým průměrem:

$$r_s = \frac{r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90}}{4}. \quad (5.17)$$

kde r_s je střední hodnota součinitele plastické anizotropie [-],
 r_0 je součinitel plastické anizotropie pro směr 0° ke směru válcování [-],
 r_{45} je součinitel plastické anizotropie pro směr 45° ke směru válcování [-],
 r_{90} je součinitel plastické anizotropie pro směr 90° ke směru válcování [-].

Součinitel plošné anizotropie popisuje nerovnoměrnost mechanických vlastností materiálu v rovině plechu, a to pro daný směr (úhel) vzhledem ke směru válcování. Hodnota plošné anizotropie je ovlivněna především mikrostrukturou materiálu, velikostí a tvarem zrn, vměstky a jejich rozložením v materiálu.

Součinitel plošné anizotropie se určuje ze směrových hodnot mechanických vlastností materiálu zjištěných z tahové zkoušky, obdobně jako v případě plastické anizotropie, ve směrech 0°, 45° a 90° vzhledem ke směru válcování. Typicky na základě zjištěných hodnot smluvní meze kluzu je součinitel plošné anizotropie popsán vztahem (5.18). Vzorec lze analogicky použít i pro hodnoty meze pevnosti či tažnosti.

$$a_{R_p 0,2} = \frac{R_p 0,2(\alpha) - R_p 0,2(0^\circ)}{R_p 0,2(0^\circ)} \cdot 100, \quad (5.18)$$

kde $a_{R_p 0,2}$ součinitel plošné anizotropie pro smluvní mez kluzu [%],
 $R_p 0,2$ je smluvní mez kluzu [MPa],
 α je směr v rovině plechu vzhledem ke směru válcování [°].

K popisu anizotropních vlastností tvářeného materiálu je možné využít v simulačních programech hned několik možných materiálových modelů, a to v závislosti na možnostech toho kterého softwaru. Jedná se o modely:

- Hill 1948,
- Hill 1990,
- Barlat 1989,
- Barlat 1991,
- Barlat 2000,
- Corus-Vegter.

Nejpoužívanější materiálové modely jsou založené na podmínce plasticity Hill 1948, která představuje zobecnění podmínky plasticity HMM (Hüber – Mises – Hencky). Pro hlavní směry, dané kartézským souřadným systémem, je možné podmínku plasticity Hill 1948 hledat ve tvaru:

$$\bar{\sigma}_{Hill} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{F \cdot (\sigma_y - \sigma_z)^2 + G \cdot (\sigma_z - \sigma_x)^2 + H \cdot (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2 \cdot L \cdot \tau_{yz}^2 + 2 \cdot M \cdot \tau_{xz}^2 + 2 \cdot N \cdot \tau_{xy}^2}, \quad (5.19)$$

kde σ_i je hlavní normálové napětí [MPa],
 τ_{ij} je hlavní smykové napětí [MPa],
 F, G, H, L, M a N jsou experimentálně zjištěné koeficienty [-].

Pro úlohy modelování plošného tváření většinou osa x koresponduje se směrem válcování plechu, osa y je vedena příčně ke směru válcování a osa z ve směru normály, tj. tloušťky plechu. Pro účely stanovení podmínky plasticity je třeba určit koeficienty F, G, H, L, M a N , které souvisejí s mezí kluzu materiálu v jednotlivých směrech. Stanovení těchto koeficientů je možné za použití různých strategií. V základu lze jednotlivé konstanty určit na základě znalosti poměrných hodnot mezí kluzu v různých směrech vzhledem ke směru válcování materiálu následovně:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{1}{R_x^2} + \frac{1}{R_y^2} + \frac{1}{R_z^2} \right), \quad (5.20)$$

$$G = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{R_x^2} - \frac{1}{R_y^2} + \frac{1}{R_z^2} \right), \quad (5.21)$$

$$H = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{R_x^2} + \frac{1}{R_y^2} - \frac{1}{R_z^2} \right), \quad (5.22)$$

$$L = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{R_{yz}^2}, \quad (5.23)$$

$$M = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{R_{xz}^2}, \quad (5.24)$$

$$N = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{R_{xy}^2}, \quad (5.25)$$

kde R_x , R_y a R_z jsou poměrné hodnoty mezí kluzu pro směry os x , y a z [-],
 R_{xy} , R_{yz} a R_{zx} jsou poměrné hodnoty mezí kluzu pro roviny xy , yz a zx [-].

Výše uvedené poměrné hodnoty mezí kluzu materiálu pro různé směry či roviny, jež v některých výpočetních softwarech přímo představují vstupní hodnoty popisující materiálový model, lze určit na základě vztahů (5.26) až (5.31).

$$R_x = \frac{\sigma_{kx}}{\sigma_{kREF}}, \quad (5.26)$$

$$R_y = \frac{\sigma_{ky}}{\sigma_{kREF}}, \quad (5.27)$$

$$R_z = \frac{\sigma_{kz}}{\sigma_{kREF}}, \quad (5.28)$$

$$R_{xy} = \sqrt{3} \cdot \frac{\tau_{kxy}}{\sigma_{kREF}}, \quad (5.29)$$

$$R_{yz} = \sqrt{3} \cdot \frac{\tau_{kyz}}{\sigma_{kREF}}, \quad (5.30)$$

$$R_{zx} = \sqrt{3} \cdot \frac{\tau_{kxz}}{\sigma_{kREF}}, \quad (5.31)$$

kde σ_{kx} , σ_{ky} , σ_{kz} jsou normálová napětí na mezi kluzu pro směry os x , y a z [MPa],
 σ_{kREF} je referenční hodnota normálového napětí na mezi kluzu [MPa],
 τ_{kxy} , τ_{kyz} , τ_{kxz} jsou smyková napětí na mezi kluzu pro roviny xy , yz a zx [MPa].

Velmi často se ovšem k určení poměrných hodnot mezí kluzu, a tím i koeficientů Hillovy podmínky, využívají experimentálně zjištěné hodnoty součinitelů plastické anizotropie pro směry 0° , 45° a 90° vzhledem ke směru válcování (r_0 , r_{45} a r_{90}). Literatura [64] uvádí výpočty jednotlivých koeficientů za zjednodušující podmínky rovinné napjatosti, kdy platí $\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$, dle vztahů (5.32) až (5.35). Pro roviny yz a zx se předpokládá izotropní chování, tedy $R_{yz} = R_{zx} = 1$.

$$R_x = 1, \quad (5.32)$$

$$R_y = \sqrt{\frac{r_{90} \cdot (r_0 + 1)}{r_0 \cdot (r_{90} + 1)}}, \quad (5.33)$$

$$R_z = \sqrt{\frac{r_{90} \cdot (r_0 + 1)}{r_0 + r_{90}}}, \quad (5.34)$$

$$R_{xy} = \sqrt{\frac{3 \cdot r_{90} \cdot (r_0 + 1)}{(2 \cdot r_{45} + 1) \cdot (r_0 + r_{90})}}, \quad (5.35)$$

Pokud platí $F = G = H = 1$ a $N = 3$, potom podmínka plasticity Hill 1948 přechází do klasického tvaru dle podmínky plasticity HMMH.

5.4 Simulační prostředí analýzy plošného tváření [72], [73], [74], [75], [76]

V dnešní době se na trhu vyskytuje celá řada softwarů určených k numerickým simulacím technologických procesů oblasti plošného tváření. Liší se nejen přístupem k řešení (implicitní, explicitní algoritmus), ale i v šířce možností proveditelných analýz. S pomocí výpočtu MKP softwarů se obecně v oblasti plošného tváření sledují výstupy typu:

- vykreslení průběhu napětí a přetvoření po průřezu lisovaného dílce,
- stanovení změny tloušťky lisovaného materiálu,
- predikce odpružení,
- tvorba limitních diagramů mezní tvářitelnosti,
- určení kritických míst zatěžovaných nástrojů,
- stanovení průběhu síly lisovníku (přidržovače).

Specializované softwary zaměřené na konkrétní technologii a k tomu přizpůsobené nabídkou proveditelných analýz nabízejí uživatelům vesměs jednodušší intuitivní ovládací prostředí.

Pro počítačovou podporu technologií plošného tváření lze do této kategorie zařadit například softwary PAM–STAMP, Simufact Forming, AutoForm, Dynaform apod. Uvedené softwary rovněž disponují specializovanými moduly, které úzce vymezují řešenou problematiku v rámci plošného tváření v návaznosti na úlohy, které je přímo potřeba u dané výroby či vyráběného dílce řešit. Většina softwarů tak pokrývá širokou oblast celého výrobního řetězce:

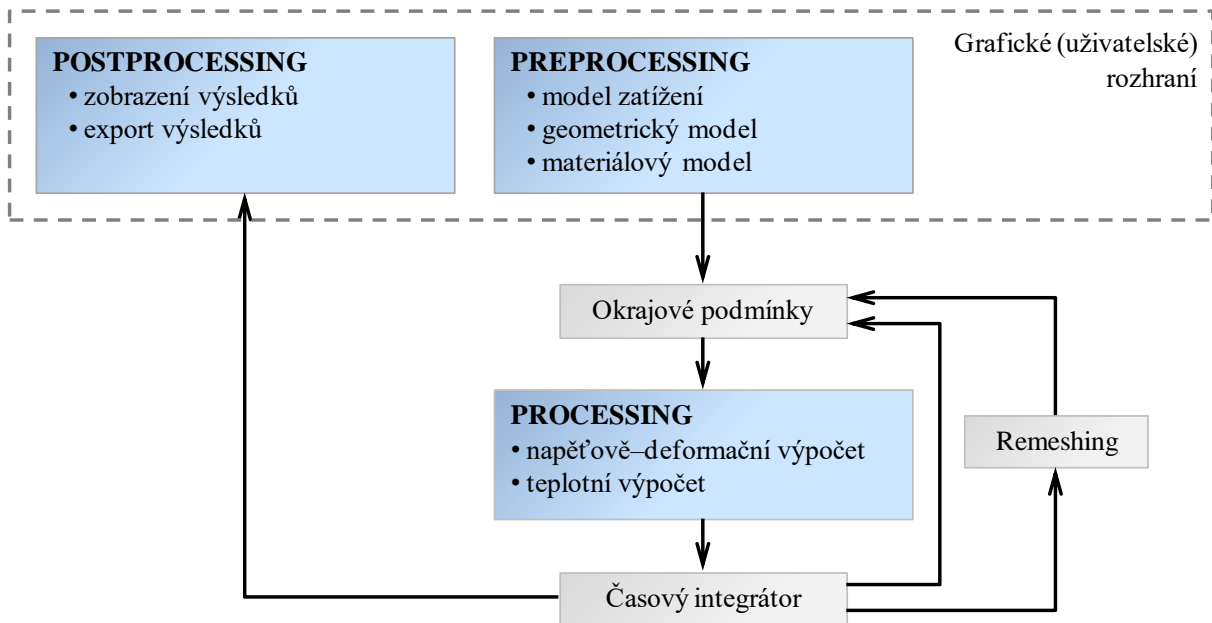
- analýza vlastní lisovací operace,
- analýza odpružení po vylisování,
- analýza a optimalizace ostřížení výlisku,
- analýza tepelného zpracování výlisku,
- analýza a optimalizace třecích parametrů,
- analýza robustnosti výlisku – optimalizace,
- tvorba geometrie nástroje,
- analýza opotřebení nástrojů,
- plánování výrobního procesu.

Naproti tomu univerzální softwary, jako například ANSYS, Abaqus, MSC Marc, LS-DYNA aj. již umožňují hlubší možnosti nastavení výpočetních analýz, a to od volby elementů konečnoprvkové sítě, přes modelování materiálových či kontaktních podmínek až po detailní nastavení parametrů a algoritmů vlastního výpočtu. To s sebou ovšem přináší i nevýhody v podobě složitějšího ovládání.

Obecně lze ale konstatovat, že obě zmíněné skupiny softwarů jsou založeny na stejné architektuře, tedy jakémusi modulovém uspořádání. Práce s každým simulačním softwarem se tak rozděluje do tří základních etap (fází):

- a) preprocessing (preprocessor) – příprava geometrického a materiálového modelu, okrajové podmínky, parametry pracovního procesu apod.,
- b) processing (solver/řešič) – vlastní výpočet, sestavení a řešení maticových rovnic,
- c) postprocessing (postprocessor) – výpočet (dopočet) závislých parametrů, zobrazení a export výsledků analýzy.

Uvedené fáze práce se simulačním softwarem jsou navzájem propojeny, jak dokumentuje obr. 62, který zobrazuje základní blokové schéma činnosti simulačního softwaru.

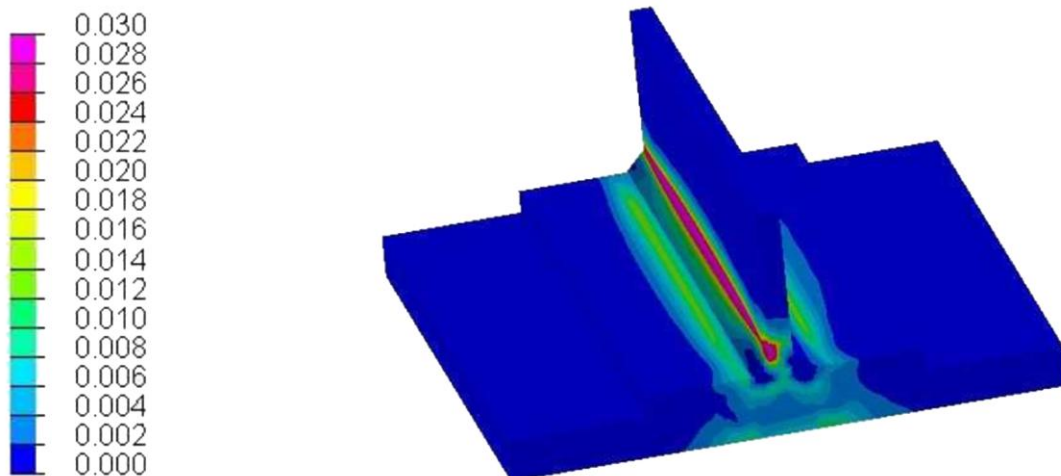


Obr. 62 Schéma činnosti simulačního softwaru [76]

Z výše uvedeného výčtu specializovaných i univerzálních softwarů budou v dalším textu blíže popsány ty programy, které byly pro disertační práci použity.

5.4.1 Sysweld [77]

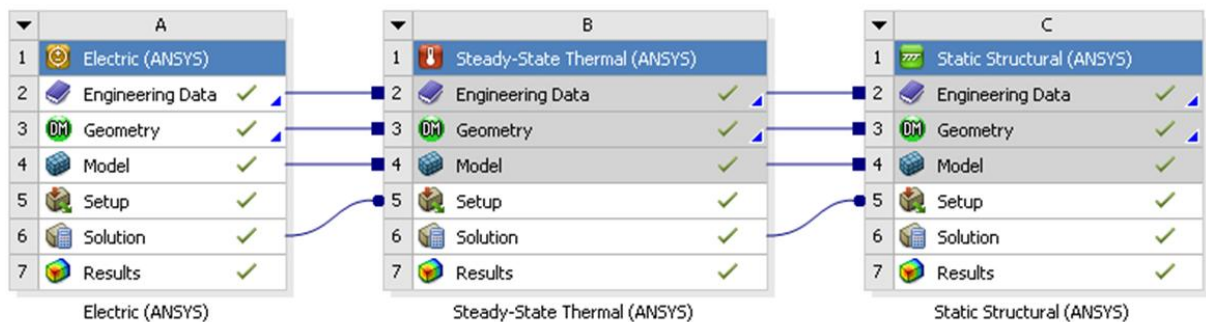
Software Sysweld společnosti ESI Group slouží především pro numerickou analýzu svařovacích operací či tepelného zpracování. Umožňuje posouzení vzniku a velikosti tepelně ovlivněné oblasti, velikosti zbytkových napětí či deformace dílce vzniklé svařovacím procesem, jak uvádí obr. 63. V oblasti plošného tváření svařovaných dílců lze software Sysweld použít ke zpřesnění materiálových vlastností v oblasti svaru, kde svařením dochází k větším či menším změnám v mechanických vlastnostech tvářeného materiálu.



Obr. 63 Příklad využití softwaru Sysweld – analýza kumulativního přetvoření svařence [78]

5.4.2 ANSYS [72], [79]

Software ANSYS slouží k numerickým simulacím lineárních i nelineárních multifyzikálních problémů zahrnujících např. strukturní, termomechanickou, elektrodynamickou, akustickou analýzu nebo analýzu proudění. V prostředí softwaru ANSYS je možné zmíněné analýzy řešit buďto odděleně nebo též společně v jediné multifyzikální úloze, viz obr. 64, který ukazuje propojení tří analýz (modulů) v prostředí ANSYS Workbench.

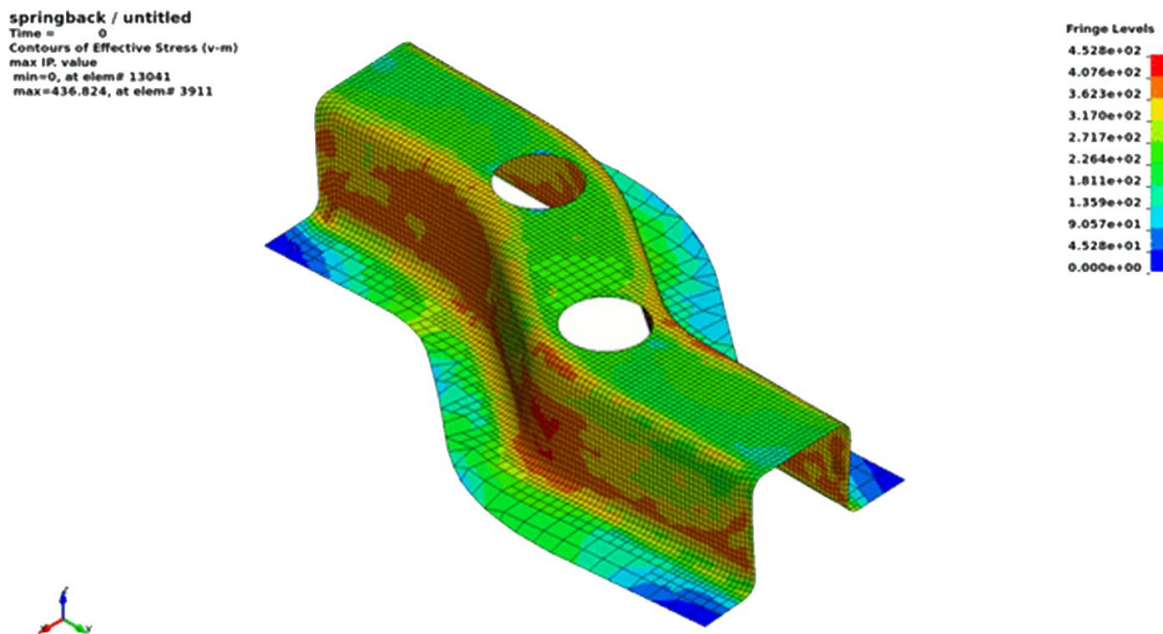


Obr. 64 Prostředí ANSYS Workbench [79]

Kromě již zmíněného prostředí ANSYS Workbench software nabízí i platformu ANSYS Mechanical pro komplexnější definici, je možné říci přímo „programování“, úloh jazykem APDL (ANSYS Parametric Design Language), který je společný jak pro ANSYS Workbench, tak i ANSYS Mechanical. I když software ANSYS podporuje implicitní i explicitní algoritmus výpočtu, používá se především jako robustní implicitní řešič.

5.4.3 LS-DYNA [80], [81]

V případě explicitních analýz lze v oblasti processingu použít rozšíření programu ANSYS, a to řešič LS-DYNA, jež byl vyvinut společností Livermore Software Technology Corporation. V současnosti je ovšem licencován i pod platformou ANSYS. Software LS-DYNA je vhodný především pro analýzy vysokorychlostních a vysoce nelineárních dějů, kdy se v krátkém časovém úseku dosahuje vysokých hodnot přetvoření. Avšak tento fakt nikterak nebrání využití zmíněného softwaru i pro kvazistatické úlohy, do kterých bezpochyby spadají i analýzy v oblasti tváření, viz obr. 65. Jakožto univerzální řešič MKP je používán v automobilovém a leteckém průmyslu, ve stavebnictví či vojenských aplikacích.

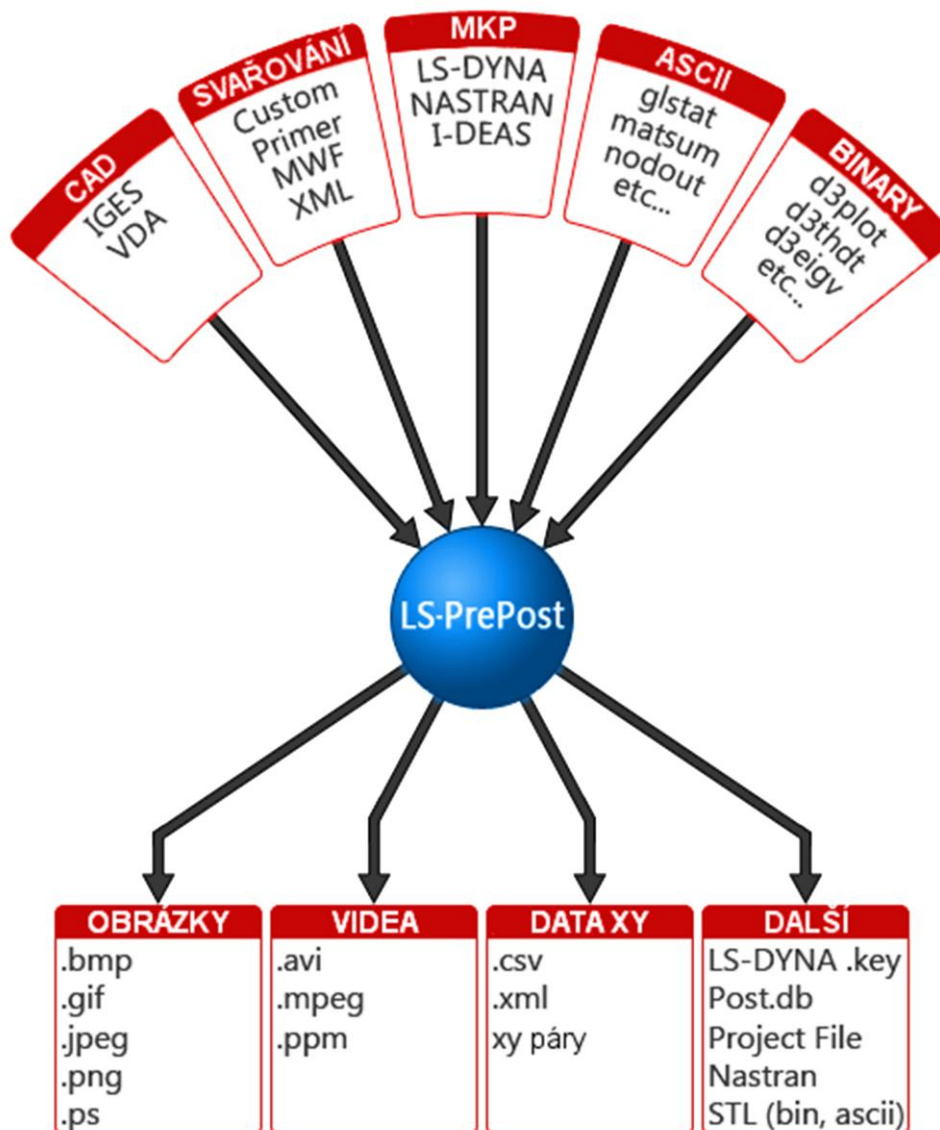


Obr. 65 Analýza plošného tváření – odpružení softwarem LS-DYNA [82]

Zatímco softwaru ANSYS Workbench či ANSYS Mechanical v sobě integrují oblasti preprossingingu, processingu i postprocessingu do jednoho celku, LS-DYNA zahrnuje pouze řešič. Z toho vyplývá potřeba doplnit oblasti preprossingingu a postprocessingu jiným softwaru tak, aby bylo možné řešenou úlohu definovat a po provedení výpočtu vyhodnotit výsledky.

5.4.4 LS-PrePost [83]

Při editaci vstupních dat simulace či zobrazení jejích výstupů lze s výhodou použít software LS-PrePost. Jak název napovídá, jedná se o prostředí pro preprocessing a postprocessing, a to primárně v součinnosti s řešičem LS-DYNA. Prostředí LS-PrePostu nabízí podporu tvorby zdrojového kódu softwaru LS-DYNA (LS-DYNA keyword), vizualizaci výpočtového modelu, tj. modelu geometrie, konečnoprvkové sítě, zatížení apod., jeho tvorbu a úpravy a v neposlední řadě též prostředí postprocessingu, které umožňuje nejenom zobrazení výsledků simulace v podobě mapovaných povrchů či grafů, ale rovněž jejich export do dalších prostředí. Možnosti softwaru souhrnně popisuje obr. 66.



Obr. 66 Schéma činnosti softwaru LS-Prepost [83]

6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

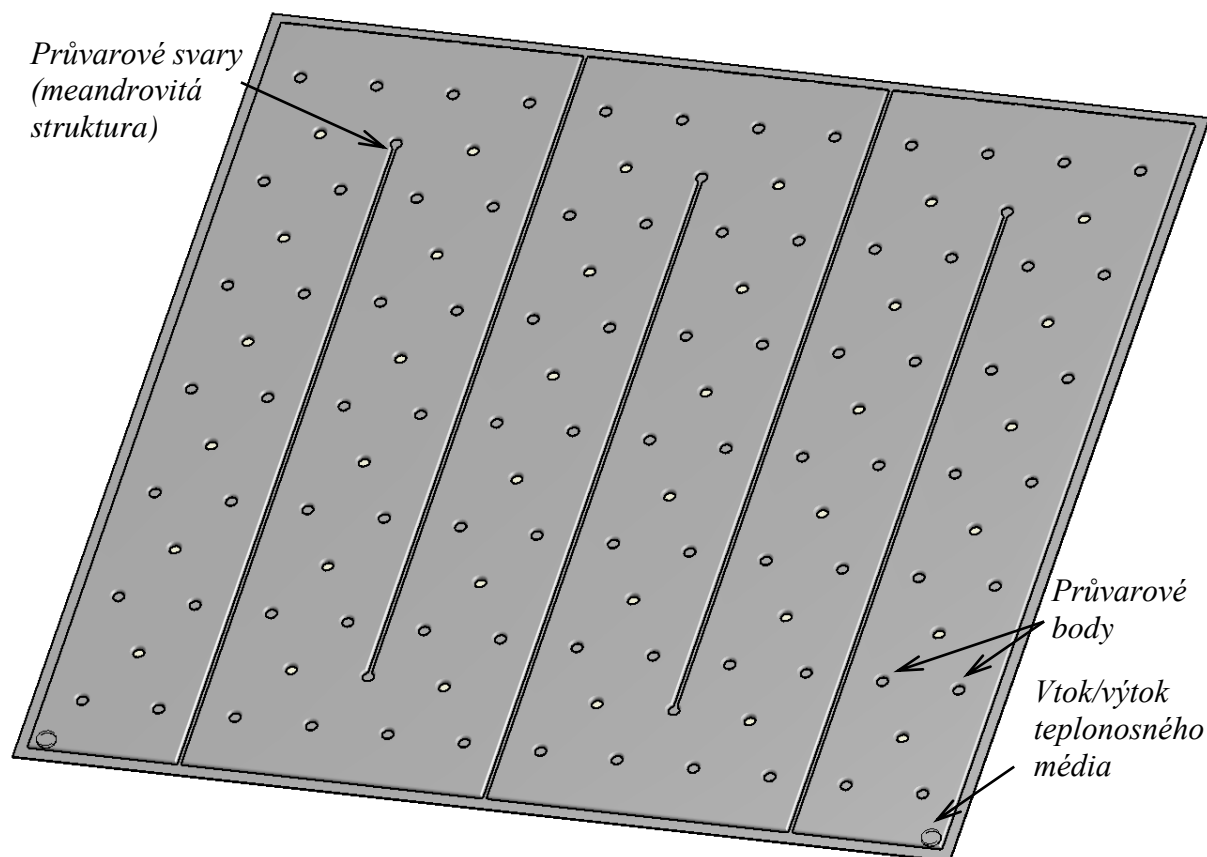
Jak již bylo výše zmíněno, pro výrobu přímo protékaných solárních absorbérů se v základu jeví jako nejvhodnější výrobní technologie hydroformování v součinnosti s laserovým svařováním, resp. metoda paralelního hydroformování (pillow hydroforming) aplikovaná na polotovary – dvojici po obvodě laserem svařených plechů. Sdružením s technologií laserového svařování lze totiž v daném případě docílit výrazného zvýšení efektivity výroby, neboť odpadá problém složitého přípravkování případných dílců lisovaných odděleně. Otvory, nutné pro přívod a odvod lisovacího média v systému paralelního hydroformování, budou s výhodou použity i jako vstup a výstup pro teplotně odolné médium protékající tělem budoucího absorbéru.

Na základě vypracované rešerše a zhodnocení možných přístupů k řešení problematiky aplikace hydroformování byly stanoveny jednotlivé etapy řešení korespondující s dílčími cíli dizertační práce:

1. vyhodnocení vstupních materiálových testů tvářené oceli:
 - stanovení křivky zpevnění provedením tahové zkoušky,
 - posouzení vlivu anizotropie stanovením koeficientů plastické anizotropie,
2. stanovení limitů při hydroformování konstrukcí diagramu mezní tvářitelnosti pro uvažované tloušťky výchozího materiálu (předpokládá se využití zařízení pro Erichsenovu zkoušku hlubokotažnosti s modifikací tvaru vzorků),
3. realizace zkušební hydroformovacího přípravku pro ověření lisovatelnosti požadované struktury (jehlanovitého strukturovaného povrchu s vrcholovými úhly 90° a 60°),
4. posouzení ovlivnění lisované oblasti tvářeného materiálu v blízkosti svaru vlivem laserového svařování:
 - měření tvrdosti svaru a tepelně ovlivněné oblasti,
 - provedení simulace svařování v softwaru MKP Sysweld,
5. sestavení teoretického modelu numerické simulace hydroformování a její vyhodnocení:
 - tvorba materiálového modelu tvářeného plechu,
 - tvorba geometrického modelu simulace (provedení diskretizace),
 - provedení ověřovací simulace – volba vhodného řešiče porovnáním softwarů ANSYS Workbench (Mechanical) a ANSYS LS-DYNA,
 - vyhodnocení tvářitelnosti požadovaných jehlanovitých struktur, včetně stanovení optimálních lisovacích podmínek,
6. vyhodnocení experimentálně vylisovaných strukturovaných povrchů a verifikace řešení MKP porovnáním výsledků experimentů s numerickou simulací:
 - měření změny tloušťky výlisků třmenovým mikrometrem,
 - stanovení změny tloušťky výlisků 3D optickým bezkontaktním snímáním povrchu systémem ATOS Triple Scan 8M,
7. posouzení vlivu změny geometrie lisovnice a geometrie svarů na hydroformovací proces a příp. optimalizace geometrie lisovacího nástroje.

6.1 Technologie výroby

Níže je popsána výroba těla přímo protékaného solárního absorbéru, na jehož výrobu bude využit systém paralelního hydroformování. Jedná se o základní koncept, který neobsahuje strukturovaný povrch, nýbrž pouze plochou absorpční část. Základní prvky zmíněného absorbéru jsou znázorněny na obr. 67. Sestavu celého solárního kolektoru, jehož je absorbér součástí, znázorňuje příloha 1.

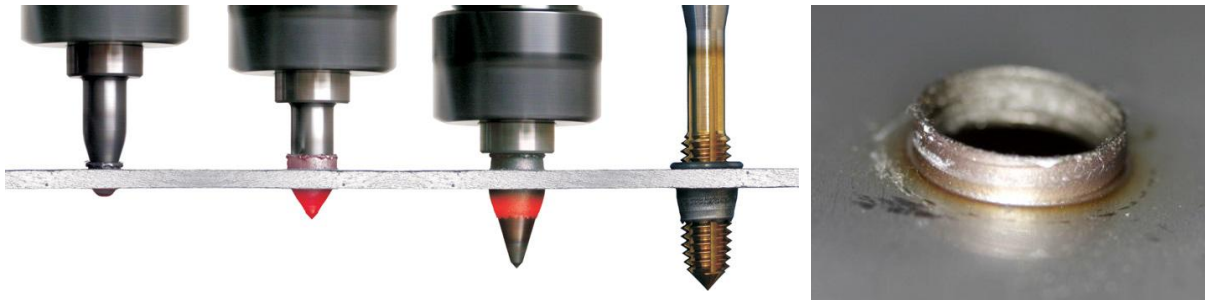


Obr. 67 Solární absorbér s přímo protékanou strukturou o rozměrech 1000×1000 mm

Uvažovaný výrobní postup se skládá ze čtyř, resp. z pěti základních kroků:

1. výroba dvou přístřihů plechu (1000×1000 mm) technologií laserového řezání (uvažovaná tloušťka plechů 0,5 až 1,0 mm),
2. výroba otvorů pro přívod a odvod tvářecího a teplosměnného média včetně výroby závitů v jednom z plechů,
3. svaření dvou přístřihů plechu průvarem – vytvoření meandrovité struktury a průvarových bodů v podobě kruhových svarů pro zvýšení tuhosti absorbéru,
4. lisování – hydroformování plechového polotovaru v dutině hydroformovacího nástroje,
5. případné povlakování absorbéru pro zvýšení jeho tepelné účinnosti.

Pro zhotovení dvou otvorů pro přívod a odvod tvářecího a teplosměnného média včetně závitů bylo zvoleno řešení výroby pomocí technologie termálního vrtání systémem Flowdrill. Na rozdíl od konvenčního řešení, kdy je k vystřiženému či laserem vyříznutému otvoru v plechu přivařena nebo připájena externí příruba, je metoda Flowdrill ekonomičtější. Vzniklý lem je velmi robustní, navíc snese vysoká tahová zatížení. Princip vytváření otvoru se závitěm metodou flowdrill znázorňuje obr. 68a. Vzniklý lemovaný otvor s vytvořeným závitěm G1/4" potom zobrazuje obr. 68b.



a) Princip technologie Flowdrill

b) otvor G1/4" v plechu tl. 0,5 mm

Obr. 68 Technologie Flowdrill [7]

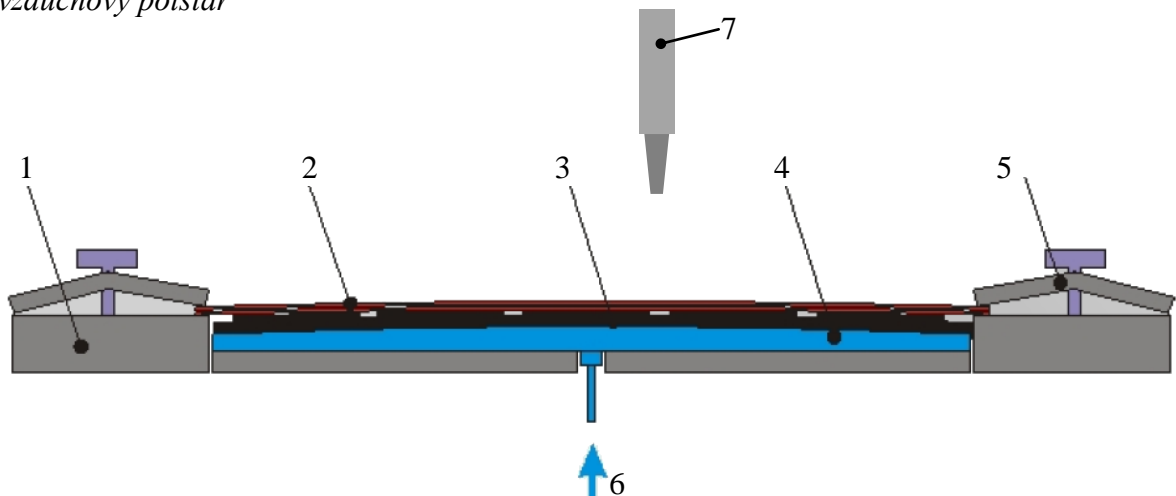
Svaření dvou přístřihů plechu průvarovými svary bylo realizováno technologií laserového svařování v tzv. penetračním režimu, kdy je možné svařit dva i více na sebe položených plechů. Oproti obloukovým a odporovým metodám disponuje řádově vyšší svařovací rychlostí. Díky strojnímu vedení lze navíc programovat svary prakticky libovolného tvaru. Svařovací postup spočívá v upnutí dvou plechových přístřihů do přípravku a následném svaření vláknovým laserem YLS 2000 s maximálním výkonem na výstupu 2 kW. Svařovací hlava Precitec YW30 je polohována průmyslovým robotem firmy ABB viz obr. 69.



Obr. 69 Laserové svařovací zařízení

Aby nedocházelo ke špatným průvarům díky mezerám mezi plechy je pro jejich těsné přilnutí použit přípravek pro svařování dle obr. 70. V prostoru pod svařencem se nachází membrána, která v součinnosti s přivedeným stlačeným vzduchem vytvoří polštář, který přitiskne oba plechy k sobě.

- | | |
|--------------------------------|-------------------------------|
| 1 – základový rám | 5 – upínací kleština |
| 2 – dvojice svařovaných plechů | 6 – přívod stlačeného vzduchu |
| 3 – plovoucí svařovací šablona | 7 – laserová svařovací hlava |
| 4 – vzduchový polštář | |

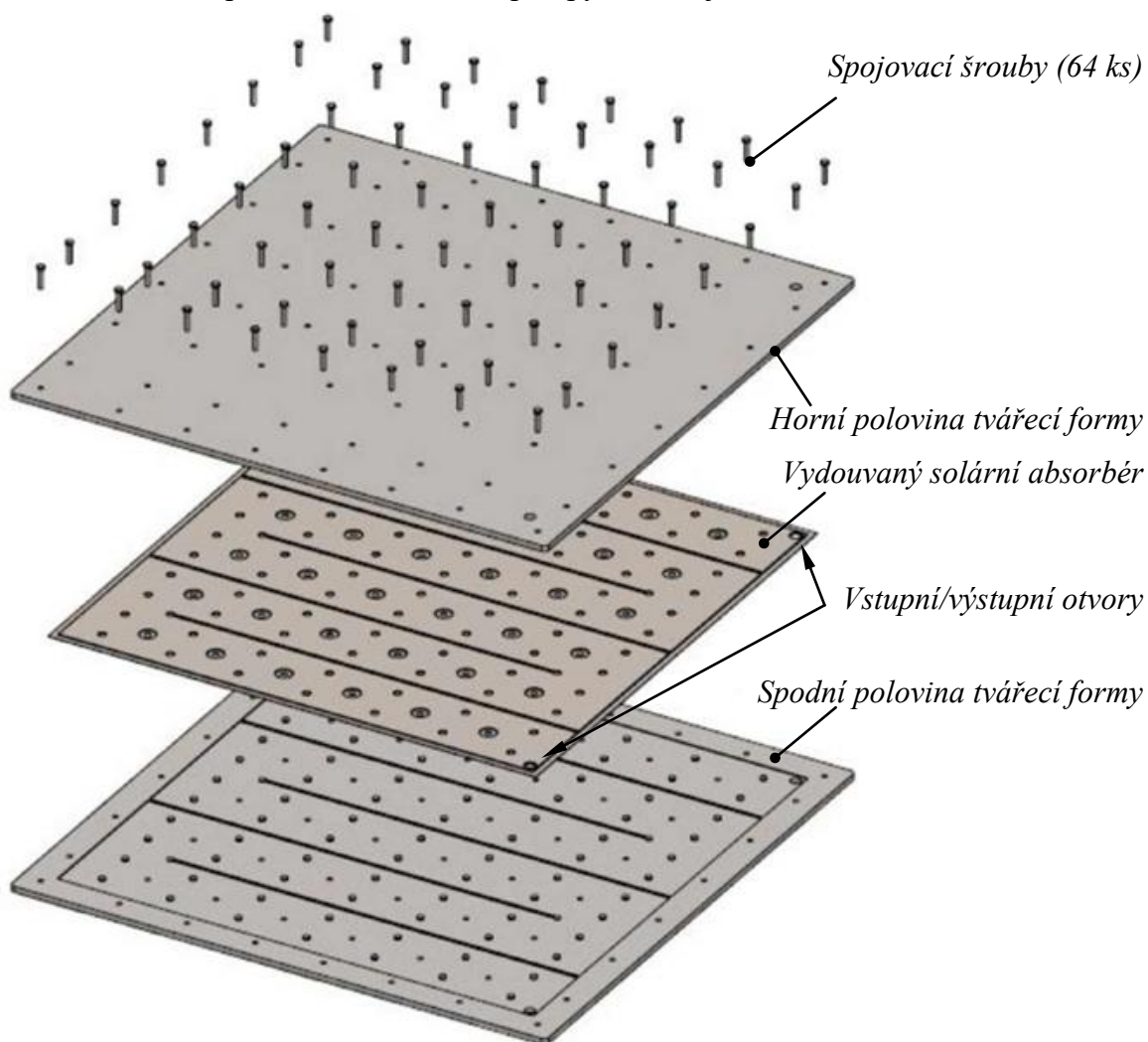


Obr. 70 Svařovací přípravek pro přitlačení plechů [6]

Dalším technologickým krokem po svaření je hydroformování. Pro tváření absorbéru formátu 1000×1000 mm je počítáno s kazetovým řešením tvářecího nástroje. Schéma provedení lisovacího nástroje pro vytvoření plochého povrchu (bez jehlanovité struktury) uvádí obr. 72. Polotovár – svařenec je sevřen mezi dvěma ocelovými deskami (lisovnicemi) tloušťky 12 mm, do kterých je vyfrézován potřebný meandrovitý tvar budoucího absorbéru, a to do hloubky 2 mm pro obě poloviny. Hydroformování je prováděno pomocí vodní tlakové pumpy, která je propojena se vstupním otvorem polotovaru přes šroubovou spojku. Ke druhému otvoru polotovaru je přišroubován uzavírací ventil zajišťující odvětrání před vlastním tvářením. Tváření solárního absorbéru pomocí vodní tlakové pumpy zobrazuje obr. 71.



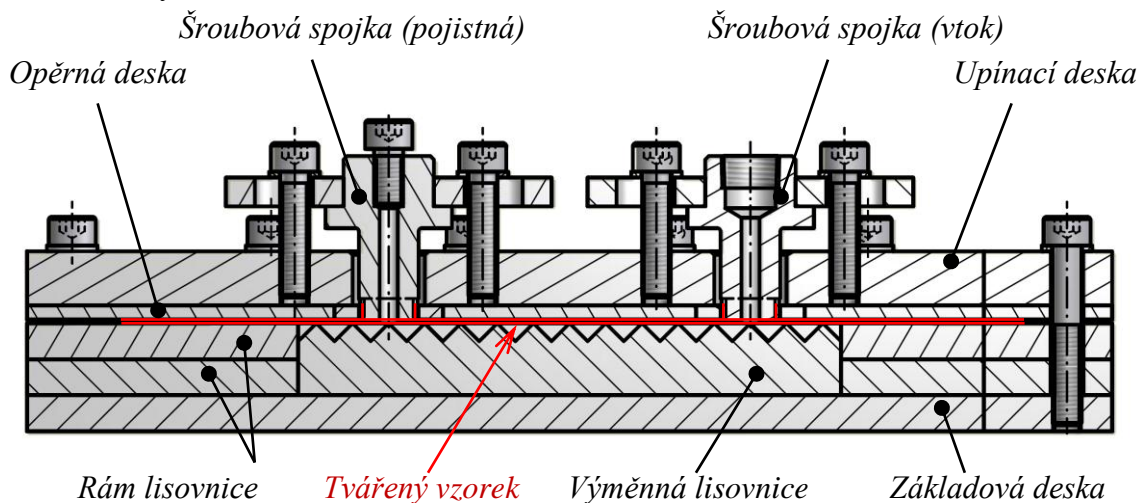
Obr. 71 Tvářecí forma s tlakovou pumpou



Obr. 72 Schéma tvářecí formy

Vzhledem k velké ploše absorbéru dochází i při relativně malých hodnotách lisovacího tlaku k velkému namáhání lisovacího nástroje. Proto jsou obě poloviny tvářecí formy sešroubovány s využitím sítě otvorů vytvořených v polotovaru solárního absorbéru (průvarových bodů). Pro sešroubování jsou použity pevnostní šrouby M8 G12,96. Tato konstrukce umožňuje použít tvářecí tlak až 0,8 MPa.

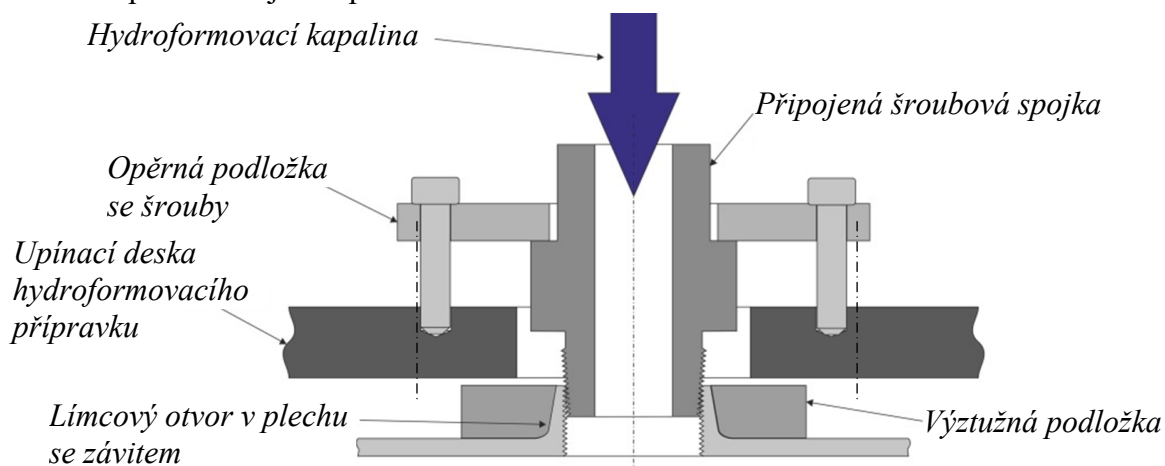
Řešení problematiky vytváření strukturovaných povrchů hydroformováním, jakož i řešení svařovacího procesu je nutné nejprve ověřit na vzorku menších rozměrů. Proto bylo před realizací strukturovaného povrchu na ploše 1000×1000 mm nejprve uvažováno s hydroformováním polotovaru o rozměrech 250×250 mm s velikostí lisované oblasti 150×150 mm (obr. 75a) opatřeným zjednodušenou variantou meandrovité struktury (středovým svarem). Vzorek je svařen ze dvou plechů: základního tloušťky 1 mm s otvory pro vstup a výstup tvářecího média a tvářeného o základní tloušťce 0,5 mm. Pro verifikaci reálného tvářecího procesu a následně též numerického modelu byl v dalším pro vzorky o velikosti 250×250 mm vyvinut lisovací přípravek, na jehož základní části byl použit materiál S235JRG2 (ČSN 41 1375). Přípravek využívá taktéž kazetový systém, viz schematický náčrt na obr. 73.



Obr. 73 Lisovací přípravek

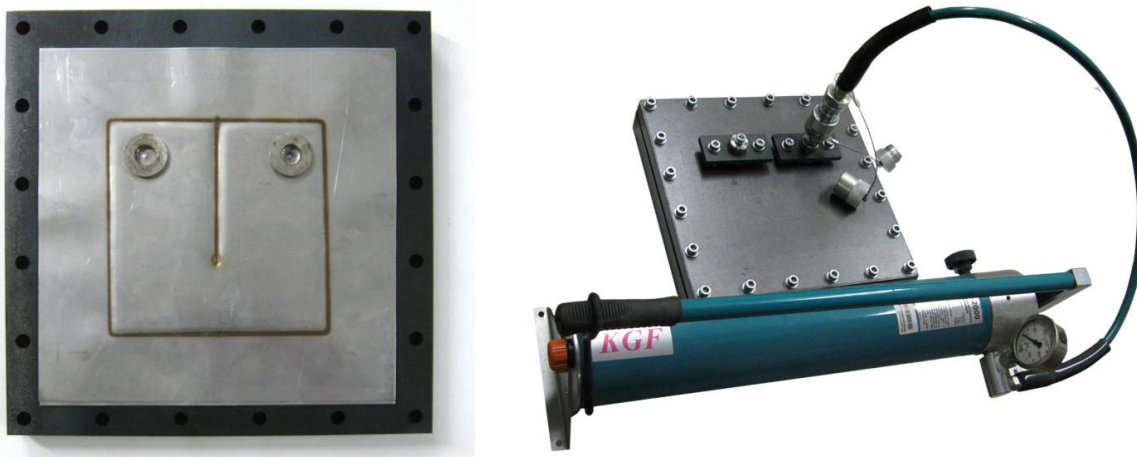
Tváření zde probíhá ve vysokotlaké kazetě s vnitřním povrchem lisovnice odpovídajícím požadovanému strukturovanému povrchu, tj. jehlanovité struktuře s vrcholovými úhly 90° nebo 60° . Aby bylo možné testovat různé geometrie jehlanových dutin, je konstrukce přípravku uzpůsobena k snadné výměně matrice vytvářející strukturovaný povrch. Tlak formovacího média (oleje HM-46) je řízen přes dvoustupňovou ruční tlakovou pumpu s maximálním tlakem 70 MPa, která se k přípravku připojuje pomocí šroubové rychlospojky.

Vstup tvářecí kapaliny do vzorku je realizován přes lemovaný otvor se závitem G 1/4", vytvořený termálním vrtáním, do kterého je našroubována šroubová spojka systémem dle obr. 74. Aby nedocházelo při hydroformování ke zborcení tvaru lemovaného otvoru, je použito výztužné podložky, jejíž výška odpovídá výšce vytvářeného lemu a profil vnitřního otvoru odpovídá vnějšímu profilu lemu.



Obr. 74 Realizace přírubového systému pro hydroformování

Aby též nedocházelo k nežádoucímu ovlivnění hydroformování zbylým vzduchem uvnitř svařence, bylo nutné řešit jeho odvodu. Toto je realizováno přes pojistnou šroubovou spojku. Praktickou realizaci celé sestavy, tj. sestavu hydroformovacího přípravku s pumpou zobrazuje obr. 75b. Detailnější 3D model sestavy přípravku je uveden v příloze 2.



a) vnitřní část přípravku s polotovarem

b) sestava přípravku s pumpou

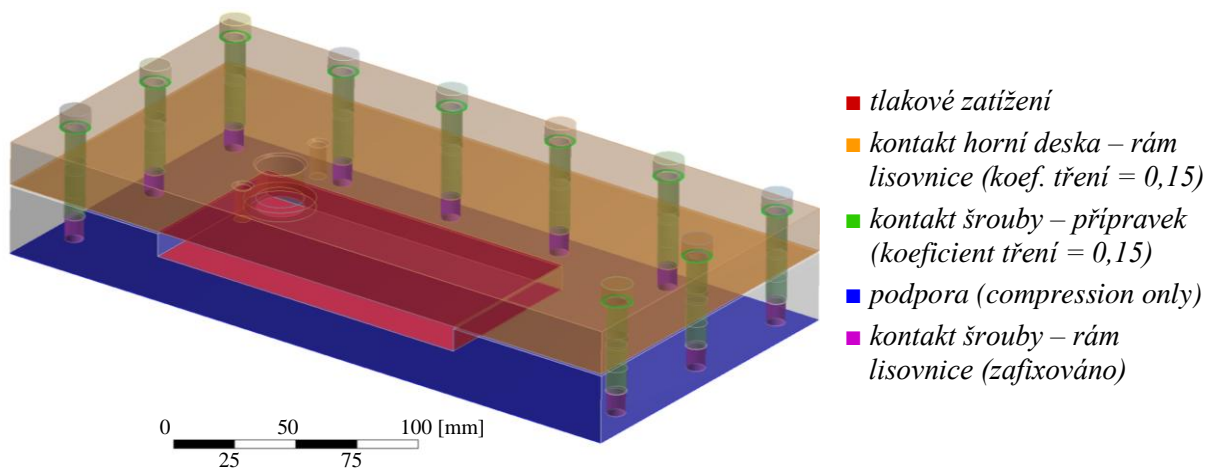
Obr. 75 Praktická realizace hydroformovacího přípravku

Tvářecí tlaky při vytváření strukturovaného povrchu na ploše 150×150 mm jsou natolik vysoké, že samotná tuhost tvářecího přípravku nemusí v tomto směru dostačovat. Tato skutečnost byla predikována numerickou simulací, a to pomocí statické analýzy zatížení hydroformovacího přípravku tlakem tvářecího média. K výpočtu byl použit software ANSYS Workbench, resp. výpočtový modul Static Structural. K materiálovému popisu byl zvolen bilineární materiálový model dle hodnot z tab. 5, jež byly získány na základě [84].

Tab. 5 Bilineární materiálový model oceli S235JRG2

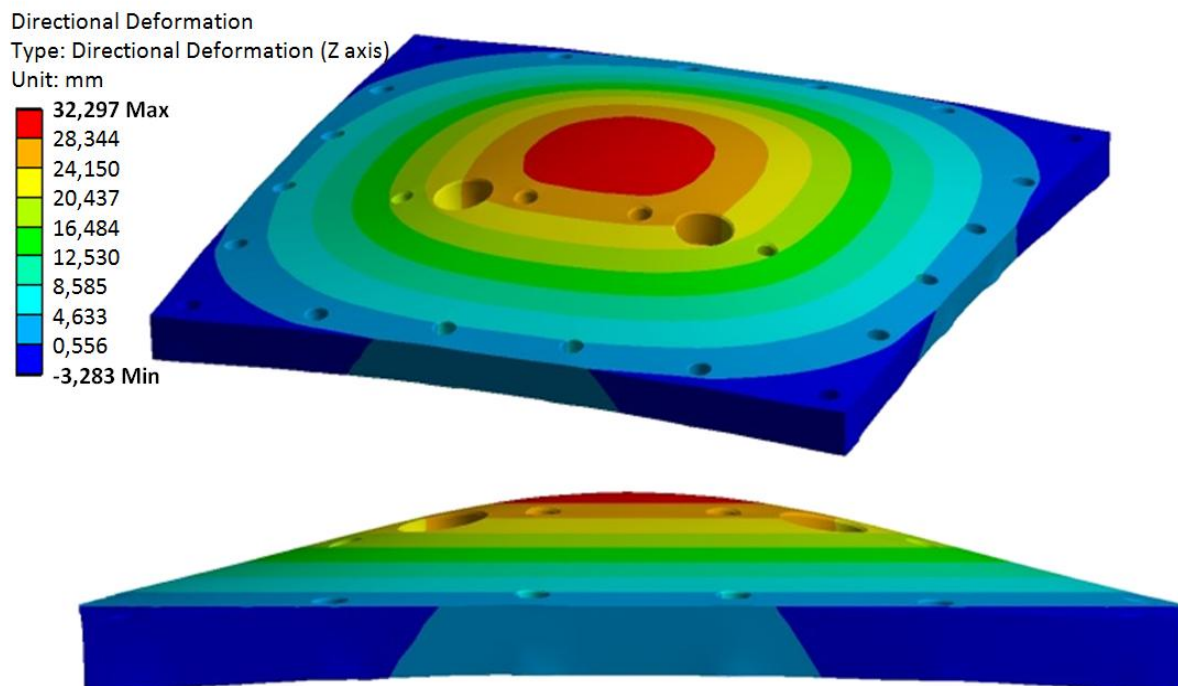
Modul pružnosti v tahu	E	[MPa]	$2,1 \cdot 10^5$
Poissonův poměr	μ	[-]	0,3
Smluvní mez kluzu	$R_{p0,2}$	[MPa]	230
Modul plasticity	E_{pl}	[MPa]	1350

Dále byla vytvořena zjednodušená geometrie výpočtového modelu, jejíž řez je včetně okrajových podmínek úlohy uveden na obr. 76. K diskretizaci byly použity kvadratické šestistěnné prvky. Pro zjednodušení modelu byly šroubové spoje nahrazeny kontaktní podmínkou typu zafixování (svázání s rámem lisovnice). Bylo počítáno s lineárním nárůstem zatížení dutiny lisovnice v rozmezí 0 až 60 MPa.



Obr. 76 Geometrický model lisovacího přípravku

Výsledky numerické simulace dokumentuje obr. 77 představující deformaci přípravku ve vertikálním směru při hodnotě lisovacího tlaku 20 MPa. K nežádoucím deformacím (plastické deformaci) přípravku bez podpory lisu však dochází již od tlaku 7 MPa.



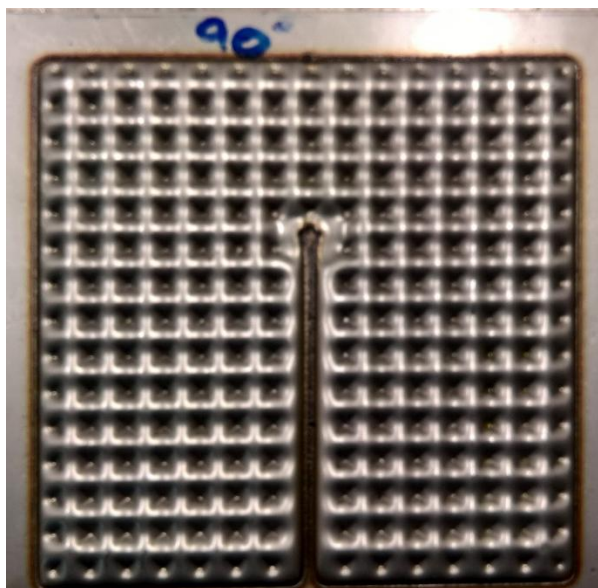
Obr. 77 Deformace upínací desky lisovacího přípravku při tlaku 20 MPa

Aby při hydroformovacím procesu nedocházelo k nežádoucím deformacím přípravku, zařízení se při hydroformování sevře v hydraulickém lisu (CBJ 500-6), který působí jako podpora a zabráňuje možnému vyduťtí lisovacího přípravku. Jedině za těchto podmínek je možné provádět hydroformovací experimenty, viz obr. 78.

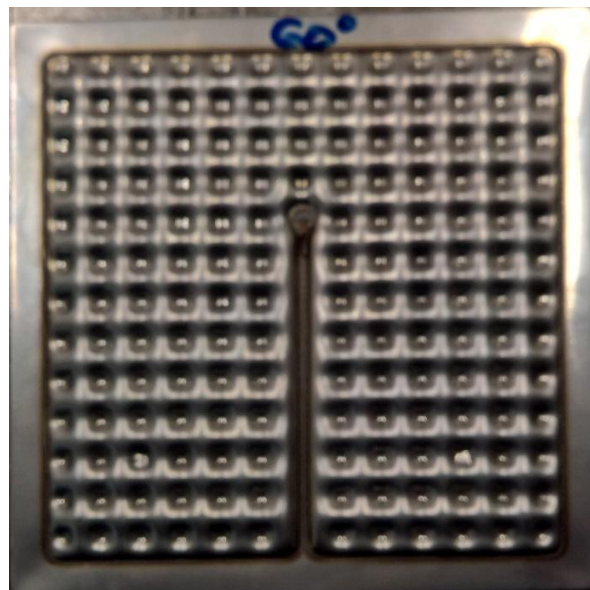


Obr. 78 Experiment s podporou lisu

Díky tomuto opatření byly vylisovány první pokusné vzorky strukturovaného povrchu s vrcholovým úhlem jehlanů 60° a 90°. Při tváření byly použity plechy tloušťky 0,5 mm pro strukturovaný povrch s vrcholovým úhlem 90°, resp. 0,8 mm pro strukturovaný povrch s vrcholovým úhlem 60°. Výsledky jsou zobrazeny na obr. 79.



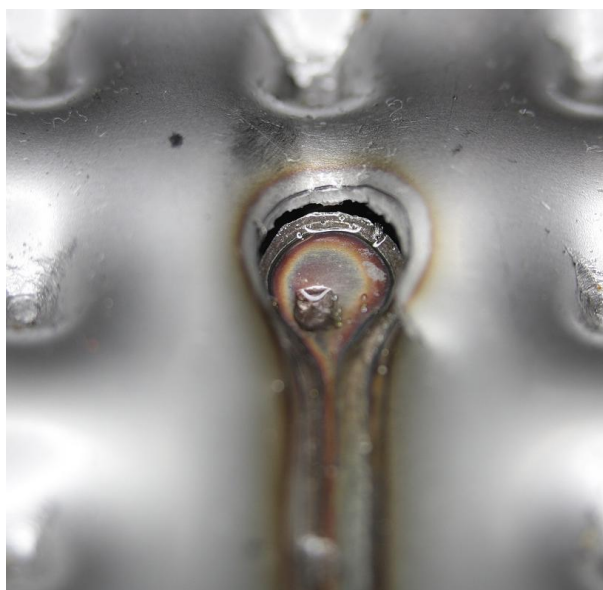
a) vrcholový úhel jehlanů 90°



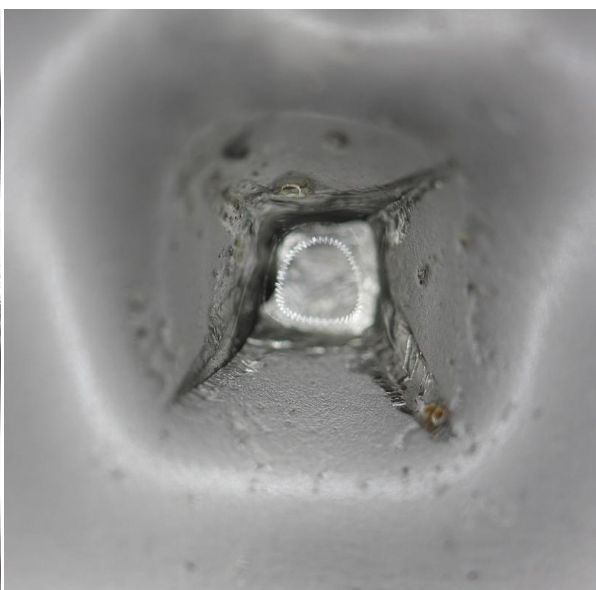
b) vrcholový úhel jehlanů 60°

Obr. 79 Vylisované strukturované povrchy

Při lisování však nezářídka kdy docházelo k defektům, a to především k porušení hranice svar – tvářený materiál v oblasti středového svaru a tvorbě trhlin na vrcholcích prolisů, viz makrofotografie defektů na obr. 80. Proto bylo nutné optimalizovat hydroformovací proces na základě provedení numerické simulace metodou konečných prvků. Touto cestou je možné stanovit bezpečné limity tvářecího tlaku, jakož i geometrie lisované struktury a výchozí tloušťky plechu tak, aby k defektům nedocházelo.



a) porušení středového svaru

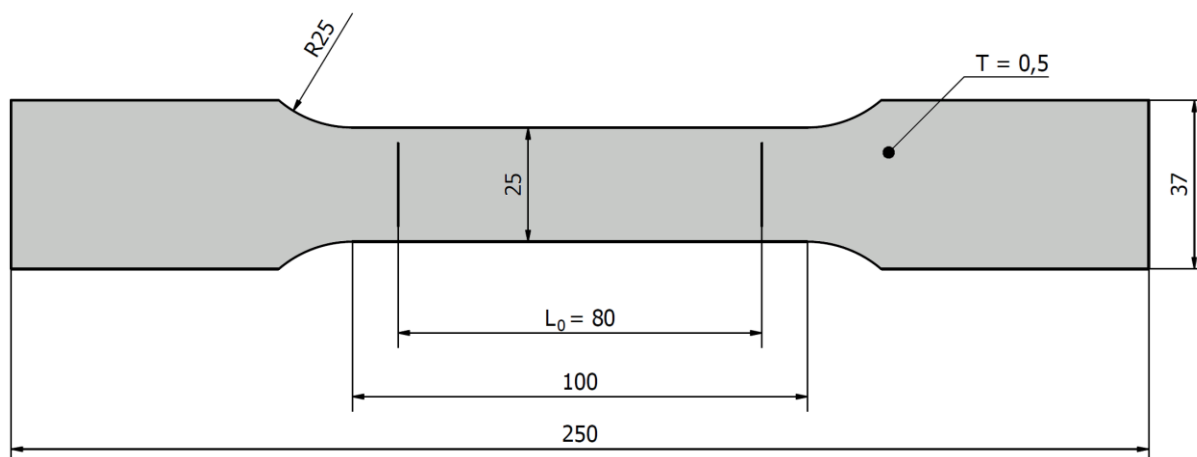


b) porušení materiálu na vrcholku jehlanu

Obr. 80 Defekty hydroformované struktury

6.2 Vstupní materiálové testy numerické simulace hydroformování

Paralelně s výše uvedeným probíhala tvorba podkladů numerické simulace. Pro účely definice materiálového modelu tvářeného plechu byly zjišťovány mechanické vlastnosti korozivzdorné austenitické oceli X5CrNi18-10, a to tahovou zkouškou za kvazistatických podmínek. Geometrie vzorku určeného pro tahovou zkoušku je znázorněna na obr. 81. Celkem bylo zkoušeno pět vzorků odebraných z materiálu ve směru válcování.



Obr. 81 Rozměry vzorku pro tahovou zkoušku

Tahová zkouška byla provedena dle normy ČSN EN 10002-1 na hydraulickém zkušebním trhacím stroji ZD 40 (obr. 82) výrobce HBM řízeným počítačem, který je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku a snímačem síly. Posuv příčnicku je řízen řídicí jednotkou EDC 60. Primární vyhodnocení zaznamenaných hodnot bylo provedeno v softwaru M-TEST verze 1.7, který je součástí řídicího počítače. Vyhodnocovací program M-TEST umožňuje na základě počátečních hodnot měřit a automaticky vyhodnocovat křivky přetvárných odporů. Základní technické údaje o zkušebním trhacím stroji ZD 40 uvádí tab. 6.

Tab. 6 Základní údaje zkušebního stroje ZD 40

Vlastnosti	Hodnota	Jednotka
Měřicí rozsah měření síly	8 až 40	kN
Chyba měření síly	0,01 rozsahu síly	
Měřicí rozsah měření dráhy	0 až 280	mm
Chyba měření dráhy	±0,01	mm

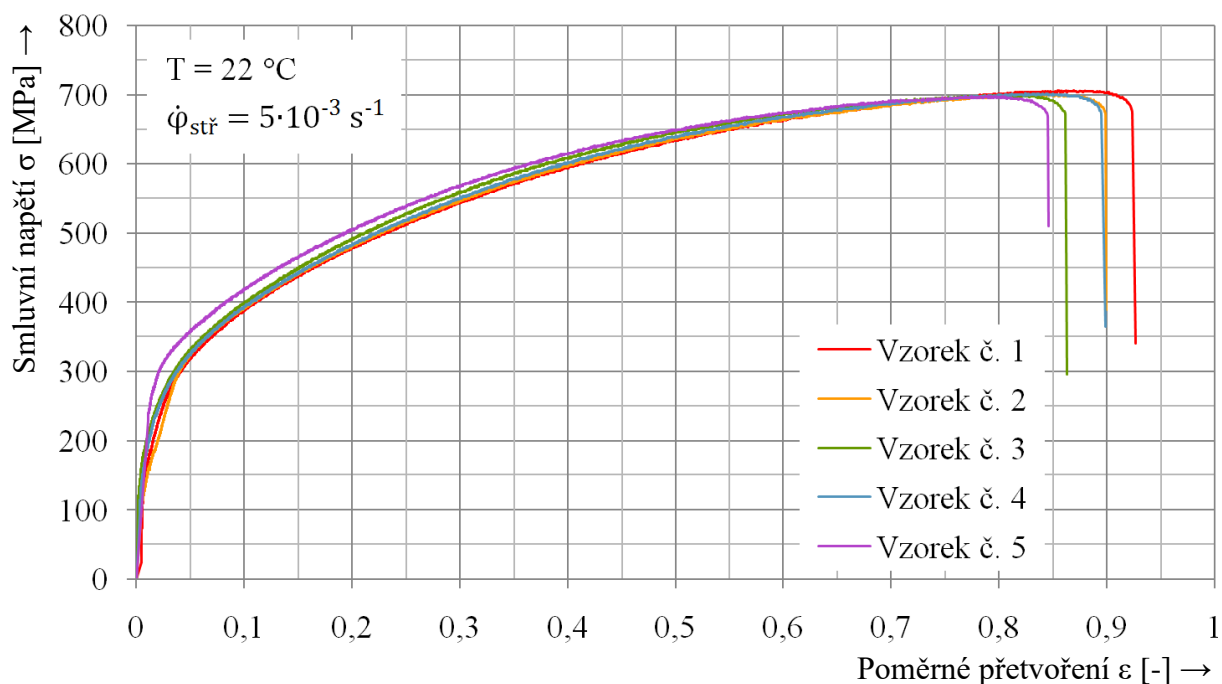


Obr. 82 Trhací stroj ZD 40

Tabelované výsledky získané ze zkoušek pěti testovaných vzorků jsou souhrnně uvedeny v tab. 7, která zahrnuje základní údaje o mechanickém chování materiálu X5CrNi18-10. Zkouškami získané křivky závislosti smluvního napětí (σ) na poměrném přetvoření (ϵ) zobrazuje obr. 83.

Tab. 7 Souhrnné výsledky tahových zkoušek oceli X5CrNi18-10

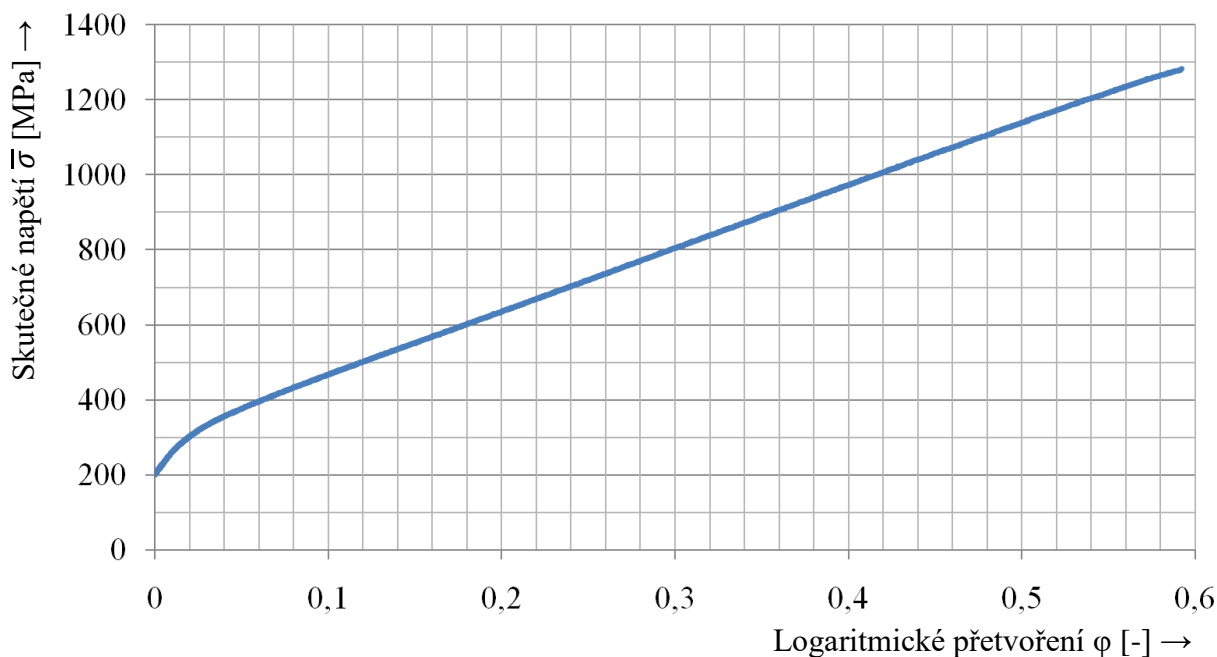
Č. vzorku	$R_{p0,2}$	R_m	L_0	L_U	A_{80}
	[MPa]	[MPa]	[mm]	[mm]	[%]
1	240,880	705,824	80	120,0	50,0
2	259,280	699,776	80	119,5	49,4
3	239,376	698,272	80	120,0	50,0
4	229,168	701,280	80	119,5	49,4
5	229,496	697,536	80	120,0	50,0
Průměr	239,64	700,538	80	119,8	49,8



Obr. 83 Závislost σ - ε vzorků tloušťky 0,5 mm z oceli X5CrNi18-10

Jak již bylo v kap. 5.3 zmíněno, systém smluvní napětí – poměrné přetvoření je využitelný pouze při malých deformacích, tedy pro popis elastického chování daného materiálu. Proto byl pro plastickou oblast (oblast zpevnění) proveden přepočít smluvního tahového diagramu na skutečný, a to užitím vztahů (5.14) a (5.15).

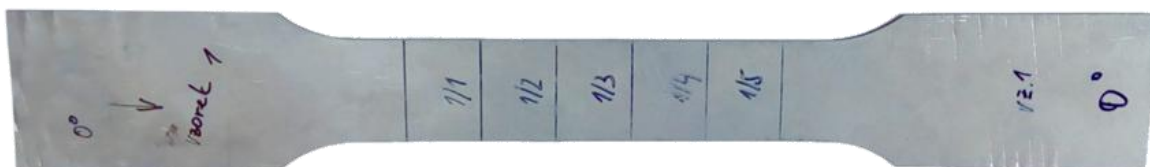
Přepočtem zprůměrované křivky tahového diagramu byla získána závislost skutečného napětí $\bar{\sigma}$ na logaritickém přetvoření φ , viz obr. 84, použitelná společně s elastickými vlastnostmi ($E = 1,99 \cdot 10^5$ MPa a $\mu = 0,3$ z tab. 3) jako materiálový model numerické simulace. Transformací křivky do logaritických souřadnic byla rovněž zjištěna hodnota exponentu deformačního zpevnění $n = 0,48$, jež je použitelná i pro další analýzy.



Obr. 84 Závislost $\bar{\sigma} - \phi$ vzorků tloušťky 0,5 mm z oceli X5CrNi18-10

Ze sady vzorků tloušťky 0,5 mm o stejných rozměrech jako pro tahové zkoušky plechu byly pro směry odběru materiálu 0°, 45° a 90° vůči směru válcování zjištěny také hodnoty součinitelů plastické anizotropie materiálu. Měření bylo na vzorcích realizováno při 20 % plastického přetvoření materiálu.

Celkem bylo pro zjištění hodnot součinitelů plastické anizotropie pro každý směr použito 5 vzorků, jejichž měrné části byly rozděleny na 5 měřených oblastí, viz obr. 85. Pro každý vzorek tak bylo realizováno 5 měření, tj. zjišťování změny šířky a tloušťky od počátečních hodnot: $s_0 = 0,477$ mm a $b_0 = 24,78$ mm. Součinitelé plastické anizotropie byly následně určovány na základě vztahu (5.16).



Obr. 85 Vzorek pro zjišťování součinitele plastické anizotropie pro směr 0°

Naměřené hodnoty byly stanoveny užitím digitálního mikrometrického měřidla Mitutoyo, jehož základní charakteristiky uvádí tab. 8. Výsledky z 5 měření byly poté zprůměrovány. V tab. 9 jsou souhrnně uvedeny naměřené a dopočtené hodnoty součinitelů plastické anizotropie. Komplexnější tabulky s naměřenými hodnotami jsou uvedeny v příloze 3.

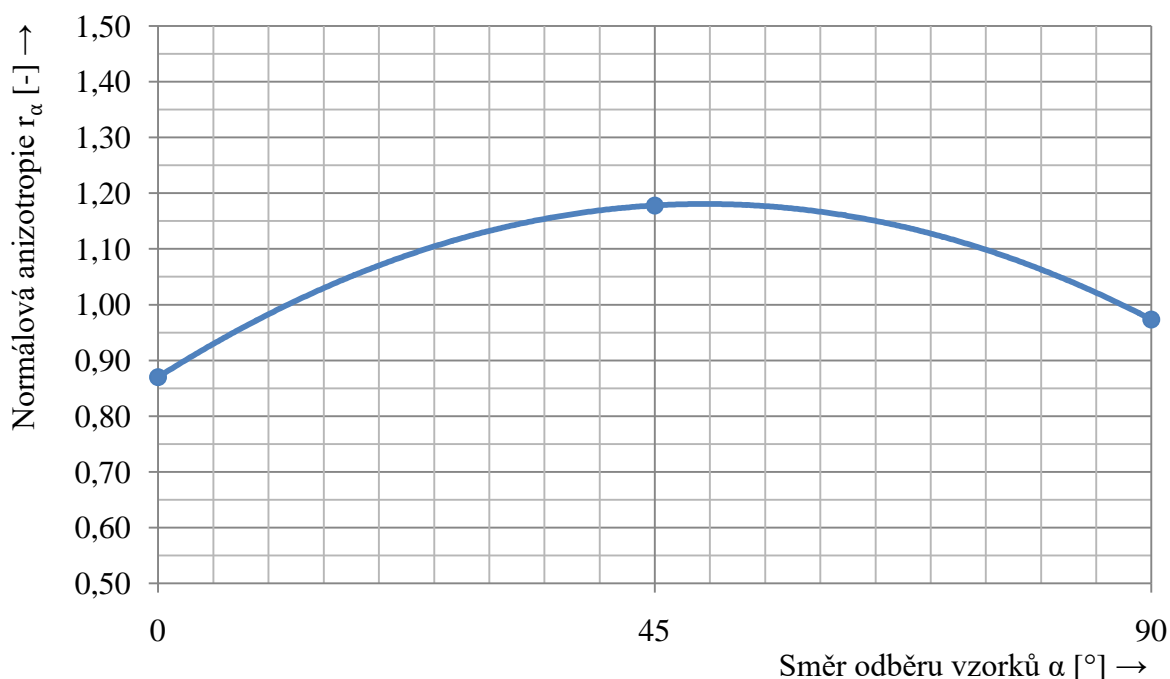
Tab. 8 Specifikace třmenového mikrometru Mitutoyo

Vlastnosti	Hodnota	Jednotky
Měřicí rozsah	0 až 25	mm
Rozlišení	0,001	mm
Průměr doteků	6,35	mm

Tab. 9 Hodnoty součinitelů plastické anizotropie oceli X5CrNi18-10

			Směr 0°	Směr 45°	Směr 90°
Tloušťka s	s	[mm]	0,478	0,478	0,478
Šířka b	b	[mm]	24,78	24,78	24,78
Přetvoření ve směru tloušťky	φ_s	[-]	-0,036	-0,036	-0,036
Přetvoření ve směru šířky	φ_b	[-]	-0,031	-0,043	-0,035
Součinitel plastické anizotropie	r_α	[-]	0,865	1,174	0,972

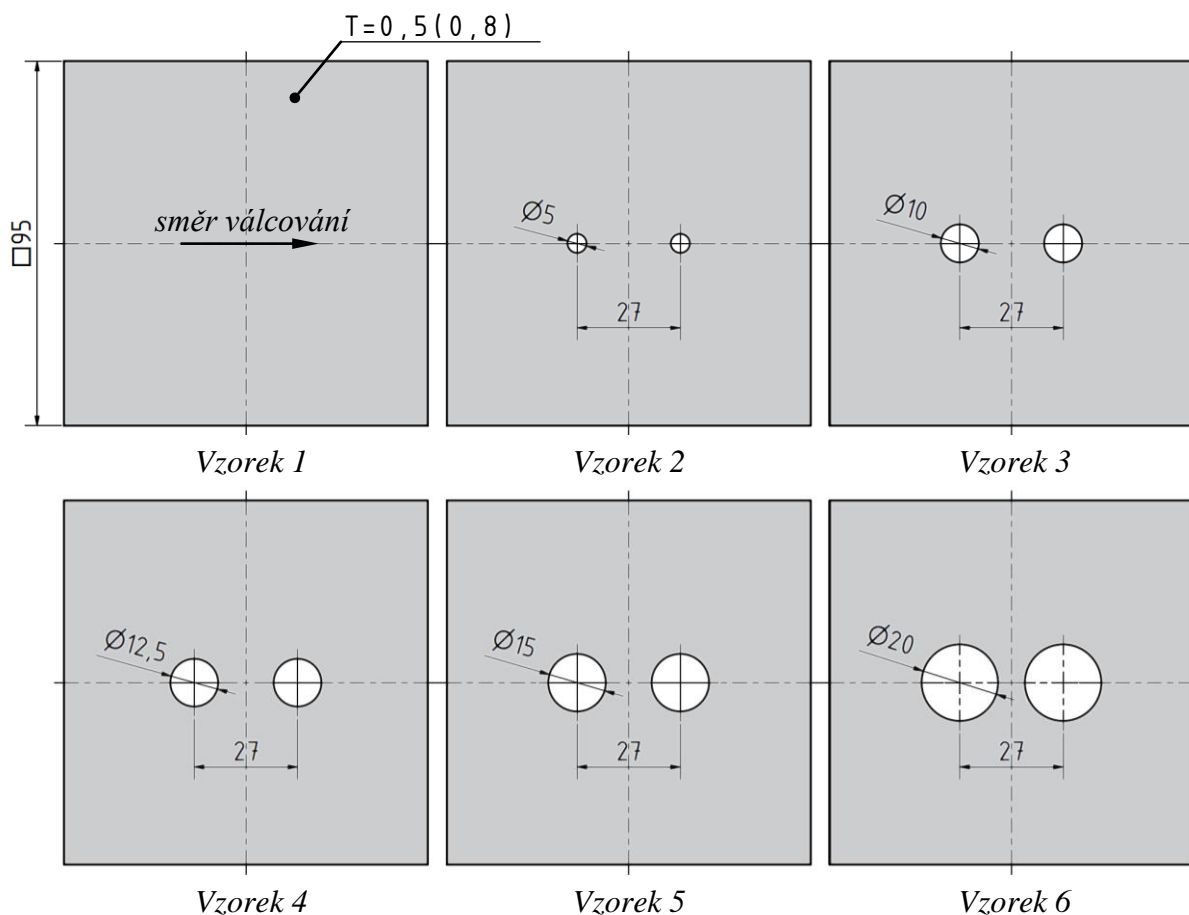
Grafické znázornění změny hodnot součinitele plastické anizotropie v závislosti na směru odběru vzorků vzhledem ke směru válcování je vyobrazeno na obr. 86. Střední hodnota součinitele plastické anizotropie byla stanovena s využitím vztahu (5.17) z kap. 5.3 jako $r_s = 1,046$.



Obr. 86 Závislost součinitele normálové anizotropie na směru odběru vzorků

Hodnoty součinitelů plastické anizotropie, a také střední hodnota součinitele plastické anizotropie, přispívají ke zpřesnění numerické simulace, a to díky přesnějšímu určení směrových závislostí mechanických vlastností tvářeného materiálu. Zjištěné hodnoty byly použity jako materiálový vstup zpřesněné numerické simulace hydroformování s užitím příslušného materiálového modelu.

Další etapu vstupních materiálových testů představuje konstrukce limitní křivky mezní tvářitelnosti dle Keelera – Goodwina (FLC). Vzhledem k tomu, že se očekává v kritických místech hydroformovaného dílce stav napjatosti blízký rovinnému přetvoření, je cílem zkonstruovat limitní křivku mezní tvářitelnosti postihující právě tuto oblast. Provedení zkoušek a vyhodnocení křivek mezní tvářitelnosti probíhalo v souladu s normou ČSN EN ISO 12004-1. Za tímto účelem byla pro zjištění diagramu mezní tvářitelnosti zvolena metoda využívající pouze Erichsenovu zkoušku hlubokotažnosti. Při použití této zkoušky se vychází z tažení vzorků různé geometrie půlkulovým tažníkem, viz kap. 4.2. Touto metodou byly zjišťovány hodnoty křivek mezní tvářitelnosti pro dvě tloušťky materiálu X5CrNi18-10, a to 0,5 mm a 0,8 mm. Skutečné tloušťky testovaného materiálu byly mikrometricky zjištěny jako 0,478 mm a 0,787 mm. Pro každou tloušťku byly zkoumány 3 sady vzorků. Materiálové zkoušky byly provedeny celkem s 6 různými typy geometrie vzorků, jak je patrné z obr. 87.

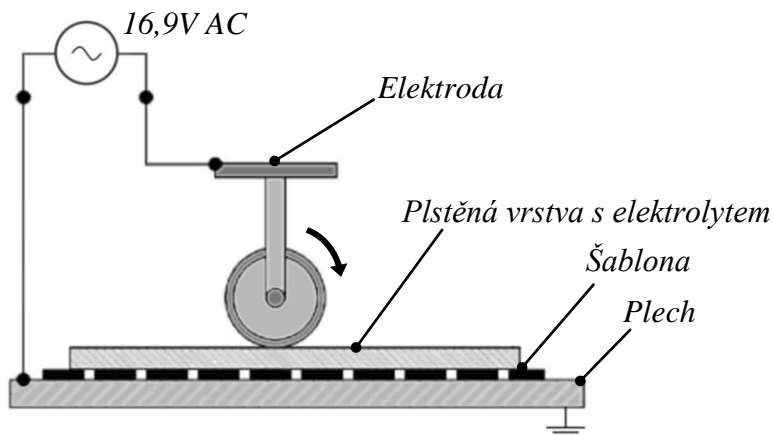


Obr. 87 Geometrie vzorků pro konstrukci křivky mezní tváritelnosti

Pro stanovení kritických hodnot přetvoření je před zkouškou nejprve nutné na zkoumané těleso nanést deformační síť. V tomto případě byla na vzorky nanášena síť s elementy tvaru kružnic o průměru 2 mm. Detail nanášené sítě uvádí obr. 88a. Fotografie vzorků před a po nanášení sítě uvádí příloha 4. Pro tento účel bylo využito elektrochemického nanášení, jehož princip je znázorněn na obr. 88b. Tvar sítě je určen šablonou, která se pokládá na povrch příslušného vzorku (plechu). Na šablonu poté působí střídavý elektrický proud přivedený elektrodou přes plstěnou vrstvu nasycenou leptacím roztokem (elektroda se po plstěné vrstvě v délce leptání odvaluje). V tomto případě byl použit leptací roztok s interním označením Y1. Tlakovým působením elektrody (válece) je elektrolyt vytlačován z plstěné vrstvy přes šablonu na povrch plechu a působením proudu dochází k vyleptání příslušných obrazců.



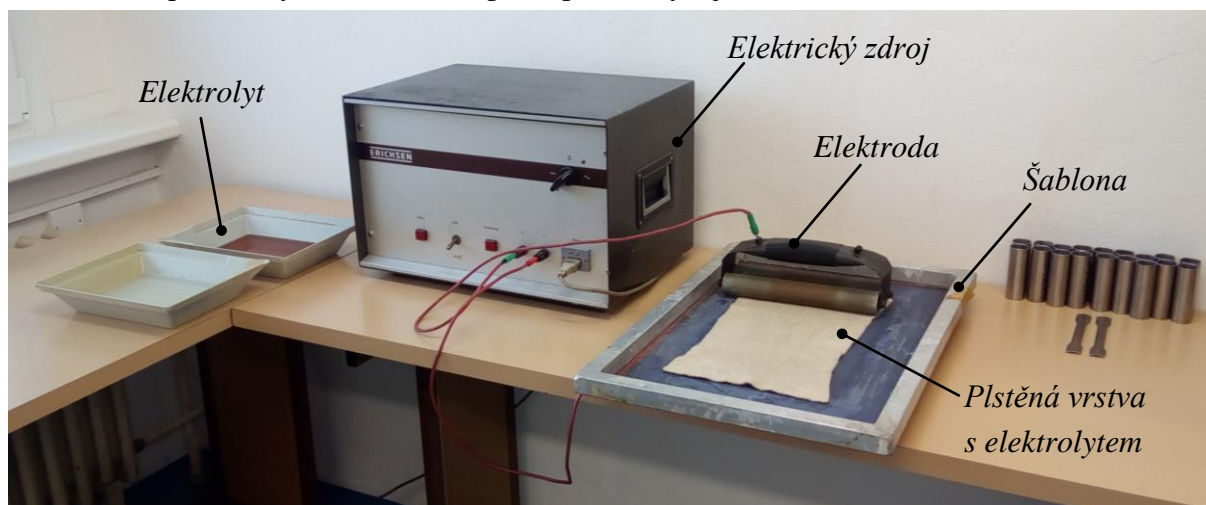
a) detail deformační sítě



b) princip elektrochemického nanášení deformační sítě

Obr. 88 Nanášení deformační sítě [55]

Výhodou zvolené metody je fakt, že se při nanášení sítě nijak nenarušuje povrch vzorků a tím nedochází k ovlivnění zkoušky hlubokotažnosti. Pracoviště pro nanášení deformační sítě, které odpovídá výše zmíněnému principu, zachycuje obr. 89.



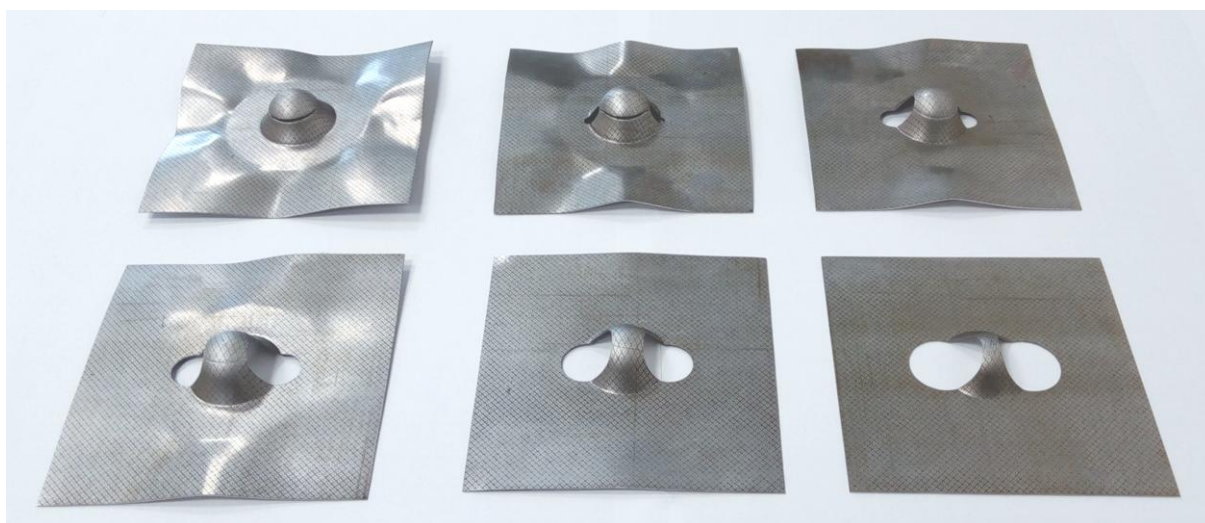
Obr. 89 Pracoviště pro nanášení deformační sítě

Po nanesení deformační sítě byly vzorky podrobeny Erichsenově zkoušce hlubokotažnosti, a to na zkušebním zařízení Erichsen F4. Detail zařízení je zobrazen na obr. 90. Erichsen F4 je propojeno se snímací a vyhodnocovací jednotkou Heidenhain, která slouží ke stanovení hodnoty prohloubení (Erichsenova indexu) IE s přesností 0,001 mm. Do uvedeného zařízení byly vzorky upnuty tak, aby se jejich středy shodovaly se středem (osou) tažného nástroje, tj. tažnice, tažníku a přídržovače. V takovém případě působí při zkoušce tažník na střed vzorku a otvory ve vzorcích 2 až 6 (obr. 87) jsou deformovány symetricky.



Obr. 90 zařízení Erichsen F4

Obr. 91 znázorňuje 1 sadu zdeformovaných vzorků tloušťky 0,5 mm po realizované Erichsenově zkoušce.



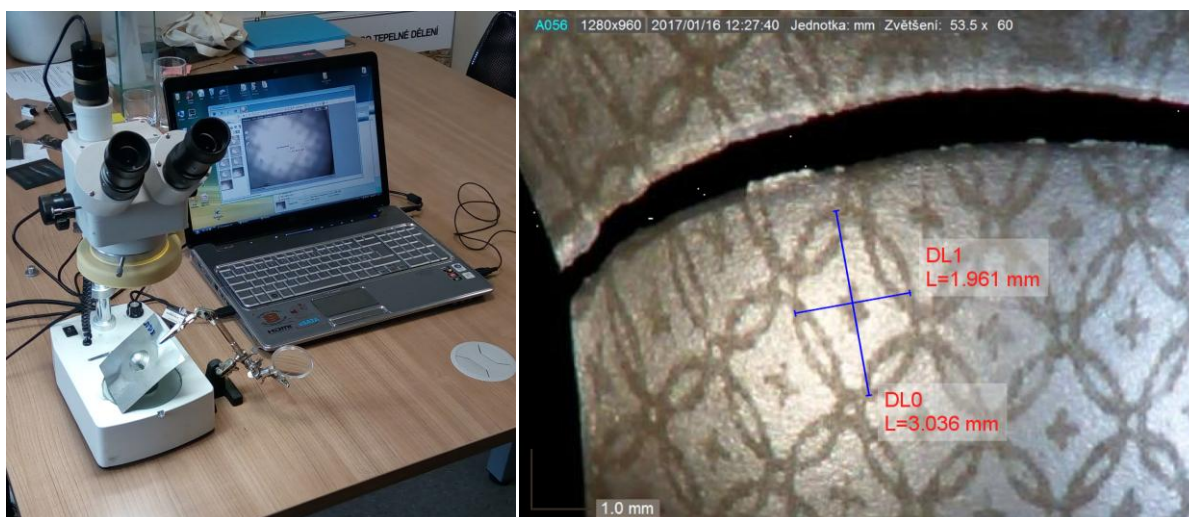
Obr. 91 Geometrie vzorků po provedení Erichsenova testu

Po provedení Erichsenovy zkoušky byla na všech vzorcích analyzována deformační síť v okolí vytvořené trhliny. Měření probíhala mikroskopickou cestou s využitím počítačové podpory analýzy obrazu. K vyhodnocení rozměrů vzniklých elips byl použit stereomikroskop SSM-3E, který disponuje USB kamerou. Díky tomu je možné provádět vyhodnocení pozorovaných vzorků s využitím PC, resp. softwaru Dino Capture 2. Základní parametry stereomikroskopu SSM-3E jsou uvedeny v tab. 10.

Tab. 10 Parametry Stereomikroskopu SSM-3E [85]

Rozsah plynulého zvětšení	10× až 40× (objektiv 1× až 4×, okulár 10×)
Objektivy	0,5×; 0,75×; 1,5×; 2×
Zvětšení/zorné pole	10×/Ø23 mm, 40×/Ø5,5 mm
Otočná hlavička mikroskopu	360°
Pracovní vzdálenost	85 mm (bez přídatných objektivů)
Osvětlení	horní a spodní

Stanovení rozměrů elipsy zdeformované sítě výše popsaným systémem, tj. mikroskopickým měřením uvádí obr. 92a. Detail vyhodnocovaných elementů (elips) deformační sítě je znázorněn na obr. 92b.



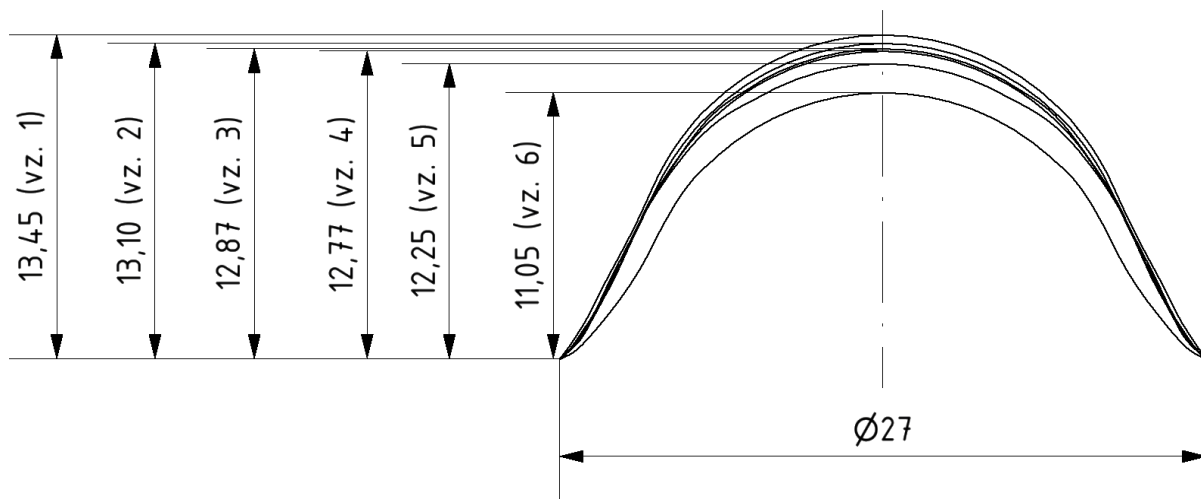
a) stereomikroskop SSM-3E

b) vyhodnocovaná síť

Obr. 92 Vyhodnocení deformační sítě

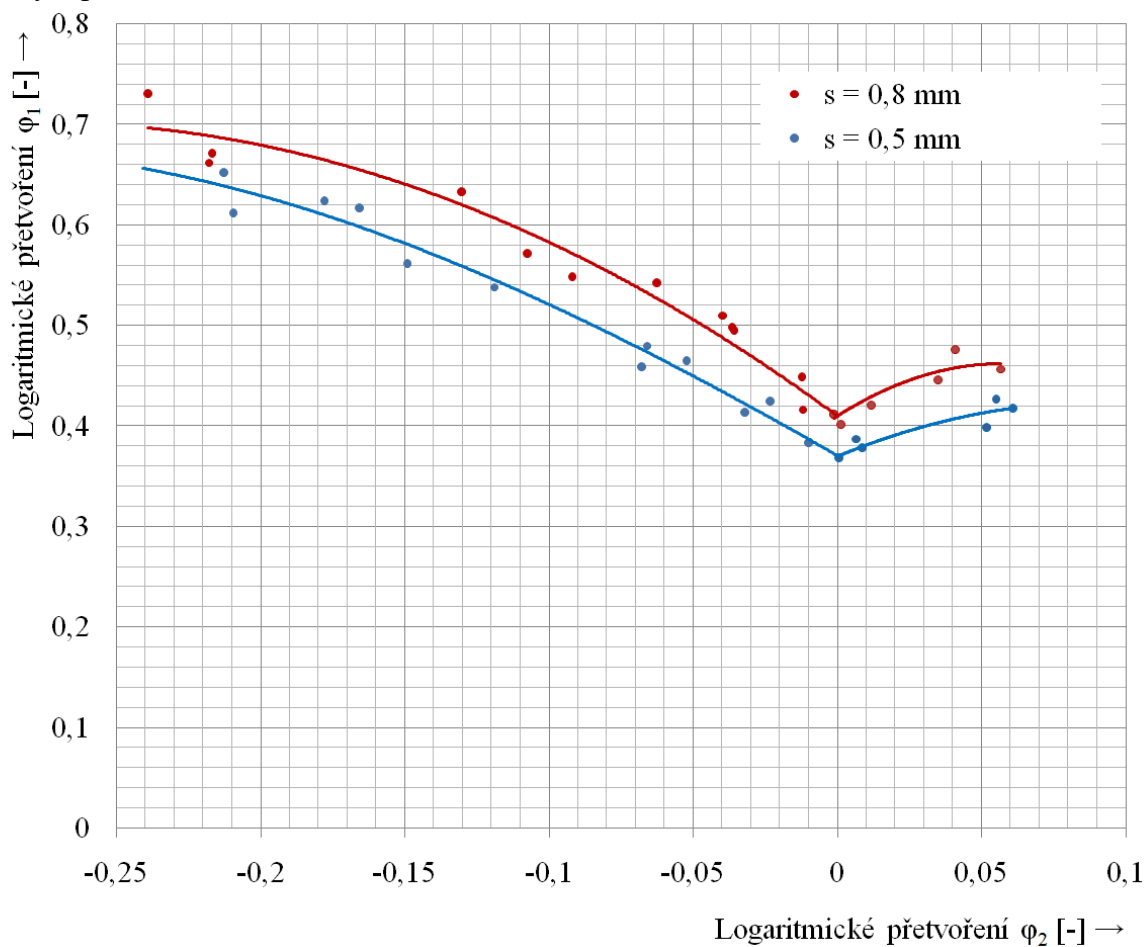
Norma ČSN EN ISO 12004-1 stanovuje, že je třeba změřit deformaci tří sousedních elementů sítě, přičemž odchylka v naměřených hodnotách by neměla přesáhnout 10 %. Po určení rozměrů tří elips a tím i přetvoření ϕ_1 a ϕ_2 s užitím vzorců (4.2) a (4.3) byly hodnoty zprůměrovány.

Rovněž bylo zkoumáno ovlivnění odečítaných rozměrů elementů sítě v důsledku zakřivení povrchu vzorku (výtažku). Obr. 93 zobrazuje geometrii površek jedné sady vzorků Erichsenova testu tloušťky 0,5 mm určenou opět pomocí stereomikroskopu SSM-3E. Ostatní výsledky jsou obsaženy v příloze 5. Po zohlednění zakřivení geometrie promítnutím zjištěného deformovaného elementu sítě na povrchu daného přetvořeného vzorku bylo zjištěno ovlivnění odečtených délek (os elips) v některých případech až v řádech $\pm 0,01$ mm. Tato skutečnost znamená nezanedbatelné ovlivnění výsledků, obzvláště v kontextu dalších výpočtů pro stanovení hlavních přetvoření, a je tedy třeba zakřivení povrchu do konečných výsledků promítnout.



Obr. 93 Geometrie površek 1 sady vzorků tloušťky 0,5 mm

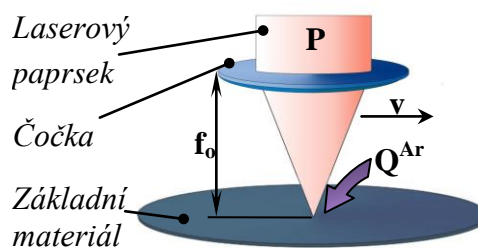
Zjištěné výsledné hodnoty přetvoření φ_1 a φ_2 byly vyneseny do grafu a polynomickým proložením bodů byly získány křivky mezní tvářitelnosti pro tloušťky materiálu $s = 0,5$ mm a $0,8$ mm. Výsledné křivky mezní tvářitelnosti (závislost přetvoření φ_1 na φ_2) jsou zobrazeny na obr. 94. Naměřené hodnoty (body) křivek mezní tvářitelnosti pro obě tloušťky jsou uvedeny v příloze 6.



Obr. 94 Diagram mezní tvářitelnosti oceli X5CrNi18-10

6.3 Analýza svaru

Nedílnou součástí vstupních materiálových testů je i rozbor oblasti svaru. Ten vychází ze svařovacích parametrů, které byly nastaveny pro dvě varianty (tloušťky) výchozího materiálu, tedy základního plechu tloušťky 1 mm a tvářeného plechu tloušťky 0,5 mm, ve druhé variantě 0,8 mm. Užití svařovací parametry jsou zaznamenány v tab. 11 a schematicky uvedeny na obr. 95.



Obr. 95 Parametry svařování [6]

Tab. 11 Základní parametry při svařování dílců absorbérů

Tloušťka svařovaného plechu	s	[mm]	0,5	0,8
Svařovací výkon	P	[W]	900	1100
Svařovací rychlost	v	[mm · s ⁻¹]	30	30
Poloha ohniska vůči svařovanému povrchu	f ₀	[mm]	0	0
Ochranná atmosféra: Ar - průtok	Q ^{Ar}	[l · s ⁻¹]	18	18

Obr. 96a uvádí makrofotografii výsledného svaru, kdy nejsou patrné žádné vady. Pro orientační posouzení ovlivnění materiálu laserovým svařováním bylo provedeno měření tvrdosti dle Vickerse na stroji Zwick 3212 (obr. 96b) s užitým zatížením indentoru HV 1. Tvrdost byla měřena v základním materiálu, v tepelně ovlivněné oblasti i v oblasti svaru.



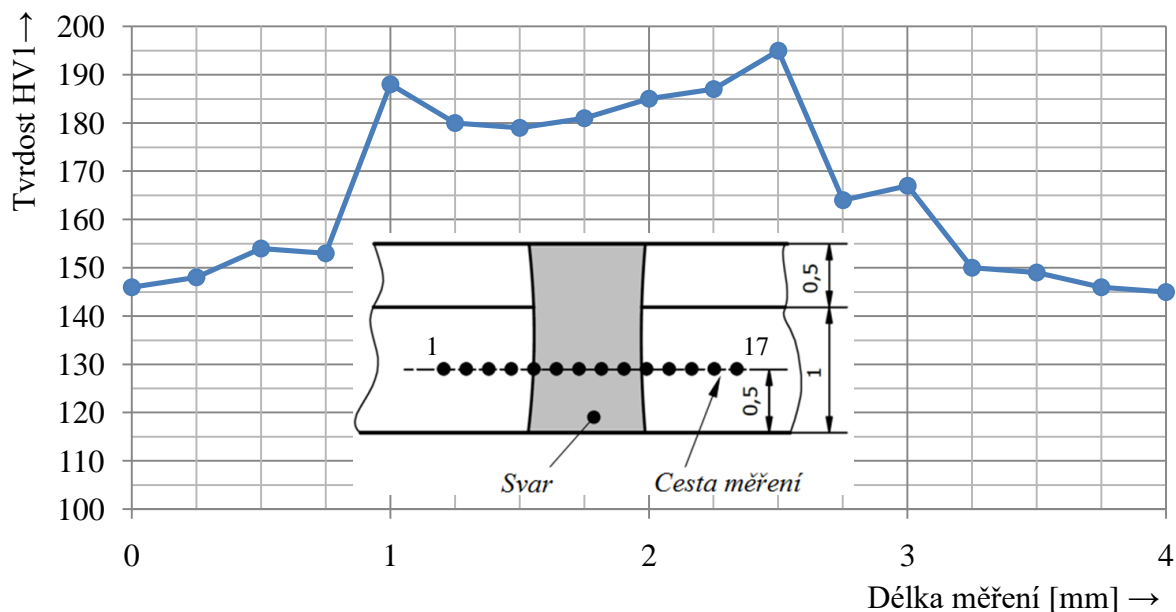
a) makrofotografie řezu svaru



b) tvrdoměr Zwick 3212

Obr. 96 Vyhodnocení svarů

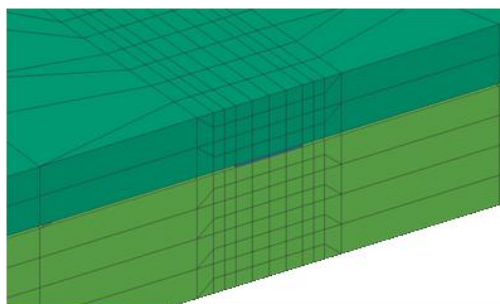
Z vyhodnocení (viz graf na obr. 97) vyplývá zvýšená hodnota tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti, a to cca o 30 jednotek HV oproti základnímu materiálu. Z toho zákonitě vyplývá i fakt, že v tepelně ovlivněné oblasti dochází v šířce cca 1,3 mm ke zdatnému ovlivnění mechanických vlastností materiálu.



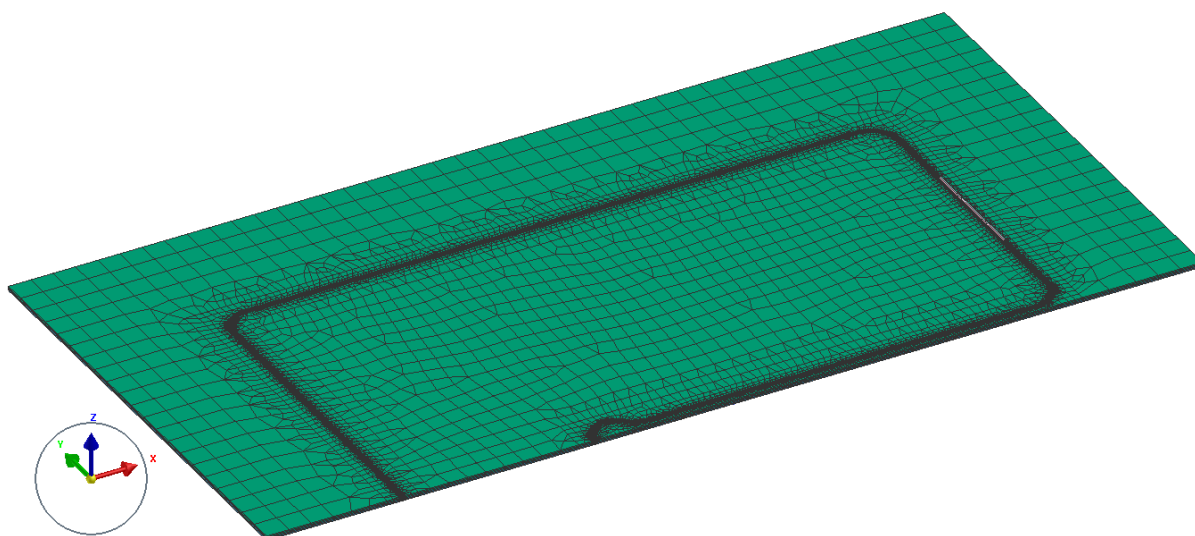
Obr. 97 Graf závislosti naměřené tvrdosti na délce měření

Tato skutečnost může hrát roli při následném tváření (hydroformování). Proto byla ve spolupráci se společností ESI Group provedena numerická simulace svařovacího procesu s důrazem na zjištění změn v mechanických vlastnostech svařovaného materiálu, tj. změn v plastickém přetvoření či zvýšení meze kluzu.

Pro simulaci byl využit software Sysweld, ve kterém byla nadefinována numerická simulace laserového svařování, mj. na podkladě hodnot z tab. 11. Geometrický model simulace zohledňuje trajektorii laserového svařování hydroformovaného vzorku. Fyzické spojení materiálu během svaření bylo v šířce svaru simulováno přidáním konečnoprvkové sítě mezi svařované plechy, jak ukazuje detail sítě MKP na obrázku obr. 98. Celkový pohled na geometrii úlohy využívající poloviční symetrii zobrazuje obr. 99.

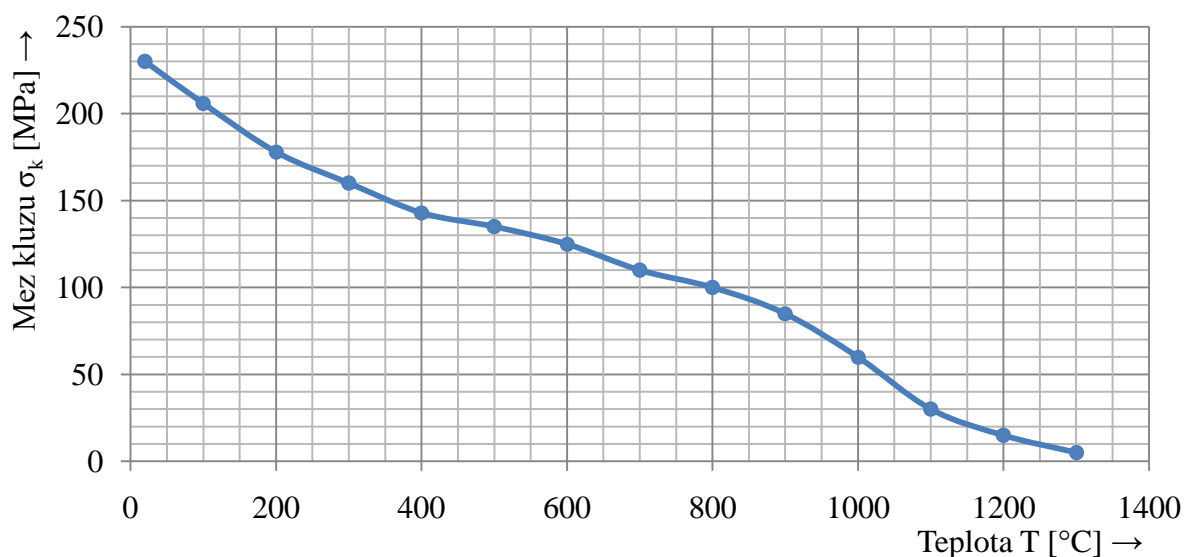


Obr. 98 Detail sítě MKP



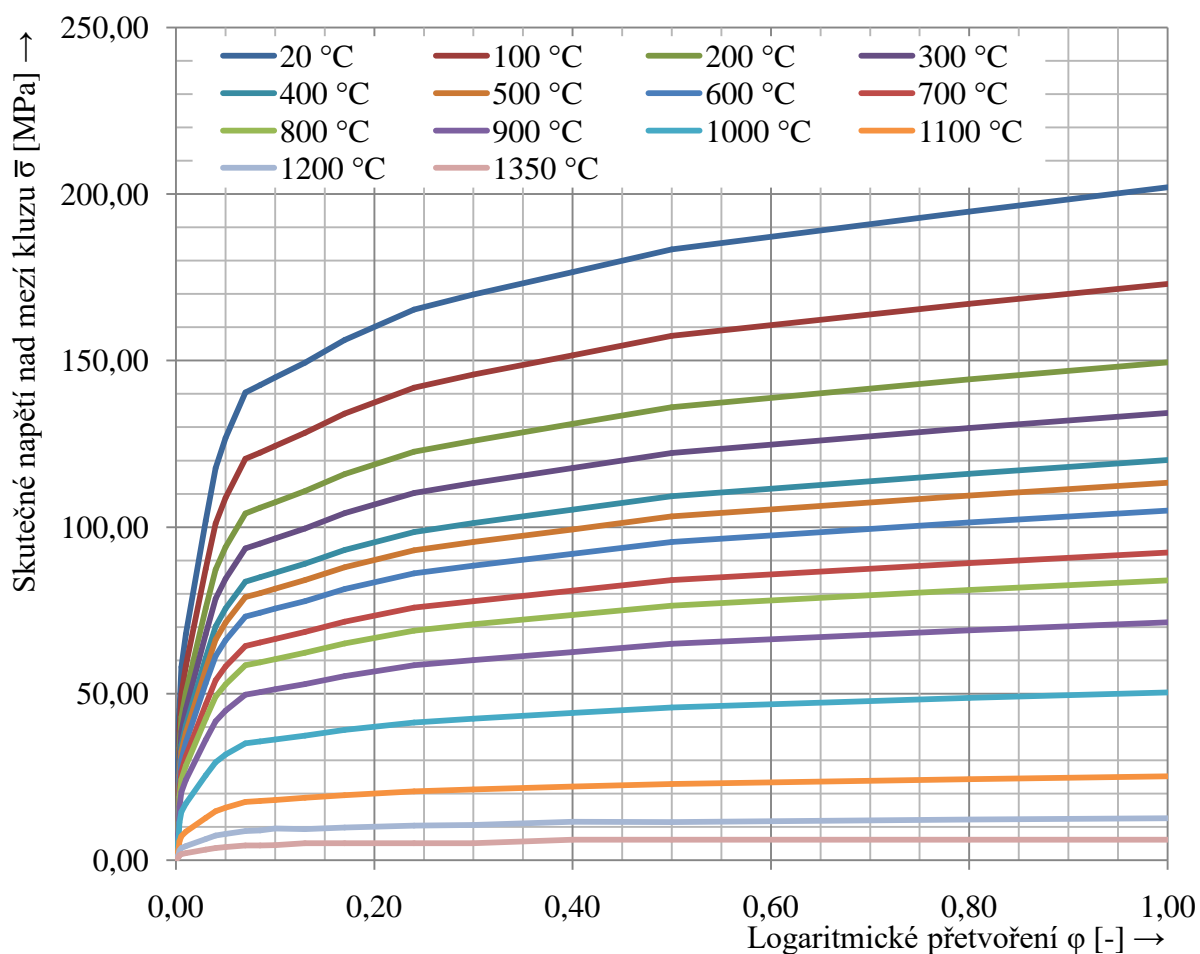
Obr. 99 Geometrický model simulace svařování

Při nastavování vstupních materiálových údajů, tj. křivek zpevnění a fyzikálních vlastností, se vycházelo z databáze softwaru. Mechanické vlastnosti materiálu jsou v softwaru Sysweld definovány na základě změny meze kluzu při změně teploty, viz obr. 100, a na to navazujícími křivkami zpevnění materiálu pro napětí nad mezi kluzu.



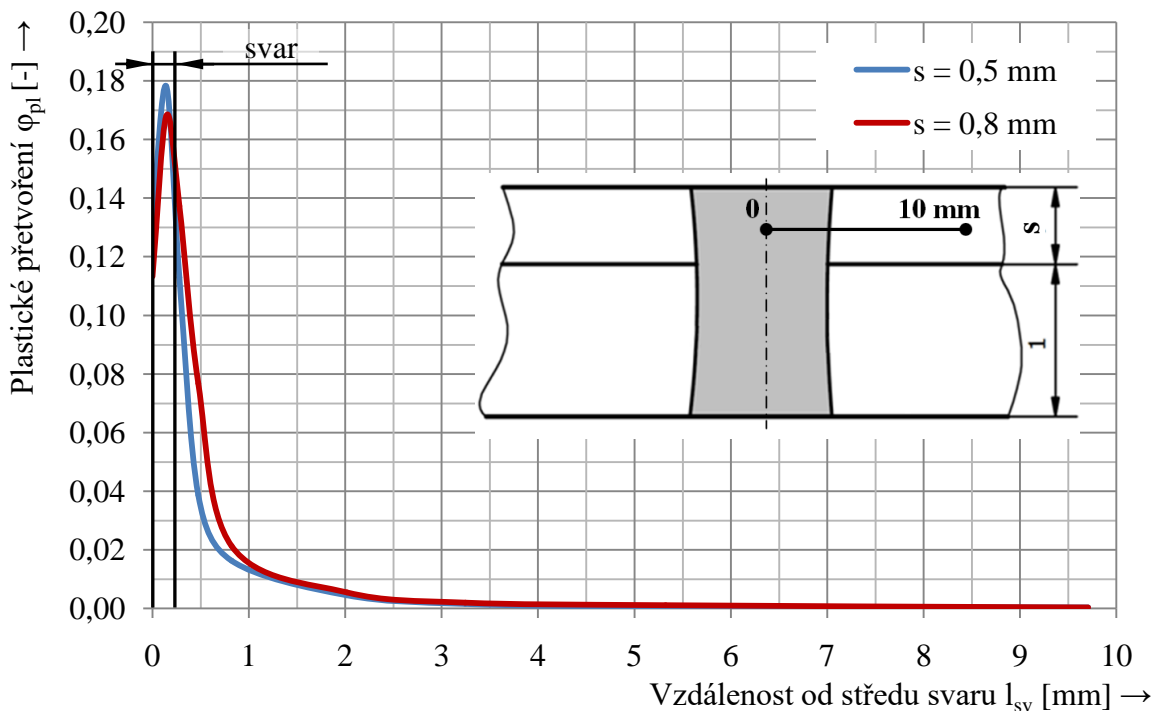
Obr. 100 Závislost meze kluzu na teplotě pro ocel X5CrNi18-10

Závislost skutečného napětí nad mezi kluzu na plastickém logaritmickém přetvoření uvádí pro teploty od 20 °C do 1350 °C obr. 101.



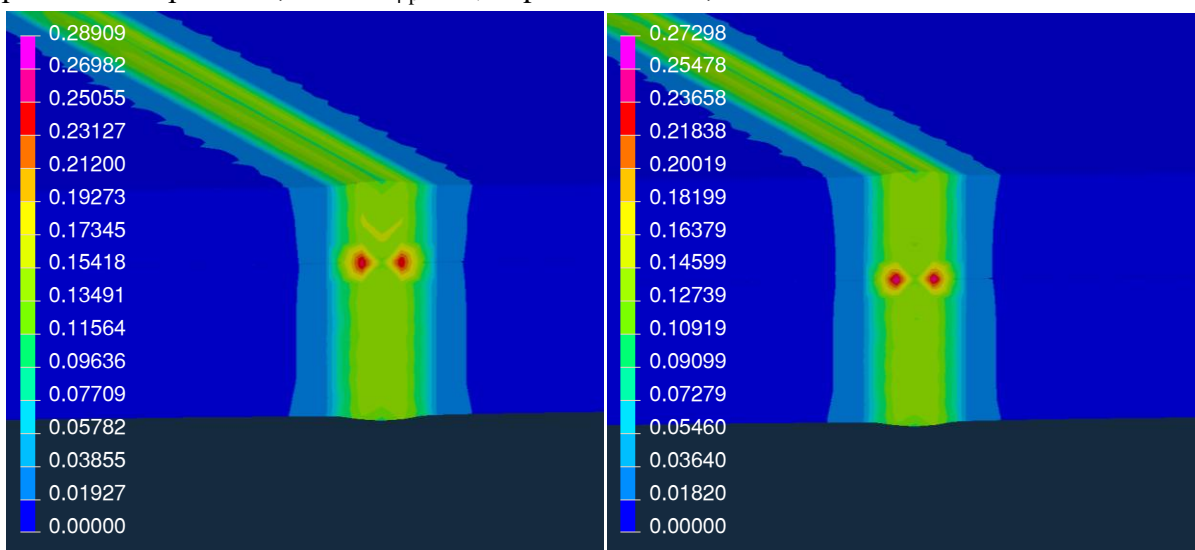
Obr. 101 Závislost $\bar{\sigma}$ – ϕ pro ocel X5CrNi18-10

Z výsledků provedené numerické analýza je zřejmé, že změny v mechanických vlastnostech se pro dané tloušťky materiálu projevují až do cca 3,5 mm od vlastního svaru. Graf na obr. 102 ukazuje závislost plastického přetvoření tvářeného materiálu tloušťky 0,5 mm a 0,8 mm na vzdálenosti od středu svaru. Z něj je jasně patrné, že vliv plastické deformace lze v případě tepelně ovlivněné oblasti sledovat v délce cca 3 mm. Z této oblasti byla zjištěna průměrná hodnota, která činí $\varphi_{pl} = 0,0254$.



Obr. 102 Závislost celkového přetvoření na vzdálenosti od středu svaru

Grafická závislost plastického přetvoření na vzdálenosti od svaru udává průměrné hodnoty přetvoření po tloušťce svařovaného materiálu. Na obr. 103 je proto uvedeno rozložení plastického přetvoření po celém svařovaném průřezu. Z něj jsou zřejmá i lokální maxima v oblasti styku svařovaných plechů, ve kterých přetvoření dosahuje hodnoty až cca $\varphi_{pl} = 0,28$ pro tloušťku plechu 0,5 mm a $\varphi_{pl} = 0,27$ pro tloušťku 0,8 mm.

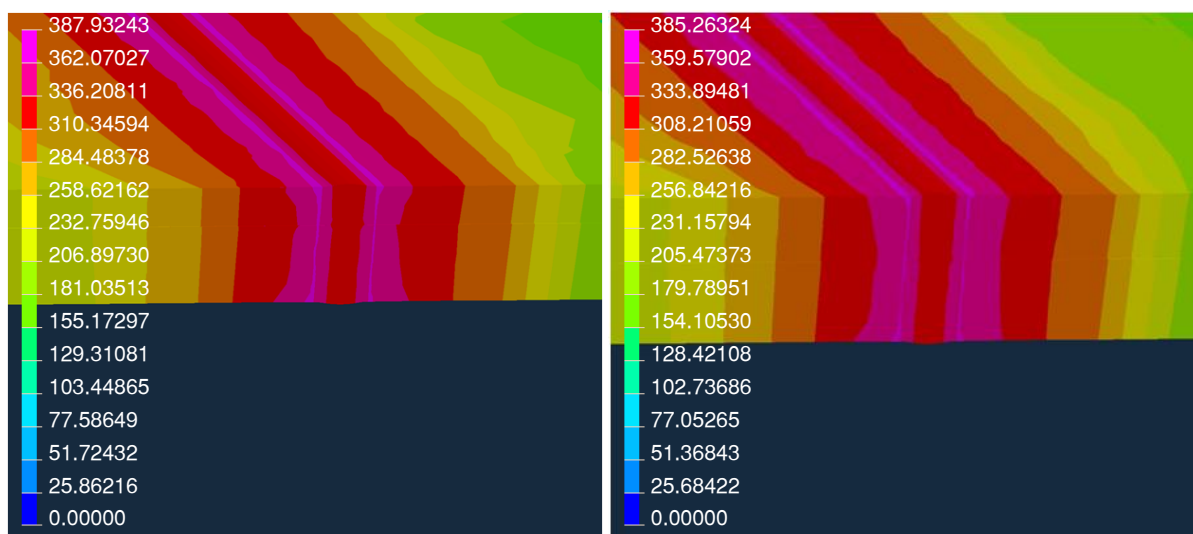


a) svařovaný plech tloušťky 0,5 mm

b) svařovaný plech tloušťky 0,8 mm

Obr. 103 Rozložení plastického přetvoření po průřezu svařovaných plechů

Obdobným způsobem lze analyzovat efektivní napětí ve svaru i v tepelně ovlivněné oblasti po svaření plechů. Výsledky této analýzy uvádí pro tloušťku svařovaného materiálu 0,5 mm obr. 104a, resp. obr. 104b pro tloušťku svařovaného materiálu 0,8 mm. Největších hodnot efektivního napětí dle HMH je dosaženo v bezprostředním okolí oblasti svaru, tedy cca 386 MPa.

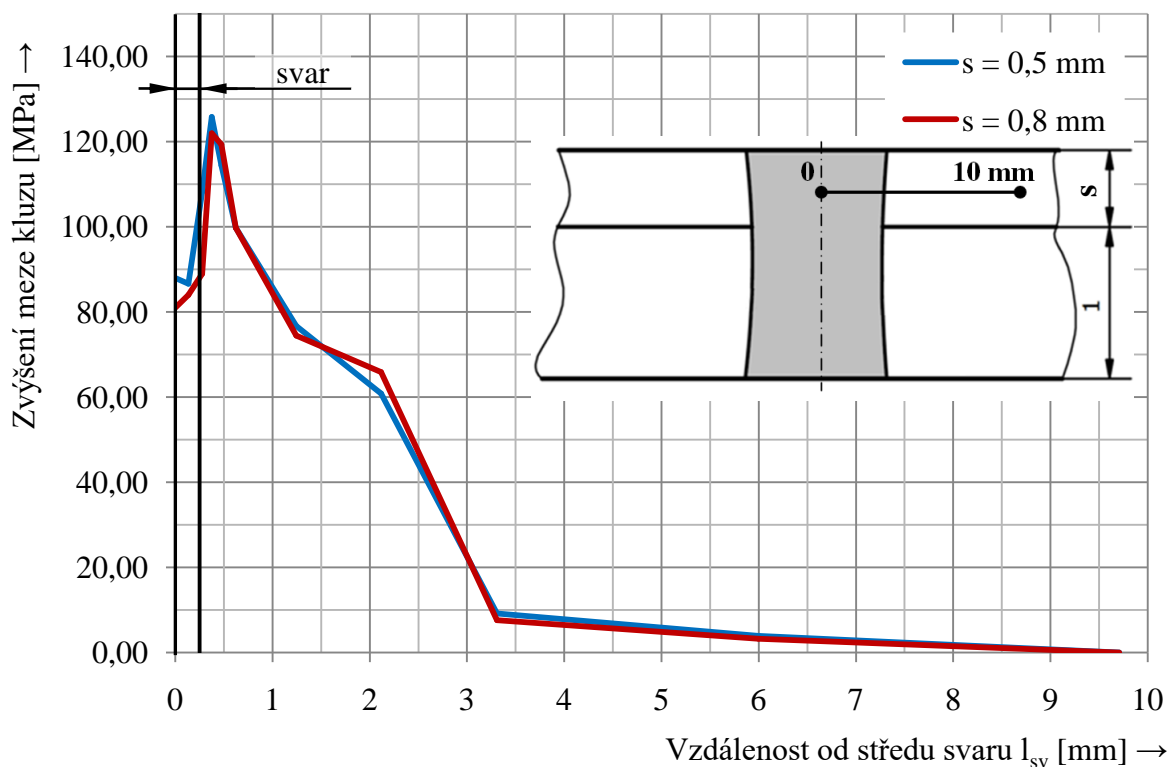


a) efektivní napětí pro $s = 0,5$ mm [MPa]

b) efektivní napětí pro $s = 0,8$ mm [MPa]

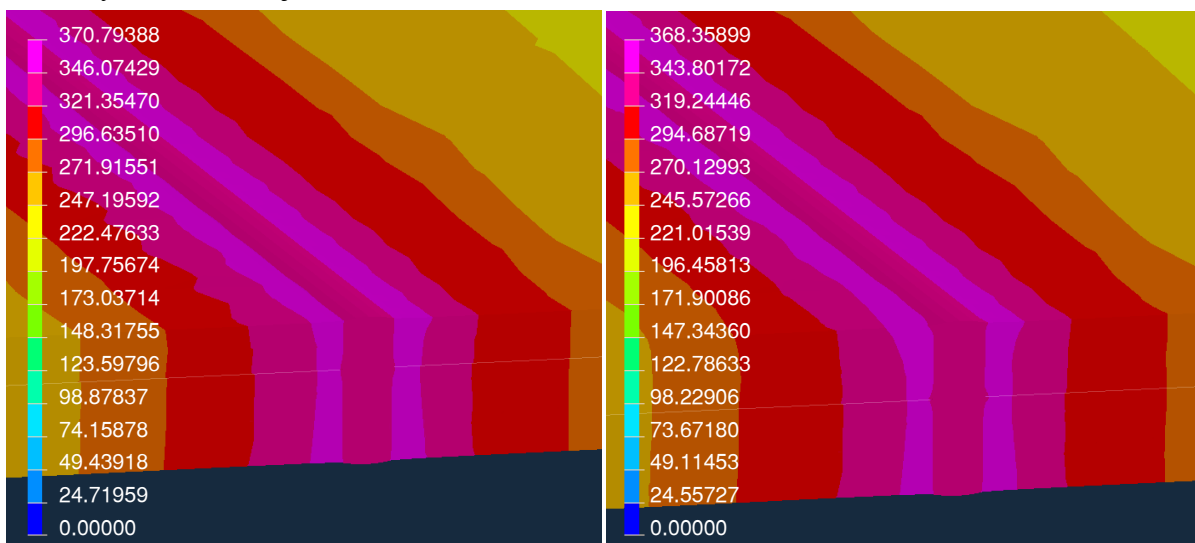
Obr. 104 Rozložení efektivního napětí dle HMH po průřezu svařovaných plechů

Provedená simulace MKP rovněž umožňuje zjištění zvýšení meze kluzu svařovaného materiálu, a to právě v důsledku plastického přetvoření. Graficky je zvýšení meze kluzu opět pro varianty tloušťky 0,5 mm a 0,8 mm znázorněno na obr. 105.



Obr. 105 Graf zvýšení meze kluzu po průřezu svařovaných plechů

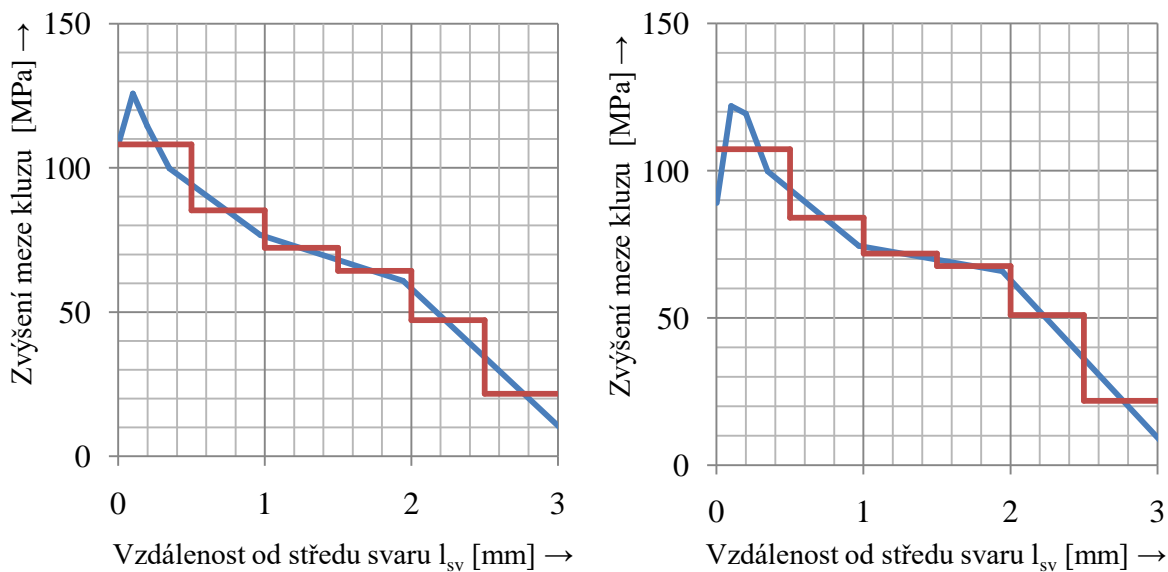
Obr. 106 ukazuje rozložení změny meze kluzu svařovaných plechů v celém svařovaném průřezu. Na rozdíl např. od plastického přetvoření je zde rozložení hodnot rovnoměrné bez viditelných extrémů, tj. lokálních maxim.



a) mez kluzu materiálu pro $s = 0,5 \text{ mm}$ [MPa] b) mez kluzu materiálu pro $s = 0,8 \text{ mm}$ [MPa]

Obr. 106 Rozložení změny meze kluzu po průřezu svařovaných plechů

Kromě informativního charakteru o oblasti svaru je také možné výsledky, např. právě změny meze kluzu materiálu vlivem svaření, využít k nadefinování přesnějšího materiálového modelu svaru a tepelně ovlivněné oblasti při procesu hydroformování. Tím dochází i ke zpřesnění výsledků numerické simulace v oblasti přechodu svar – tvářený materiál. Tento přístup je výhodný zejména proto, že analýza tváritelnosti počítá s tvorbou možných defektů, tedy trhlin, právě ve zmíněné oblasti svaru. Vzhledem k tomu, že v simulačním softwaru použitému k analýze hydroformování nelze zadat průběh změny meze kluzu spojitě, bylo provedeno proložení zjištěných charakteristik pro obě testované tloušťky zjednodušeně, a to po částech konstantní funkcí, viz obr. 107.



a) $s = 0,5 \text{ mm}$

b) $s = 0,8 \text{ mm}$

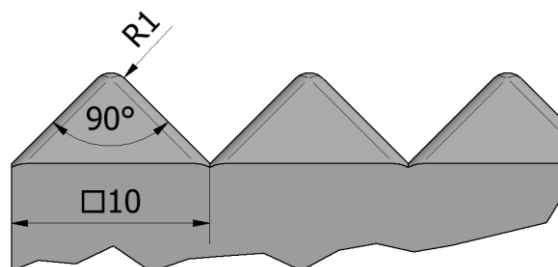
Obr. 107 Proložení zvýšení meze kluzu po částech konstantní funkcí

6.4 Numerická simulace hydroformování

Pro posouzení vylisovatelnosti navrženého strukturovaného povrchu absorbérů a příp. optimalizační činnost bylo využito numerických výpočtů s podporou metody konečných prvků.

6.4.1 Ověřovací simulace – výběr metody řešení

Prvotní numerická simulace MKP byla zaměřena především na porovnání implicitního a explicitního algoritmu řešení s experimentálně zhotoveným povrchem absorbéru. Ten byl získán lisováním vzorku o rozměrech lisované části 150×150 mm v dutině výše zmíněného lisovacího přípravku (obr. 73), resp. užitím lisovnice tvořené jehlany s vrcholovými úhly 90° a se zaoblením hran 1 mm, viz obr. 108. Tloušťka plechu byla stanovena mikrometricky jako 0,478 mm (jmenovitá tloušťka 0,5 mm). Jelikož se simulace v základu zaměřovala jen na tváření strukturovaného povrchu, nebyl lisovaný vzorek opatřen středovým svarem simulujícím meandrovitou strukturu. Vzhledem ke kvazistatickému charakteru úlohy je v tomto případě možné využít jak implicitní, tak ale i explicitní přístup k řešení. Pro ověření možností obou přístupů (algoritmů) a výběru optimální metody řešení byl výpočtový model numerické simulace aplikován v prostředí dvou softwarů využívajících implicitní a explicitní algoritmus výpočtu, tj. ANSYS Workbench a ANSYS LS-DYNA.



Obr. 108 Rozměry lisovnice

Z hlediska popisu chování tvářeného materiálu v průběhu numerické simulace, tj. austenitické chromniklové korozivzdorné oceli X5CrNi18-10, byl materiálový model aproximovaně zadán v souladu s výše uvedenými experimentálně zjištěnými charakteristikami, viz kap. 6.2, v podobě multilineárního modelu. Dále byly využity poznatky o anizotropii materiálu a změně meze kluzu v důsledku svaření, viz obr. 107. Lisovnice byla uvažována jako ideálně tuhá. Srovnávané softwary nabízejí k popisu anizotropního chování materiálu každý jiný model vyžadující odlišné vstupní údaje.

Prostředí ANSYS Workbench verze 16, resp. modul pro statické (kvazistatické) výpočty nezávislé na měnící se rychlosti přetvoření Static Structural představuje možnost řešení úlohy nezávisle na čase, tedy statickou cestou, a to implicitním algoritmem řešení uvažujícím velká přetvoření s využitím Newton-Raphsonovy metody. Výpočet je zde realizován v řešiči ANSYS Mechanical. Pro popis materiálových vlastností v oblasti zpevnění byl zvolen model „Anisotropic plasticity“, který vyžaduje údaje o poměrných hodnotách mezí kluzu R_x , R_y , R_z , R_{xy} , R_{yz} a R_{zx} , viz vztahy (5.26) až (5.31). Vstupní materiálová data simulace uvádí tab. 12 a obr. 109. Poměrné hodnoty mezí kluzu byly určeny na základě zjednodušení pro daný případ plošného tváření, a to na základě výše uvedených vztahů (5.33) až (5.35):

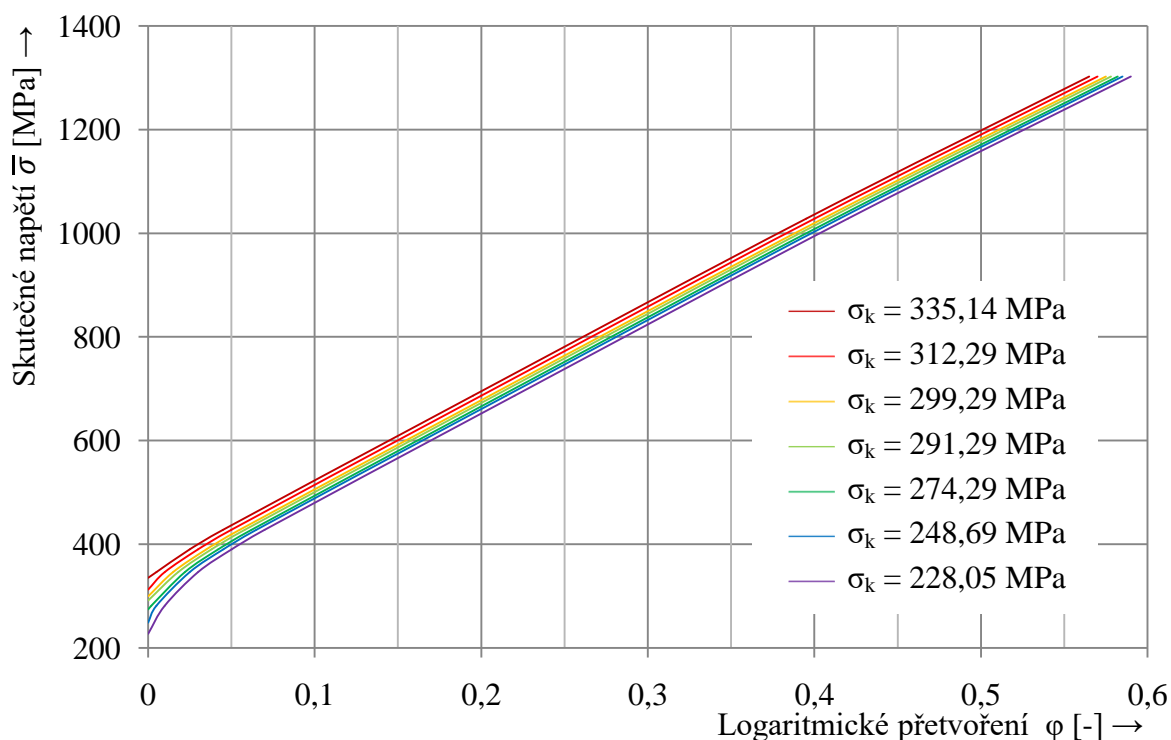
$$R_y = \sqrt{\frac{r_{90} \cdot (r_0 + 1)}{r_0 \cdot (r_{90} + 1)}} = \sqrt{\frac{0,973 \cdot (0,870 + 1)}{0,870 \cdot (0,973 + 1)}} = 1,030,$$

$$R_z = \sqrt{\frac{r_{90} \cdot (r_0 + 1)}{r_0 + r_{90}}} = \sqrt{\frac{0,973 \cdot (0,870 + 1)}{0,870 + 0,973}} = 0,994,$$

$$R_{xy} = \sqrt{\frac{3 \cdot r_{90} \cdot (r_0 + 1)}{(2 \cdot r_{45} + 1) \cdot (r_0 + r_{90})}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 0,973 \cdot (0,870 + 1)}{(2 \cdot 1,178 + 1) \cdot (0,870 + 0,973)}} = 0,939.$$

Tab. 12 Parametry materiálového modelu Anisotropic plasticity (ANSYS Mechanical)

Modul pružnosti v tahu	E	[MPa]	$1,99 \cdot 10^5$
Poissonův poměr	μ	[-]	0,3
Poměrná hodnota meze kluzu ve směru osy x	R_x	[-]	1
Poměrná hodnota meze kluzu ve směru osy y	R_y	[-]	1,030
Poměrná hodnota meze kluzu ve směru osy z	R_z	[-]	0,994
Poměrná hodnota meze kluzu v rovině xy	R_{xy}	[-]	0,939
Poměrná hodnota meze kluzu v rovině yz	R_{yz}	[-]	1
Poměrná hodnota meze kluzu v rovině zx	R_{zx}	[-]	1



Obr. 109 Multilineární model křivky zpevnění pro směr válcování (osa x)

Software ANSYS LS-DYNA verze R7.1.1 je určen především k explicitním analýzám rychlých či vysoce nelineárních úloh. Jelikož se ovšem jedná pouze o řešič, je v rámci preprocessingu a postprocessingu nutná kooperace s jinými softwary. Pro daný případ byly pro vygenerování a nezbytnou úpravu vstupního souboru a vyhodnocení výsledků použity programy ANSYS Workbench verze 16 modul Explicit Dynamics (LS-DYNA Export) v součinnosti s programem LS-PrePost verze 4.3. Aby bylo možné počítat kvazistatickou úlohu explicitním algoritmem, bylo nutné provést úpravy vstupních údajů (viz kap. 5.2.2). V prvním kroku byla oproti implicitnímu algoritmu, kde tato hodnota není k výpočtu vůbec zapotřebí, zadána měrná hmotnost tvářeného materiálu o dva řády vyšší. Dále byla zadána oproti realitě nižší hodnota času simulace (10 ms). Tyto zásahy mohou ovlivnit korektnost výsledků, proto je nutné statický charakter úlohy po výpočtu zkontrolovat porovnáním kinetické a vnitřní energie řešené soustavy (obr. 111). Samotný popis materiálových vlastností spojených s anizotropií je zde možné realizovat více modely. Pro danou úlohu byl zvolen model „Anisotropic plastic“, který podporuje výpočet s přímo zadanými hodnotami součinitelů plastické anizotropie. Popis zpevnění materiálu ve směru válcování koresponduje s výše uvedeným grafem na obr. 109. Konkrétní zadané parametry materiálového modelu Anisotropic plastic uvádí tab. 13.

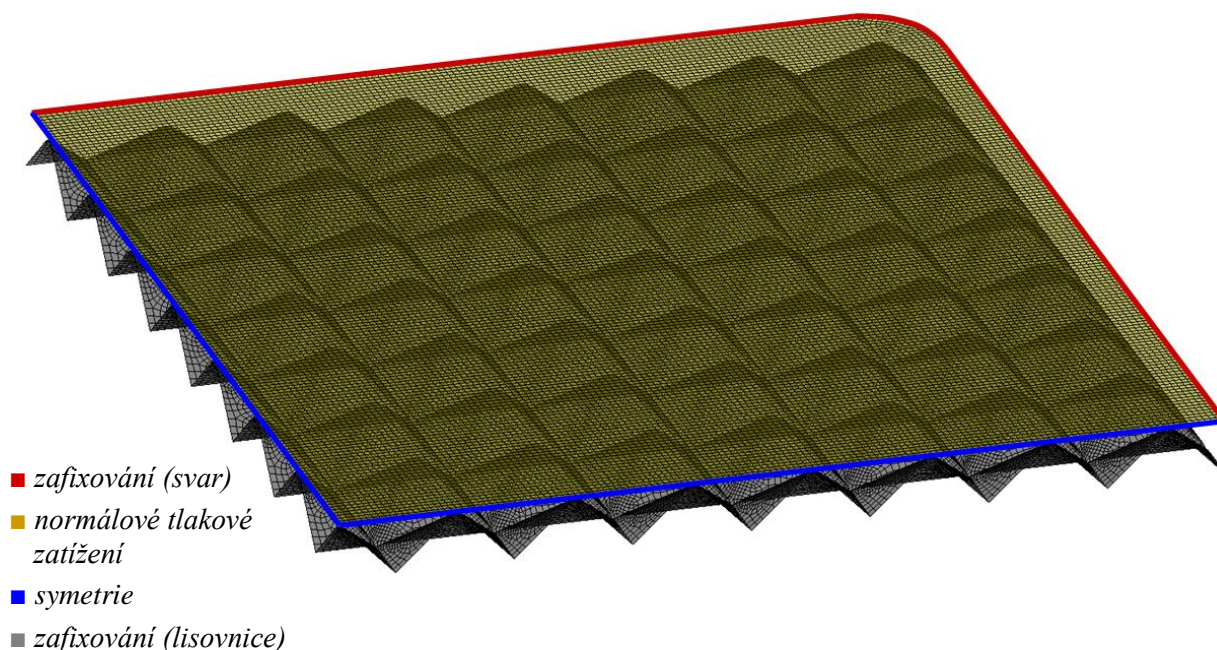
Tab. 13 Parametry materiálového modelu *Anisotropic plastic (LS-DYNA)*

Měrná hmotnost materiálu	ρ	[kg · m ⁻³]	$7,90 \cdot 10^5$
Modul pružnosti v tahu	E	[MPa]	$1,99 \cdot 10^5$
Poissonův poměr	μ	[-]	0,30
Součinitel plastické anizotropie pro směr 0°	r_0	[-]	0,865
Součinitel plastické anizotropie pro směr 45°	r_{45}	[-]	1,174
Součinitel plastické anizotropie pro směr 90°	r_{90}	[-]	0,972

Třecí podmínky simulace byly voleny pro obě řešení stejné. S ohledem na přítomnost hydraulického oleje, který ulpívá po každém experimentu na hranách lisovnice, byl nastaven součinitel smykového tření $f = 0,12$. Nutno ovšem dodat, že možné odchylky koeficientu tření od reality zde nejsou příliš podstatné, neboť za stávajícího stavu napjatosti při hydroformování, kdy dochází v podstatě k „nabalování“ materiálu na geometrii lisovnice, příliš neovlivňují výsledky.

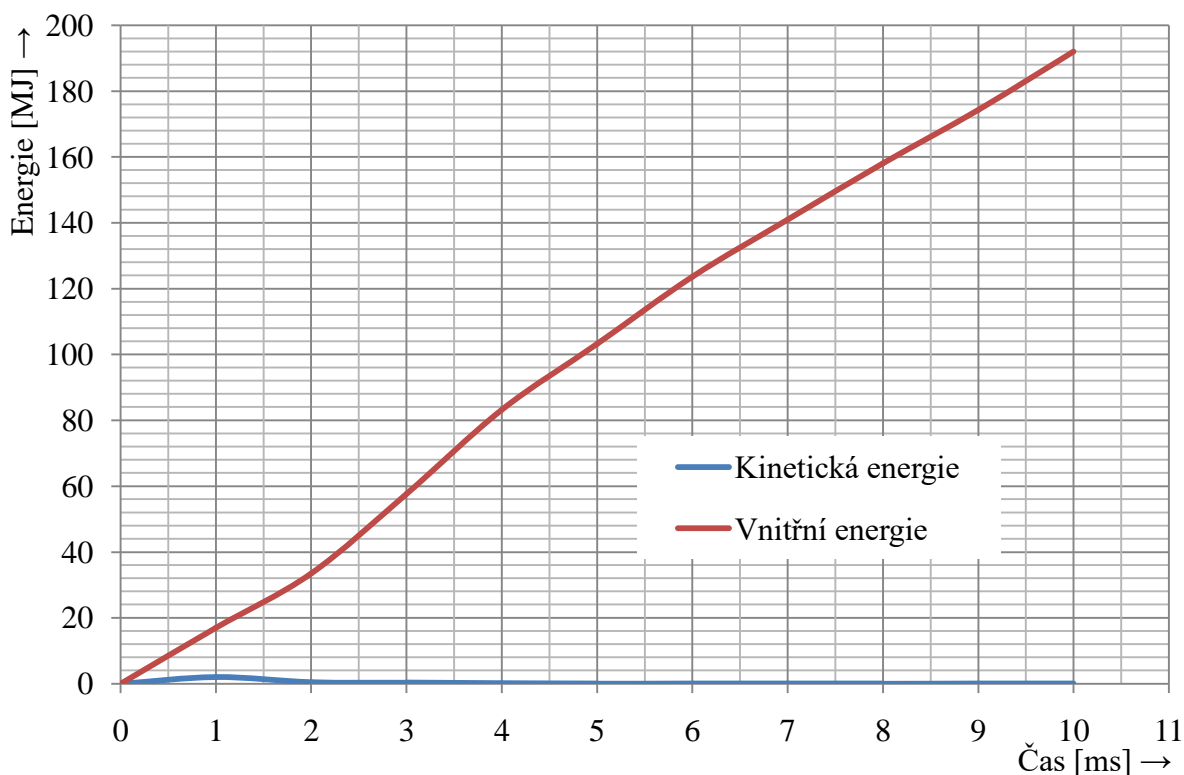
Za účelem zjednodušení a tím i zrychlení výpočtu simulace procesu lisování byl použit zjednodušený geometrický model. Ten vychází z předpokladu symetrie úlohy i z možnosti zanedbání těch částí, které nemají přímou účast na lisovacím pochodu. Geometrický vstup byl vytvořen v prostředí Autodesk Inventor Professional 2016 a do výpočetního softwaru importován ve formátu *.iges.

Diskretizace řešeného kontinua lisovaného materiálu i lisovnice byla provedena za pomoci čtyřuzlových čtyřúhelníkových skořepinových prvků. Důraz byl kladen na požadavek co možná největší rovnoměrnosti sítě MKP, a to zejména z důvodu pozdější korektnosti výsledků. V případě aplikace sítě MKP na plech tak byly použity prvky s délkou hrany 0,5 mm. Po provedení diskretizace jednotlivých makroprvků a aplikaci okrajových podmínek, tj. lisovacího tlaku, podmínek symetrie, kontaktních a vazebných podmínek dle obr. 110, byl získán plně definovaný výpočtový model. Působení tvářecího média bylo v rámci zadávání okrajových podmínek úlohy nahrazeno normálovým působením tlaku na povrch lisovaného materiálu. Pro výpočet byla nastavena lineární změna lisovacího tlaku v rozmezí 0 až 60 MPa.



Obr. 110 Geometrický model sestavy

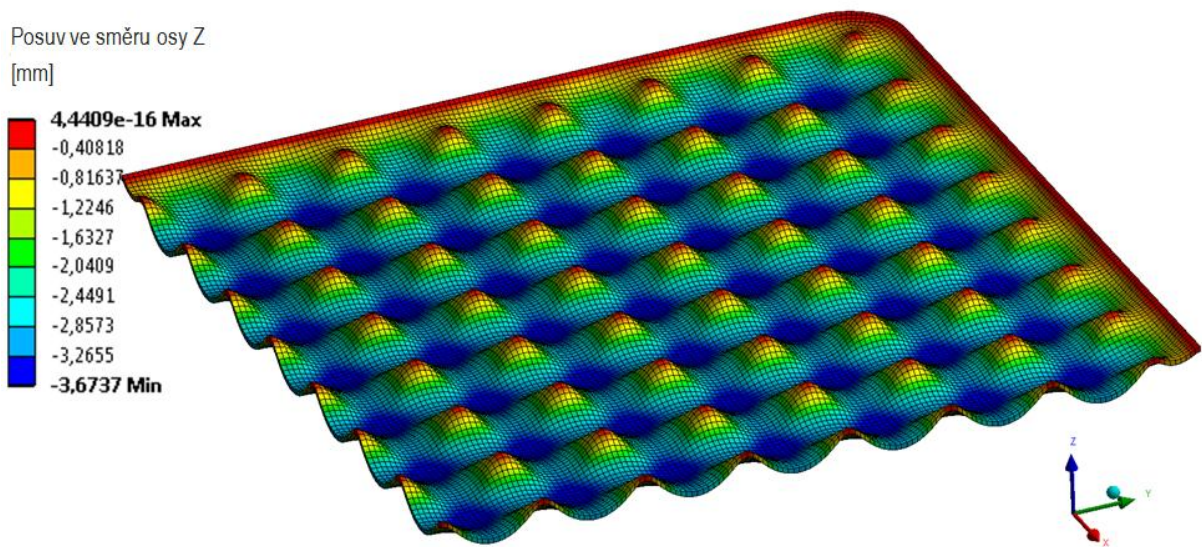
Jak bylo výše zmíněno, po provedení výpočtu pomocí explicitního algoritmu v softwaru LS-DYNA je nutné, vzhledem k zásahům do nastavení výpočtu, kontrolovat zachování statického (kvazistatického) charakteru úlohy. Graf globálního energetického vývoje simulované soustavy, vykreslený pro danou úlohu, tj. závislost kinetické a vnitřní energie na čase ukazuje obr. 111.



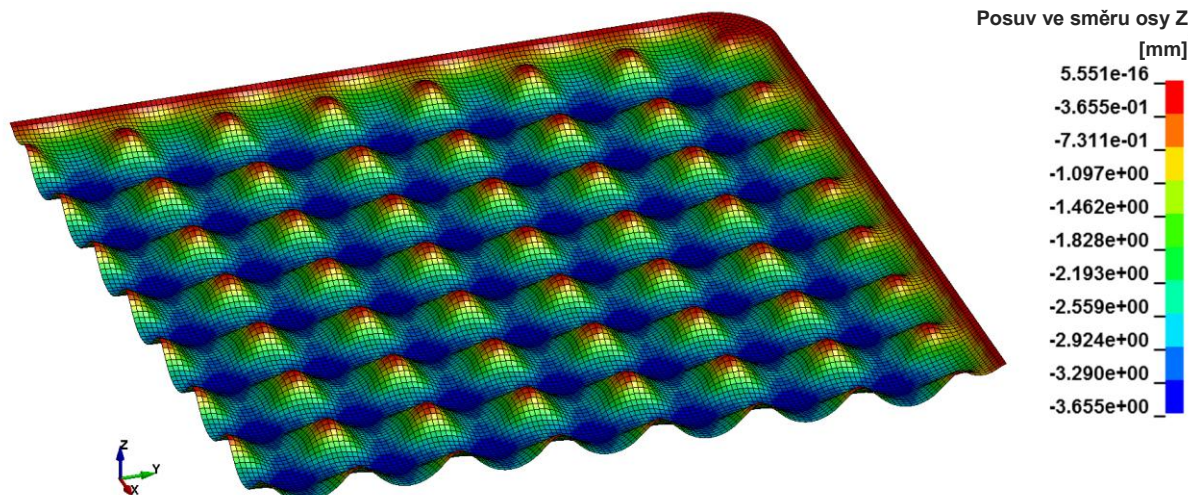
Obr. 111 Závislost kinetické a vnitřní energie na čase

Jak je z grafu patrné, kinetická energie je v porovnání s vnitřní energií řešené soustavy zanedbatelná. Lze tedy konstatovat, že statický charakter úlohy nebyl narušen a nedošlo tudíž ani ke zkreslení výsledků.

Po provedení výpočtové simulační části je možné zaměřit se na vyhodnocení. Ze simulace metodou konečných prvků vyplynul především potřebný lisovací tlak. Při tlaku 40 MPa jsou prolisy vylisovány do hloubky cca 3 mm, při 60 MPa jsou to již cca 3,6 mm. Obr. 112 uvádí predikci bez defektů dosažitelné hloubky výlisků, tj. tvaru vylisované struktury při použití lisovacího tlaku 60 MPa.



a) výstup software ANSYS Workbench (implicit)



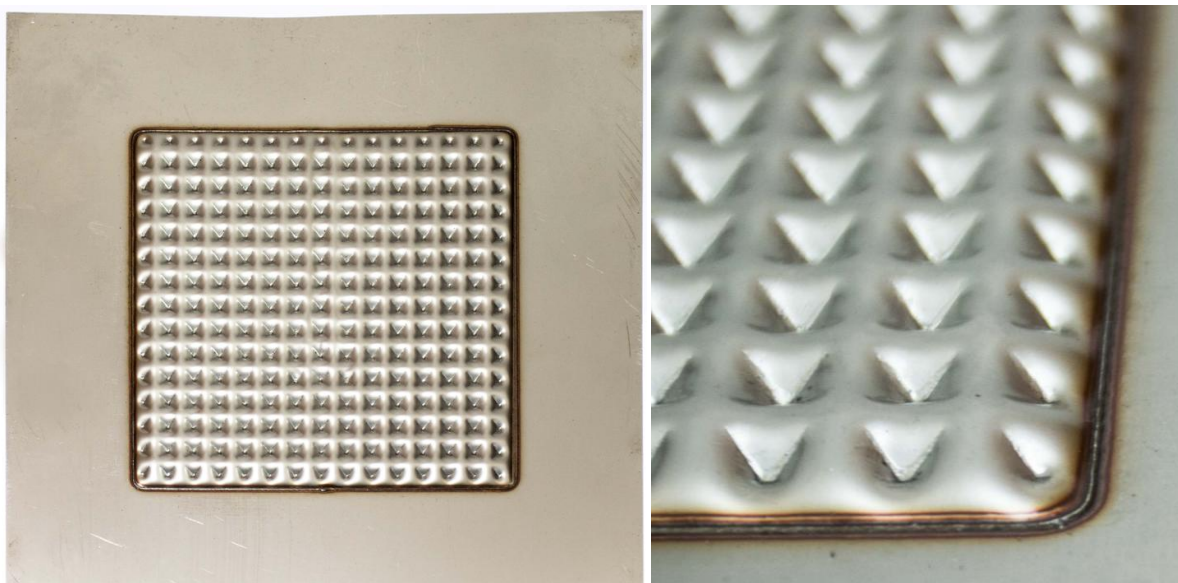
b) výstup software ANSYS LS-DYNA (explicit)

Obr. 112 Predikce hloubky prolisů při tvářecím tlaku 60 MPa

Aby bylo možné porovnat výsledky dosažené numerickou simulací implicitním a explicitním algoritmem řešení, bylo přikročeno k lisování zkušební vzorku v lisovacím přípravku s povrchem lisovnice odpovídajícím strukturovanému jehlanovitému povrchu s vrcholovými úhly jehlanů 90° dle obr. 108. Výslednou vylisovanou strukturu vzorku uvádí obr. 113. Maximální hloubka prolisů, která byla stanovena na základě experimentálního měření posuvným měřidlem PROTECO (základní údaje viz tab. 14) činí 3,65 mm.

Tab. 14 Specifikace posuvného měřidla PROTECO

Vlastnosti	Hodnota	Jednotky
Měřicí rozsah	0 až 150	mm
Rozlišení	0,01	mm
Přesnost (pro rozměry < 100 mm)	± 0,02	mm

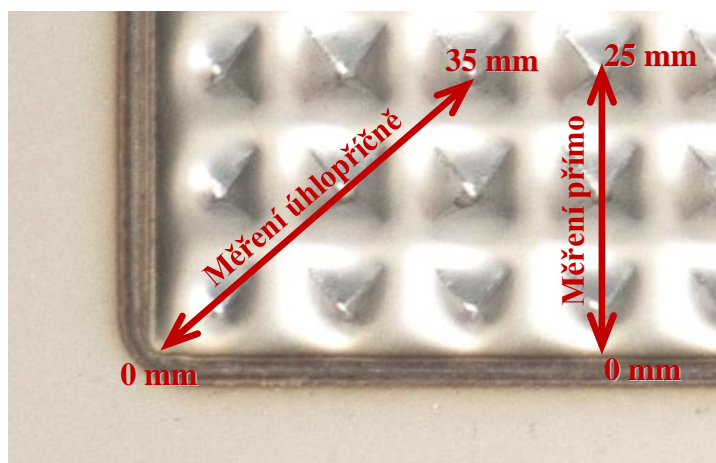


a) Vylisovaný vzorek

b) detail vylisované struktury

Obr. 113 Vylisovaný strukturovaný povrch absorbéru

Jedním z dalších výstupů provedené numerické simulace je i analýza změny tloušťky výlisku. Tato byla následně konfrontována s experimentální cestou, tj. proměřením profilu výlisku. S ohledem na tvarovou složitost a přesnější popis ztenčení, bylo měření prováděno ve směru přímém i úhlopříčném, jak naznačuje obr. 114. Měření probíhalo vždy od kraje lisované oblasti, těsně za svarem, přes tři vrcholy jehlanovitých prolisů v délce 25 mm pro přímý směr a 35 mm pro směr úhlopříčný.



Obr. 114 Naznačení měřených úseků

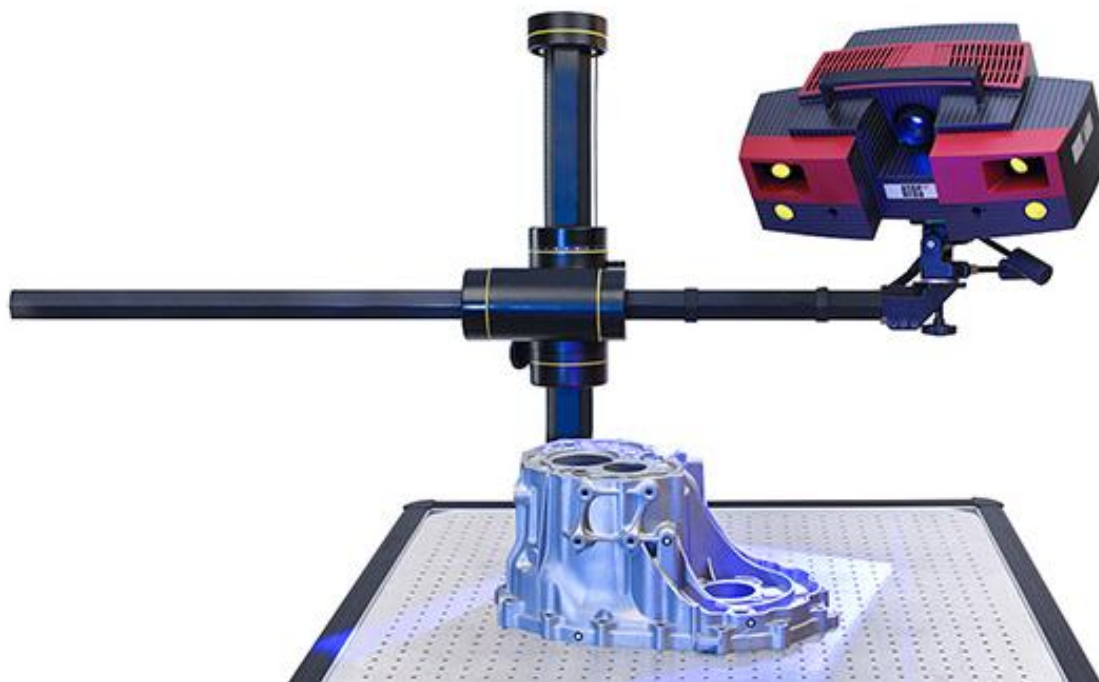
Ke zjištění ztenčení materiálu bylo použito více experimentálních metod. Primárně byl pro tento účel použit digitální třmenový mikrometr Mitutoyo s hrotovými doteky, jehož základní parametry uvádí tab. 15. Celkem byla tímto způsobem provedena tři měření. Naměřené údaje byly poté zprůměrovány. Tabelované naměřené údaje jsou uvedeny v příloze 7.

Tab. 15 Specifikace hrotového digitálního mikrometru Mitutoyo

Vlastnosti	Hodnota	Jednotky
Měřicí rozsah	0 až 25	mm
Rozlišení	0,001	mm
Měřicí síla	3 až 8	N

Vzhledem ke složitosti vylisované struktury, která může při ručním mikrometrickém měření mít značný dopad na jeho přesnost, tj. obtížné zaručení kolmosti měřících dotyků vzhledem k rovině plechu, bylo přikročeno k experimentálnímu měření s využitím 3D optického bezkontaktního snímání povrchu.

Pro tento účel byl využit systém ATOS Triple Scan 8M společnosti GOM, viz ilustrační foto na obr. 115, umožňující přímé 3D skenování součástí s tmavým i lesklým povrchem, skenování hlubokých otvorů i jemných hran.



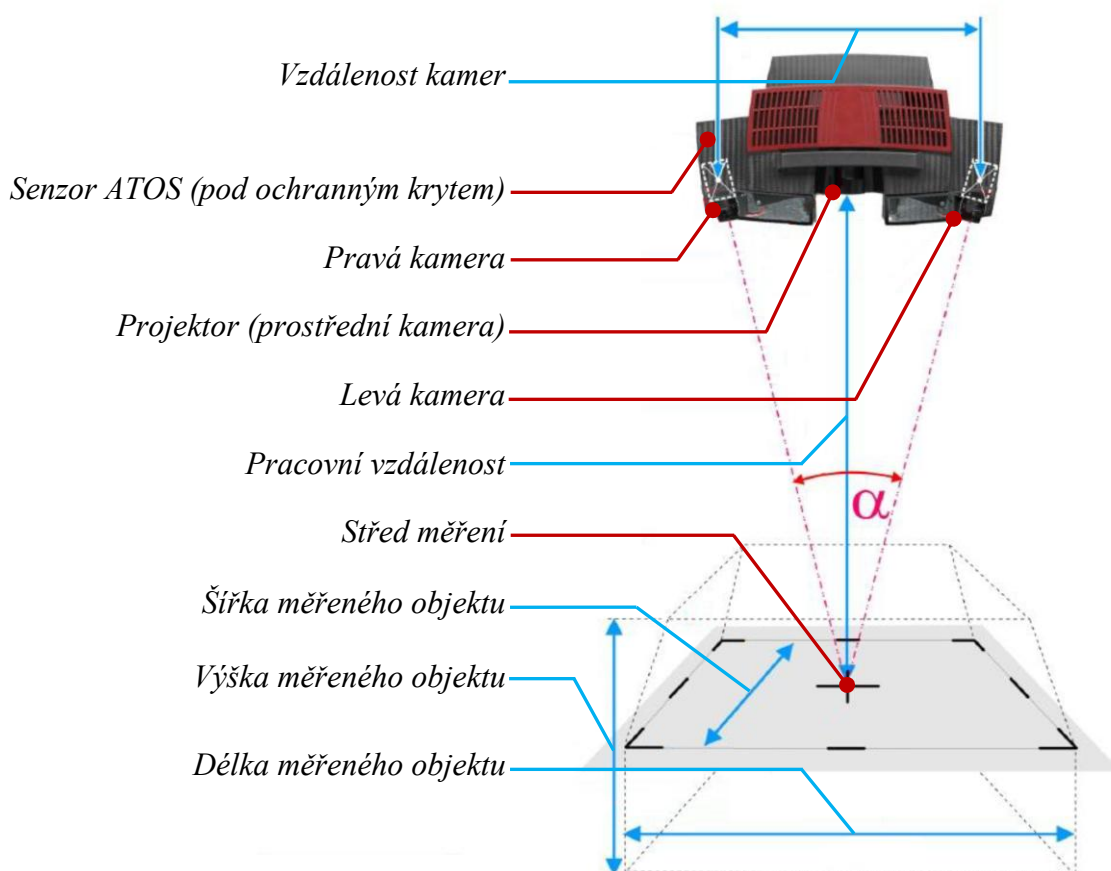
Obr. 115 Systém ATOS Triple Scan [86]

Princip skenování systémem ATOS (Advanced TOPometric Sensor) spočívá v triangulaci snímaných dat. Projektor promítá na skenovaný dílec pattern (různé typy pruhů), který je snímán dvojicí kamer. K celkové digitalizaci snímaného objektu je zapotřebí provést skenování z několika pohledů, tj. z několika úhlů. Díky referenčním bodům (markerům), jež se umísťují přímo na skenovaný dílec či na geometrii svázanou se skenovaným dílcem, vyhodnocovací systém provede transformaci záběrů do společného globálního souřadného systému a vytvoří tak celkový sken součásti. Výhodou systému ATOS Triple Scan je možnost snímat objekt i přes projektor, který může sloužit jako třetí skenovací kamera. Stereopohled tak lze v rámci skenování rozšířit o třetí pohled, což vede k menšímu počtu potřebných skenů při současném zvýšení jejich kvality. Nasnímané údaje o geometrii je poté možné upravit ve vyhodnocovacím softwaru a exportovat jako tzv. mrak bodů nebo ve formátech *.stl, *.igs apod. Základní údaje o systému ATOS Triple Scan 8M jsou sumarizovány v tab. 16.

Tab. 16 Základní specifikace systému ATOS Triple Scan 8M [87]

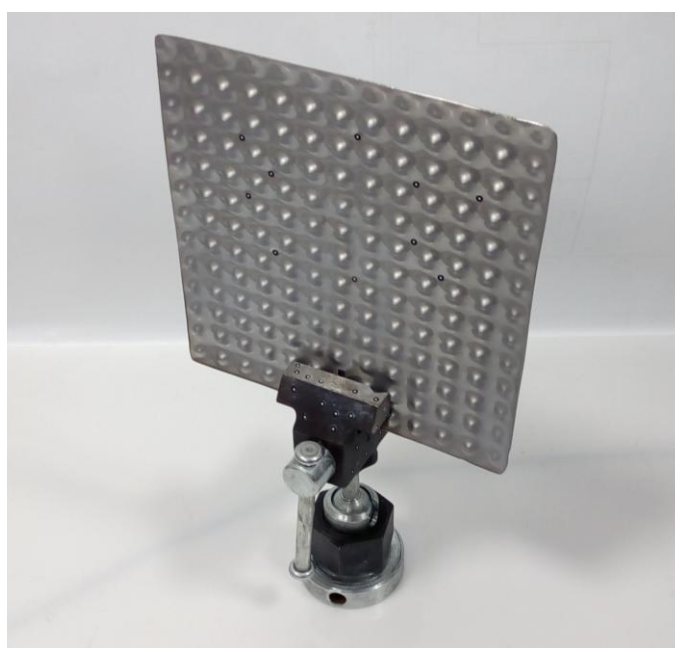
Vlastnosti	Hodnota	Jednotky
Počet pixelů	2 × 8 000 000	-
Plocha měření	38 × 29 až 2 000 × 1 500	mm ²
Hustota bodů	0,01 až 0,61	mm
Pracovní vzdálenost	490 až 2 000	mm
Pracovní teplota	5 až 40	°C
Polohování měřeného dílce	manuální nebo otočným stolem	-

Schéma činnosti systému ATOS Triple Scan ozřejmuje obr. 116. Ke skenování vylisovaného strukturovaného povrchu byl navíc využit otočný stůl, který výrazně usnadňuje manipulaci se skenovaným vzorkem.



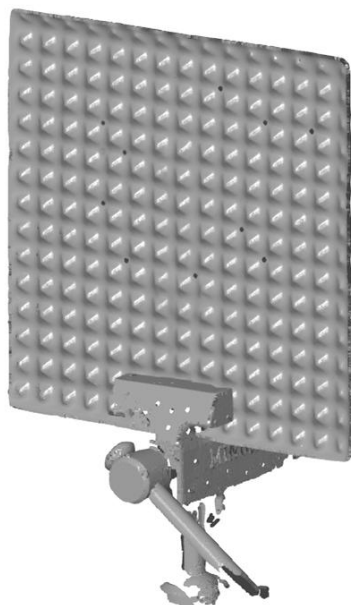
Obr. 116 Schéma systému ATOS Triple Scan [87], [88]

Jelikož se výlisek pro účely skenování jevil jako extrémně lesklý, byl opatřen matným nástřikem – Ti povlakem (tloušťka nástřiku cca 5 μm). Dále byl zkoumaný dílec opatřen referenčními body. Vzorek připravený k měření je zobrazen na obr. 117. Při skenování docházelo díky specifickému plochému tvaru výlisku k problémům v navazování pohledů (skenů) přes referenční body, resp. k problémům při přechodu z jedné strany výlisku na druhou. Proto byl upnut přes upínací zařízení (svěrák), opatřené též referenčními body, k otočnému skenovacímu stolu a naskenován. Díky svázání geometrie svěráku se zkoumanou geometrií výlisku již k problémům s přechody mezi jednotlivými pohledy nedocházelo. K vyhodnocení naskenovaných dat byl použit software GOM Inspect 2016.

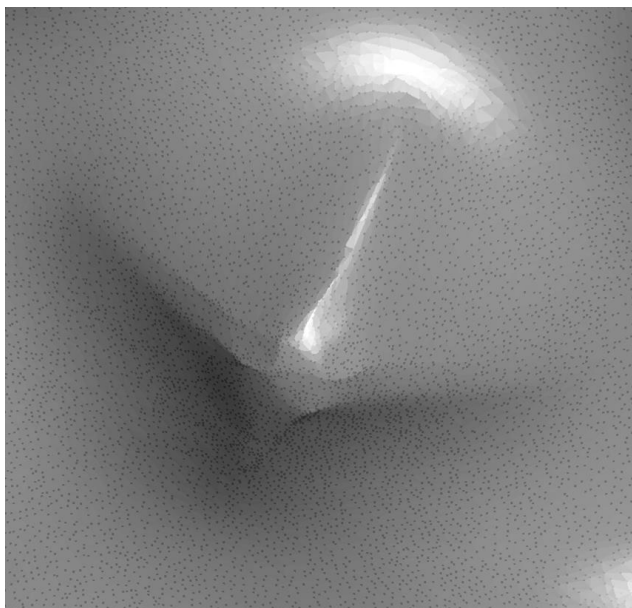


Obr. 117 Vzorek pro skenování systémem ATOS

Naskenovaná geometrie výlisku počáteční tloušťky plechu 0,478 mm s vrcholovými úhly jehlanů 90° v softwaru GOM Inspect 2016 je zobrazena na obr. 118a. Pro dobrou kvalitu naskenované geometrie ji bylo nutné popsat velmi jemnou sítí se střední délkou hrany prvku 0,052 mm. Detail jehlanovité dutiny skenovaného hydroformovaného dílu zobrazuje obr. 118b, z nějž jsou mj. patrné body (uzly) sítě naskenované geometrie.



a) celkový pohled



b) detail jehlanovité dutiny

Obr. 118 Naskenovaná součást systémem ATOS Triple Scan

Po provedení příčných řezů skenovaným objektem, které respektovaly schéma na obr. 114 (přímo i úhlopříčně), byly řezy exportovány ve formátu *.igs do softwaru Autodesk Inventor Professional 2016, kde bylo provedeno následné vyhodnocení ztenčení výlisku. Detaily obou provedených řezů vždy pro 4 jehlanovité prolisy znázorňují obr. 119 a obr. 120.

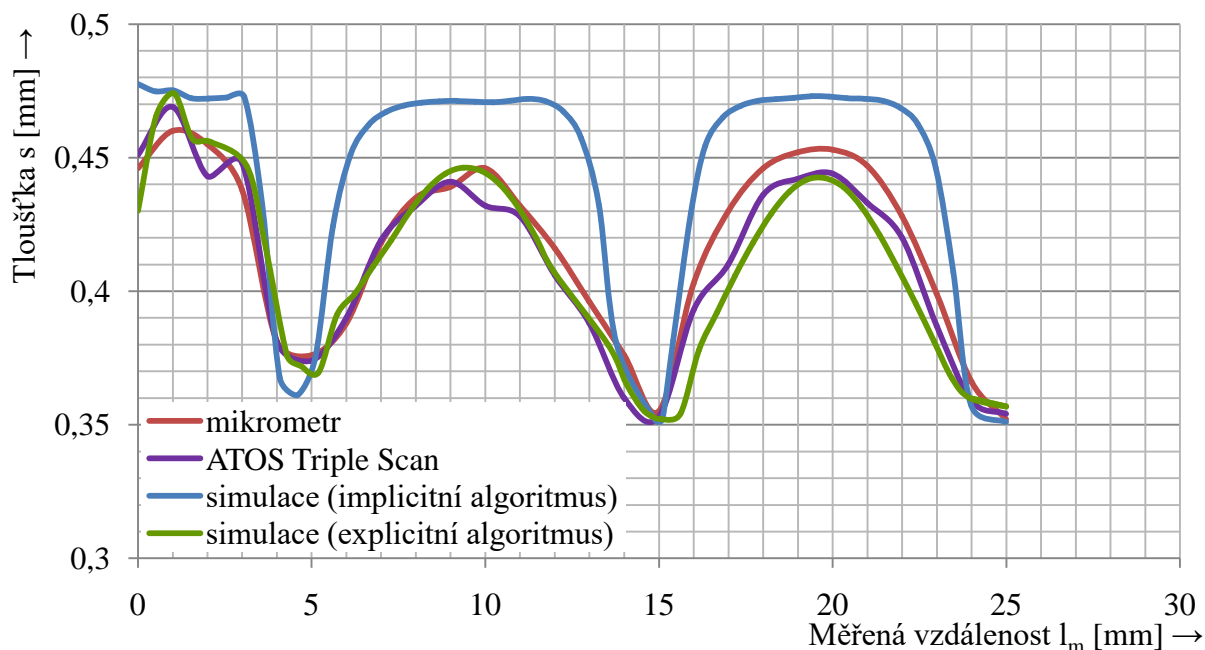


Obr. 119 Detail podélného (přímého) řezu naskenovanou součástí



Obr. 120 Detail úhlopříčného řezu naskenovanou součástí

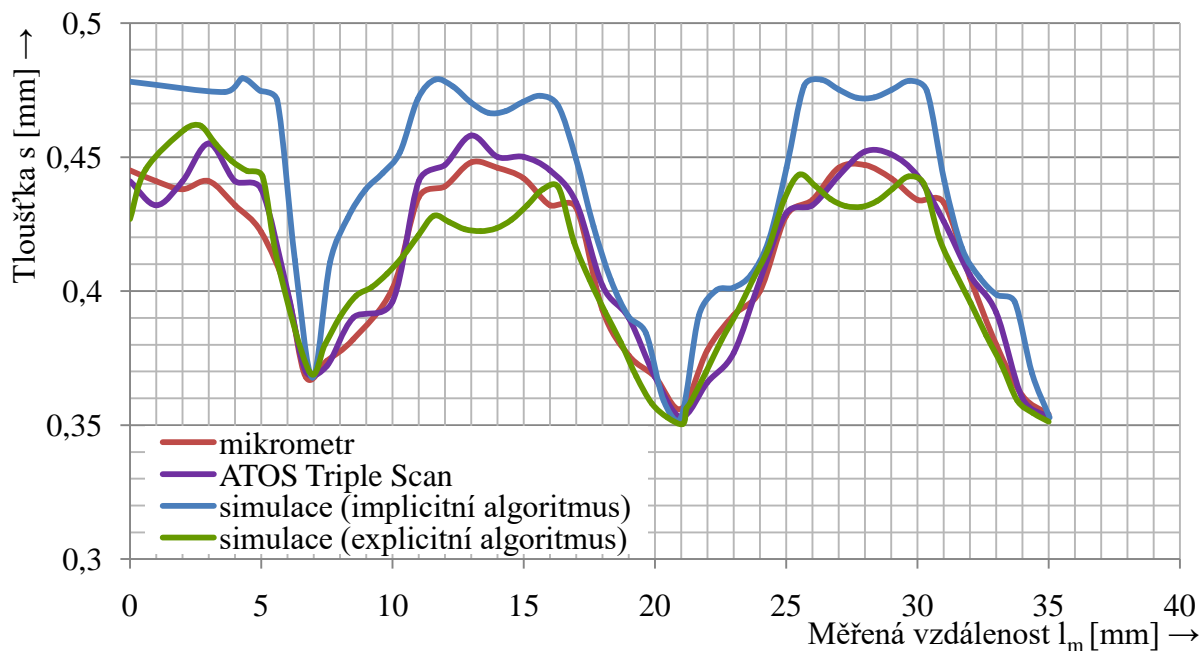
Srovnání teoretického modelu numerické simulace a experimentálního měření s využitím obou výše zmíněných přístupů znázorňují grafy na obr. 121 a obr. 122. Jedná se o závislosti zjištěné tloušťky hydroformovaného dílce na délce měření v přímém a úhlopříčném směru, a to pro výsledky numerické simulace explicitního a implicitního algoritmu řešení, resp. pro změřené hodnoty experimentálního vyhodnocení mikrometrickou cestou a 3D skenovacím systémem ATOS Triple Scan 8M.



Obr. 121 Graf změn tloušťky prolisů – přímý směr

Vzhledem k tomu, že dochází k vylišování tvaru dílce na úkor ztenčování plechu, lze pozorovat proměnné hodnoty tloušťky výlisku dle metody zjišťování cca od 0,48 mm do 0,35 mm. Zvláště je patrné výrazné ztenčení v oblastech prolisů, které přiléhají při lisování k lisovnici, tedy na vrcholy jehlanů. Ztenčení v takovýchto případech dosahuje až 0,14 mm.

Z hlediska porovnání simulace v softwarech ANSYS Workbench a ANSYS LS-DYNA s experimentálním proměřením jsou patrné odchylky od naměřených hodnot zvláště v oblasti od svaru do prvního prolisu (od 0 mm po 5 mm), což platí nejen pro srovnání teoretického výpočtu a experimentu, ale i pro srovnání mikrometrického měření s 3D skenováním, tedy metod experimentálního zjišťování tloušťky. Obecně lze říci, že 3D skenováním byly zjištěny celkově nižší hodnoty tloušťky než při použití mikrometru. Rovněž byla systémem ATOS zjištěna, oproti mikrometrickému proměření, větší variabilita rozložení tloušťky.

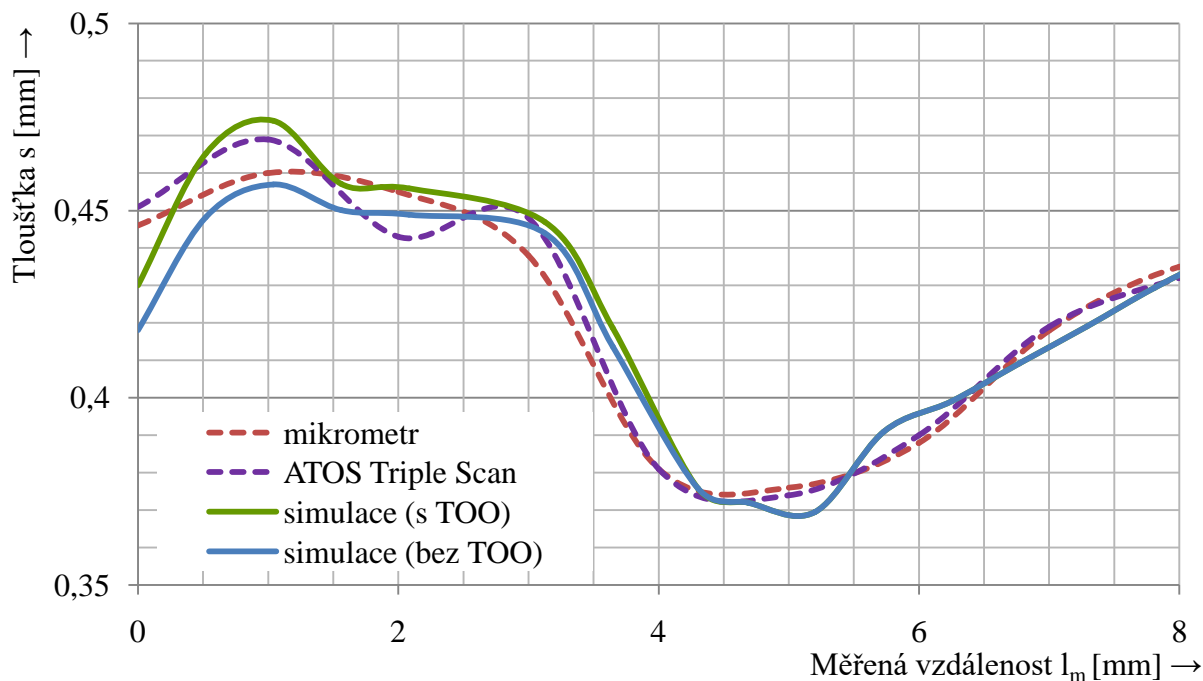


Obr. 122 Graf změn tloušťky prolisů – úhlopříčný směr

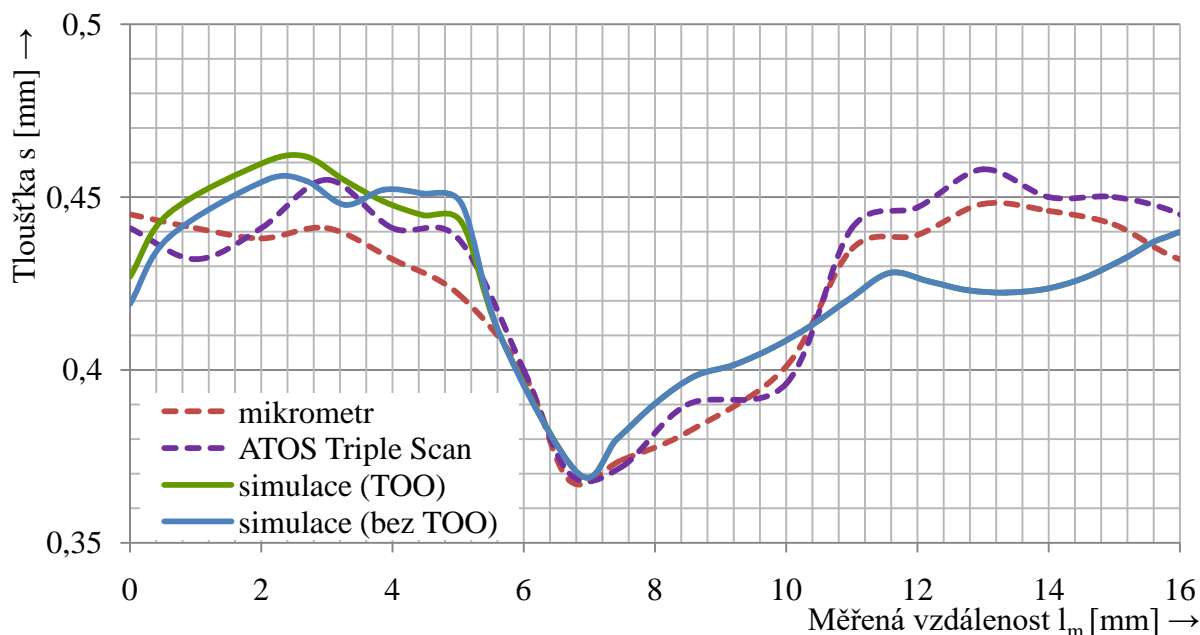
Pokud jsou zohledněny oba výše popsané přístupy k experimentálnímu vyhodnocení, potom v přímém směru (obr. 121) byly v oblasti od svaru do prvního prolisu zjištěny největší odchylky od naměřených hodnot systémem ATOS pro implicitní algoritmus cca 11 % a pro explicitní algoritmus cca 5 %. V případě mikrometrického měření činí největší odchylka pro implicitní algoritmus cca 12 % a pro explicitní algoritmus cca 6 %. V dalších oblastech grafu změn tloušťky prolisů v přímém směru vykazují zhoršenou shodu především spodní části prolisů vypínajících se tlakem kapaliny do volného prostoru (měřené délky cca 10 mm a 20 mm). Výpočet implicitním algoritmem zde predikoval tloušťku materiálu o cca 10 % vyšší, než ve skutečnosti. Naproti tomu výpočet explicitním algoritmem vykazuje velmi dobrou míru shody výsledků s nejvyšší odchylkou nepřesahující 6 %.

Srovnání teoretické simulace s experimentem v úhlopříčném směru (obr. 122) dává obdobné výsledky. I když je třeba konstatovat, že z hlediska shodnosti výsledného ztenčení jsou zde patrné větší odchylky, než u podélného směru. Implicitní řešení i zde vykazuje oproti explicitnímu vyšší rozdíly oproti naměřeným hodnotám. Nejvyšší zjištěná odchylka činí 10 % (měřená vzdálenost cca 3 mm). Ve spodní části prolisů byly poté zaznamenány hodnoty lišící se o cca 8 %. U explicitního řešení je zjištěný nejvyšší rozdíl vyčíslený na 6 %. Ve spodní části prolisů se jedná o hodnotu cca 2 %.

Je zjevné, že v obou případech se vyskytují největší odchylky v oblasti od svaru do prvního prolisu. Další řešenou problematikou v rámci numerické simulace MKP tak může být otázka vhodnosti uvažování změny meze kluzu materiálu v důsledku jeho svaření. Je otázkou, zda vykazuje lepší míru shody řešení bez nebo s uvažováním tohoto jevu. Graficky je tato problematika pro změnu tloušťky výchozího materiálu znázorněna na obr. 123 a obr. 124. Jedná se o detailní zobrazení grafů z obr. 121 a obr. 122 pro měřenou délku 8 mm pro přímý směr, resp. 16 mm pro směr úhlopříčný. Jak je z nich patrné, uvažování tepelně ovlivněné oblasti má v tomto případě smysl. Byť ovlivnění výsledů není nijak velké, přesto uvažování tepelně ovlivněné oblasti přispívá ke zvýšení přesnosti simulace, a to především v šířce tepelného ovlivnění. Porovná-li se obě řešení, potom lze konstatovat, že bez uvažování tepelně ovlivněné oblasti simulace obecně predikuje nižší hodnoty tloušťky. Odchylky od naměřených hodnot se zde pohybují cca od 2 % do 8 %. Naproti tomu hodnoty ztenčení určené s uvažováním tepelného ovlivnění v místě svaru vykazují v tomto místě nejvyšší odchylku 6 %.



Obr. 123 Graf změn tloušťky prolisů v blízkosti svaru – přímý směr



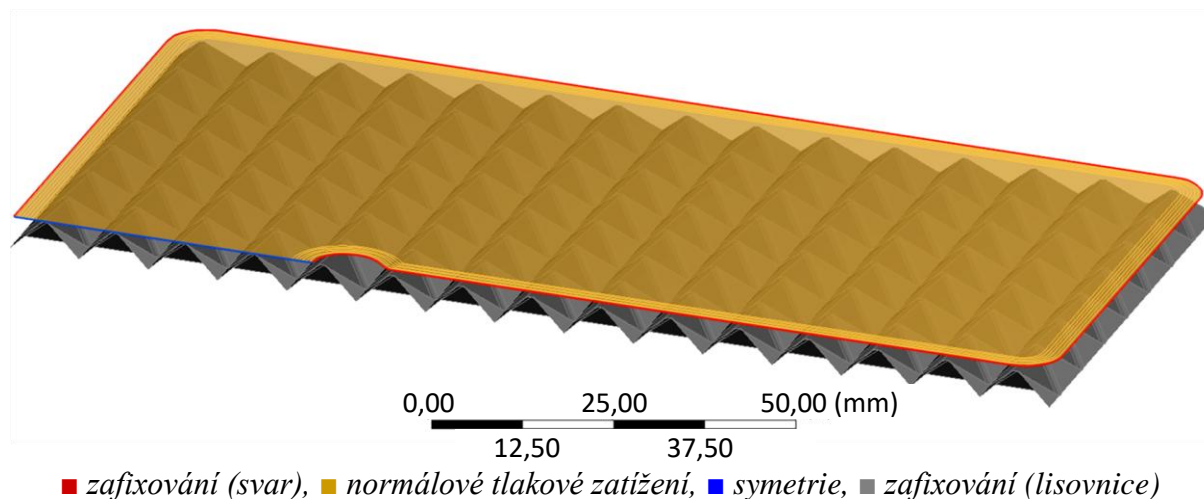
Obr. 124 Graf změn tloušťky prolisů v blízkosti svaru – úhlopříčný směr

Z výše uvedeného je zřejmé, že numerická simulace, především pak explicitní řešení, vykazuje dobrou míru shody výsledků s provedeným experimentem a je tedy možné využít toto numerické modelování i pro další simulace a analýzy. Po úspěšné verifikaci výsledků prvotní numerické simulace MKP byly v dalším zkoumány limity hydroformovacího procesu, tedy stanovení optimálního a kritického lisovacího tlaku, optimální hodnoty zaoblení jehlanovitých elementů lisovací matrice, či problematiky přechodu svar – tvářený materiál ve vztahu k možné tvorbě defektů.

6.4.2 Analýza vyrobitelnosti povrchu s vrcholovým úhlem 90°

Jak je patrné z výsledků výše provedeného rozboru, jako optimální se pro numerickou analýzu jeví využití explicitní formulace MKP. Pro veškeré simulace hydroformování je tedy v dalším použit pouze software ANSYS LS-DYNA.

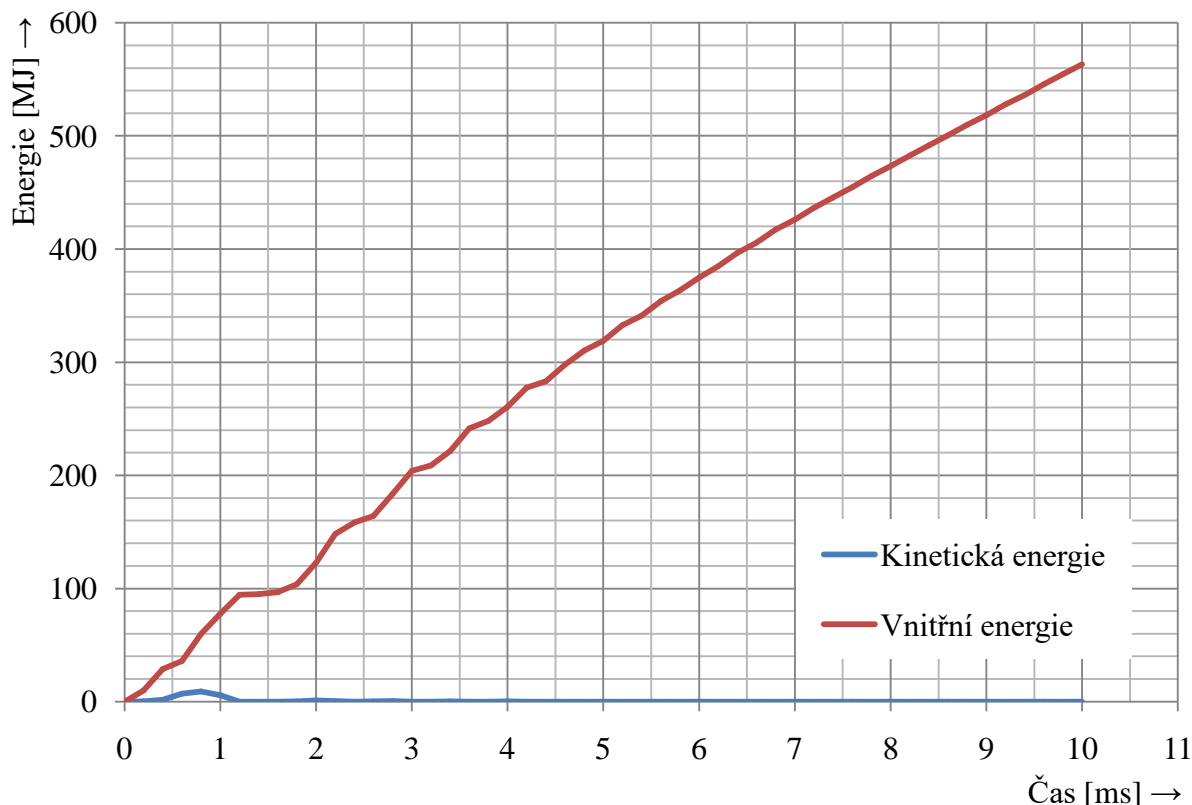
Jako první byla zkoumána možnost vylisování strukturovaného povrchu s co nejmenším bezpečným zaoblením hran lisovnice. Tento požadavek vychází z potřeby co možná nejostřejších přechodů v geometrii jehlanovité struktury, což v praxi vede ke zlepšení absorpčních schopností vyráběného absorbéru. Geometrický model zkoumaného dílce zohledňuje geometrii hydroformovaného vzorku z obr. 79, viz obr. 125.



Obr. 125 Geometrický model sestavy

Jako v předešlém případě, tedy ověřovací simulaci, i zde bylo k diskretizaci polotovaru využito čtyřuzlových čtyřúhelníkových skořepinových prvků s délkou hrany 0,25 mm. Rovněž materiálové i třecí poměry byly zadány ve shodě s předchozím. Za účelem vyhodnocení sledovaných závislostí bylo předepsáno normálové tlakové zatížení 0 až 100 MPa.

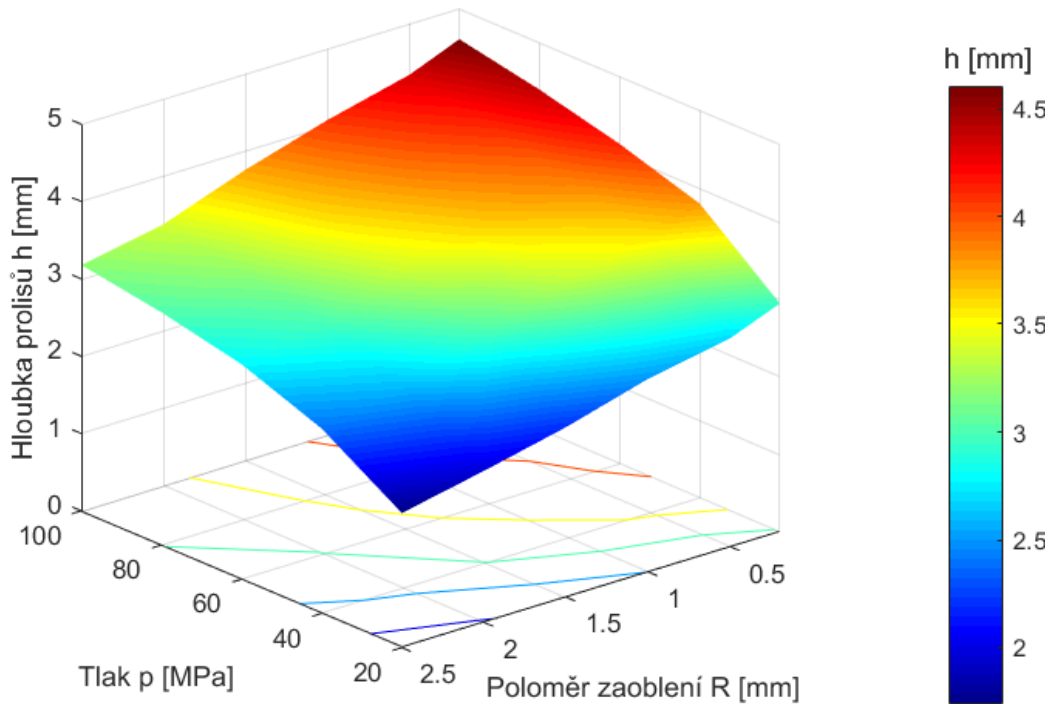
Jelikož bylo rozhodnuto o využití explicitního řešiče ANSYS LS-DYNA, je opět na místě po ukončení výpočtu zkontrolovat zachování statického charakteru řešené úlohy porovnáním kinetické a vnitřní energie, jež je provedeno na obr. 126. Jedná se o případ zaoblení lisovnice 1 mm. Pro ostatní uvažované poloměry zaoblení lisovnice je průběh obdobný. Z grafu je patrné, že pro zadaný čas tvářecího procesu 10 ms nebyl statický charakter úlohy narušen.



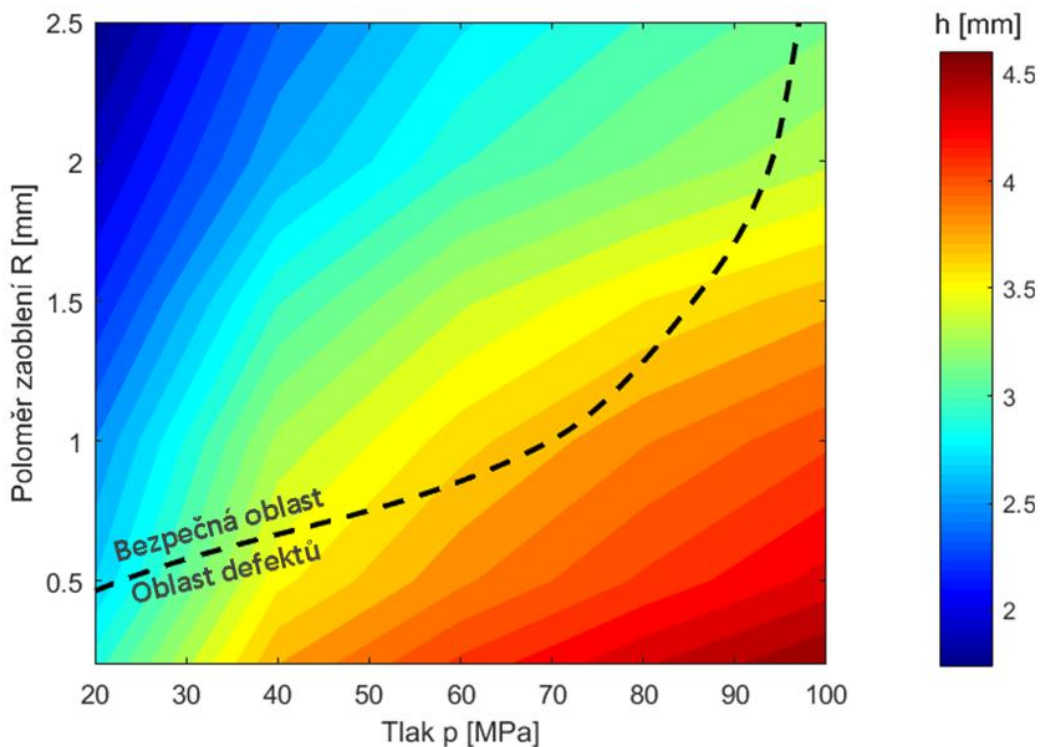
Obr. 126 Závislost kinetické a vnitřní energie na čase

Obr. 127 a obr. 128 ukazují zkonstruovanou grafickou závislost mezi hloubkou prolisů h , poloměrem zaoblení lisovnice R a použitým hydroformovacím tlakem p . Přerušovanou černou čarou je zde též vyznačena limitní křivka vymežující bezpečnou oblast vyrobitelnosti, resp. oddělující dobré výlisky od těch, u nichž byla překročena hranice mezní tvářitelnosti.

Tato byla pro dané parametry hydroformování stanovena na základě vyhodnocení deformačních stop diagramu mezní tvářitelnosti, a to vždy pro oblast (bod) diagramu, jejíž souřadnice (hlavní přetvoření φ_1 a φ_2) spadají do nejproblémovějších oblastí diagramu mezní tvářitelnosti. Dílčí analýzy mezních stavů tvářitelnosti, vždy pro nejkritičtější místo výlisku, včetně deformační stopy v diagramu mezní tvářitelnosti pro různé hodnoty poloměrů zaoblení lisovnice jsou uvedeny v příloze 8. Graf byl zkonstruován s podporou softwaru Matlab R2016.



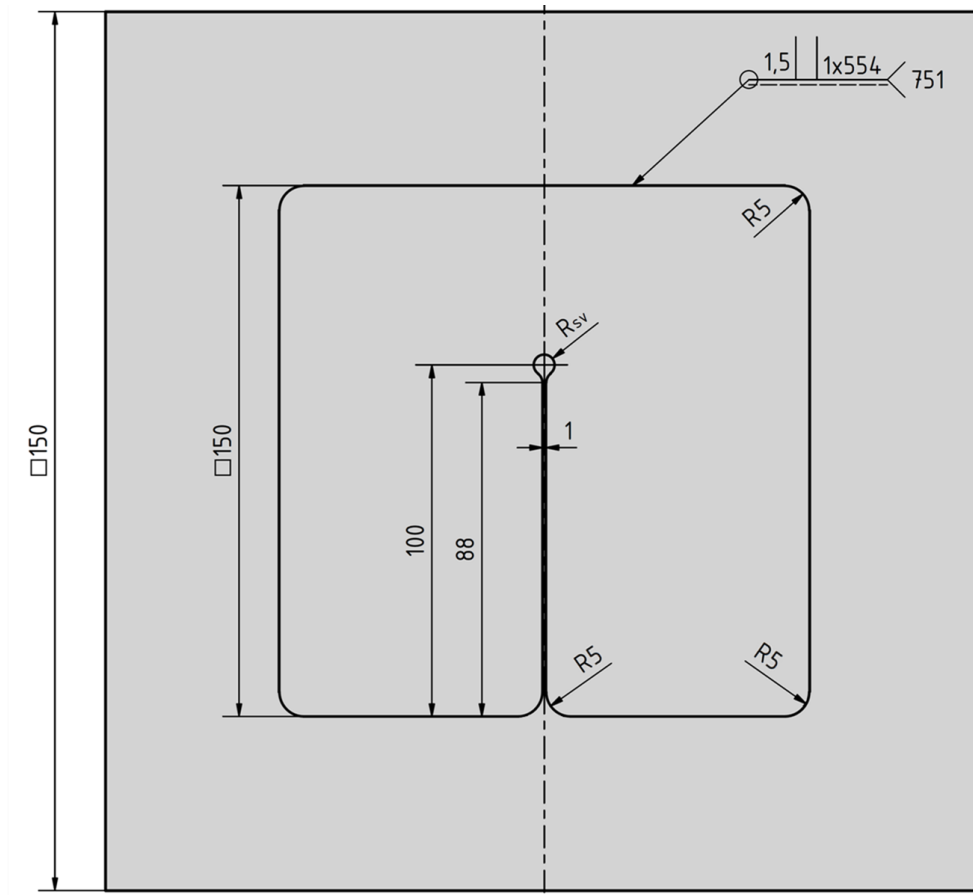
Obr. 127 3D graf závislosti $h - p - R$ pro vrcholový úhel jehlanovité struktury 90°



Obr. 128 Vrstevnicový graf závislosti $h - p - R$ pro vrcholový úhel jehlanovité struktury 90°

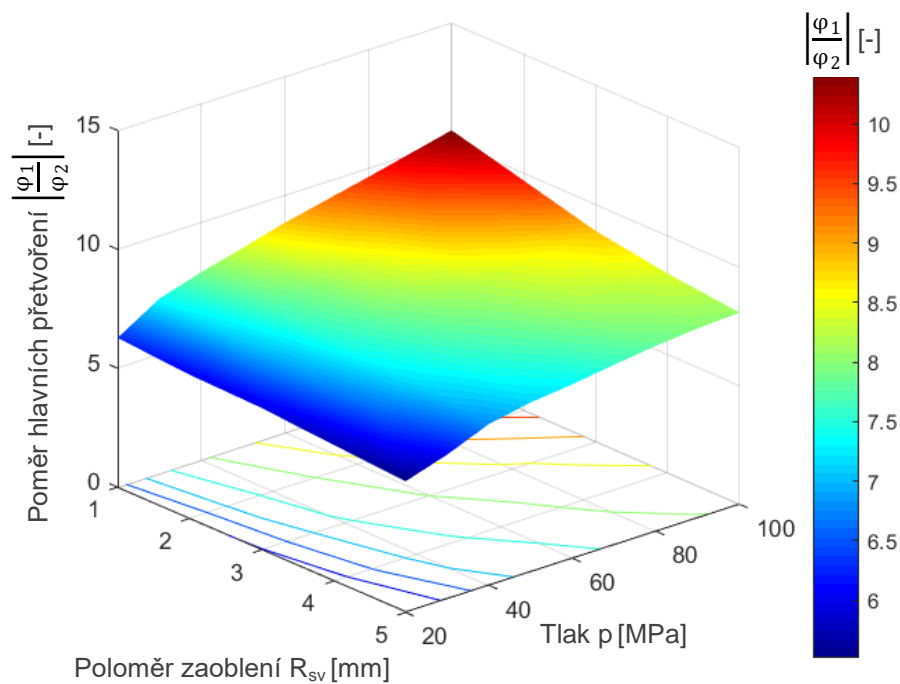
S ohledem na skloubení požadavků co nejhlubších prolisů vylisované struktury s co možná nejostřejšími přechody, jakož i na požadované maximální ztenčení na tloušťku cca 0,35 mm, byla z grafu na obr. 128 odečtena hodnota dovoleného zaoblení 1 mm při lisovacím tlaku 70 MPa. Při takto nastavených parametrech hydroformování je možno vyrobit kýžený strukturovaný povrch bez defektů.

Pro zvolený tlak 70 MPa je dále potřeba vyřešit optimalizaci geometrických parametrů středového svaru vzorku, který simuluje meandrovitou strukturu solárního absorbéru. To proto, aby nedocházelo k jeho porušení. Geometrii dráhy svaru vzorku uvádí obr. 129.

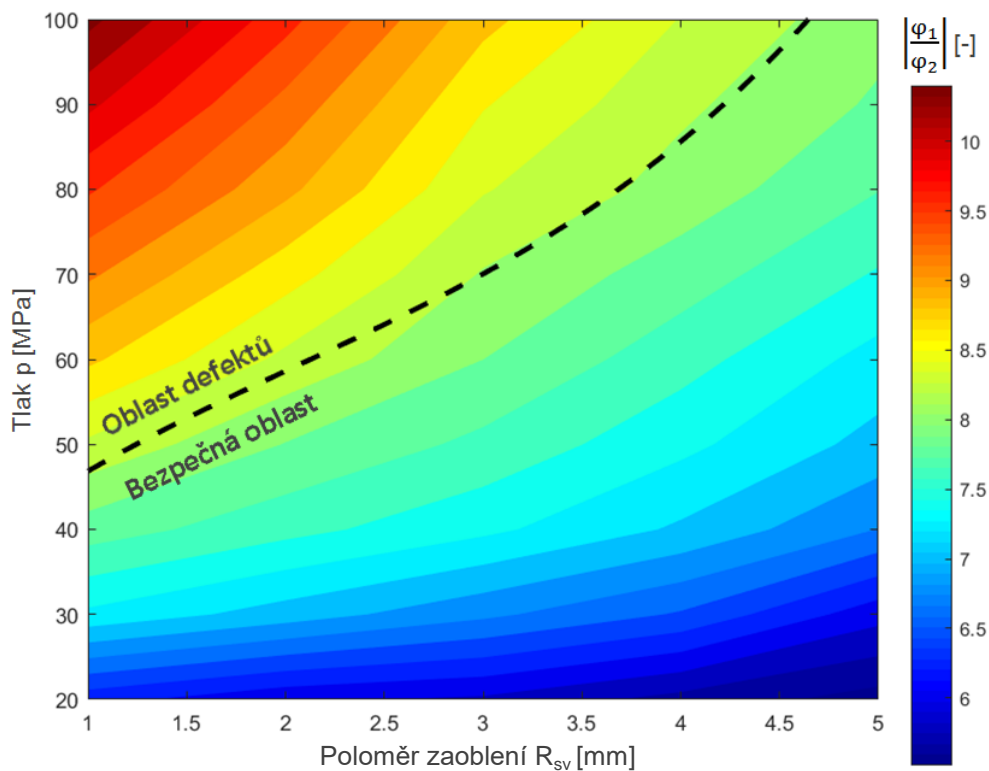


Obr. 129 Geometrie dráhy svaru

Na obr. 130 a obr. 131 je vykreslena simulací predikovaná závislost mezi absolutní hodnotou poměru hlavních přetvoření φ_1 a φ_2 v okolí svaru, lisovacím tlakem p a poloměrem zaoblení zakončení svaru R_{sv} , a to pro nejproblémovější oblast okolí svaru v diagramu mezní tvárnosti s vymezením bezpečné zóny.

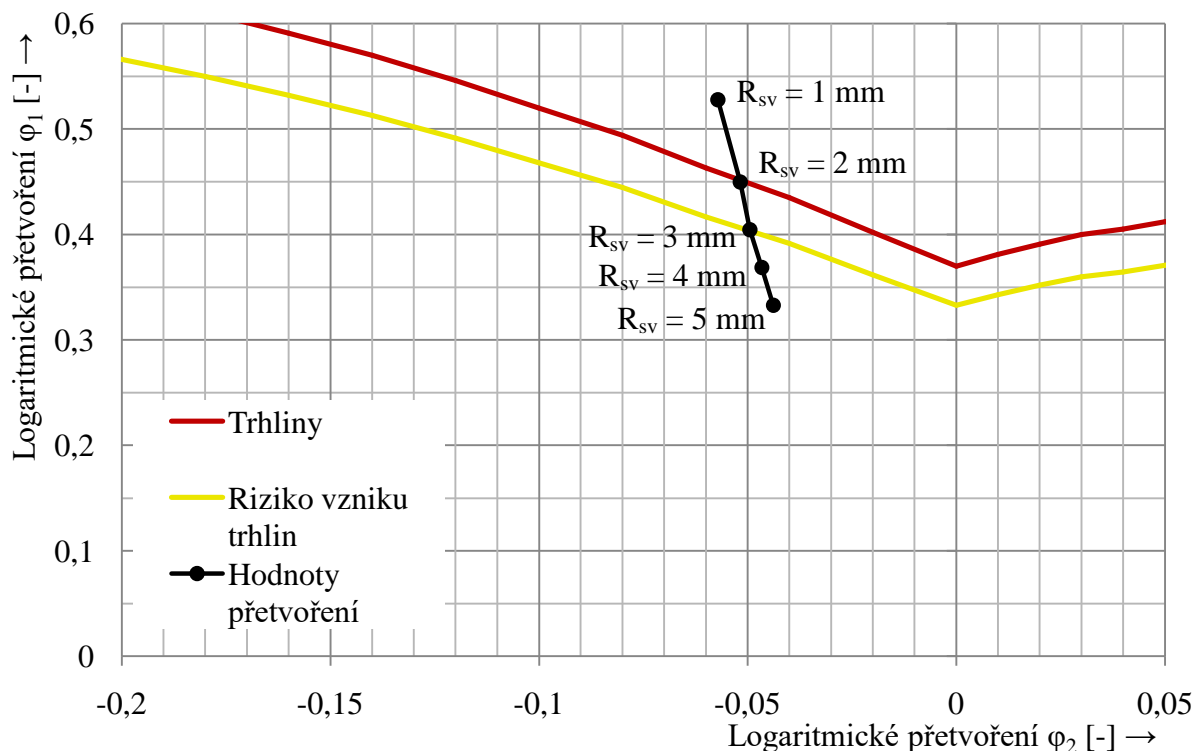


Obr. 130 3D graf závislosti $\left| \frac{\varphi_1}{\varphi_2} \right| - p - R_{sv}$ pro tloušťku plechu 0,478 mm struktury 90°



Obr. 131 Vrstevnicový graf $\left| \frac{\varphi_1}{\varphi_2} \right| - p - R_{sv}$ pro tloušťku plechu 0,478 mm struktury 90°

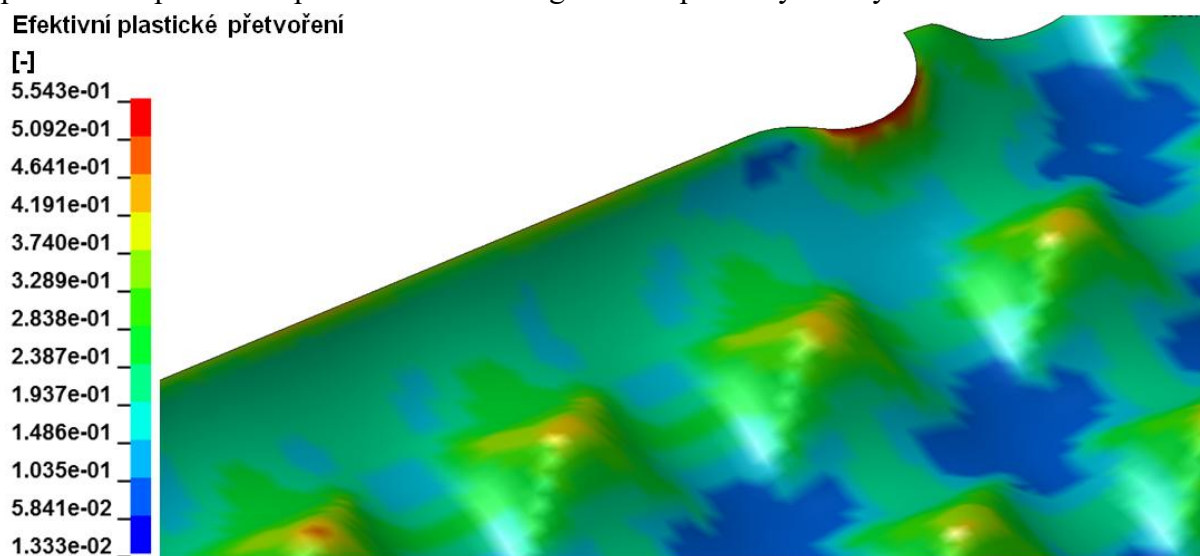
Bezpečná oblast i oblast defektů na obr. 131 byly, stejně jako v předešlém případě, určeny na základě analýzy deformačních stop udávajících historii zatěžování kritických míst v okolí svaru v průběhu hydroformování (viz příloha 9). Pro daný lisovací tlak 70 MPa lze z výše uvedených grafů určit závislost poloměru zaoblení na umístění bodů v diagramu mezní tvárnosti, jež je zobrazen obr. 132.



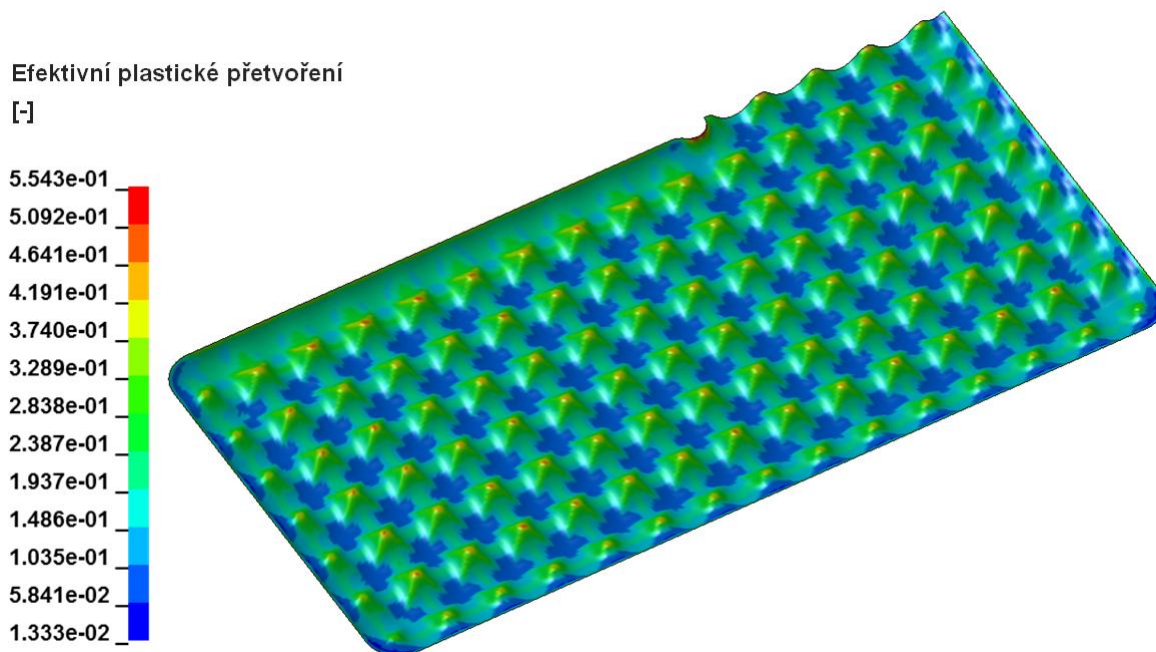
Obr. 132 Poloha bodů v FLD při $p = 70 \text{ MPa}$, tloušťky plechu 0,478 mm struktury 90°

Z výsledků vyplývá nejmenší přijatelný poloměr zaoblení $R_{sv} = 3$ mm. Daná hodnota zaoblení vyhovuje požadavkům lisovatelnosti, neboť simulace predikuje nepřesážení předělu mezi bezpečnou oblastí a oblastí rizika vzniku defektů – trhlin (v obr. 132 žlutě), který je z důvodu bezpečnosti v diagramu mezní tváritelnosti odsazen od křivky mezní tváritelnosti (červeně) o 10 %. Křivka mezní tváritelnosti byla zadána na základě provedených materiálových zkoušek, viz obr. 94 v kap. 6.2. Použití menší hodnoty zaoblení by již spadalo do přechodové oblasti, a tedy i existovalo riziko vzniku trhlin při lisování.

Rozložení efektivního plastického přetvoření v místě zakončení středového svaru pro uvedený poloměr zaoblení zobrazuje obr. 133. K posouzení rozložení efektivní hodnoty plastického přetvoření po celé simulované geometrii poloviny těla výlisku slouží obr. 134.

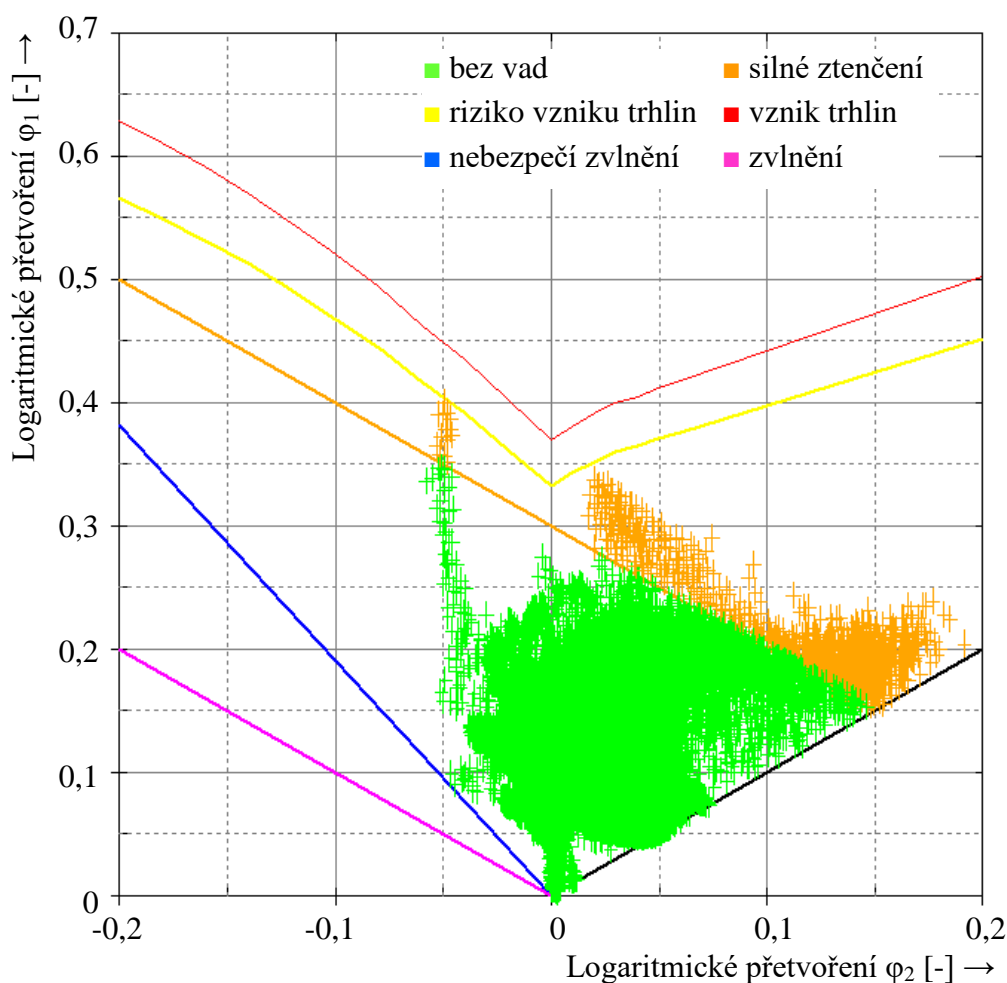


Obr. 133 Rozložení efektivní hodnoty plastického přetvoření v okolí svaru

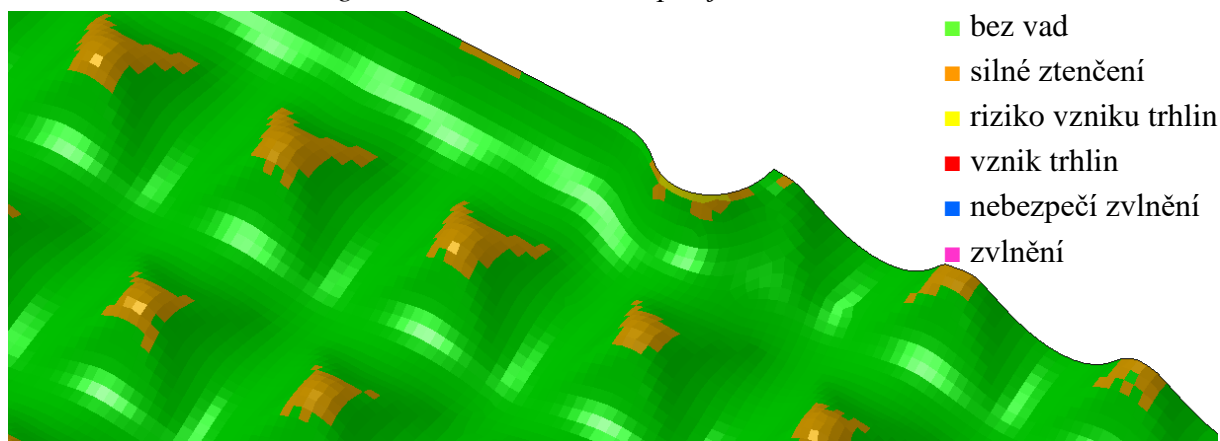


Obr. 134 Rozložení efektivní hodnoty plastického přetvoření

Riziko vzniku trhlin na vzorku bylo též testováno pro celkové řešení, a to globálně vynesením příslušných deformačních bodů do diagramu mezní tváritelnosti dle Keelera – Goodwina. Výsledky uvádí graf na obr. 135 v součinnosti s obr. 136, který barevně vyznačuje v diagramu řešené oblasti na těle výlisku. V diagramu mezní tváritelnosti je vyznačeno hned několik zkoumaných oblastí.



Obr. 135 Diagram mezní tvářitelnosti pro jehlanovitou strukturu 90°

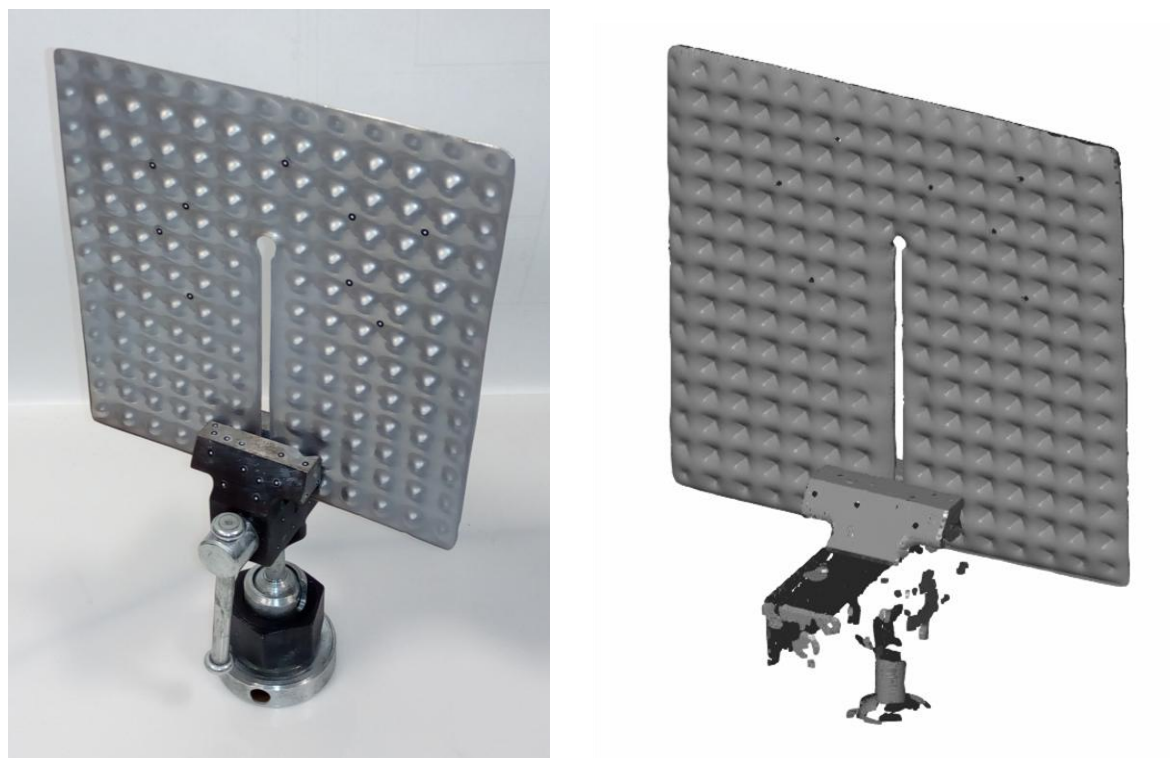


Obr. 136 Analýza lisovatelnosti pro jehlanovitou strukturu 90°

Předně je jasné, že během tvářecího procesu nedojde ke zvlnění materiálu, čemuž v diagramu odpovídá modrá a fialová barva oblastí predikujících zvlnění. Oblast rizika vzniku trhlin, v diagramu vyznačena žlutě, byla zkonstruována shodně s výše uvedeným jako 10% bezpečnostní odsazení od křivky mezní tvářitelnosti (červeně). V diagramu je též vymezena oblast silného ztenčení materiálu (oranžově), jež je určena hodnotou přípustného přetvoření – ztenčení 0,3.

Z diagramu je patrné, že dílec nebude vykazovat vady. Některé body diagramu sice leží v blízkosti oblasti rizika možného vzniku trhlin, ale vzhledem k šířce pásma i způsobu zjišťování mezní křivky, kdy bylo rovněž počítáno s jistou bezpečností, je možné riziko zanedbat.

Jako v případě ověřovací simulace, i zde bylo dále přikročeno ke srovnání hodnot ztenčení materiálu, které byly zjištěny numerickou simulací a experimentální cestou za pomoci digitálního třmenového mikrometru Mitutoyo s hrotovými doteky a systému ATOS Triple Scan 8M. Obr. 137 uvádí skenovanou geometrii vzorku.

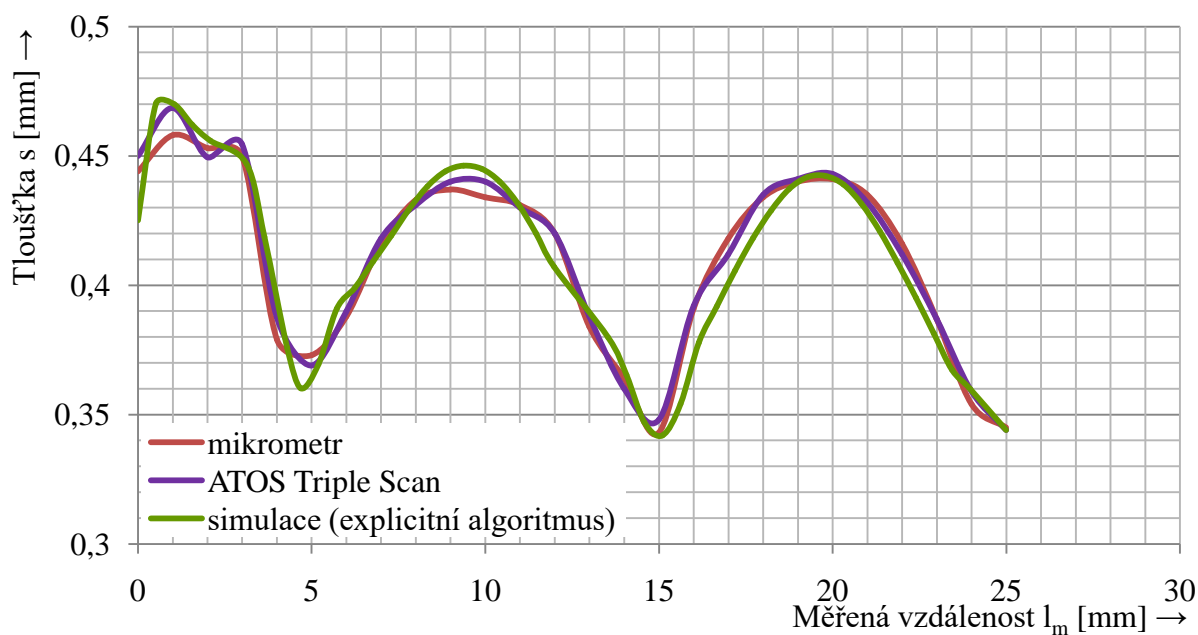


a) skenovaný vzorek

b) naskenovaný model

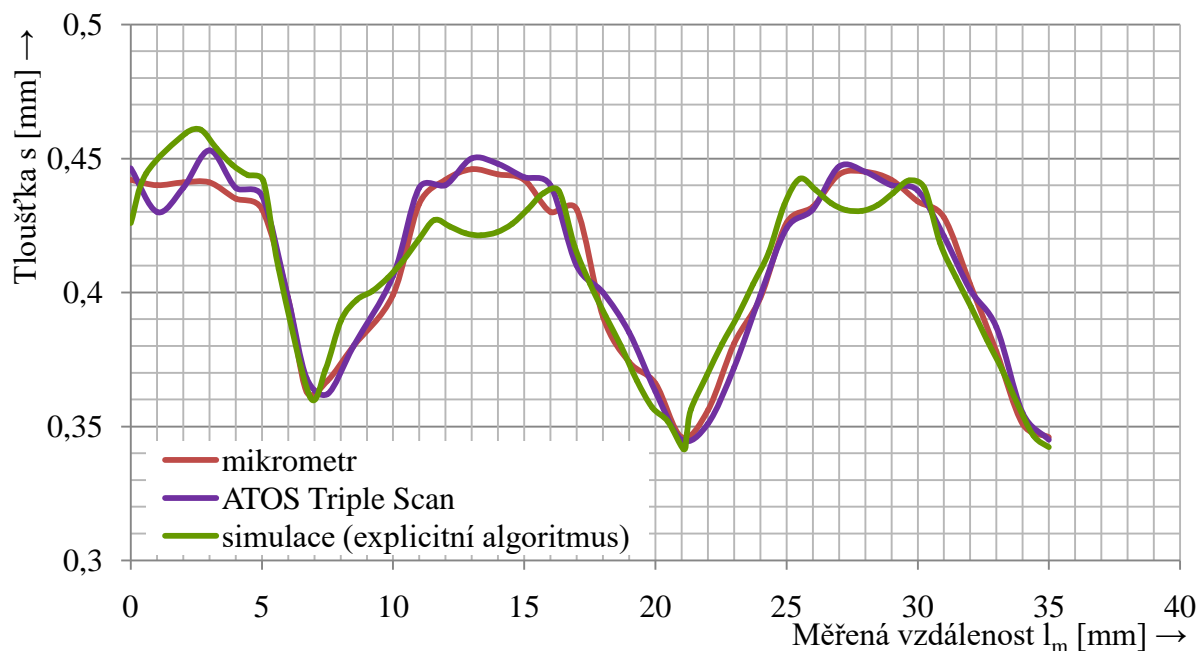
Obr. 137 Skenovaná součást systémem ATOS Triple Scan

V grafech na obr. 138 a obr. 139 jsou uvedeny výsledné křivky změny tloušťky hydroformovaného materiálu, a to pro přímý a úhlopříčný směr měření, které respektuje výše uvedené schéma měření na obr. 114.



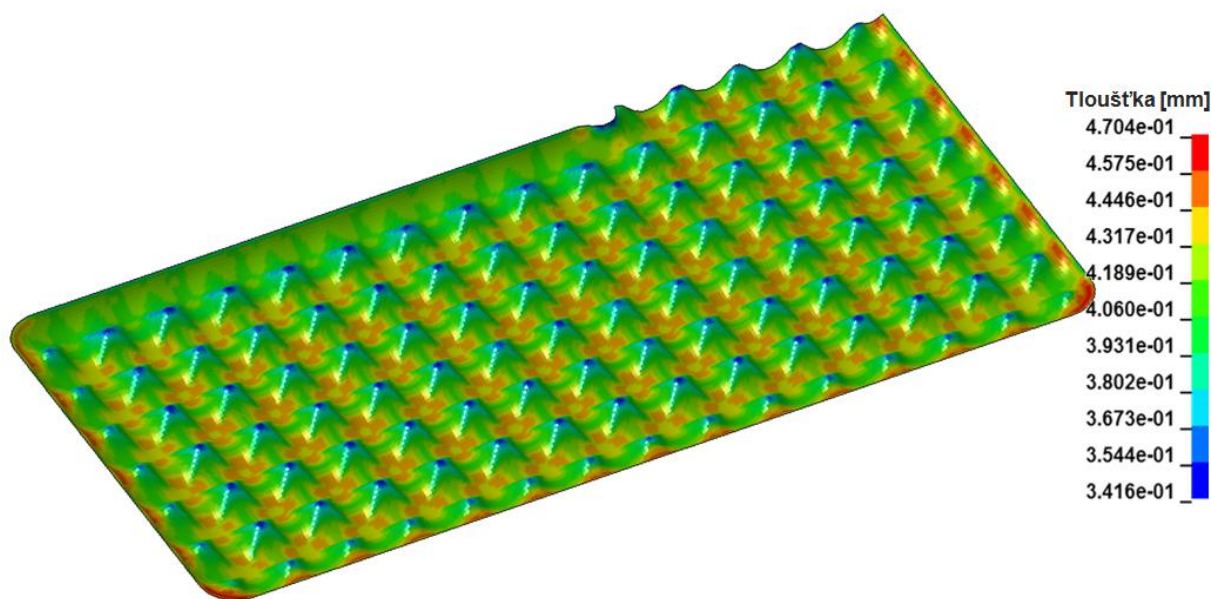
Obr. 138 Graf změn tloušťky prolisů – přímý směr

Pro vyšší lisovací tlak 70 MPa je oproti ověřovací simulaci dosaženo většího ztenčení, tj. minimální zjištěné tloušťky cca 0,345 mm. Proměnlivost tloušťky výlisku se pohybuje v rozmezí (0,471 až 0,345) mm. Středový svar nemá na výsledné ztenčení v pozorovaných oblastech vliv. V obou grafech lze pozorovat dobrou míru shody mezi naměřenými hodnotami, ať už systémem ATOS či mikrometricky, a numerickou simulací v softwaru ANSYS LS-DYNA. Největší odchylky se opět vyskytují u úhlopříčného směru měření v oblasti volně se vypínajícího materiálu, tedy v měřené vzdálenosti cca 14 mm a 27 mm. Zde lze pozorovat největší odchylky cca 5,9 %, resp. 3,2 %. Dále v oblasti vrcholu prvního prolisu (měřená vzdálenost 5 mm) lze pozorovat významnou odchylku, konkrétně 2,4 %.



Obr. 139 Graf změn tloušťky prolisů – úhlopříčný směr

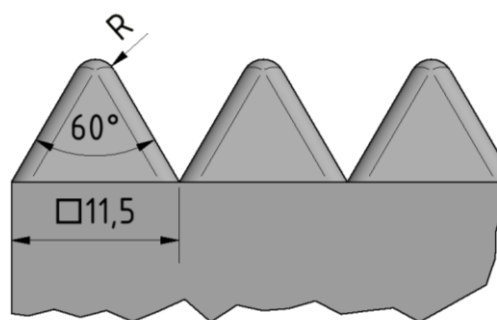
Celkovou představu o ztenčení hydroformovaného dílce, resp. o jeho konečné tloušťce, dává obr. 140.



Obr. 140 Konečná tloušťka výlisku

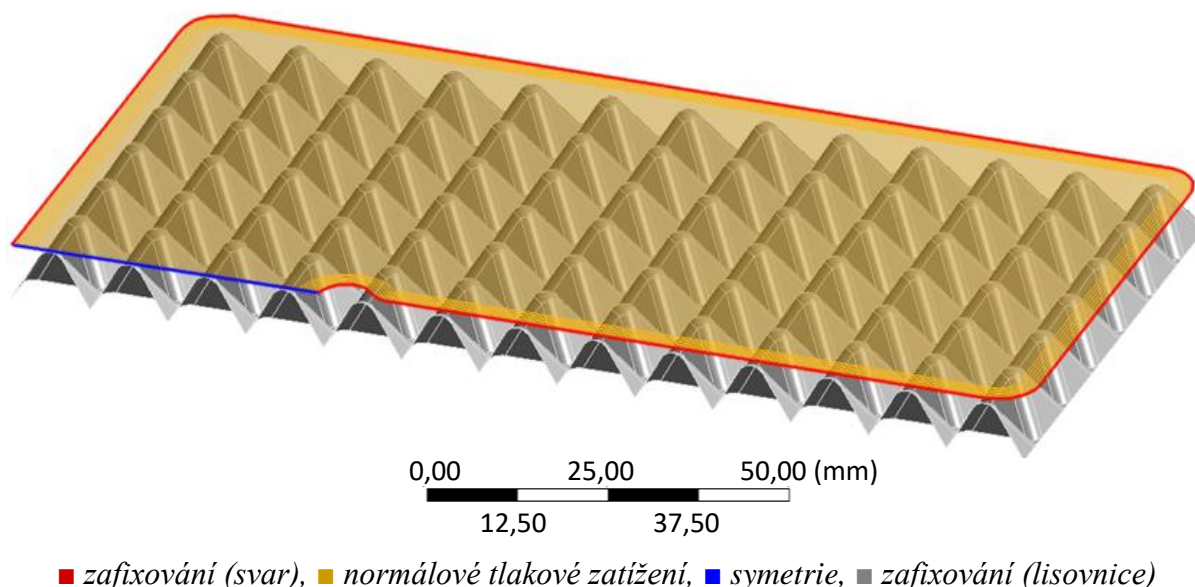
6.4.3 Analýza vyrobitelnosti povrchu s vrcholovým úhlem 60°

Z hlediska možného zvýšení absorpčních vlastností uvažovaného solárního absorbéru se strukturovaným povrchem lze uvažovat též druhou variantu zmíněného strukturovaného povrchu, tedy jehlanovitou strukturu o vrcholovém úhlu jehlanů 60°. V tomto případě je výroba obtížnější, neboť jsou elementy lisovnice oproti 90° variantě strmější a tudíž obtížněji lisovatelné. Základní rozměry lisovnice jsou uvedeny na obr. 141. Oproti elementům s vrcholovým úhlem 90° je sice základna každého jehlanu větší, ale vrcholový úhel 60° vyžaduje vyšší elementy. Proto je nezbytné určit bezpečnou hodnotu zaoblení hran jehlanů, pro kterou bude dílec vyrobitelný.



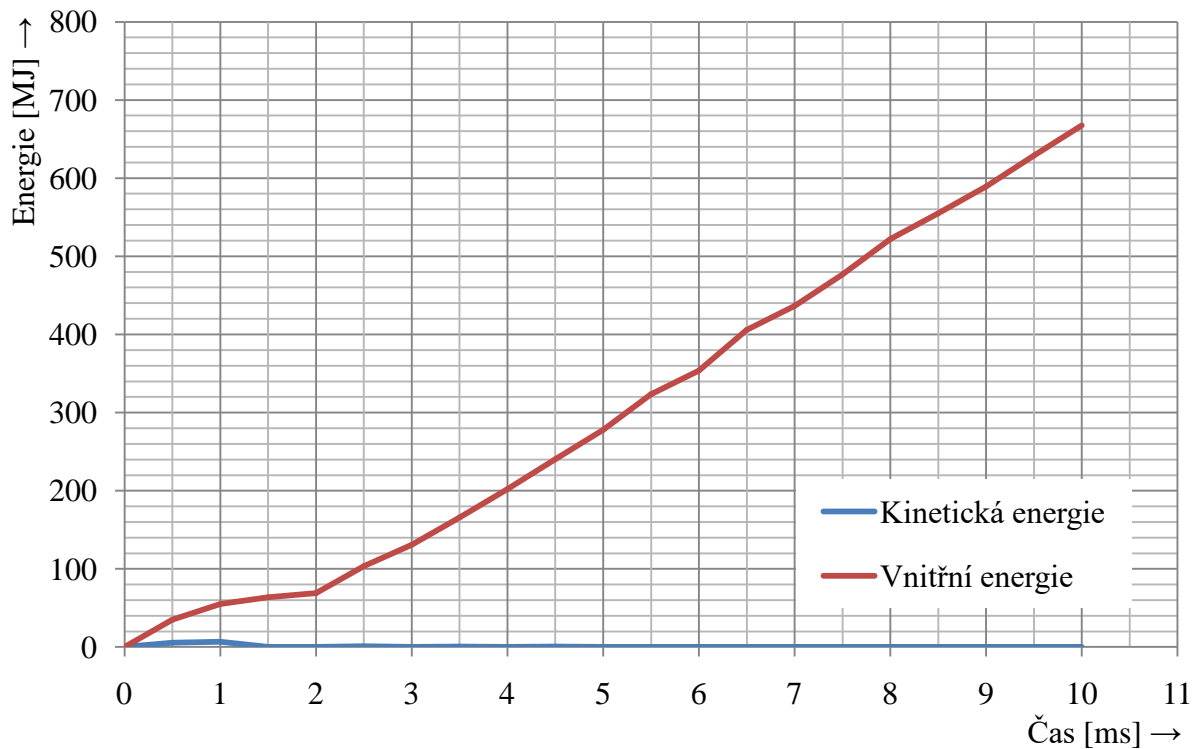
Obr. 141 Rozměry lisovnice

K analýze vyrobitelnosti strukturovaného povrchu s vrcholovým úhlem 60° byl opět použit software ANSYS LS-DYNA zohledňující geometrický model z obr. 142. Jako v předchozí úloze, i zde byla geometrie popsána čtyřhranovými čtyřúhelníkovými skořepinovými prvky s délkou hrany 0,25 mm. Materiálový model byl zadán shodně s předchozím. Pro vyhodnocení závislosti mezi poloměrem zaoblení lisovnice, lisovacím tlakem a hloubky prolisů bylo předepsáno normálové tlakové zatížení simulující tlak kapaliny na lisovaný povrch, a to v rozsahu 0 až 100 MPa.



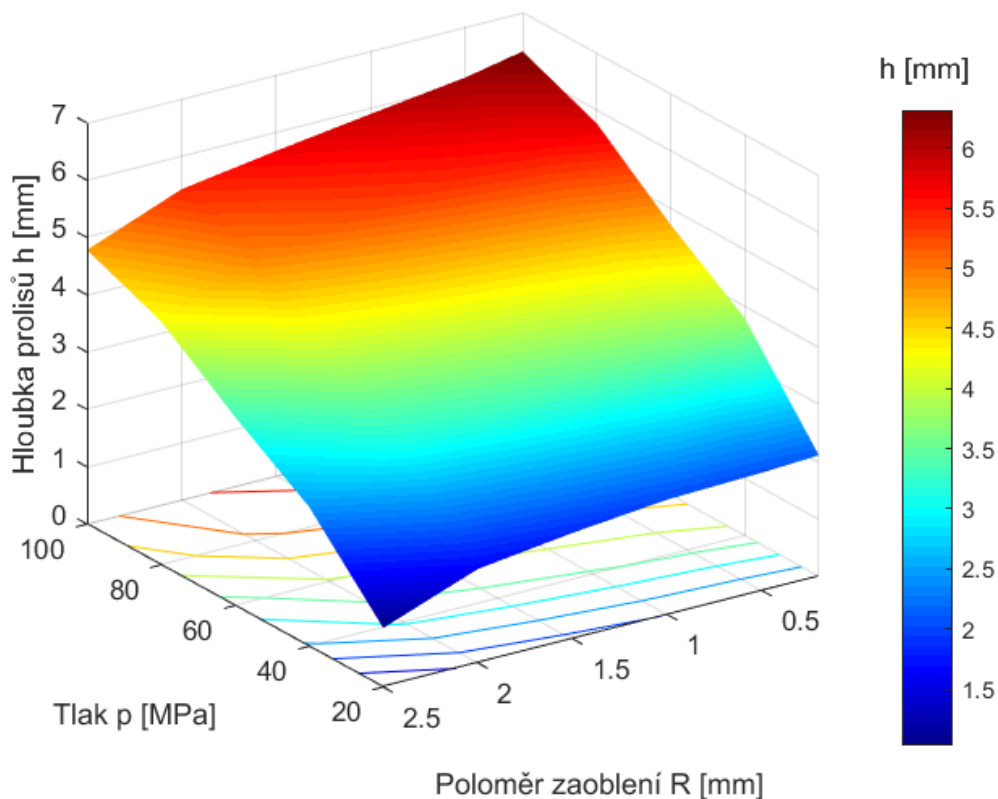
Obr. 142 Geometrický model sestavy

Nejprve byl analyzován polotovár o jmenovité tloušťce 0,5 mm, resp. skutečné tloušťce 0,478 mm, jež byla zjištěna mikrometrickým měřením. Pro tento případ byly provedeny příslušné výpočty MKP. Ověření statického charakteru úlohy pro případ zaoblení hran lisovnice 2 mm a zadaný čas tvářecího procesu 10 ms uvádí graf na obr. 143. Kinetická energie úlohy je vůči vnitřní energii zanedbatelná a je tedy zřejmé, že z hlediska kvazistatického charakteru úlohy je výpočet v pořádku.

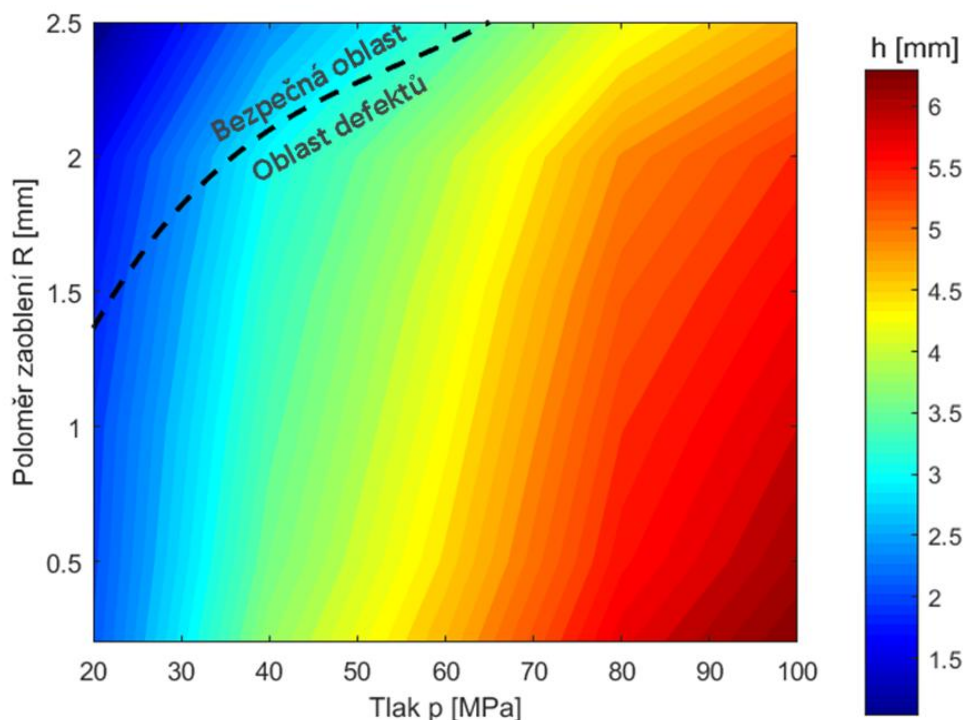


Obr. 143 Závislost kinetické a vnitřní energie na čase

Primárním výsledkem simulací MKP byla konstrukce závislosti mezi hloubkou prolisů h , poloměrem zaoblení lisovnice R a hydroformovacím tlakem p . Grafické vyjádření zmíněné závislosti je znázorněno na obr. 144 a obr. 145.



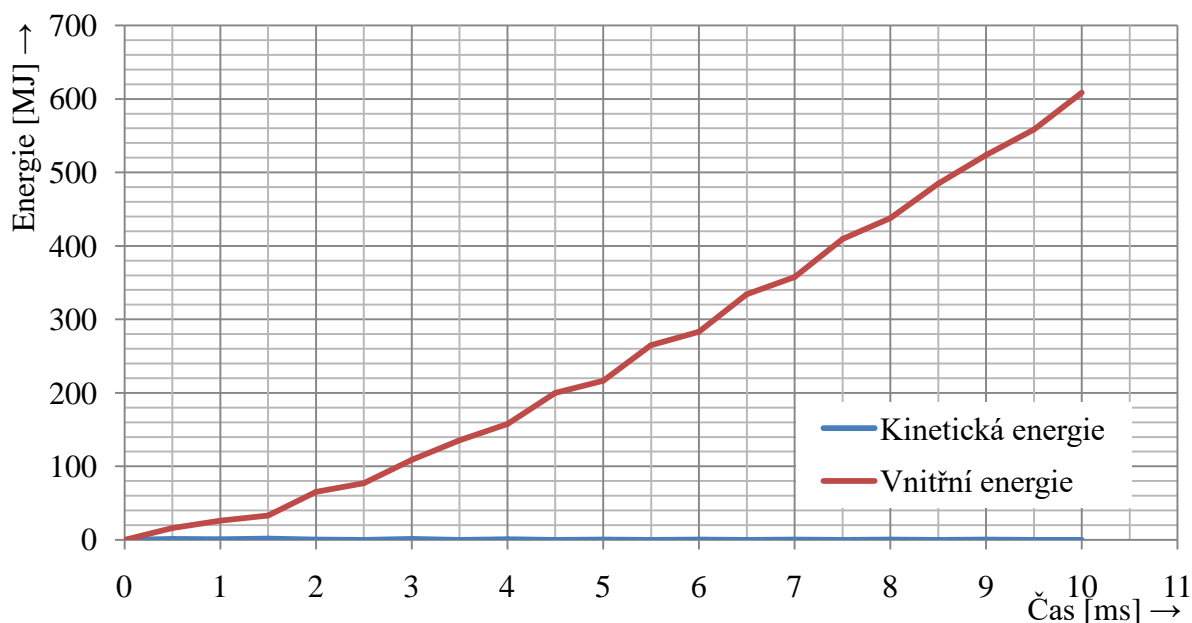
Obr. 144 3D graf závislosti $h - p - R$ pro tloušťku 0,478 mm a vrcholový úhel 60°



Obr. 145 Vrstevnicový graf závislosti $h - p - R$ pro tloušťku 0,478 mm a vrcholový úhel 60°

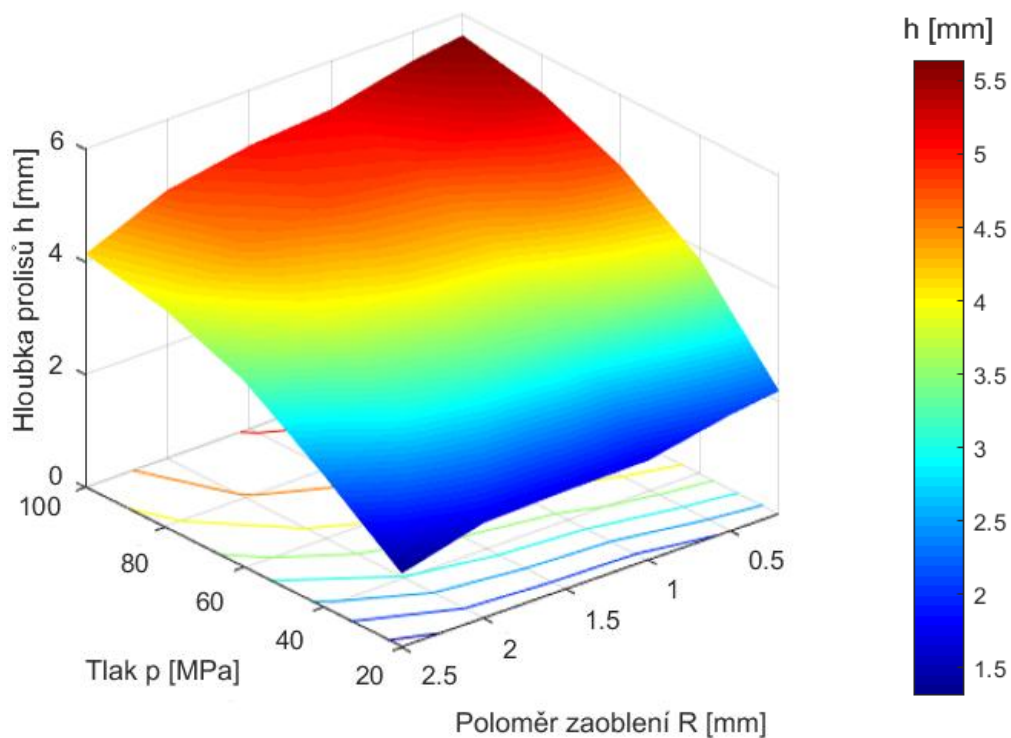
Po stanovení limitů na základě limitního přetvoření a diagramu mezní tvárnosti (černá přerušovaná křivka v grafu na obr. 145) je jasné, že použití výchozího materiálu o tloušťce 0,478 mm je problematické. Maximální bezpečný tlak cca 64 MPa při zaoblení lisovnice 2,5 mm nedovoluje vyhlisování struktury do potřebné hloubky. Maximální možná bezpečná hloubka prolisů byla zjištěna $h = 3,4$ mm, při čemž požadovaná hloubka činí alespoň 3,5 mm. Při zmíněném zaoblení lisovnice by dále vyhlisovaný dílec nedisponoval dostatečně ostrými přechody ve své struktuře.

Z tohoto důvodu je nutné zaměřit se na větší tloušťku výchozího materiálu. V dalším je proto analyzován polotovár – plech o počáteční jmenovité tloušťce 0,8 mm. Skutečná tloušťka plechu vzorku zjištěná mikrometricky činí 0,787 mm. Výpočet pro tuto variantu byl proveden shodně s předchozím, jen s tím rozdílem, že byla skořepinovým prvkům polotovaru přiřazena jiná tloušťka. Vývoj kinetické a vnitřní úlohy je zobrazen na obr. 146.

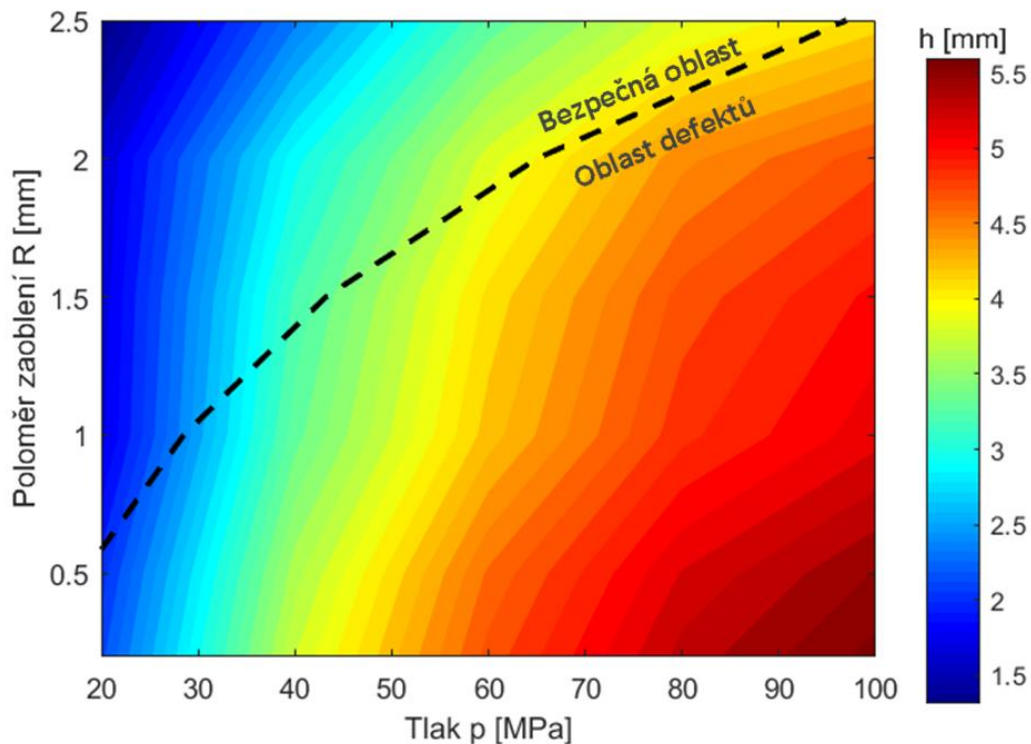


Obr. 146 Závislost kinetické a vnitřní energie na čase

Pokud je i v tomto případě sestrojena závislost hloubka prolisů – poloměr zaoblění lisovnice – hydroformovací tlak, potom lze konstatovat, že zvýšení tloušťky materiálu o 0,3 mm znamená významný posun v možnostech lisovatelnosti potřebného strukturovaného povrchu, jak ukazují grafy na obr. 147 a obr. 148.



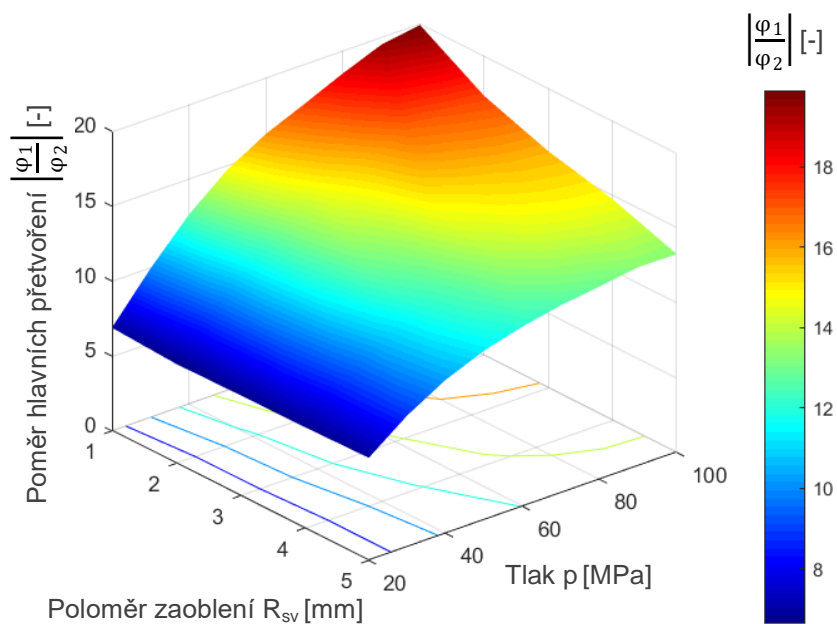
Obr. 147 3D graf závislosti $h - p - R$ pro tloušťku 0,787 mm a vrcholový úhel 60°



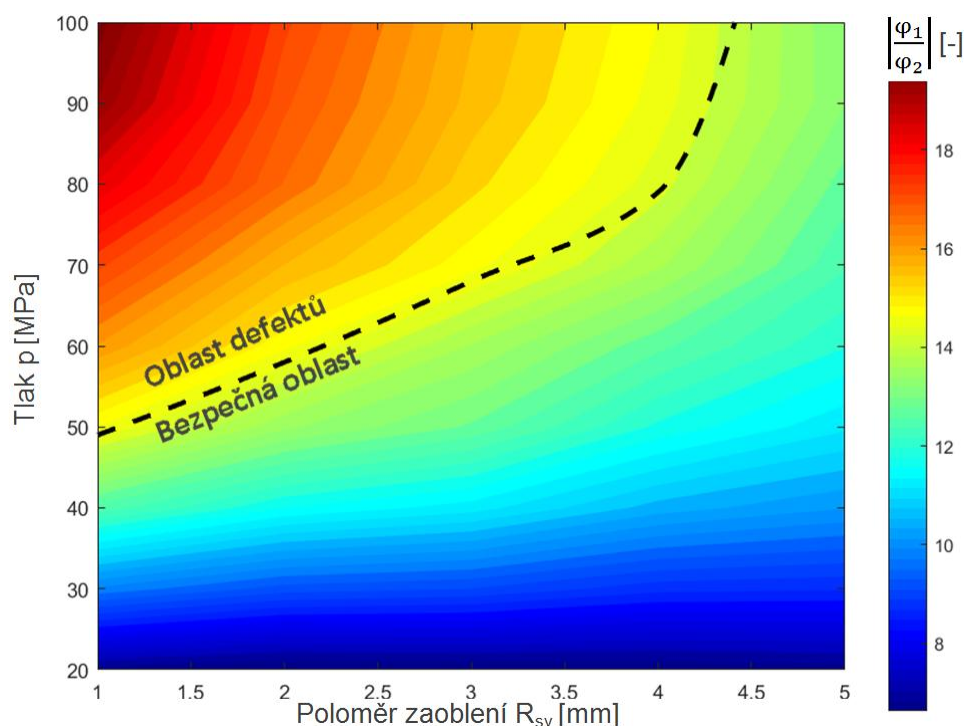
Obr. 148 Vrstevnicový graf závislosti $h - p - R$ pro tloušťku 0,787 mm a vrcholový úhel 60°

Z grafů je zřejmé, že se bezpečná oblast významně rozšířila a lze tak pro dosažení potřebného tvaru obecně využít vyšších tlaků s nižší hodnotou zaoblení lisovnice. Jako přijatelná kombinace se jeví lisovací tlak 65 MPa a zaoblení lisovnice 2 mm.

Zmíněná kombinace vede k vylisování struktury do hloubky cca 4,2 mm. Z hlediska středového svaru testovaného vzorku a stanovení minimálního bezpečného poloměru jeho „kapkovitého“ zakončení, viz schéma na obr. 129, je pro výše zmíněný lisovací tlak 65 MPa situace obdobná, jako v případě 90° matrice. Nutno ovšem konstatovat, že je v tomto případě dosahováno vyššího poměru mezi hlavními přetvořeními φ_1 a φ_2 . Konkrétní výsledky uvádějí grafy na obr. 149 a obr. 150. Podrobnější výstupy uvádí příloha 8.

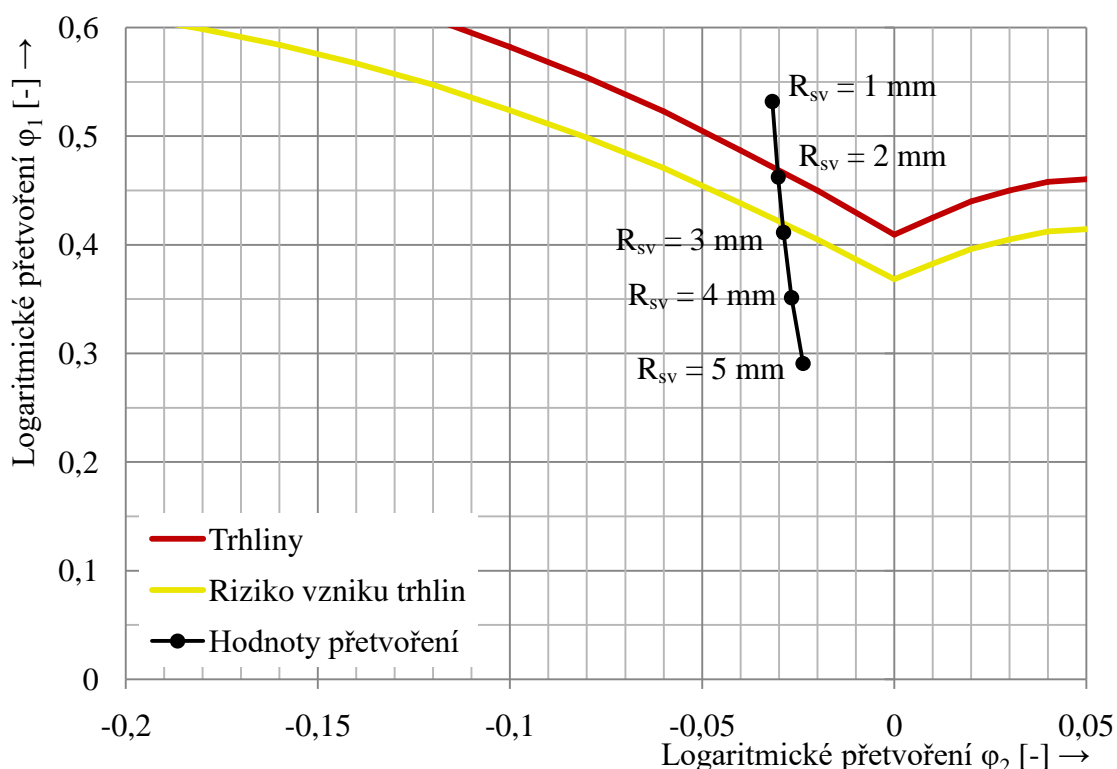


Obr. 149 3D graf závislosti $\left| \frac{\varphi_1}{\varphi_2} \right| - p - R_{sv}$ pro tloušťku plechu 0,787 mm struktury 60°



Obr. 150 Vrstevnicový graf $\left| \frac{\varphi_1}{\varphi_2} \right| - p - R_{sv}$ pro tloušťku plechu 0,787 mm struktury 60°

Pro zvolený lisovací tlak 65 MPa byla dále určena závislost poloměru zaoblění na umístění bodů v diagramu mezní tvářítnosti, která je zobrazena na obr. 151. V grafu lze pozorovat téměř lineární posuv deformačních bodů při měnícím se poloměru zaoblění zakončení svaru R_{sv} .

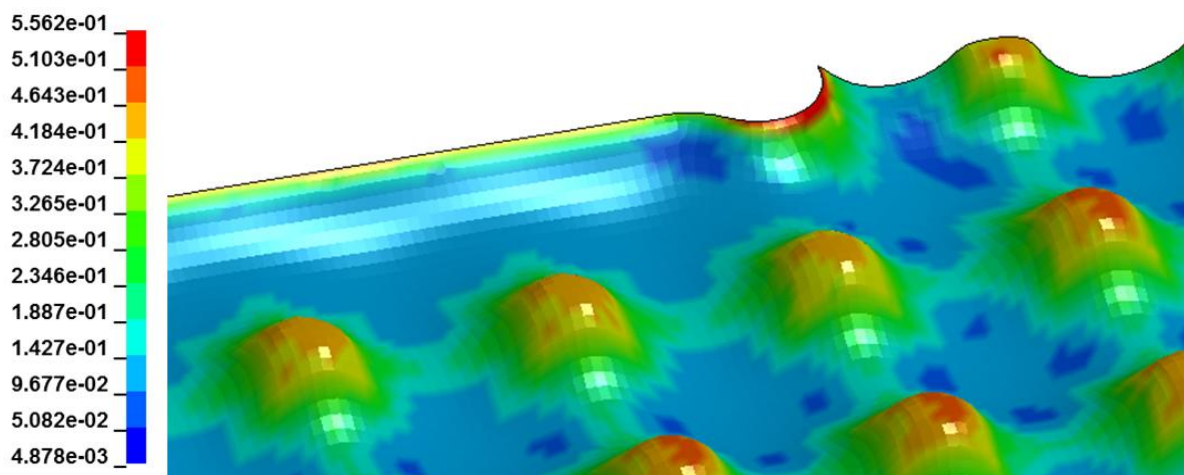


Obr. 151 Poloha bodů v FLD při $p = 65\text{MPa}$, tloušťky plechu $0,787\text{ mm}$ struktury 60°

Z výsledků, stejně jako v případě 90° matrice, vyplynula nejmenší přijatelná hodnota poloměru zaoblění $R_{sv} = 3\text{ mm}$, kdy simulace predikovala deformační stav pro daný poloměr zaoblění v oblasti bezprostředně navazující na pásmo kritických přetvoření, tj. pásmo rizika vzniku defektů. Rozložení plastického přetvoření v místě zakončení středového svaru pro poloměr zaoblění 3 mm, určené numerickou simulací, zobrazuje obr. 152. Z něj je jasně patrné, že k největším deformacím dochází především v místě svaru a dále na vrcholcích jehlanovitých elementů. K posouzení rozložení efektivní hodnoty plastického přetvoření na celém simulovaném modelu slouží obr. 153.

Efektivní plastické přetvoření

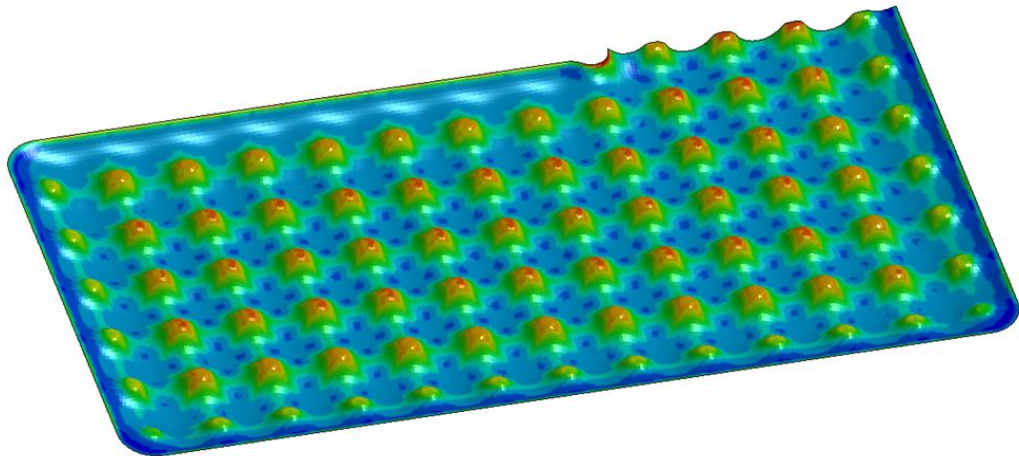
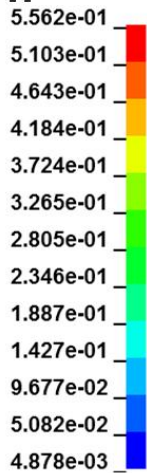
[-]



Obr. 152 Rozložení efektivní hodnoty plastického přetvoření v okolí svaru

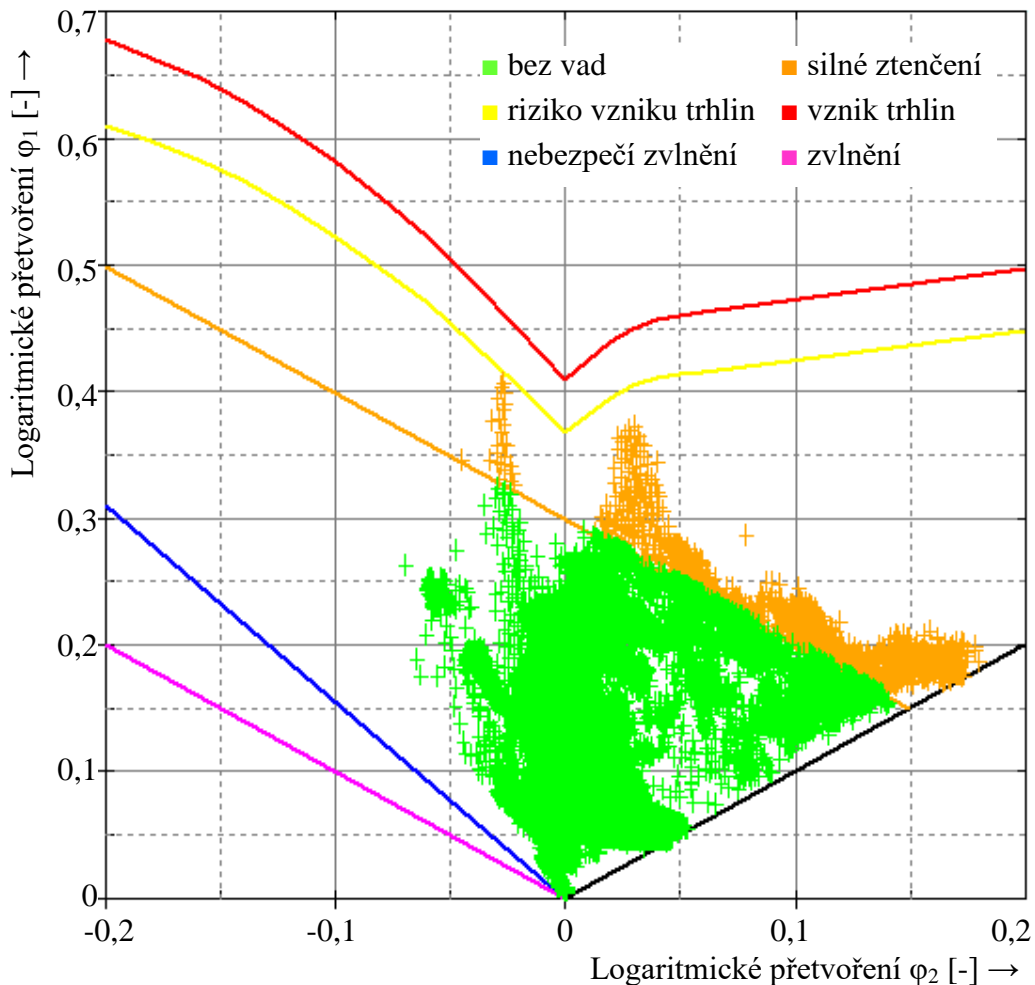
Efektivní plastické přetvoření

[-]



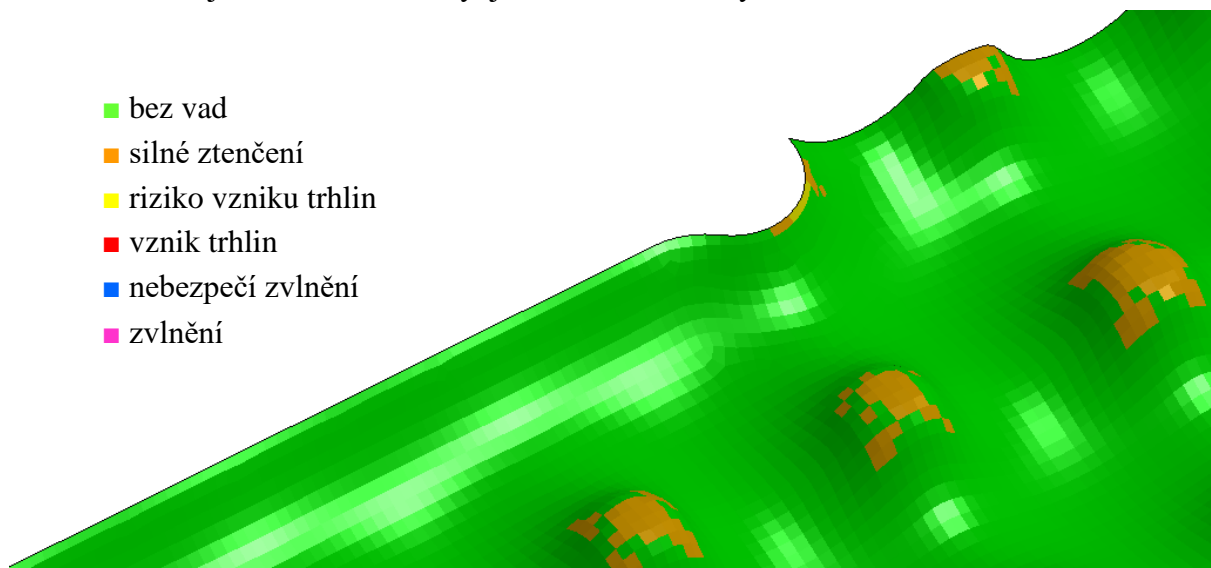
Obr. 153 Rozložení efektivní hodnoty plastického přetvoření

Přihlédne-li se též ke globální analýze tvářitelnosti dílce dle diagramu mezní tvářitelnosti, který je uveden na obr. 154, potom je zřejmé, že žádná oblast výlisku neleží v oblasti vymezující riziko vzniku defektů – trhlin, natož v oblasti výskytu defektů, tj. nad křivkou mezní tvářitelnosti. Jako nejproblematictější se z diagramu jeví oblasti středového svaru výlisku a vrcholků jehlanovité struktury, které se hodnotami přetvoření φ_1 a φ_2 nejvíce blíží riziku vzniku trhlin.



Obr. 154 Diagram mezní tvářitelnosti pro jehlanovitou strukturu 60°

Dané oblasti, jež byly určeny na základě diagramu mezní tvářítnosti, na výlisku vymezuje obr. 155. Obrázek v podstatě potvrzuje identifikaci problematických míst dílce z předchozí analýzy, tedy přechodu svar – tvářený materiál v místě zakončení středového svaru a vrcholů jehlanovité struktury, jakožto míst se silným ztenčením.

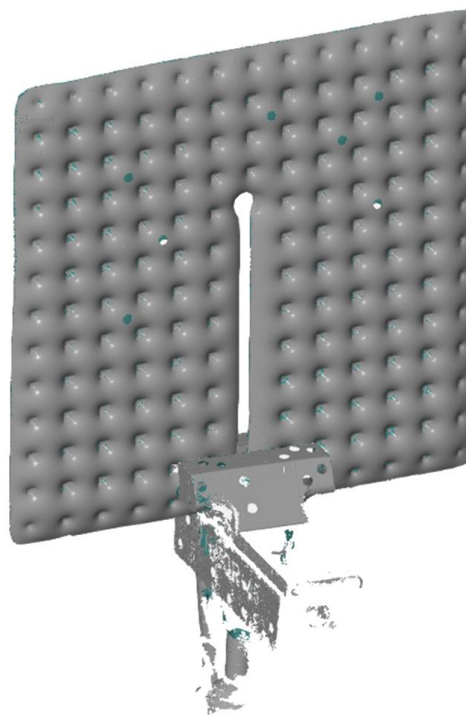


Obr. 155 Analýza lisovatelnosti pro jehlanovitou strukturu 60°

Pro ověření správnosti numerického výpočtu MKP byla, stejně jako v předchozím případě, vylisovaná struktura vzorku naskenována systémem ATOS Triple Scan 8M a rovněž proměřena mikrometricky třmenovým mikrometrem Mitutoyo s hrotovými doteky. Skenovaný dílec je uveden na obr. 156. Výsledky obou analýz byly následně konfrontovány s hodnotami tloušťky, zjištěnými numerickou simulací.



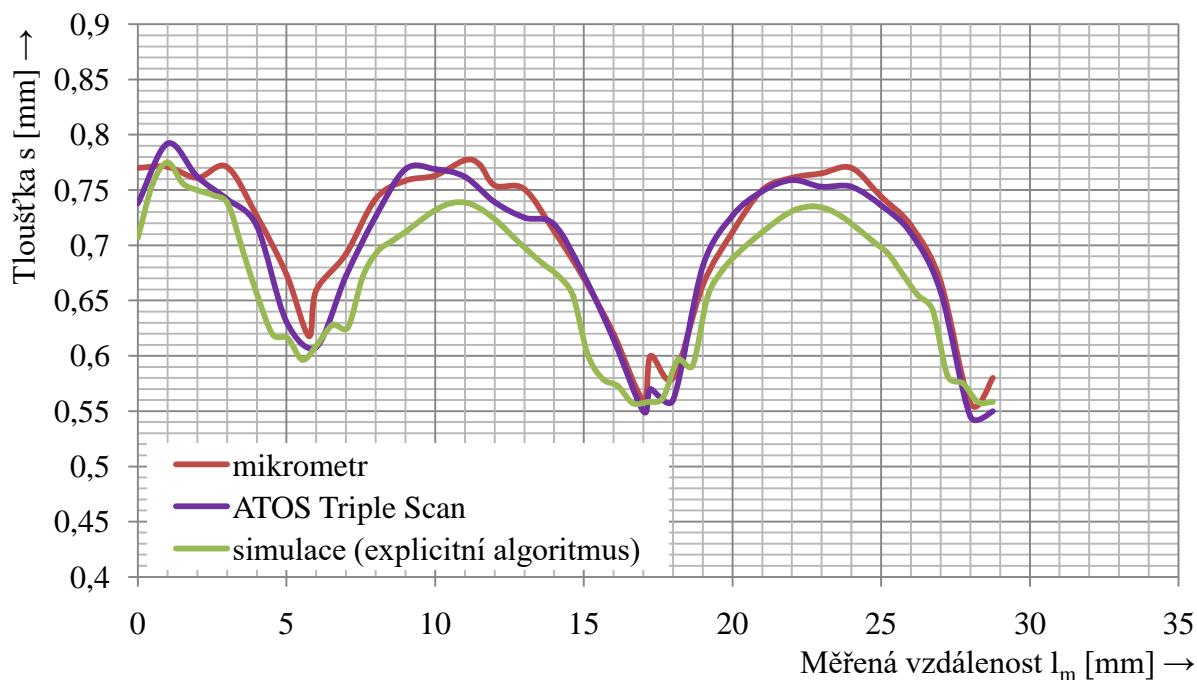
a) skenovaný vzorek



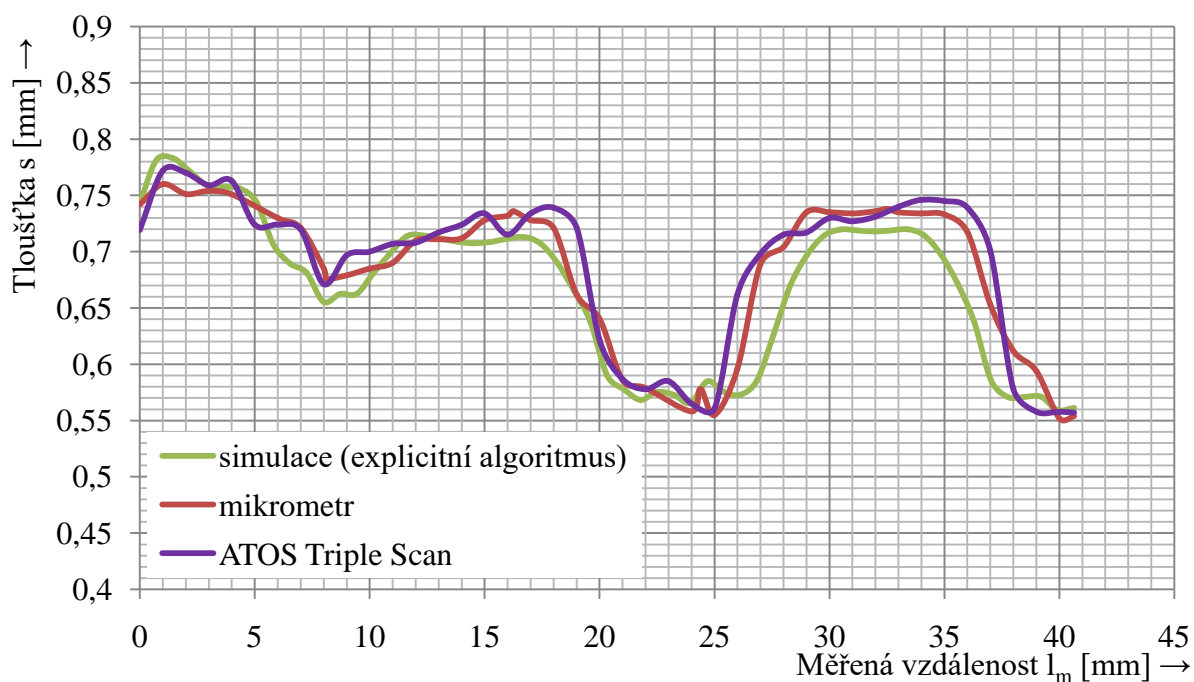
b) naskenovaný model

Obr. 156 Skenovaná součást systémem ATOS Triple Scan

Na obr. 157 a obr. 158 jsou vykresleny zjištěné křivky změny tloušťky hydroformovaného materiálu pro přímý a úhlopříčný směr měření. Schéma měření uvádí dříve zmíněný obr. 114.



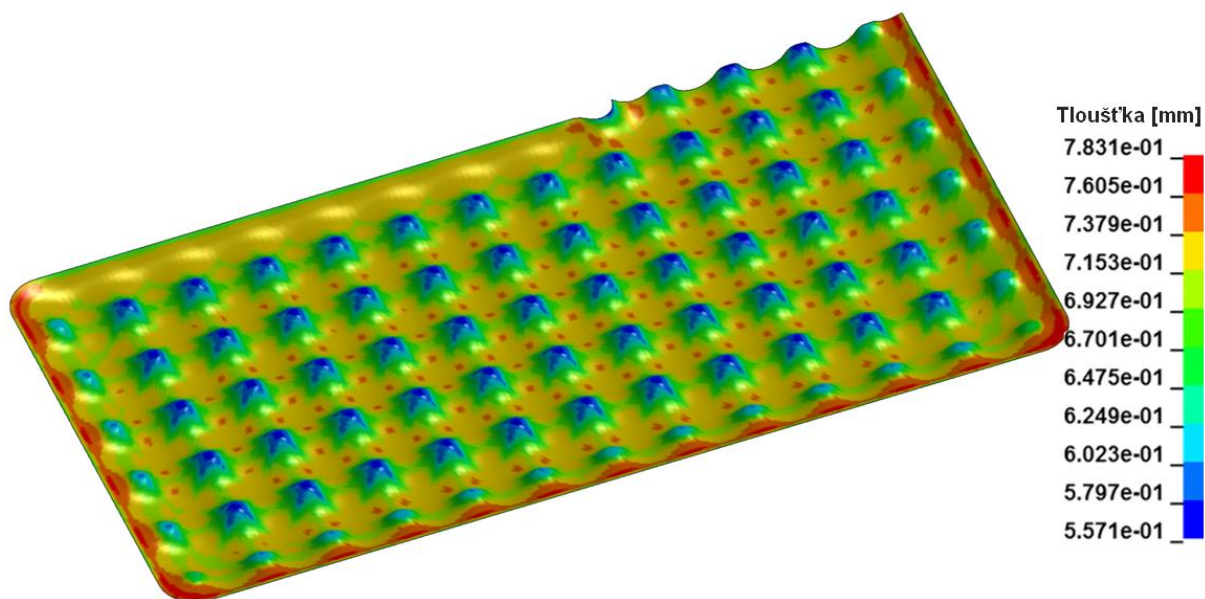
Obr. 157 Graf změn tloušťky prolisů – přímý směr



Obr. 158 Graf změn tloušťky prolisů – úhlopříčný směr

Jak je z grafů patrné, tloušťka výlisku se dle simulace pohybuje v rozmezí (0,783 až 0,557) mm. Oproti experimentálně zjištěným hodnotám udává numerické řešení celkově nižší hodnoty. Největší odchylky jsou zaznamenány v oblasti volně se vypínajícího materiálu, tedy v měřené vzdálenosti cca 10 mm a 22 mm pro přímý směr měření, resp. 17 mm a 34 mm pro úhlopříčný směr. Pokud jsou hodnoty zjištěné simulací MKP konfrontovány s údaji skeneru ATOS Triple Scan, lze pozorovat maximální odchylky 7,5 % pro přímý směr měření a 9,5 % pro směr úhlopříčný. V porovnání s mikrometrickým měřením se jedná o maximální odchylky v přímém směru 5,9 % a v úhlopříčném směru 8,9 %. Celkově je ovšem možné v grafech pozorovat dobrou shodu mezi naměřenými údaji a numerickou simulací.

Pro celkové posouzení konečné tloušťky materiálu hydroformovaného dílce je na obr. 159 zobrazen výstup numerické simulace, tj. tloušťka elementů sítě MKP po vylisování tlakem 65 MPa.



Obr. 159 Konečná tloušťka vylisku

7 ZÁVĚRY

Hlavním cílem dizertační práce bylo zaměřit se na možnosti technologie hydroformování a její aplikaci při výrobě strukturovaného povrchu solárního absorbéru nové generace. Konkrétně se jednalo o optimalizaci parametrů výroby, jako je optimální lisovací tlak, geometrie nástroje a tloušťka polotovaru – plechu. Byly navrženy celkem dvě varianty strukturovaného povrchu tvořeného jehlanovitými prolisy s vrcholovým úhlem 90° a ve druhé variantě 60° . Jako materiál pro výrobu absorbérů byla zvolena austenitická chromniklová korozivzdorná ocel X5CrNi18-10, která disponuje potřebnou tvářitelností, svařitelností i schopností odolat nepříznivým vlivům, kterým bude bez pochyby solární absorbér v provozních podmínkách vystavován.

Z provedené literární rešerše vyplynula jako nejvhodnější výrobní technologie metoda paralelního hydroformování dvojice laserem svařených plechů, které jsou vloženy do lisovacího nástroje a tlakem kapalinného média vylisovány do potřebného tvaru.

Stěžejním úkolem práce bylo stanovení optimálních parametrů výroby na základě provedené numerické simulační analýzy. Za tímto účelem byla provedena tvorba numerického modelu hydroformovacího procesu v prostředí na bázi metody konečných prvků softwaru ANSYS, resp. softwarů ANSYS Workbench (Mechanical) a ANSYS LS-DYNA.

Pro zjištění materiálových charakteristik byly dále provedeny potřebné materiálové testy, které posloužily nejen pro vyhodnocení lisovatelnosti užitého materiálu a zjištění jeho tvářecích limitů, ale rovněž jako vstupy numerické simulace MKP. Zkoušky byly zaměřeny především na stanovení křivky zpevnění daného materiálu, vlivu anizotropie a též stanovení křivek mezní tvářitelnosti. Pro tento účel byla vyvinuta metodika testování vzorků různých geometrií Erichsenovým testem, která umožnila zjištění křivek mezní tvářitelnosti v širším rozsahu, než jak umožňuje standardní Erichsenova zkouška hlubokotažnosti. Vyhodnocení křivek mezní tvářitelnosti bylo provedeno pro dvě tloušťky analyzovaného materiálu, tedy 0,5 mm a 0,8 mm. Hodnoty mezních přetvoření byly stanoveny mikroskopicky na základě analýzy přetvořené deformační sítě nanesené na povrchu vzorků elektrolytickým leptáním.

V rámci řešení dané práce byla rovněž provedena predikce ovlivnění lisované oblasti tvářeného materiálu v blízkosti svaru, a to prostřednictvím simulace svařování metodou konečných prvků v softwaru Sysweld. Byly tak, krom jiného, získány údaje o ovlivnění lisovaného materiálu v tepelně ovlivněné oblasti, jež byly následně použity pro zpřesnění materiálového modelu simulace lisování. Především se jednalo o zmapování navýšení meze kluzu materiálu v důsledku tepelného ovlivnění s následkem vzniku vnitřního napětí a přetvoření v okolí svaru, které zapříčiňuje zvýšení meze kluzu až o 125 MPa.

Za účelem ověření funkčnosti zvolené metody tváření a vyrobitelnosti výše zmíněného strukturovaného povrchu a taktéž i k ověření teoretických výstupů numerických simulací byl navržen a následně vyroben lisovací přípravek kazetového systému. S jeho použitím byly experimentálně zhotoveny povrchy s jehlanovitými elementy daných vrcholových úhlů na vzorcích o rozměrech 250×250 mm s velikostí lisované oblasti 150×150 mm, opatřených zjednodušenou variantou meandrovité struktury, tj. středovým svarem.

Pro určení optimální metody výpočtu MKP při analýze hydroformovacího procesu byla dále provedena ověřovací simulace, která porovnávala analýzu hydroformování vzorku o rozměrech 250×250 mm bez středového svaru s použitím implicitního a explicitního algoritmu řešení. Simulacemi predikované ztenčení výchozího materiálu bylo následně konfrontováno s experimentálně zjištěnými hodnotami ztenčení vzorku vylisovaného pomocí navrženého přípravku. Tloušťky stěn výlisku byly zjišťovány digitálním třmenovým mikrometrem s hrotovými doteky a 3D optickým bezkontaktním snímáním povrchu systémem ATOS Triple Scan 8M. Z provedeného rozboru vyplynulo jako nejvhodnější pro danou aplikaci užití explicitního algoritmu, který dosahoval přesnějších výsledků.

Zároveň srovnání teoretické simulace ztenčení materiálu s vylisovaným vzorkem prokázalo velice dobrou míru shody mezi teoreticky predikovanými a experimentálně zjištěnými hodnotami ztenčení materiálu, jejichž rozdíl nepřesáhl 9,5 %.

Provedením numerické simulace hydroformování strukturovaných povrchů s danými vrcholovými úhly jehlanů a středovým svarem výše zmíněnou metodou výpočtu vedlo především ke zjištění optimální závislosti mezi hloubkou prolisů, poloměrem zaoblění lisovnice a použitým hydroformovacím tlakem. Z hlediska středového svaru byl dále optimalizován poloměr zaoblění jeho „kapkovitého“ zakončení.

Pro strukturovaný povrch s vrcholovým úhlem jehlanů 90° a výchozí tloušťkou materiálu 0,478 mm (jmenovitá tloušťka 0,5 mm) byly zjištěny následující dovolené hodnoty: poloměr zaoblění matrice $R = 1$ mm, poloměr zaoblění zakončení středového svaru $R_{sv} = 3$ mm, a to při lisovacím tlaku $p = 70$ MPa. Při takto nastavených parametrech dosahuje maximální hloubka prolisů hodnoty 3,7 mm s maximálním ztenčením plechu 28 %, čemuž odpovídá minimální tloušťka 0,345 mm.

Pro jehlanovitý povrch o vrcholovém úhlu 60° byly testovány dvě tloušťky výchozího materiálu. Při použití plechu tloušťky 0,478 mm (jmenovitá tloušťka 0,5 mm) nedovolují simulací zjištěné bezpečné parametry ($R = 2,5$ mm a $p = 64$ MPa) vylisování struktury do potřebné hloubky alespoň 3,5 mm. Maximální možná bezpečná hloubka prolisů byla v tomto případě simulací stanovena na 3,4 mm. Proto bylo v dalším přikročeno k analýze hydroformování se jmenovitou tloušťkou výchozího materiálu 0,8 mm (reálná zjištěná tloušťka 0,787 mm). Pro danou reálnou tloušťku plechu byly simulací stanoveny optimální hodnoty hydroformovacího procesu, jako: $R = 2$ mm, $R_{sv} = 3$ mm a $p = 65$ MPa. Uvedené parametry vedou k vylisování jehlanovité struktury až do hloubky 4,2 mm, při maximálním ztenčení materiálu 29,2 %, tj. minimální tloušťka výlisku 0,557 mm.

Lze tedy konstatovat, že provedenými optimalizačními analýzami systémem MKP byly prokázány možnosti vylisování potřebných strukturovaných povrchů s jehlanovitými elementy. Tento fakt byl pro oba výše uvedené typy strukturovaných povrchů ověřen lisováním vzorků dle navržených parametrů v navrženém lisovacím přípravku. Práce tak přinesla nové poznatky v oblasti hydroformování prostorově komplikovaných výlisků a jejich optimalizace s použitím numerické simulace. V rámci řešení dizertační práce byly analyzovány unikátní tvary strukturovaných povrchů, jejichž výroba dosud nebyla daným systémem řešena. Získané výsledky tak lze hodnotit za přínosné nejen pro teoretickou oblast výzkumu ale i pro praxi.

Z hlediska uplatnění výsledků předkládané dizertační práce a perspektiv dalších prací je nutné zmínit, že výzkum lisování prostorových struktur pokračuje vývojem a výrobou výsledné koncepce solárního absorbéru se strukturovaným povrchem, a to segmentovým řešením, kdy se absorbér skládá z více segmentů opatřených přímo protékajícími meandrovitými částmi, jež jsou vzájemně propojeny. V zásadě tak lze vytvořit libovolně velkou absorpční plochu. Modely zmíněného řešení jsou uvedeny v příloze 10. V navazujícím výzkumu bude též zkoumáno uplatnění strukturovaných povrchů při výrobě sendvičových panelů či částí karoserií zvyšujících jejich celkovou tuhost.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [89]

1. Hydroforming Irregular Parts. *Custom Spun Metal Forming & Fabrication Services: Helander* [online]. 2016 [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://www.helandermetal.com/hydroforming-services>
2. Hydroforming. *Hello* [online]. 2016 [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://peinseint.blogspot.cz/2011/09/hydroforming.html>
3. Pillow Hydroforming. *Hydroforming Design Light* [online]. 2013 [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://www.designlight.se/en/platformning/pillow-hydroforming/>
4. Precision Hydroforming Services. *Metal Spinning & Hydroforming Services* [online]. 2013 [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://www.metalspun.com/hydroforming.html>
5. Sheet Hydroforming. *Amino North America Corporation* [online]. 2016 [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://aminonac.ca/sheet-hydroforming-vehicles.asp>
6. ŘIHÁČEK, Jan. *Systém pro měření tepelné účinnosti solárních absorberů*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
7. MRŇA, Libor, Jan ŘIHÁČEK, Zdeněk LIDMILA, Kamil PODANÝ a Jaroslav KUBÍČEK. 19. Solární absorber se strukturovaným povrchem - možná cesta ke zvýšení účinnosti. In: *Alternativní zdroje energie 2014: sborník přednášek z konference*. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2014, s. 119-128. ISBN 978-80-02-02546-7.
8. MATUŠKA, Tomáš. *Solární zařízení v příkladech*. 1. vyd. Praha: Grada, 2013. Stavitel. ISBN 978-80-247-3525-2.
9. MRŇA, Libor. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *TA04020456, Vývoj nových typů solárních absorberů: odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2016*. Brno, 2017.
10. ČSN 10088-1. *Korozivzdorné oceli: přehled korozivzdorných ocelí*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
11. HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*, 1, vyd, Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave v Nakladateľstve STU, 2009, 492 s. ISBN 978-80-227-3167-6
12. INGH, Harjinder. *Fundamentals of hydroforming*. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, 2003. ISBN 08-726-3662-3.
13. *Korozivzdorné oceli: vlastnosti* [online]. Lucembursko: Euro Inox, 2002 [cit. 2016-02-05]. ISBN 2-87997-082-2. Dostupné z: http://www.euro-inox.org/pdf/map/StainlessSteelProperties_CZ.pdf
14. Nerezová ocel: praktická příručka. *ASTRAPOOL* [online]. 2012 [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: www.astralpool.cz/podpora/Abynereznekorodovala.pdf
15. PODANÝ, Kamil, Zdeněk LIDMILA a Bronislav RUDOLF. *Výroba povrchově strukturovaného solárního absorberu nepevným nástrojem*. Kovárenství. Brno: Svaz kováren ČR, 2012, č. 44, s. 4. ISSN 1213-9289.
16. Použití korozivzdorných ocelí pro konstrukce a konstrukční prvky. *KONSTRUKCE: informace o uplatnění konstrukcí a návazných oborů při stavbách ve stavebnictví a strojírenství* [online]. 2013 [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/pouziti-korozivzdornych-oceli-pro-konstrukce-a-konstrukcni-prvky/>

17. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
18. Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha, 2003, **2003**(4), 84 [cit. 2017-01-28]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/korozivzdorne-oceli-jako-konstrukcni-materialy.html>
19. Charakteristika skupin korozivzdorných ocelí. BOLZANO, Bohdan. *Bolzano* [online]. Kladno, 2017 [cit. 2017-01-29]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobky-z-oceli-korozivzdornych/charakteristika-skupin-korozivzdornych-oceli>
20. DOHNAL, Ivo. *Ověření možnosti využití tahové deformace při Hopkinsonově testu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014. Dostupné také z: https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/35854/Ivo_Dohnal_77503_dizerta_%c4%8d%c3%ad_pr%c3%a1ce_2014.pdf?sequence=2&isAllowed=y. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Forejt, CSc.
21. HEIN, P. a F. VOLLERTSEN. Hydroforming of sheet metal pairs. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. 1999, **87**(1), 154-164 [cit. 2016-04-01]. DOI: 10.1016/S0924-0136(98)00347-1. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0924013698003471>
22. SCHMOECKEL, D., C. HIELSCHER, R. HUBER a M. GEIGER. Metal Forming of Tubes and Sheets with Liquid and Other Flexible Media. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 1999, **48**(2), 497-513 [cit. 2016-04-01]. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63230-2. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S000785060763232>
23. SIEGERT, Klaus, Markus HÄUSSERMANN, Bruno LÖSCH a Ralf RIEGER. Recent developments in hydroforming technology. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. 2000, **98**(2), 251-258 [cit. 2016-04-02]. DOI: 10.1016/S0924-0136(99)00206-X. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S092401369900206X>
24. ALTAN, Taylan a A. Erman TEKKAYA. *Sheet metal forming: processes and applications*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2012. ISBN 16-150-3844-2.
25. KOÇ, Muammer. *Hydroforming for advanced manufacturing*. First published. Cambridge: Woodhead Publishing and Maney Publishing on behalf of The Institute of Materials, Minerals, 2008. Woodhead publishing in materials. ISBN 978-1-84569-328-2.
26. ASNAFI, Nader. Analytical modelling of tube hydroforming. *Thin-Walled Structures* [online]. Elsevier, 1999, **34**(4), 295-330 [cit. 2017-02-03]. DOI: 10.1016/S0263-8231(99)00018-X. ISSN 02638231. Dostupné z: http://ac.els-cdn.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/S026382319900018X/1-s2.0-S026382319900018X-main.pdf?_tid=edc2dc1c-e9fc-11e6-b82a-00000aab0f02&acdnat=1486118501_b0d70624a0186f143147d5a697a5314f
27. MARCINIAK, Z., J. L. DUNCAN a S. J. HU. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. Second edition. London: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 978-0-7506-5300-8.

28. SCHULER. *Metal forming handbook*. New York: Springer-Verlag, 1998. ISBN 35-406-1185-1.
29. *BUB Materials* [online]. [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: <http://www.bubmaterials.com/>
30. *Interlaken Technology* [online]. USA [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: <http://www.interlaken.com/home>
31. Products: Technical Information. *SANGO Co., Ltd.* [online]. 2012 [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: http://www.sango.jp/en/products_technology/processing/pipe_plastic_working/
32. *Excella Technologies: Tube Hydroforming Manufacturer, Tube Hydroformers, Tube Fabricators* [online]. 2012 [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: <http://excellatechnologies.com>
33. MORPHY, Gary. The evolution of tube hydroforming: Adapting to a changing environment. *The Tube & Pipe Journal* [online]. 2007 [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: <http://www.thefabricator.com/article/hydroforming/the-evolution-of-tube-hydroforming>
34. NIKHARE, C., M. WEISS a P.D. HODGSON. FEA comparison of high and low pressure tube hydroforming of TRIP steel. *Computational Materials Science* [online]. Elsevier B.V, 2009, 47(1), 146-152 [cit. 2017-02-03]. DOI: 10.1016/j.commatsci.2009.06.024. ISSN 09270256. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0927025609002808?np=y&npKey=f877bfed37931a182bf3eb953f8ccfc6ae4623bf05a0e1ccbc0a95d822d02031>
35. MORPHY, Gary. Ressure-sequence and high-pressure hydroforming: Knowing the processes can mean boosting profits. *The Tube & Pipe Journal* [online]. 1998 [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: <http://www.thefabricator.com/article/hydroforming/pressure-sequence-and-high-pressure-hydroforming--knowing-the-processes-can-mean-boosting-profits>
36. HOSFORD, William F. a Robert M CADDELL. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. ISBN 978-1-107-00452-8.
37. JONES METAL PRODUCTS COMPANY. *The Hydroforming Process* [online]. 2004 [cit. 2012-02-11]. Dostupné z: <http://www.jmpforming.com/hydroforming/about-hydroforming-process.htm>
38. ŽÁK, Jan, Radko SAMEK a Bohumil BUMBÁLEK. *Speciální letecké technologie*. 1. vyd. Brno: Ediční středisko Vysokého učení technického, 1990. ISBN 80-214-0128-1.
39. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. 2. vyd. Brno: CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7
40. NOVOTNY, S. a P. HEIN. Hydroforming of sheet metal pairs from aluminium alloys. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. 2001, 115(1), 65-69 [cit. 2016-04-01]. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00766-X. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S092401360100766X>
41. Sheet Metal Forming. *Quintus technologies* [online]. 2016 [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://quintustechnologies.com/metal-forming/>
42. KALPAKJIAN, Serope. Sheet-metal forming. *AccessScience* [online]. 2014 [cit. 2016-04-01]. DOI: 1097-8542.619200. Dostupné z: <http://www.accessscience.com//content/sheet-metal-forming/619200>

43. SAMEK, Radko, Eva ŠMEHLÍKOVÁ a Zdeněk LIDMILA. *Speciální technologie tváření*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4220-7.
44. STEPHENS, Tim. Incremental Forming-Simulation Software. *MetalForming Magazine* [online]. 2013, 47(6), 1 [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: <http://www.metalfformingmagazine.com/magazine/article.asp?aid=8355>
45. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
46. MARCINIAK, Zdisław. *Teorie tváření plechů*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964, 259 s.
47. ČSN EN ISO 12004-1. *Kovové materiály - stanovení křivek mezní tváritelnosti - část 1: měření a aplikace diagramů mezní tváritelnosti v lisovně*. Praha: Český normalizační institut, 2009.
48. ČSN EN ISO 12004-2. *Kovové materiály - stanovení křivek mezní tváritelnosti - část 2: měření a aplikace diagramů mezní tváritelnosti v lisovně*. Praha: Český normalizační institut, 2009.
49. LĂZĂRESCU, Lucian, Dan-Sorin COMȘA, Ioan NICODIM, Ioan CIOBANU a Dorel BANABIC. Characterization of plastic behaviour of sheet metals by hydraulic bulge test. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [online]. 2012, 22, 275-279 [cit. 2016-04-01]. DOI: 10.1016/S1003-6326(12)61719-1. ISSN 10036326. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1003632612617191>
50. SLOTA, J. a E. SPIŠÁK. Comparison of the forming - Limit diagram (FLD) models for drawing quality (DQ) steel sheets. *Metalurgija* [online]. 2005, 44(4), 249-253 [cit. 2016-04-01]. ISSN 05435846. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/280808584_Comparison_of_the_forming_-_Limit_diagram_FLD_models_for_drawing_quality_DQ_steel_sheets
51. BANABIC, Dorel. *Sheet metal forming processes: constitutive modelling and numerical simulation*. New York: Springer, 2008. ISBN 35-408-8112-3.
52. ČSN EN ISO 20482 (420406). *Kovové materiály - plechy a pásy - zkouška hloubením podle Erichsena*. Praha: Český normalizační institut, 2014.
53. SCHAEFFLER, Daniel J. a Evan J. VINEBERG. Troubleshooting Formability Problems Using Strain Analysis. *ASM handbook* [online]. Materials Park: ASM International, 2006, 14B, s. 10 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: http://www.eqsgroup.com/ysx2tsinz6u0gxsw7kbt/8i2k7l0wefhre3wxbto3/EQS_introduction-to-circle-grid-strain-analysis.pdf.
54. Grid Pattern Analyzer. *ASAME Technology: Strain Measurement Solutions*: [online]. 2014 [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: <http://www.asametech.com/dwn/factsheets/gpa.pdf>
55. KUČERA, Radek. *Význam deformační sítě v oblasti tváření*. Brno, 2012, 32 s. Bakalářská práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Obor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Eva Šmehlíková, Ph.D.
56. CATEC: Equipement. *Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales* [online]. Spain, 2011 [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: <http://www.catec.aero/en/materials-processes/equipment.htm>

57. Determination of the Process Limitations in Sheet Metal Forming. *GOM: Optical Measuring Techniques* [online]. [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: http://www.gom.com/fileadmin/user_upload/industries/flc_fld_EN.pdf
58. HALAMA, Radim. *MKP a MHP* [online]. VŠB -TU Ostrava, ZČU v Plzni, 2011 [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/metoda_konecných_prvku_a_hranicnich_prvku.pdf
59. LOGAN, Daryl L. *A first course in the finite element method*. 4th ed. United States: Thomson, 2007. ISBN 978-0-534-55298-6.
60. PETRUŠKA, Jindřich. *Počítačové metody mechaniky II* [online]. Ústav mechaniky těles FSI VUT v Brně, 2002 [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/PocitacoveMetodyII/PocitacovaMechanikaII.pdf>
61. CHARPA, Steven C. a Raymond P. CANALE. *Numerical Methods for engineers*. New York: McGraw-Hill, 2010, 968s. ISBN 978-0-07-340106-5.
62. MADENCI, Erdogan a Ibrahim GUVEN. *The finite element method and applications in engineering using ANSYS*. New York: Springer, 2006. ISBN 03-872-8290-4.
63. VALBERG, Henry S. *Applied metal forming including FEM analysis*. New York: Cambridge University Press, 2010. ISBN 978-051-1729-430.
64. CRISFIELD, M.A. *Non-linear finite element analysis of solids and structures*. England: Wiley, 1996, 362 s. ISBN 978-0471970590.
65. HOI, H.-H., S.-M. HWANG, Y.H. KANG, J. KIM a B.S. KANG. Comparison of Implicit and Explicit Finite-Element Methods for the Hydroforming Process of an Automobile Lower Arm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. London: Springer-Verlag London Limited, 2002, 20(6), 407-413 [cit. 2016-04-02]. DOI: 10.1007/s001700200170. ISSN 02683768. Dostupné z: <http://link.springer.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1007/s001700200170>
66. LEE, Huei-Huang. *Finite element simulations with ANSYS workbench 14: theory, applications, case studies*. Mission: SDC Publications, 2012. ISBN 978-1-58503-725-4-2.
67. VAVERKA, Michal a Martin VRBKA. *MKP v dynamice III: implicitní a explicitní algoritmus MKP* [online]. [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: MKP v dynamice III, MICHAL, Vaverka a Vrbka MARTIN, Výpočtové nadstavby pro CAD [online], 2011 [cit. 2014-01-16], Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/ZVN/prednaska7_zvn.pdf
68. Fyzikální základy vědy o materiálu. *Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity* [online]. 2013 [cit. 2015-09-08]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/>
69. PETRUŽELKA, Jiří a Pavel SONNEK. *Tvařitelnost kovových materiálů*. 3. vydání. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2007.
70. *PAM-STAMP 2G: User's guide* [online]. Paris: ESI Group, 2012 [cit. 2017-07-28]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/259215739/Manual-Pam-Stamp>
71. DASAPPAA, Prasad, Kaan INALA a Raja MISHRA. The effects of anisotropic yield functions and their material parameters on prediction of forming limit diagrams. *International Journal of Solids and Structures* [online]. 2012, **49**(25), 3528-3550 [cit. 2017-05-28]. Dostupné z: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00872583/document>
72. *ANSYS: Simulation Driven Product Development* [online]. 2016 [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: <http://www.ansys.com/>

73. Forming Simulation Simufact.forming. *Simulation of manufacturing processes: simufact* [online]. 2016 [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: <http://www.simufact.com/simufactforming-forming-simulation.html>
74. Stamping solution PAM-STAMP. *ESI Group - virtuální prototypování - software a servis* [online]. 2016 [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: <https://www.esi-group.com/cz/software-va-reseni/virtualni-vyroba/tvareni-plechu/stamping-solution-pam-stamp>
75. *Software Solutions for Sheet Metal Forming: AutoForm Engineering* [online]. AutoForm Engineering, 2017 [cit. 2017-01-20]. Dostupné z: <http://www.autoform.com/en/>
76. *FormFEM 2.1: Program pro tváření rovinných a rotačně symetrických těles*. Ostrava: ITA s.r.o., březen 2008. Uživatelská příručka.
77. Welding & Assembly Simulation. *ESI Group* [online]. Paris, 2017 [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: <https://www.esi-group.com/software-solutions/virtual-manufacturing/welding-assembly-simulation>
78. VANĚK, Mojmir. *Predikce deformací svarových spojů pomocí počítačová simulace*. Brno, 2012. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Obor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce Doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.
79. *Ozen Engineering: ANSYS Multiphysics Solutions Features*: [online]. Ozen Engineering, 2015 [cit. 2017-01-20]. Dostupné z: <http://www.ozeninc.com/ansys-multiphysics/multiphysics-solutions-features/>
80. Explicit Dynamics Solutions. *ANSYS* [online]. ANSYS Inc., 2017 [cit. 2017-01-20]. Dostupné z: <http://resource.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/brochure/ansys-explicit-dynamics-brochure-14.0.pdf>
81. HALLQUIST, John O. *LS-DYNA: theoretical manual* [online]. California: Livermore Software technology Corporation, 2006 [cit. 2017-07-28]. ISBN 0-9778540-0-0. Dostupné z: http://www.lstc.com/pdf/ls-dyna_theory_manual_2006.pdf
82. *LS-OPT Support Site* [online]. USA: LSTC [cit. 2017-01-20]. Dostupné z: <http://www.lsoptsupport.com/>
83. *LS-PrePost Online Documentation: Overview* [online]. 2012 [cit. 2017-01-20]. Dostupné z: <http://www.lstc.com/lspc/content/overview.shtml>
84. WCISLIK, Wiktor. Modelling S235JRG2 steel load-carrying capacity and micro-damage development for static and quasi-static loads. *Challenges of modern technology* [online]. 2011, 3(2), 4. ISSN 2082-2863.
85. Stereomikroskop SSM. *WHP TECHNIK s.r.o., Brno, Identifikační systémy a měřicí technika* [online]. Brno: WHP TECHNIK, 2017 [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: <http://www.whp.cz/stereomikroskop-ssm.html>
86. ATOS Triple Scan. *GOM: Optical Measuring Techniques* [online]. GOM, 2017 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://www.gom.com/metrology-systems/atos/atos-triple-scan.html>
87. *Systém ATOS: Výchukový modul* [online]. Brno: Ústav konstruování, FSI VUT v Brně, 2008 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/FRVS/atos.pdf>
88. VAGOVSÝ, Juraj, Ivan BURANSKÝ a Augustín GÖRÖG. Evaluation of Measuring Capability of the Optical 3D Scanner. *Procedia Engineering* [online]. 2015, 100, 1198-1206 [cit. 2017-04-15]. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.484. ISSN 18777058. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705815005111>
89. *Citace PRO* [online]. 2016 [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com>

TVŮRČÍ ČINNOST AUTORA

Vědecké články a příspěvky ve sbornících

1. MRŇA, Libor, Jan ŘIHÁČEK a Zdeněk LIDMILA. Tváření strukturovaného povrchu solárního absorbéru hydroformováním. *Kovárenství*. Svaz kováren České republiky, 2014, (50), 29-32. ISSN 1213-9289.
2. MRŇA, Libor a Jan ŘIHÁČEK. Forming a Structured Surface of a New Type of Solar Absorber with Hydroforming. *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications, 2015, (1127), 49-54. ISSN 1022- 6680.
3. ŘIHÁČEK, Jan a Mojmir VANĚK. Možnosti zkvalitnění sítě MKP při simulacích objemového tváření v software ANSYS Workbench 16. *Kovárenství*. Svaz kováren České republiky, 2015, (55), 9-12. ISSN 1213-9289.
4. MRŇA, Libor a Jan ŘIHÁČEK. Využití laserového svařování při vývoji nového typu solárního absorbéru. *Zváranie - Svařování*. Bratislava: Výzkumný ústav zvaračský, Priemyselný inštitút SR, 2015, **64**(7-8), 155-158. ISSN 0044-5525.
5. MRŇA, Libor a Jan ŘIHÁČEK. EuroBLECH 2014. *MM Průmyslové spektrum*. 2014, (12), 20-22. ISSN 1212-2572.
6. MRŇA, Libor, Jan ŘIHÁČEK, Zdeněk LIDMILA, Kamil PODANÝ a Jaroslav KUBÍČEK. 19. Solární absorbér se strukturovaným povrchem - možná cesta ke zvýšení účinnosti. In: *Alternativní zdroje energie 2014: sborník přednášek z konference*. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2014, s. 119-128. ISBN 978-80-02-02546-7.
7. PODANÝ, Kamil, Zdeněk LIDMILA a Jan ŘIHÁČEK. Proposal of the flexible tool for the production of aerospace parts. *MM Science Journal*, 2016, roč. 2016, č. 5, s. 1338-1342. ISSN: 1805-0476.
8. LIDMILA, Zdeněk, Kamil PODANÝ a Jan ŘIHÁČEK. Improving of shearing blades life. *MM Science Journal*, 2016, roč. 2016, č. 5, s. 1411-1414. ISSN: 1805-0476.
9. VANĚK, Mojmir, Jan ŘIHÁČEK a Jaromír MORAVEC. Improvement of Model of Aluminium Alloys Behaviour for Application in Numerical Simulations of Welding. *MM Science Journal*, 2016, roč. 2016, č. 5, s. 1370-1375. ISSN: 1805-0476.
10. ŘIHÁČEK, Jan a Libor MRŇA. Comparison of Implicit and Explicit Algorithms of Finite Element Method for the Numerical Simulation of Hydroforming Process. *MM Science Journal*, 2016, roč. 2016, č. 6, s. 1326-1331. ISSN: 1805-0476.
11. MRŇA, Libor, Jan ŘIHÁČEK, Kamil PODANÝ a Eva PETERKOVÁ. Konstrukce termického solárního kolektoru s poduškovým absorbérem a jeho varianty. In *Konference Alternativní zdroje energie 2016*. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2016. s. 101-107. ISBN: 978-80-02-02666- 2.

Abstrakty ve sbornících

1. ŘIHÁČEK, Jan a Libor MRŇA. Optimization of Hydroforming Die Geometry For Manufacturing of Solar Absorbers. In: *METAL 2015*. Ostrava, 2015, s. 1-6. ISBN 978-80-87294-58-1. ŘIHÁČEK, Jan a Libor MRŇA.
2. ŘIHÁČEK, Jan, Libor MRŇA, Eva PETERKOVÁ a Milan DROŽÁK. Possibilities of Using the Erichsen Test for Determination of Forming Limit Diagram and Its Utilization for Hydroforming. In: *METAL 2017*. Ostrava, 2017, s. 1-6. ISBN 978-80-87294-73-4.

Ostatní publikace

1. ŘIHÁČEK, Jan. FSI VUT v Brně. *Simulace tvářecích procesů v softwaru FormFEM: řešené příklady*. Brno, 2015, 94 s.
2. ŘIHÁČEK, Jan. FSI VUT v Brně. *Počítačová podpora technologie: část tváření*. Brno, 2015, 29 s.

Výzkumné zprávy

1. PODANÝ, Kamil, Zdeněk LIDMILA a Jan ŘIHÁČEK. *Vývoj kontejnerového nástroje na gumu*. Brno, 2015. Souhrnná výzkumná zpráva.

Funkční vzorky a prototypy

1. MRŇA, Libor, Kamil PODANÝ, Jan ŘIHÁČEK, Vojtěch ŘIHÁČEK a Roman KRATOCHVÍL. *Zařízení pro měření tepelné účinnosti solárních absorbérů*. ČR. Funkční vzorek. 21. 12. 2012.
2. MRŇA, Libor, Zdeněk LIDMILA, Jan ŘIHÁČEK, Ivo DOHNAL, Jaroslav KUBÍČEK a Kamil PODANÝ. *Harmonikový solární absorbér*. ČR. Funkční vzorek. 4. 9. 2013.
3. MRŇA, Libor, Zdeněk LIDMILA a Jan ŘIHÁČEK. *Zařízení pro hydroformování tvaru a povrchu poduškových solárních absorbérů*. ČR. Funkční vzorek. 18. 12. 2013.
4. PODANÝ, Kamil, Zdeněk LIDMILA a Jan ŘIHÁČEK. *Kontejnerový nástroj s elastomerem*. ČR. Funkční vzorek. 29. 10. 2015.
5. MRŇA, Libor, Jan ŘIHÁČEK, Kamil PODANÝ a Eva PETERKOVÁ. *Plochý solární absorbér poduškového typu*. ČR. Prototyp. 16. 11. 2015.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	absorpce	[-]
A ₅	tažnost	[%]
A _C	kumulativní absorpce	[-]
a _{Rp0,2}	součinitel plošné anizotropie pro smluvní mez kluzu	[%]
b	šířka zkušebního tělesa	[mm]
b ₀	výchozí šířka zkušebního tělesa	
c _p	měrná tepelná kapacita	[J · kg ⁻¹ · K ⁻¹]
D _{bh}	průměr otvoru vzorku testu dle Marciniaka	
E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
E _{pl}	modul plasticity	[MPa]
F	globální matice zatížení	
f	poloha ohniska vůči svařovanému povrchu	[mm]
F, G, H, L, M, N	koeficienty podmínky plasticity Hill 1948	[-]
F_i	matice vnějšího zatížení	
FLD	Forming Limit Diagram	
h	hloubka prolisů	[mm]
IE	Erichsenův index	[mm]
I_{i-1}	matice vnitřních sil	
K	globální matice tuhosti	
l	charakteristický rozměr nejmenšího prvku sítě	[m]
L ₀	počáteční hodnota měrné délky	[mm]
l _m	měřená vzdálenost	[mm]
l _{sv}	vzdálenost od svaru	[mm]
L _U	konečná hodnota měrné délky	[mm]
M	globální matice hmotnosti	
MKP	metoda konečných prvků	
n	exponent deformačního zpevnění	[-]
N _o	počet odrazů paprsku	[-]
P	svařovací výkon	[W]
p	lisovací tlak	[MPa]
p _a	normálový vnější tlak	[MPa]
p _i	normálový vnitřní tlak	[MPa]
Q ^{Ar}	průtok ochranné atmosféry – Ar	[l · s ⁻¹]
r, R	poloměr zaoblení	[mm]

Označení	Legenda	Jednotka
R_i	reziduum	
R_m	mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu	[MPa]
r_s	střední hodnota součinitele plastické anizotropie	[-]
R_{sv}	poloměr zaoblení zakončení svaru	[mm]
R_x, R_y, R_z	poměrné hodnoty mezi kluzu pro směry os x, y, z	[-]
R_{xy}, R_{yz}, R_{zx}	poměrné hodnoty mezi kluzu pro roviny xy, yz, zx	[-]
$r_\alpha, r_0, r_{45}, r_{90}$	součinitelé plastické anizotropie	[-]
s	tloušťka	[mm]
s_0	počáteční tloušťka	[mm]
T	teplota	[°C]
U	globální matice deformačních parametrů	
u	matice deformačních parametrů (posuvů)	
u, v, w	složky posuvů	[mm]
Ů	matice rychlosti	
Ü	globální matice zrychlení	
v	svařovací rychlost	[mm · s ⁻¹]

Označení	Legenda	Jednotka
α	odchylka od směru válcování	[°]
β	vrcholový úhel jehlanu	[°]
$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$	složky úhlového přetvoření	[-]
δ_F, δ_U	kritéria konvergence	[-]
Δt	časový krok	[s]
Δt_{krit}	kritická délka časového kroku	[s]
Δu_i	přírůstek posuvů	[mm]
ε	poměrné přetvoření	[-]
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	hlavní poměrná přetvoření	[-]
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	složky lineárního přetvoření	[-]
η	tepelná účinnost	[-]
θ	úhel sklonu křivky tahového diagramu v elastické oblasti	[°]
λ_t	tepelná vodivost	[W · m ⁻¹ · K ⁻¹]
μ	poissonův poměr	[-]
ρ	hustota	[kg · m ⁻³]
ρ_1, ρ_2	poloměry zakřivení	[mm]
σ	smluvní napětí	[MPa]
$\bar{\sigma}$	skutečné napětí	[MPa]
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	hlavní napětí	[MPa]
σ_k	napětí na mezi kluzu	[MPa]
σ_{kREF}	referenční hodnota normálového napětí na mezi kluzu	[MPa]
$\sigma_{kx}, \sigma_{ky}, \sigma_{kz}$	normálová napětí na mezi kluzu pro směry os x, y, z	[MPa]
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	složky normálového napětí	[MPa]
$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$	složky smykového napětí	[MPa]
φ	logaritmické přetvoření	[-]
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$	hlavní logaritmická přetvoření	[-]
φ_b	logaritmické přetvoření ve směru šířky tělesa	[-]
φ_{pl}	platické přetvoření	[-]
φ_s	logaritmické přetvoření ve směru tloušťky tělesa	[-]
$\dot{\varphi}_{stř}$	střední rychlost logaritmického přetvoření	[s ⁻¹]

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: sestava přímo protékaného solárního kolektoru

Příloha 2: 3D model hydroformovacího přípravku

Příloha 3: hodnoty součinitelů normálové anizotropie

Příloha 4: geometrie vzorků pro Erichsenův test

Příloha 5: profily vzorků po provedení erichsenova testu

Příloha 6: naměřené hodnoty křivek mezní tváritelnosti

Příloha 7: mikrometrické měření tloušťky prolisů

Příloha 8: mezní tváritelnost jehlanovitého tvaru dle FLD

Příloha 9: mezní tváritelnost oblasti svaru dle FLD

Příloha 10: výroba segmentových solárních absorbérů

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklady tvarových skupin dílců hydroformování plechů	9
Obr. 2 Schéma činnosti solárního tepelného systému	11
Obr. 3 Základní rozdělení solárních kolektorů	12
Obr. 4 Schéma plochého solárního kolektoru	12
Obr. 5 Varianty trubkového registru plochých kolektorů	13
Obr. 6 Přestup tepla absorbér – trubka	13
Obr. 7 Možnosti napojení absorbér – trubka	13
Obr. 8 Závislost průtočné délky na konstrukci meandrovité struktury absorbéru	14
Obr. 9 Absorbér se strukturovaným povrchem	15
Obr. 10 Změna vlastností v závislosti na vrcholovém úhlu jehlanovité struktury	16
Obr. 11 Závislost účinnosti na vrcholovém úhlu	16
Obr. 12 Vznik pasivační vrstvy	17
Obr. 13 Schaefflerův diagram	17
Obr. 14 Základní rozdělení hydroformovacích metod	21
Obr. 15 Příklady tvarových skupin dílců trubkového hydroformování	22
Obr. 16 Řízení formovacího tlaku v jednotlivých etapách hydroformování trubek	22
Obr. 17 Princip nízkotlakého hydroformování	23
Obr. 18 Princip vícetlakého hydroformování	23
Obr. 19 Děrování s hydroformováním	23
Obr. 20 Princip hydroformování vlnovců	24
Obr. 21 Princip vysokotlakého hydroformování	24
Obr. 22 Princip tváření metodou Hydroform	25
Obr. 23 Princip metody ASEA	26
Obr. 24 Princip tváření metodou hydromechanického tažení	26
Obr. 25 Vybrané varianty hydromechanického tažení	27
Obr. 26 Princip tváření metodou aktivního hydromechanického tažení	27
Obr. 27 Princip tváření tlakem kapaliny	28
Obr. 28 Princip tváření metodou paralelního hydroformování	28
Obr. 29 Příklady ustavení polotovaru při tváření metodou paralelního hydroformování	28
Obr. 30 Integrace operací tváření, stříhání a svařování	29
Obr. 31 Princip tváření metodou Flexform	29
Obr. 32 Princip Tváření metodou Wheelon	29
Obr. 33 Diagram mezní tvářitelnosti	31
Obr. 34 Používané tvary obrazců deformační sítě	32
Obr. 35 Změna tvaru elementu kružnicové sítě	32
Obr. 36 Keeler-Goodwinův diagram	33
Obr. 37 Tvar vzorků tahové zkoušky	34
Obr. 38 Princip hydraulického vyboulování	34
Obr. 39 Princip Swiftovy zkoušky	35
Obr. 40 Princip Erichsenovy zkoušky	35
Obr. 41 Zkouška dle Nakajimy	36
Obr. 42 Tvary tažníků Keelerova testu	36
Obr. 43 Princip zkoušky dle Marciniaka	37
Obr. 44 Měřicí páska určující ε_1 , ε_2	37
Obr. 45 Systém Grid Pattern Analyzer	38
Obr. 46 Příklad snímání přetvoření sítě na těle výlisku metodou Argus	38
Obr. 47 Příklad použití markerů	39
Obr. 48 Aparatura systému Aramis	39

Obr. 49	System ARAMIS	39
Obr. 50	Procesní diagram hydroformování plechového dílu	40
Obr. 51	Zatížení vypínaného dílce	40
Obr. 52	Příklad aplikace diskretizace pro 2D úlohu	42
Obr. 53	Základní typy lineárních prvků	42
Obr. 54	Základní typy kvadratických prvků	43
Obr. 55	Princip implicitního algoritmu	44
Obr. 56	Newton-Raphsonova metoda	45
Obr. 57	Princip explicitního algoritmu	45
Obr. 58	Smluvní diagram napětí – přetvoření	47
Obr. 59	Smluvní a skutečný tahový diagram	47
Obr. 60	Materiálové modely	48
Obr. 61	Orientace odběru vzorků pro vyhodnocení součinitelů plastické anizotropie	49
Obr. 62	Schéma činnosti simulačního softwaru	53
Obr. 63	Příklad využití softwaru Sysweld – analýza kumulativního přetvoření svařence	53
Obr. 64	Prostředí ANSYS Workbench	54
Obr. 65	Analýza plošného tváření – odpružení softwarem LS-DYNA	54
Obr. 66	Schéma činnosti softwaru LS-Prepost	55
Obr. 67	Solární absorbér s přímo protékanou strukturou o rozměrech 1000 × 1000 mm	57
Obr. 68	Technologie Flowdrill	58
Obr. 69	Laserové svařovací zařízení	58
Obr. 70	Svařovací přípravek pro přitlačení plechů	58
Obr. 71	Tvářecí forma s tlakovou pumpou	59
Obr. 72	Schéma tvářecí formy	59
Obr. 73	Lisovací přípravek	60
Obr. 74	Realizace přírubového systému pro hydroformování	60
Obr. 75	Praktická realizace hydroformovacího přípravku	61
Obr. 76	Geometrický model lisovacího přípravku	61
Obr. 77	Deformace upínací desky lisovacího přípravku při tlaku 20 MPa	62
Obr. 78	Experiment s podporou lisu	62
Obr. 79	Vylisované strukturované povrchy	63
Obr. 80	Defekty hydroformované struktury	63
Obr. 81	Rozměry vzorku pro tahovou zkoušku	64
Obr. 82	Trhací stroj ZD 40	64
Obr. 83	Závislost σ - ϵ vzorků tloušťky 0,5 mm z oceli X5CrNi18-10	65
Obr. 84	Závislost $\bar{\sigma}$ – ϕ vzorků tloušťky 0,5 mm z oceli X5CrNi18-10	66
Obr. 85	Vzorek pro zjišťování součinitele plastické anizotropie pro směr 0°	66
Obr. 86	Závislost součinitele normálové anizotropie na směru odběru vzorků	67
Obr. 87	Geometrie vzorků pro konstrukci křivky mezní tvářitelnosti	68
Obr. 88	Nanášení deformační sítě	68
Obr. 89	Pracoviště pro nanášení deformační sítě	69
Obr. 90	zařízení Erichsen F4	69
Obr. 91	Geometrie vzorků po provedení Erichsenova testu	69
Obr. 92	Vyhodnocení deformační sítě	70
Obr. 93	Geometrie povrchek 1 sady vzorků tloušťky 0,5 mm	71
Obr. 94	Diagram mezní tvářitelnosti oceli X5CrNi18-10	71
Obr. 95	Parametry svařování	72
Obr. 96	Vyhodnocení svarů	72
Obr. 97	Graf závislosti naměřené tvrdosti na délce měření	73
Obr. 98	Detail sítě MKP	73
Obr. 99	Geometrický model simulace svařování	73

Obr. 100	Závislost meze kluzu na teplotě pro ocel X5CrNi18-10.....	74
Obr. 101	Závislost $\bar{\sigma}$ – φ pro ocel X5CrNi18-10	74
Obr. 102	Závislost celkového přetvoření na vzdálenosti od středu svaru.....	75
Obr. 103	Rozložení plastického přetvoření po průřezu svařovaných plechů.....	75
Obr. 104	Rozložení efektivního napětí dle HMM po průřezu svařovaných plechů	76
Obr. 105	Graf zvýšení meze kluzu po průřezu svařovaných plechů.....	76
Obr. 106	Rozložení změny meze kluzu po průřezu svařovaných plechů	77
Obr. 107	Proložení zvýšení meze kluzu po částech konstantní funkcí	77
Obr. 108	Rozměry lisovnice.....	78
Obr. 109	Multilineární model křivky zpevnění pro směr válcování (osa x).....	79
Obr. 110	Geometrický model sestavy	80
Obr. 111	Závislost kinetické a vnitřní energie na čase	81
Obr. 112	Predikce hloubky prolisů při tvářecím tlaku 60 MPa	82
Obr. 113	Vylisovaný strukturovaný povrch absorberu	83
Obr. 114	Naznačení měřených úseků.....	83
Obr. 115	Systém ATOS Triple Scan.....	84
Obr. 116	Schéma systému ATOS Triple Scan.....	85
Obr. 117	Vzorek pro skenování systémem ATOS	85
Obr. 118	Naskenovaná součást systémem ATOS Triple Scan	86
Obr. 119	Detail podélného (přímého) řezu naskenovanou součástí.....	86
Obr. 120	Detail úhlopříčného řezu naskenovanou součástí	86
Obr. 121	Graf změn tloušťky prolisů – přímý směr.....	87
Obr. 122	Graf změn tloušťky prolisů – úhlopříčný směr	87
Obr. 123	Graf změn tloušťky prolisů v blízkosti svaru – přímý směr	88
Obr. 124	Graf změn tloušťky prolisů v blízkosti svaru – úhlopříčný směr.....	89
Obr. 125	Geometrický model sestavy	89
Obr. 126	Závislost kinetické a vnitřní energie na čase	90
Obr. 127	3D graf závislosti $h - p - R$ pro vrcholový úhel jehlanovité struktury 90°	91
Obr. 128	Vrstevnicový graf závislosti $h - p - R$ pro vrcholový úhel jehlanovité struktury 90° ...	91
Obr. 129	Geometrie dráhy svaru	92
Obr. 130	3D graf závislosti $\varphi_1/\varphi_2 - p - R_{sv}$ pro tloušťku plechu 0,478 mm struktury 90°	92
Obr. 131	Vrstevnicový graf $\varphi_1/\varphi_2 - p - R_{sv}$ pro tloušťku plechu 0,478 mm struktury 90°	93
Obr. 132	Poloha bodů v FLD při $p = 70\text{MPa}$, tloušťky plechu 0,478 mm struktury 90°	93
Obr. 133	Rozložení efektivní hodnoty plastického přetvoření v okolí svaru.....	94
Obr. 134	Rozložení efektivní hodnoty plastického přetvoření	94
Obr. 135	Diagram mezní tvářitelnosti pro jehlanovitou strukturu 90°	95
Obr. 136	Analýza lisovatelnosti pro jehlanovitou strukturu 90°	95
Obr. 137	Skenovaná součást systémem ATOS Triple Scan	96
Obr. 138	Graf změn tloušťky prolisů – přímý směr.....	96
Obr. 139	Graf změn tloušťky prolisů – úhlopříčný směr	97
Obr. 140	Konečná tloušťka výlisku	97
Obr. 141	Rozměry lisovnice.....	98
Obr. 142	Geometrický model sestavy	98
Obr. 143	Závislost kinetické a vnitřní energie na čase	99
Obr. 144	3D graf závislosti $h - p - R$ pro tloušťku 0,478 mm a vrcholový úhel 60°	99
Obr. 145	Vrstevnicový graf závislosti $h - p - R$ pro tloušťku 0,478 mm a vrcholový úhel 60° .	100
Obr. 146	Závislost kinetické a vnitřní energie na čase	100
Obr. 147	3D graf závislosti $h - p - R$ pro tloušťku 0,787 mm a vrcholový úhel 60°	101
Obr. 148	Vrstevnicový graf závislosti $h - p - R$ pro tloušťku 0,787 mm a vrcholový úhel 60° .	101
Obr. 149	3D graf závislosti $\varphi_1/\varphi_2 - p - R_{sv}$ pro tloušťku plechu 0,787 mm struktury 60°	102
Obr. 150	Vrstevnicový graf $\varphi_1/\varphi_2 - p - R_{sv}$ pro tloušťku plechu 0,787 mm struktury 60° ...	102

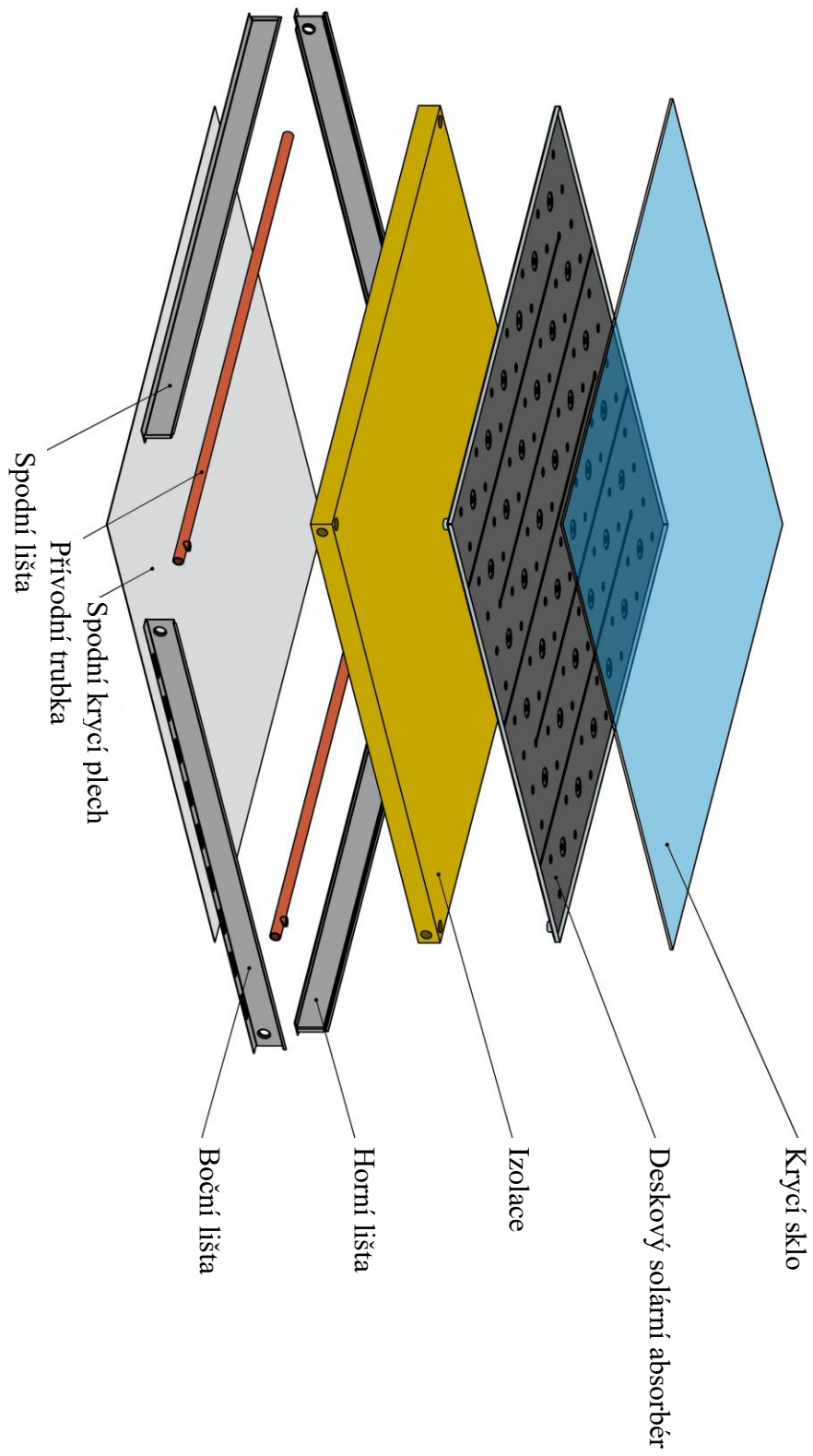
Obr. 151 Poloha bodů v FLD při $p = 65\text{MPa}$, tloušťky plechu 0,787 mm struktury 60°	103
Obr. 152 Rozložení efektivní hodnoty plastického přetvoření v okolí svaru.....	103
Obr. 153 Rozložení efektivní hodnoty plastického přetvoření	104
Obr. 154 Diagram mezní tvářitelnosti pro jehlanovitou strukturu 60°	104
Obr. 155 Analýza lisovatelnosti pro jehlanovitou strukturu 60°	105
Obr. 156 Skenovaná součást systémem ATOS Triple Scan	105
Obr. 157 Graf změn tloušťky prolisů – přímý směr.....	106
Obr. 158 Graf změn tloušťky prolisů – úhlopříčný směr	106
Obr. 159 Konečná tloušťka výlisku	107

SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tab. 1 Orientační přehled vybraných vlastností korozivzdorných ocelí.....	19
Tab. 2 Chemické složení oceli X5CrNi18-10	19
Tab. 3 Mechanické vlastnosti oceli X5CrNi18-10.....	20
Tab. 4 Fyzikální vlastnosti oceli X5CrNi18-10.	20
Tab. 5 Bilineární materiálový model oceli S235JRG2	61
Tab. 6 Základní údaje zkušebního stroje ZD 40	64
Tab. 7 Souhrnné výsledky tahových zkoušek oceli X5CrNi18-10.....	65
Tab. 8 Specifikace třmenového mikrometru Mitutoyo	66
Tab. 9 Hodnoty součinitelů plastické anizotropie oceli X5CrNi18-10.....	67
Tab. 10 Parametry Stereomikroskopu SSM-3E	70
Tab. 11 Základní parametry při svařování dílců absorbérů	72
Tab. 12 Parametry materiálového modelu Anisotropic plasticity (ANSYS Mechanical)	79
Tab. 13 Parametry materiálového modelu Anisotropic plastic (LS-DYNA).....	80
Tab. 13 Specifikace posuvného měřidla PROTECO	82
Tab. 14 Specifikace hrotového digitálního mikrometru Mitutoyo.....	83
Tab. 15 Základní specifikace systému ATOS Triple Scan 8M.....	84

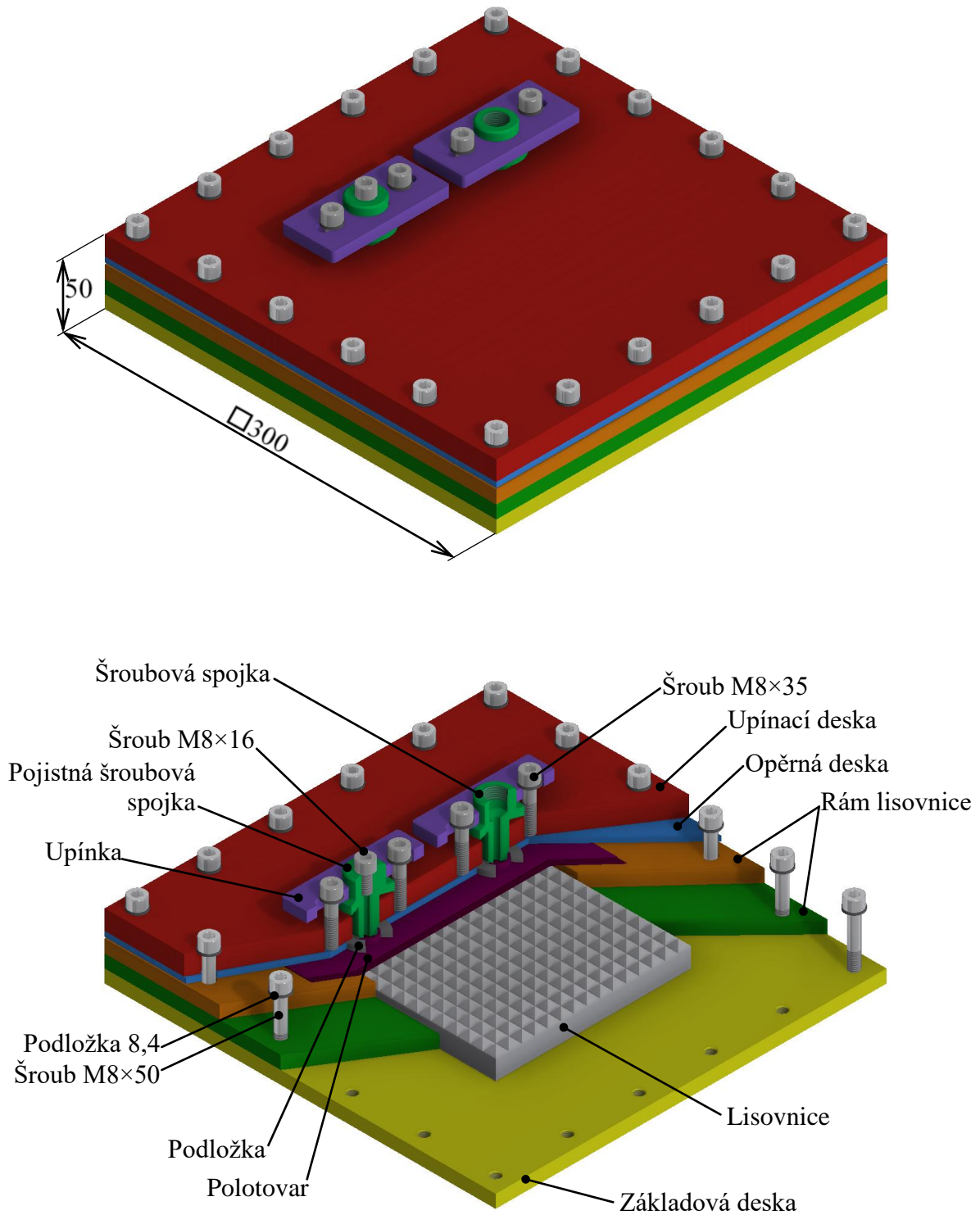
PŘÍLOHA 1: SESTAVA PŘÍMO PROTÉKANÉHO SOLÁRNÍHO KOLEKTORU

List 1/1



PŘÍLOHA 2: 3D MODEL HYDROFORMOVACÍHO PŘÍPRAVKU

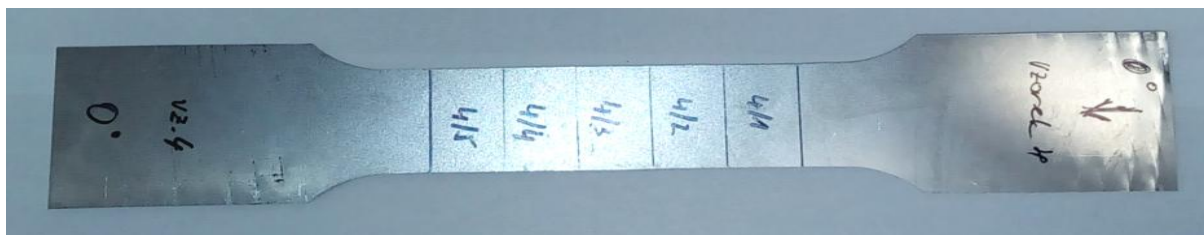
List 1/1



PŘÍLOHA 3: HODNOTY SOUČINITELŮ NORMÁLOVÉ ANIZOTROPIE

List 1/3

Počáteční tloušťka vzorku $s_0 = 0,478$ mm, počáteční šířka vzorku $b_0 = 24,78$ mm, délka měrné části vzorku $L_0 = 80$ mm, protažení vzorku $\Delta L = 13,2$ mm

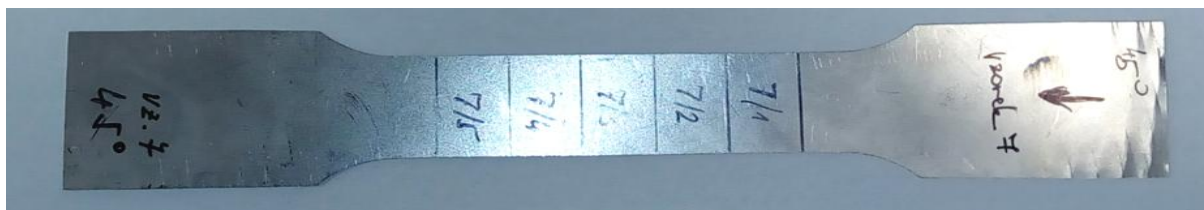


Směr	Vzorek č.	Měření č.	Tloušťka	Šířka	Přetvoření ve směru tloušťky	Přetvoření ve směru šířky	Průměrné hodnoty přetvoření		Součinitel plastické anizotropie	Průměr
			s [mm]	b [mm]	φ_s [-]	φ_b [-]	φ_{ss} [-]	φ_{bs} [-]	r_0 [-]	r_{0s} [-]
0°	1	1	0,461	23,988	-0,036	-0,032	-0,037	-0,032	0,865	0,865
		2	0,460	24,015	-0,038	-0,031				
		3	0,459	24,010	-0,041	-0,032				
		4	0,462	24,012	-0,034	-0,031				
		5	0,462	24,010	-0,034	-0,032				
	2	1	0,461	24,036	-0,036	-0,030	-0,035	-0,031	0,870	
		2	0,462	24,033	-0,034	-0,031				
		3	0,461	24,040	-0,036	-0,030				
		4	0,462	24,017	-0,034	-0,031				
		5	0,461	24,024	-0,036	-0,031				
	3	1	0,461	23,985	-0,036	-0,033	-0,036	-0,031	0,862	
		2	0,459	24,038	-0,041	-0,030				
		3	0,462	24,006	-0,034	-0,032				
		4	0,462	24,048	-0,034	-0,030				
		5	0,461	24,014	-0,036	-0,031				
	4	1	0,458	23,899	-0,043	-0,036	-0,037	-0,032	0,869	
		2	0,461	24,010	-0,036	-0,032				
		3	0,460	24,000	-0,038	-0,032				
		4	0,461	24,024	-0,036	-0,031				
		5	0,463	24,040	-0,032	-0,030				
5	1	0,462	24,000	-0,034	-0,032	-0,037	-0,032	0,861		
	2	0,457	24,016	-0,045	-0,031					
	3	0,461	24,010	-0,036	-0,032					
	4	0,461	24,010	-0,036	-0,032					
	5	0,463	24,013	-0,032	-0,031					

PŘÍLOHA 3: HODNOTY SOUČINITELŮ NORMÁLOVÉ ANIZOTROPIE

List 2/3

Počáteční tloušťka vzorku $s_0 = 0,478$ mm, počáteční šířka vzorku $b_0 = 24,78$ mm, délka měrné části vzorku $L_0 = 80$ mm, protažení vzorku $\Delta L = 13,2$ mm



Směr	Vzorek č.	Měření č.	Tloušťka	Šířka	Přetvoření ve směru tloušťky	Přetvoření ve směru šířky	Průměrné hodnoty přetvoření		Součinitel plastické anizotropie	Průměr
			s [mm]	b [mm]	φ_s [-]	φ_b [-]	φ_{ss} [-]	φ_{bs} [-]	r_{45} [-]	r_{45s} [-]
45°	1	1	0,459	23,816	-0,040	-0,040	-0,036	-0,042	1,160	1,174
		2	0,460	23,705	-0,038	-0,044				
		3	0,462	23,785	-0,033	-0,041				
		4	0,463	23,739	-0,032	-0,043				
		5	0,460	23,744	-0,038	-0,043				
	2	1	0,458	23,740	-0,042	-0,043	-0,036	-0,042	1,183	
		2	0,462	23,778	-0,034	-0,041				
		3	0,462	23,748	-0,034	-0,043				
		4	0,463	23,751	-0,032	-0,042				
		5	0,461	23,769	-0,036	-0,042				
	3	1	0,459	23,697	-0,040	-0,045	-0,037	-0,043	1,172	
		2	0,460	23,774	-0,039	-0,041				
		3	0,460	23,744	-0,038	-0,043				
		4	0,461	23,742	-0,036	-0,043				
		5	0,464	23,726	-0,030	-0,043				
	4	1	0,459	23,741	-0,041	-0,043	-0,037	-0,043	1,171	
		2	0,461	23,742	-0,036	-0,043				
		3	0,460	23,745	-0,038	-0,043				
		4	0,462	23,740	-0,034	-0,043				
		5	0,462	23,746	-0,034	-0,043				
5	1	0,459	23,738	-0,041	-0,043	-0,036	-0,043	1,182		
	2	0,462	23,742	-0,034	-0,043					
	3	0,461	23,742	-0,036	-0,043					
	4	0,462	23,742	-0,034	-0,043					
	5	0,461	23,745	-0,036	-0,043					

PŘÍLOHA 3: HODNOTY SOUČINITELŮ NORMÁLOVÉ ANIZOTROPIE

List 3/3

Počáteční tloušťka vzorku $s_0 = 0,478$ mm, počáteční šířka vzorku $b_0 = 24,78$ mm, délka měrné části vzorku $L_0 = 80$ mm, protažení vzorku $\Delta L = 13,2$ mm

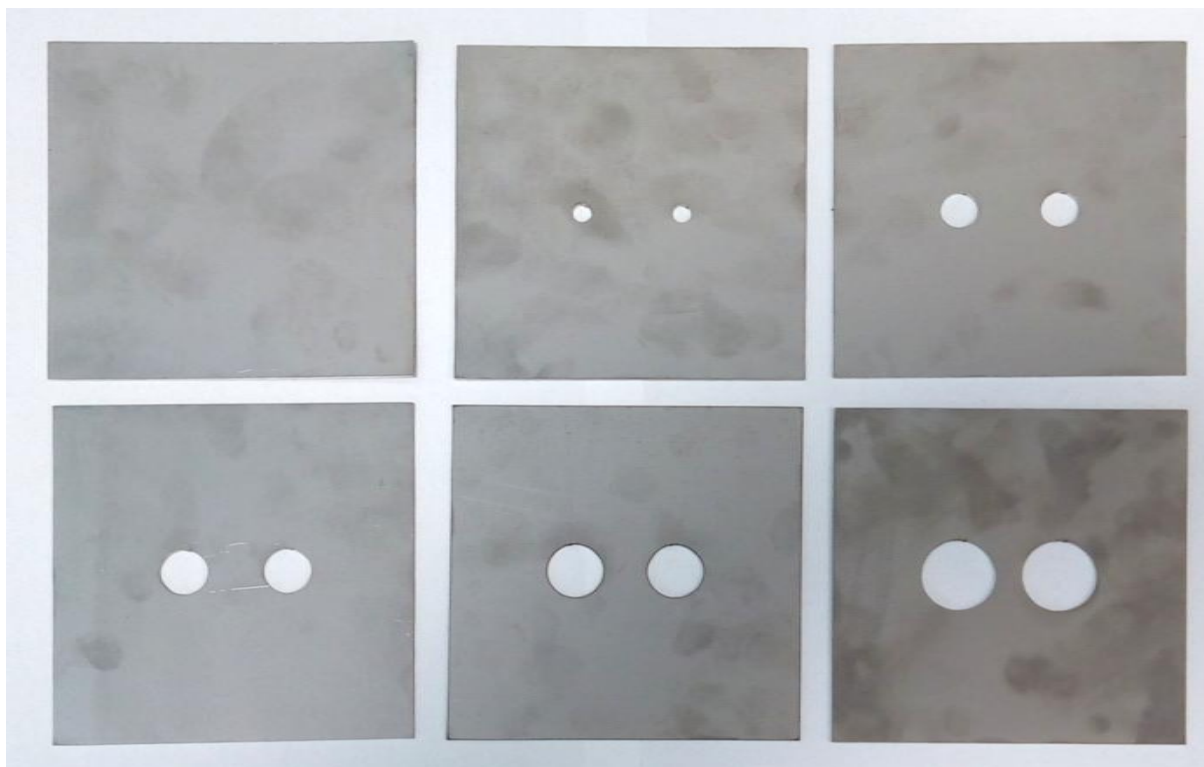


Směr	Vzorek č.	Měření č.	Tloušťka	Šířka	Přetvoření ve směru tloušťky	Přetvoření ve směru šířky	Průměrné hodnoty přetvoření		Součinitel plastické anizotropie	Průměr
			s [mm]	b [mm]	φ_s [-]	φ_b [-]	φ_{ss} [-]	φ_{bs} [-]	r_{90} [-]	r_{90s} [-]
90°	1	1	0,459	23,920	-0,040	-0,035	-0,036	-0,035	0,974	0,972
		2	0,460	23,920	-0,037	-0,035				
		3	0,461	23,925	-0,036	-0,035				
		4	0,462	23,921	-0,033	-0,035				
		5	0,462	23,920	-0,034	-0,035				
	2	1	0,457	23,918	-0,046	-0,035	-0,037	-0,035	0,966	
		2	0,463	23,916	-0,033	-0,035				
		3	0,462	23,921	-0,034	-0,035				
		4	0,459	23,929	-0,041	-0,035				
		5	0,464	23,916	-0,030	-0,036				
	3	1	0,460	23,921	-0,038	-0,035	-0,036	-0,035	0,968	
		2	0,461	23,919	-0,036	-0,035				
		3	0,461	23,920	-0,037	-0,035				
		4	0,461	23,927	-0,036	-0,035				
		5	0,462	23,926	-0,034	-0,035				
	4	1	0,460	23,928	-0,038	-0,035	-0,036	-0,035	0,985	
		2	0,461	23,928	-0,037	-0,035				
		3	0,461	23,917	-0,036	-0,035				
		4	0,461	23,928	-0,036	-0,035				
		5	0,464	23,924	-0,030	-0,035				
5	1	0,461	23,922	-0,036	-0,035	-0,037	-0,035	0,964		
	2	0,463	23,919	-0,032	-0,035					
	3	0,461	23,913	-0,036	-0,036					
	4	0,464	23,917	-0,030	-0,035					
	5	0,455	23,918	-0,049	-0,035					

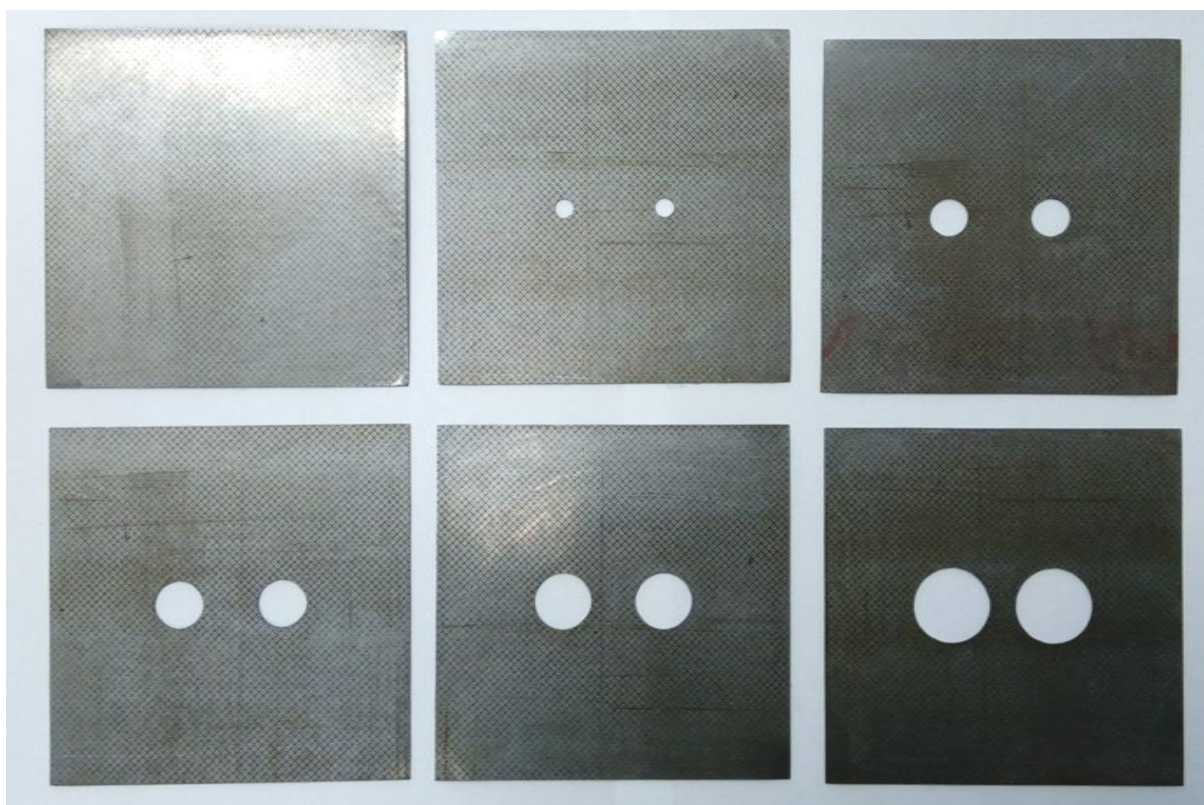
PŘÍLOHA 4: GEOMETRIE VZORKŮ PRO ERICHSENŮV TEST

List 1/1

Tloušťka materiálu $s_0 = 0,478$ mm



Sada vzorků č. 1 před nanesením deformační sítě

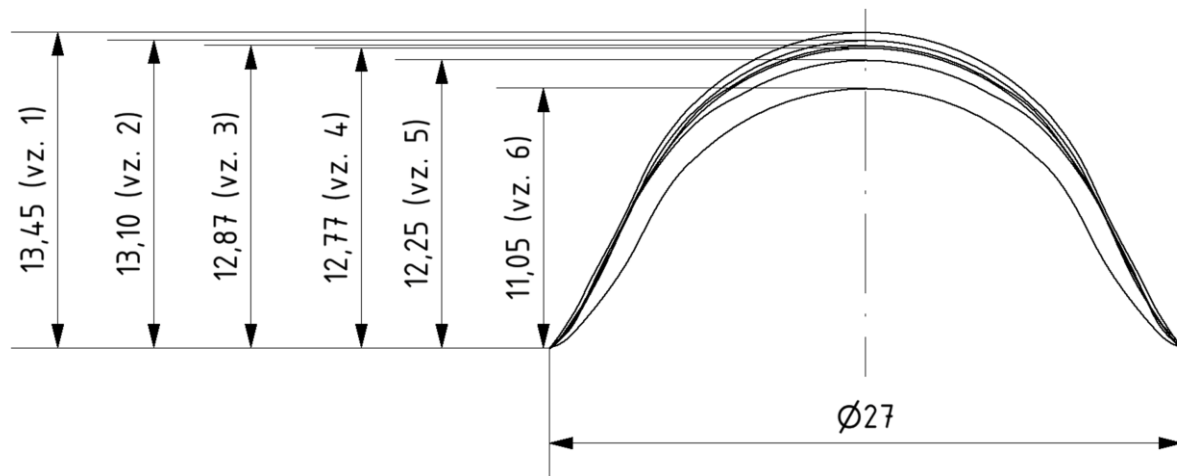


Sada vzorků č. 1 po nanesení deformační sítě

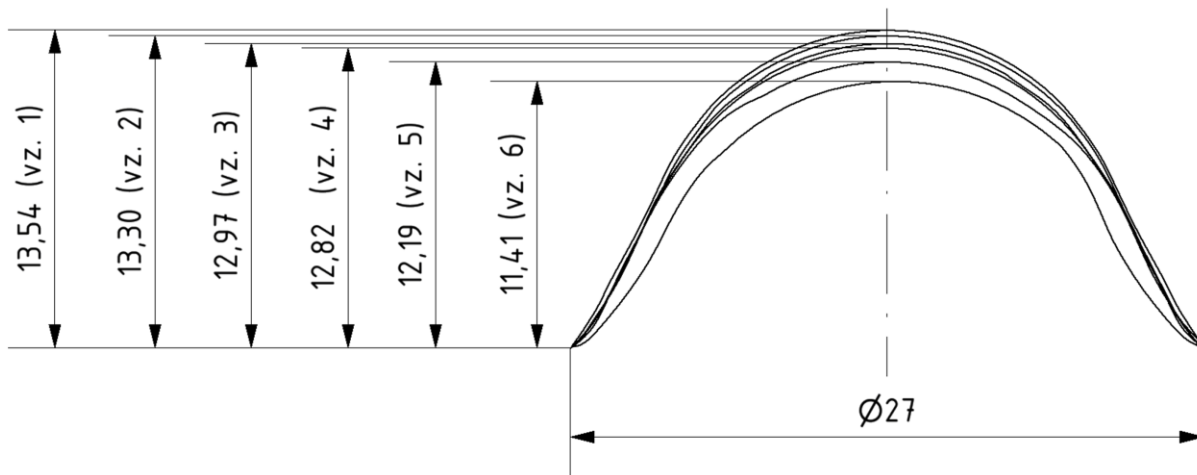
PŘÍLOHA 5: PROFILY VZORKŮ PO PROVEDENÍ ERICHSENOVA TESTU

List 1/2

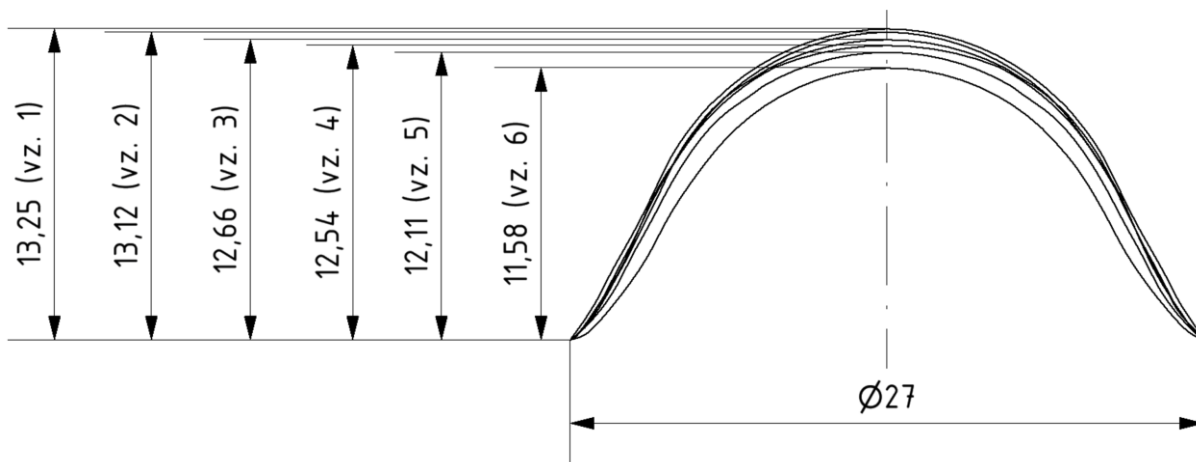
Tloušťka materiálu $s_0 = 0,478$ mm



Sada vzorků č. 1



Sada vzorků č. 2

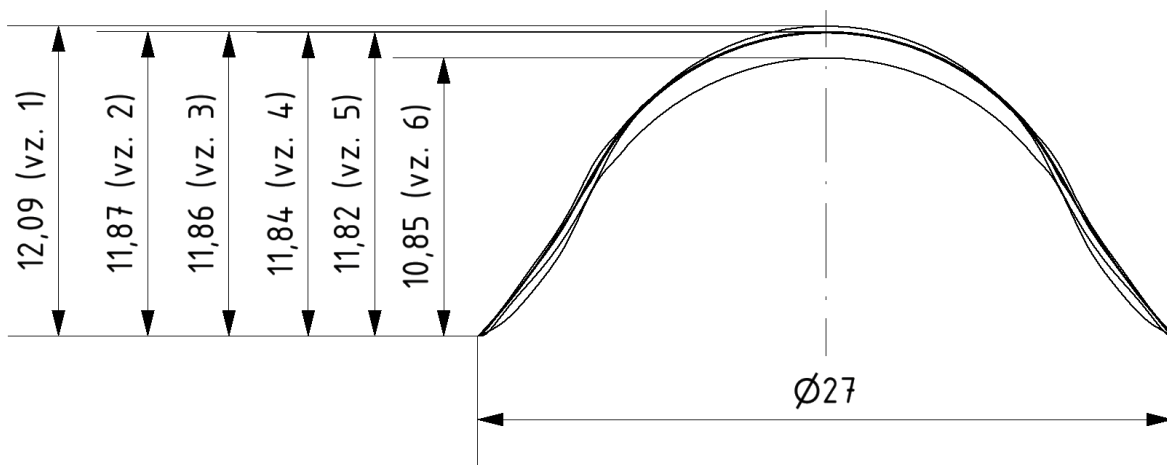


Sada vzorků č. 3

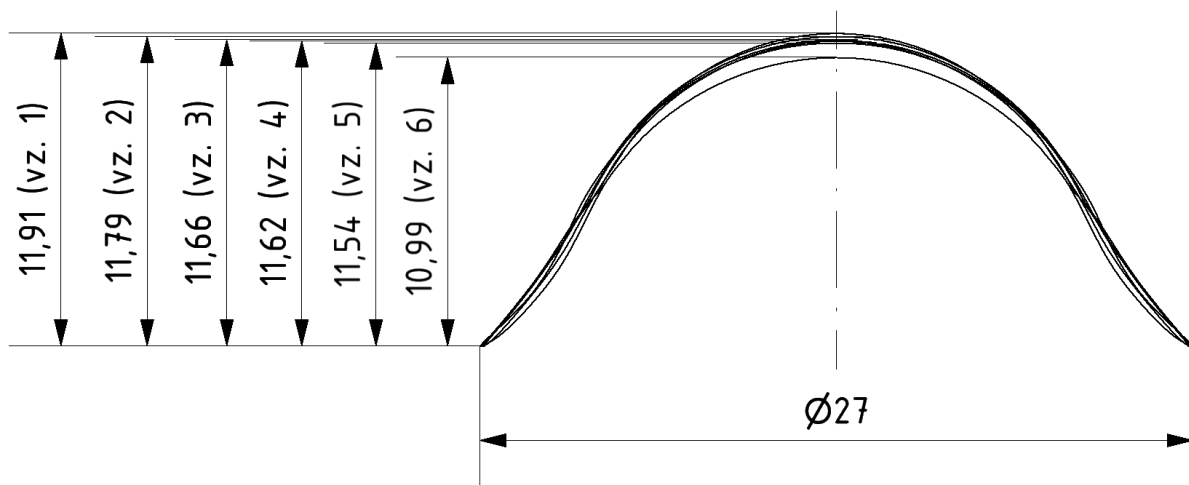
PŘÍLOHA 5: PROFILY VZORKŮ PO PROVEDENÍ ERICHSENOVA TESTU

List 2/2

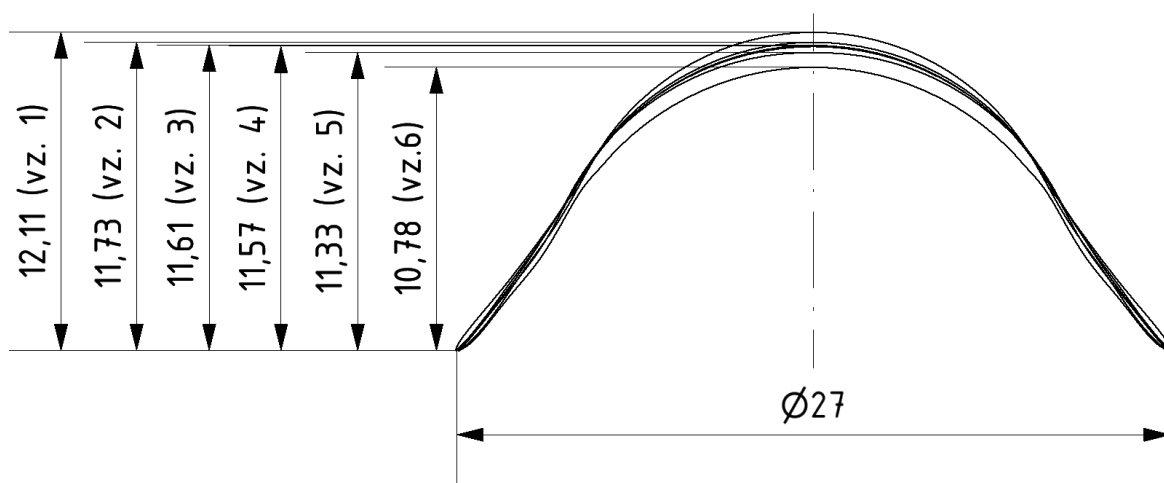
Tloušťka materiálu $s_0 = 0,787$ mm



Sada vzorků č. 1



Sada vzorků č. 2



Sada vzorků č. 3

PŘÍLOHA 6: NAMĚŘENÉ HODNOTY KŘIVEK MEZNÍ TVÁŘITELNOSTI

List 1/4

Tloušťka materiálu $s_0 = 0,478$ mm, průměr elementu deformační sítě $D_0 = 1,840$ mm

Sada vzorků č.	Vzorek č.	Měření č.	Délky os elipsy		Hlavní přetvoření		Průměrné hodnoty hlavních přetvoření	
			l_1 [mm]	l_2 [mm]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_{1s} [-]	φ_{2s} [-]
1	1	1	2,741	1,948	0,399	0,057	0,399	0,052
		2	2,750	1,931	0,402	0,048		
		3	2,748	1,938	0,401	0,052		
	2	1	2,699	1,861	0,383	0,011	0,388	0,010
		2	2,721	1,862	0,391	0,012		
		3	2,720	1,854	0,391	0,008		
	3	1	2,705	1,821	0,385	-0,010	0,384	-0,010
		2	2,698	1,822	0,383	-0,010		
		3	2,704	1,821	0,385	-0,010		
	4	1	2,927	1,747	0,464	-0,052	0,465	-0,052
		2	2,929	1,746	0,465	-0,052		
		3	2,935	1,745	0,467	-0,053		
	5	1	3,146	1,638	0,536	-0,116	0,538	-0,119
		2	3,154	1,632	0,539	-0,120		
		3	3,150	1,630	0,538	-0,121		
	6	1	3,389	1,496	0,611	-0,207	0,612	-0,209
		2	3,396	1,492	0,613	-0,210		
		3	3,392	1,492	0,612	-0,210		
2	1	1	2,825	1,742	0,429	-0,055	0,427	0,055
		2	2,820	1,739	0,427	-0,056		
		3	2,819	1,741	0,427	-0,055		
	2	1	2,680	1,852	0,376	0,007	0,378	0,008
		2	2,688	1,857	0,379	0,009		
		3	2,685	1,855	0,378	0,009		
	3	1	2,784	1,782	0,414	-0,032	0,414	-0,032
		2	2,788	1,780	0,416	-0,033		
		3	2,783	1,783	0,414	-0,031		
	4	1	2,908	1,721	0,458	-0,067	0,459	-0,068
		2	2,911	1,720	0,459	-0,067		
		3	2,912	1,718	0,459	-0,069		
	5	1	3,226	1,582	0,561	-0,151	0,562	-0,149
		2	3,229	1,587	0,562	-0,148		
		3	3,229	1,588	0,562	-0,147		
	6	1	3,413	1,559	0,618	-0,166	0,617	-0,166
		2	3,409	1,559	0,617	-0,166		
		3	3,408	1,557	0,616	-0,167		

PŘÍLOHA 6: NAMĚŘENÉ HODNOTY KŘIVEK MEZNÍ TVÁŘITELNOSTI

List 2/4

Tloušťka materiálu $s_0 = 0,478$ mm, průměr elementu deformační sítě $D_0 = 1,840$ mm

Sada vzorků č.	Vzorek č.	Měření č.	Délky os elipsy		Hlavní přetvoření		Průměrné hodnoty hlavních přetvoření	
			l_1 [mm]	l_2 [mm]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_{1s} [-]	φ_{2s} [-]
3	1	1	2,791	1,961	0,417	0,064	0,417	0,061
		2	2,789	1,957	0,416	0,062		
		3	2,799	1,951	0,419	0,059		
	2	1	2,665	1,841	0,370	0,001	0,368	0,001
		2	2,652	1,843	0,366	0,002		
		3	2,659	1,841	0,368	0,001		
	3	1	2,826	1,794	0,429	-0,025	0,425	-0,023
		2	2,827	1,801	0,429	-0,021		
		3	2,789	1,799	0,416	-0,023		
	4	1	2,979	1,721	0,482	-0,067	0,480	-0,066
		2	2,975	1,725	0,480	-0,065		
		3	2,970	1,719	0,479	-0,068		
	5	1	3,440	1,540	0,626	-0,178	0,624	-0,178
		2	3,431	1,544	0,623	-0,175		
		3	3,436	1,538	0,625	-0,179		
	6	1	3,540	1,485	0,654	-0,214	0,653	-0,213
		2	3,535	1,491	0,653	-0,210		
		3	3,532	1,484	0,652	-0,215		

PŘÍLOHA 6: NAMĚŘENÉ HODNOTY KŘIVEK MEZNÍ TVÁŘITELNOSTI

List 3/4

Tloušťka materiálu $s_0 = 0,787$ mm, průměr elementu deformační sítě $D_0 = 1,840$ mm

Sada vzorků č.	Vzorek č.	Měření č.	Délky os elipsy		Hlavní přetvoření		Průměrné hodnoty hlavních přetvoření	
			l_1 [mm]	l_2 [mm]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_{1s} [-]	φ_{2s} [-]
1	1	1	2,908	1,742	0,458	-0,055	0,456	0,057
		2	2,899	1,737	0,455	-0,058		
		3	2,900	1,733	0,455	-0,060		
	2	1	2,754	1,837	0,403	-0,002	0,402	0,001
		2	2,749	1,845	0,401	0,003		
		3	2,751	1,843	0,402	0,002		
	3	1	2,791	1,822	0,417	-0,010	0,416	-0,012
		2	2,789	1,817	0,416	-0,013		
		3	2,785	1,815	0,414	-0,014		
	4	1	3,030	1,955	0,499	0,061	0,499	-0,012
		2	3,036	1,961	0,501	0,064		
		3	3,029	1,956	0,498	0,061		
	5	1	3,459	1,612	0,631	-0,132	0,633	-0,130
		2	3,462	1,618	0,632	-0,129		
		3	3,471	1,619	0,635	-0,128		
	6	1	3,811	1,447	0,728	-0,240	0,731	-0,239
		2	3,828	1,451	0,733	-0,238		
		3	3,823	1,449	0,731	-0,239		
2	1	1	2,967	1,917	0,478	0,041	0,476	0,041
		2	2,962	1,911	0,476	0,038		
		3	2,960	1,923	0,475	0,044		
	2	1	2,809	1,866	0,423	0,014	0,421	0,012
		2	2,802	1,863	0,421	0,012		
		3	2,800	1,858	0,420	0,010		
	3	1	3,019	1,771	0,495	-0,038	0,499	-0,037
		2	3,028	1,777	0,498	-0,035		
		3	3,047	1,773	0,504	-0,037		
	4	1	3,159	1,729	0,540	-0,062	0,542	-0,062
		2	3,164	1,730	0,542	-0,062		
		3	3,166	1,729	0,543	-0,062		
	5	1	3,249	1,659	0,569	-0,104	0,572	-0,107
		2	3,259	1,649	0,572	-0,110		
		3	3,268	1,652	0,574	-0,108		
	6	1	3,594	1,486	0,670	-0,214	0,672	-0,217
		2	3,607	1,481	0,673	-0,217		
		3	3,610	1,478	0,674	-0,219		

PŘÍLOHA 6: NAMĚŘENÉ HODNOTY KŘIVEK MEZNÍ TVÁŘITELNOSTI

List 4/4

Tloušťka materiálu $s_0 = 0,787$ mm, průměr elementu deformační sítě $D_0 = 1,840$ mm

Sada vzorků č.	Vzorek č.	Měření č.	Délky os elipsy		Hlavní přetvoření		Průměrné hodnoty hlavních přetvoření	
			l_1 [mm]	l_2 [mm]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_{1s} [-]	φ_{2s} [-]
3	1	1	2,878	1,898	0,447	0,031	0,446	0,035
		2	2,871	1,911	0,445	0,038		
		3	2,877	1,906	0,447	0,035		
	2	1	2,775	1,842	0,411	0,001	0,412	-0,001
		2	2,778	1,845	0,412	0,003		
		3	2,778	1,840	0,412	0,000		
	3	1	3,015	1,777	0,494	-0,035	0,496	-0,036
		2	3,019	1,774	0,495	-0,037		
		3	3,027	1,773	0,498	-0,037		
	4	1	3,057	1,764	0,508	-0,042	0,510	-0,040
		2	3,066	1,768	0,511	-0,040		
		3	3,071	1,769	0,512	-0,039		
	5	1	3,182	1,678	0,548	-0,092	0,549	-0,092
		2	3,180	1,675	0,547	-0,094		
		3	3,193	1,680	0,551	-0,091		
	6	1	3,569	1,479	0,663	-0,218	0,662	-0,218
		2	3,564	1,477	0,661	-0,220		
		3	3,567	1,482	0,662	-0,216		

PŘÍLOHA 7: MIKROMETRICKÉ MĚŘENÍ TLOUŠŤKY PROLISŮ

List 1/6

Matrice 90°, počáteční tloušťka vzorku $s_0 = 0,478$ mm, lisovací tlak 60 MPa

Směr měření: přímý

Délka měření	Tloušťka			
	s [mm]			
l [mm]	Měření č. 1	Měření č. 2	Měření č. 3	Průměr
0	0,446	0,445	0,446	0,446
1	0,462	0,460	0,459	0,460
2	0,447	0,460	0,457	0,455
3	0,438	0,438	0,439	0,438
4	0,384	0,379	0,381	0,381
5	0,376	0,377	0,375	0,376
6	0,391	0,387	0,385	0,388
7	0,421	0,417	0,417	0,418
8	0,438	0,434	0,434	0,435
9	0,440	0,438	0,438	0,439
10	0,450	0,445	0,442	0,446
11	0,434	0,431	0,432	0,432
12	0,419	0,415	0,415	0,416
13	0,399	0,392	0,397	0,396
14	0,376	0,377	0,376	0,376
15	0,355	0,354	0,356	0,355
16	0,406	0,403	0,402	0,403
17	0,432	0,429	0,431	0,430
18	0,449	0,445	0,445	0,446
19	0,455	0,451	0,450	0,452
20	0,456	0,453	0,451	0,453
21	0,446	0,450	0,446	0,447
22	0,427	0,424	0,432	0,428
23	0,396	0,402	0,400	0,399
24	0,369	0,365	0,365	0,366
25	0,350	0,354	0,353	0,352

PŘÍLOHA 7: MIKROMETRICKÉ MĚŘENÍ TLOUŠŤKY PROLISŮ

List 2/6

Matrice 90°, počáteční tloušťka vzorku $s_0 = 0,478$ mm, lisovací tlak 60 MPa

Směr měření: úhlopříčný

Délka měření	Tloušťka			
	s [mm]			
l [mm]	Měření č. 1	Měření č. 2	Měření č. 3	Průměr
0	0,450	0,442	0,444	0,445
1	0,446	0,445	0,431	0,441
2	0,443	0,437	0,435	0,438
3	0,444	0,440	0,439	0,441
4	0,437	0,429	0,431	0,432
5	0,426	0,422	0,418	0,422
6	0,404	0,397	0,395	0,399
6,7	0,372	0,363	0,369	0,368
7,5	0,369	0,377	0,375	0,374
8,5	0,386	0,380	0,381	0,382
10	0,404	0,394	0,403	0,401
11	0,434	0,433	0,437	0,435
12	0,444	0,438	0,435	0,439
13	0,452	0,444	0,449	0,448
14	0,449	0,446	0,444	0,446
15	0,446	0,440	0,440	0,442
16	0,436	0,429	0,431	0,432
17	0,435	0,432	0,427	0,431
18	0,396	0,387	0,395	0,393
19	0,379	0,378	0,371	0,376
20	0,371	0,366	0,367	0,368
21	0,359	0,352	0,357	0,356
22	0,378	0,379	0,377	0,378
23	0,394	0,389	0,390	0,391
24	0,403	0,399	0,400	0,400
25	0,432	0,428	0,425	0,428
26	0,435	0,429	0,438	0,434
27	0,450	0,441	0,447	0,446
28	0,451	0,446	0,444	0,447
29	0,446	0,441	0,440	0,442
30	0,438	0,433	0,432	0,434
31	0,437	0,431	0,432	0,433
32	0,408	0,403	0,404	0,405
33	0,383	0,379	0,378	0,380
34	0,361	0,361	0,360	0,361
35	0,357	0,353	0,353	0,354

PŘÍLOHA 7: MIKROMETRICKÉ MĚŘENÍ TLOUŠŤKY PROLISŮ

List 3/6

Matrice 90°, počáteční tloušťka vzorku $s_0 = 0,478$ mm, lisovací tlak 70 MPa

Směr měření: přímý

Délka měření	Tloušťka			
	s [mm]			
l [mm]	Měření č. 1	Měření č. 2	Měření č. 3	Průměr
0	0,447	0,445	0,445	0,446
1	0,462	0,459	0,458	0,46
2	0,457	0,454	0,453	0,455
3	0,440	0,437	0,437	0,438
4	0,383	0,380	0,381	0,381
5	0,378	0,377	0,375	0,376
6	0,390	0,387	0,387	0,388
7	0,420	0,417	0,417	0,418
8	0,434	0,434	0,437	0,435
9	0,438	0,438	0,441	0,439
10	0,448	0,446	0,445	0,446
11	0,431	0,431	0,434	0,432
12	0,418	0,415	0,415	0,416
13	0,398	0,395	0,396	0,396
14	0,375	0,377	0,378	0,376
15	0,355	0,354	0,356	0,355
16	0,402	0,402	0,405	0,403
17	0,430	0,429	0,432	0,43
18	0,444	0,447	0,448	0,446
19	0,454	0,451	0,451	0,452
20	0,455	0,453	0,452	0,453
21	0,449	0,445	0,446	0,447
22	0,430	0,427	0,428	0,428
23	0,401	0,399	0,398	0,399
24	0,365	0,365	0,367	0,366
25	0,350	0,351	0,353	0,352

PŘÍLOHA 7: MIKROMETRICKÉ MĚŘENÍ TLOUŠŤKY PROLISŮ

List 4/6

Matrice 90°, počáteční tloušťka vzorku $s_0 = 0,478$ mm, lisovací tlak 70 MPa

Směr měření: úhlopříčný

Délka měření l [mm]	Tloušťka s [mm]			
	Měření č. 1	Měření č. 2	Měření č. 3	Průměr
0	0,447	0,435	0,453	0,445
1	0,449	0,432	0,443	0,441
2	0,440	0,439	0,435	0,438
3	0,439	0,443	0,442	0,441
4	0,434	0,431	0,431	0,432
5	0,421	0,421	0,424	0,422
6	0,398	0,398	0,401	0,399
6,7	0,369	0,367	0,367	0,368
7,5	0,373	0,373	0,375	0,374
8,5	0,381	0,381	0,384	0,382
10	0,400	0,403	0,402	0,401
11	0,434	0,434	0,437	0,435
12	0,441	0,438	0,438	0,439
13	0,447	0,447	0,449	0,448
14	0,446	0,445	0,446	0,446
15	0,444	0,441	0,441	0,442
16	0,431	0,431	0,434	0,432
17	0,430	0,430	0,433	0,431
18	0,392	0,392	0,395	0,393
19	0,378	0,375	0,375	0,376
20	0,367	0,367	0,369	0,368
21	0,356	0,355	0,357	0,356
22	0,377	0,377	0,380	0,378
23	0,390	0,392	0,392	0,391
24	0,400	0,399	0,402	0,400
25	0,427	0,419	0,438	0,428
26	0,433	0,436	0,433	0,434
27	0,445	0,448	0,445	0,446
28	0,446	0,439	0,455	0,447
29	0,441	0,441	0,444	0,442
30	0,432	0,435	0,436	0,434
31	0,435	0,432	0,433	0,433
32	0,407	0,404	0,404	0,405
33	0,379	0,379	0,382	0,380
34	0,360	0,363	0,360	0,361
35	0,352	0,356	0,353	0,354

PŘÍLOHA 7: MIKROMETRICKÉ MĚŘENÍ TLOUŠŤKY PROLISŮ

List 5/6

Matrice 60°, počáteční tloušťka vzorku $s_0 = 0,787$ mm, lisovací tlak 65 MPa

Směr měření: přímý

Délka měření	Tloušťka			
	s [mm]			
l [mm]	Měření č. 1	Měření č. 2	Měření č. 3	Průměr
0,00	0,771	0,769	0,770	0,770
1,00	0,771	0,770	0,771	0,771
2,00	0,763	0,759	0,760	0,761
3,00	0,774	0,771	0,769	0,771
4,00	0,730	0,726	0,725	0,727
5,00	0,676	0,673	0,673	0,674
5,75	0,618	0,620	0,617	0,618
6,00	0,659	0,660	0,658	0,659
7,00	0,692	0,692	0,691	0,692
8,00	0,745	0,741	0,741	0,742
9,00	0,757	0,760	0,757	0,758
10,00	0,763	0,762	0,764	0,763
11,00	0,776	0,776	0,780	0,777
11,50	0,776	0,772	0,772	0,773
12,00	0,756	0,753	0,753	0,754
13,00	0,750	0,754	0,750	0,751
14,00	0,712	0,715	0,713	0,713
15,00	0,669	0,672	0,669	0,670
16,00	0,623	0,619	0,619	0,620
17,00	0,561	0,560	0,559	0,560
17,25	0,602	0,598	0,601	0,600
18,00	0,580	0,579	0,582	0,580
19,00	0,662	0,663	0,666	0,664
20,00	0,716	0,711	0,710	0,712
21,00	0,752	0,749	0,749	0,750
22,00	0,762	0,760	0,761	0,761
23,00	0,765	0,763	0,766	0,765
24,00	0,770	0,769	0,770	0,770
25,00	0,744	0,743	0,744	0,744
26,00	0,720	0,716	0,719	0,718
27,00	0,668	0,666	0,666	0,667
28,00	0,558	0,556	0,557	0,557
28,75	0,579	0,579	0,581	0,580

PŘÍLOHA 7: MIKROMETRICKÉ MĚŘENÍ TLOUŠŤKY PROLISŮ

List 6/6

Matrice 60°, počáteční tloušťka vzorku $s_0 = 0,787$ mm, lisovací tlak 65 MPa

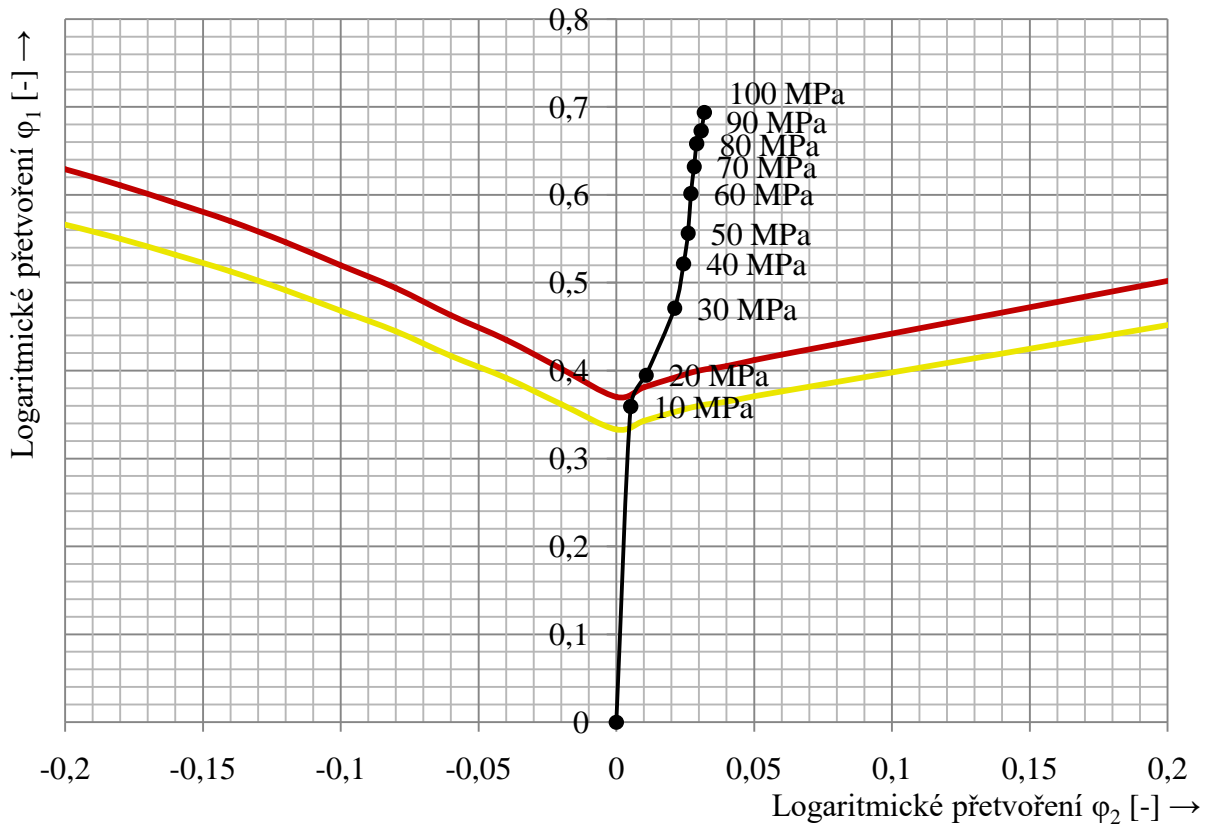
Směr měření: úhlopříčný

Délka měření l [mm]	Tloušťka s [mm]			
	Měření č. 1	Měření č. 2	Měření č. 3	Průměr
0,00	0,740	0,745	0,742	0,742
1,00	0,763	0,762	0,756	0,760
2,00	0,751	0,754	0,748	0,751
3,00	0,760	0,757	0,745	0,754
4,00	0,750	0,748	0,754	0,751
6,00	0,730	0,728	0,733	0,730
7,00	0,719	0,721	0,724	0,721
8,00	0,680	0,687	0,688	0,685
8,13	0,673	0,679	0,677	0,676
9,00	0,678	0,682	0,677	0,679
10,00	0,683	0,687	0,685	0,685
11,00	0,689	0,693	0,688	0,690
12,00	0,707	0,713	0,709	0,710
13,00	0,708	0,713	0,712	0,711
14,00	0,714	0,711	0,711	0,712
15,00	0,731	0,727	0,726	0,728
16,00	0,735	0,730	0,731	0,732
16,26	0,734	0,739	0,735	0,736
17,00	0,726	0,731	0,727	0,728
18,00	0,719	0,724	0,720	0,721
19,00	0,660	0,665	0,661	0,662
20,00	0,643	0,638	0,639	0,640
21,00	0,588	0,585	0,585	0,586
22,00	0,581	0,578	0,578	0,579
23,00	0,560	0,557	0,557	0,558
24,39	0,578	0,580	0,577	0,578
25,00	0,554	0,554	0,557	0,555
26,00	0,595	0,595	0,598	0,596
27,00	0,691	0,688	0,688	0,689
28,00	0,707	0,703	0,702	0,704
29,00	0,738	0,733	0,734	0,735
30,00	0,738	0,733	0,734	0,735
31,00	0,737	0,732	0,733	0,734
32,00	0,739	0,734	0,735	0,736
32,52	0,741	0,736	0,737	0,738
33,00	0,738	0,733	0,734	0,735
34,00	0,732	0,733	0,737	0,734
35,00	0,731	0,732	0,736	0,733
36,00	0,715	0,716	0,720	0,717
37,00	0,656	0,652	0,651	0,653
38,00	0,614	0,611	0,610	0,612
39,00	0,596	0,593	0,593	0,594
40,00	0,554	0,551	0,551	0,552
40,65	0,556	0,553	0,553	0,554

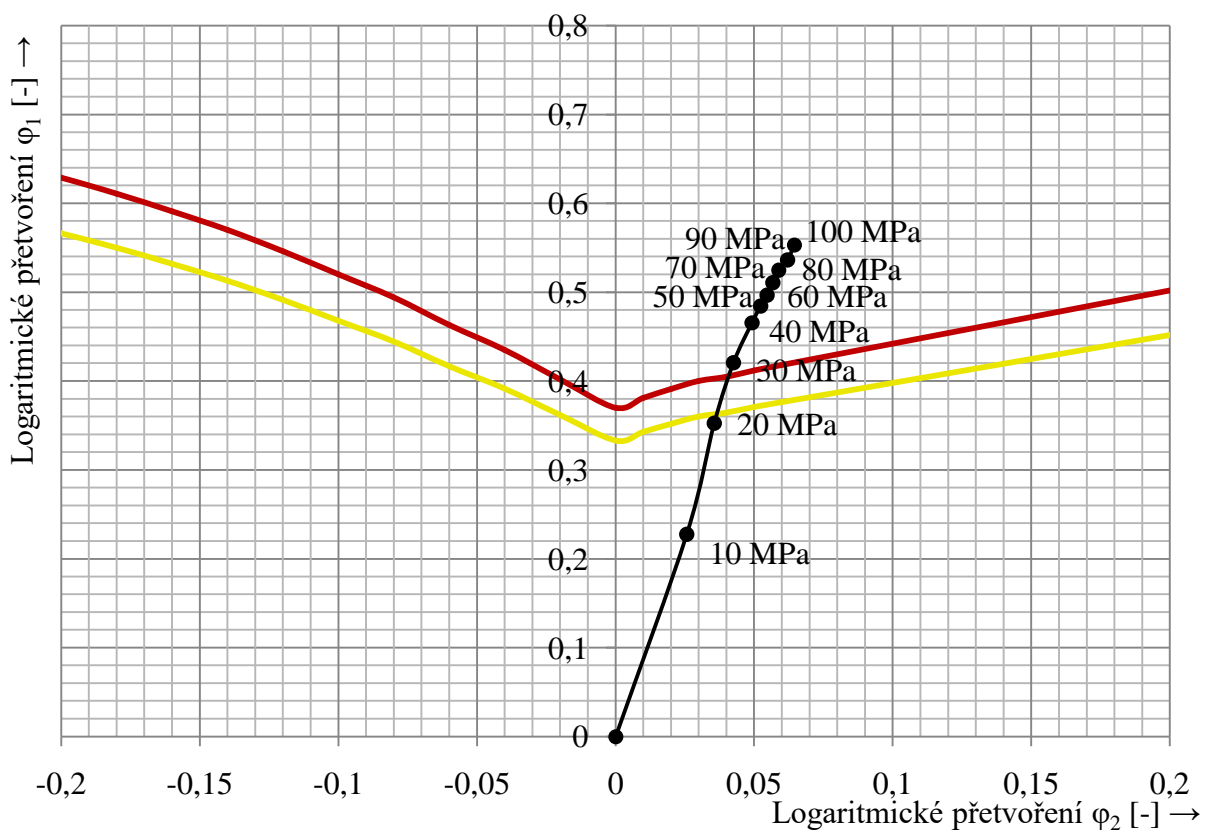
PŘÍLOHA 8: MEZNÍ TVÁŘITELNOST JEHLANOVITÉHO TVARU DLE FLD

List 1/9

Strukturovaný povrch 90°, tloušťka materiálu $s_0 = 0,478$ mm, lisovací tlak $p = 0$ až 100 MPa



Zaoblení matrice $R = 0,2$ mm

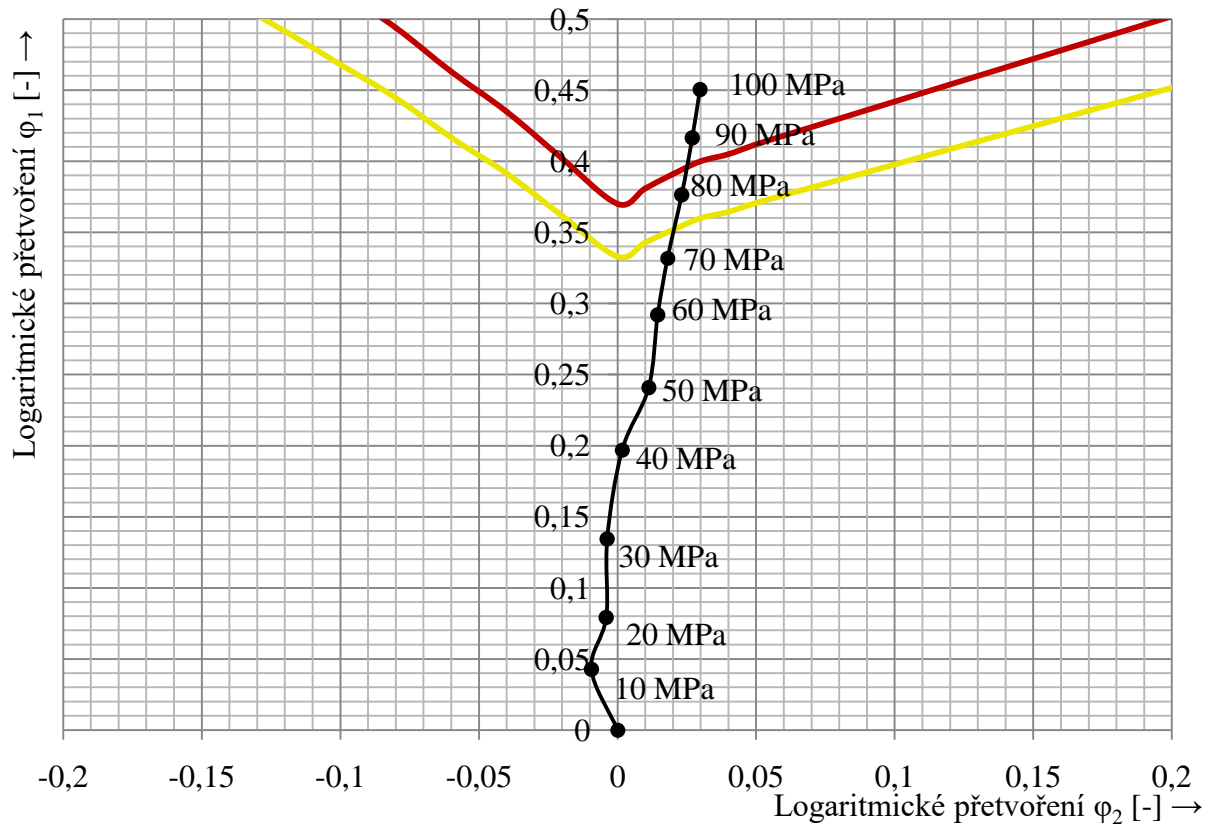


Zaoblení matrice $R = 0,5$ mm

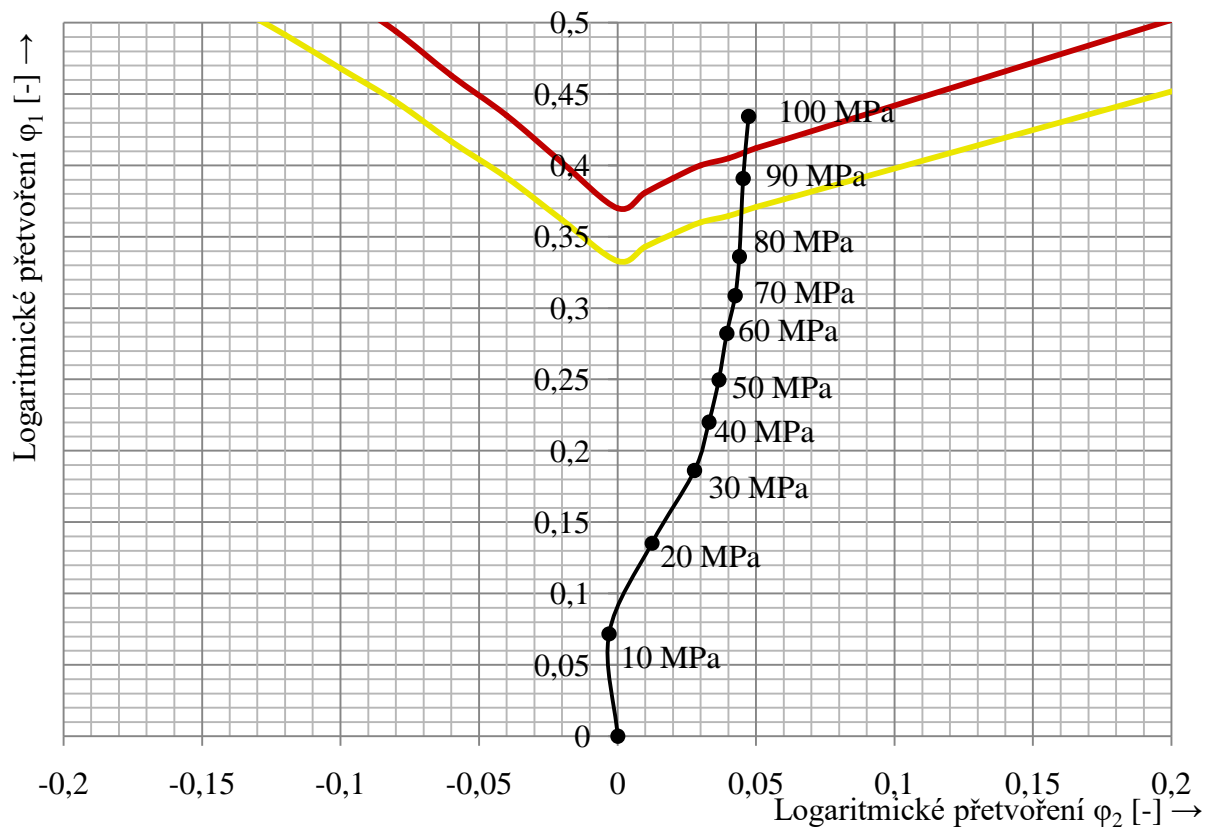
PŘÍLOHA 8: MEZNÍ TVÁŘITELNOST JEHLANOVITÉHO TVARU DLE FLD

List 2/9

Strukturovaný povrch 90°, tloušťka materiálu $s_0 = 0,478$ mm, lisovací tlak $p = 0$ až 100 MPa



Zaoblení matrice $R = 1$ mm

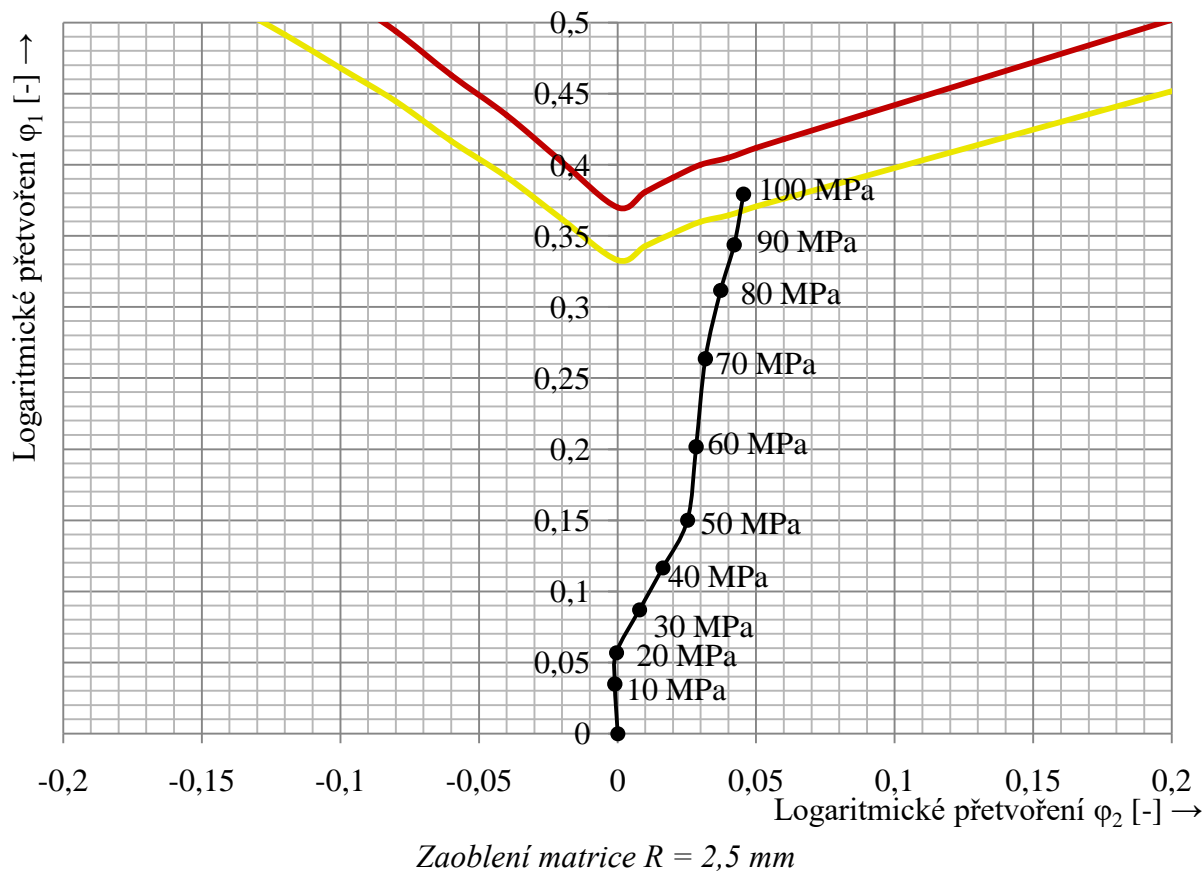
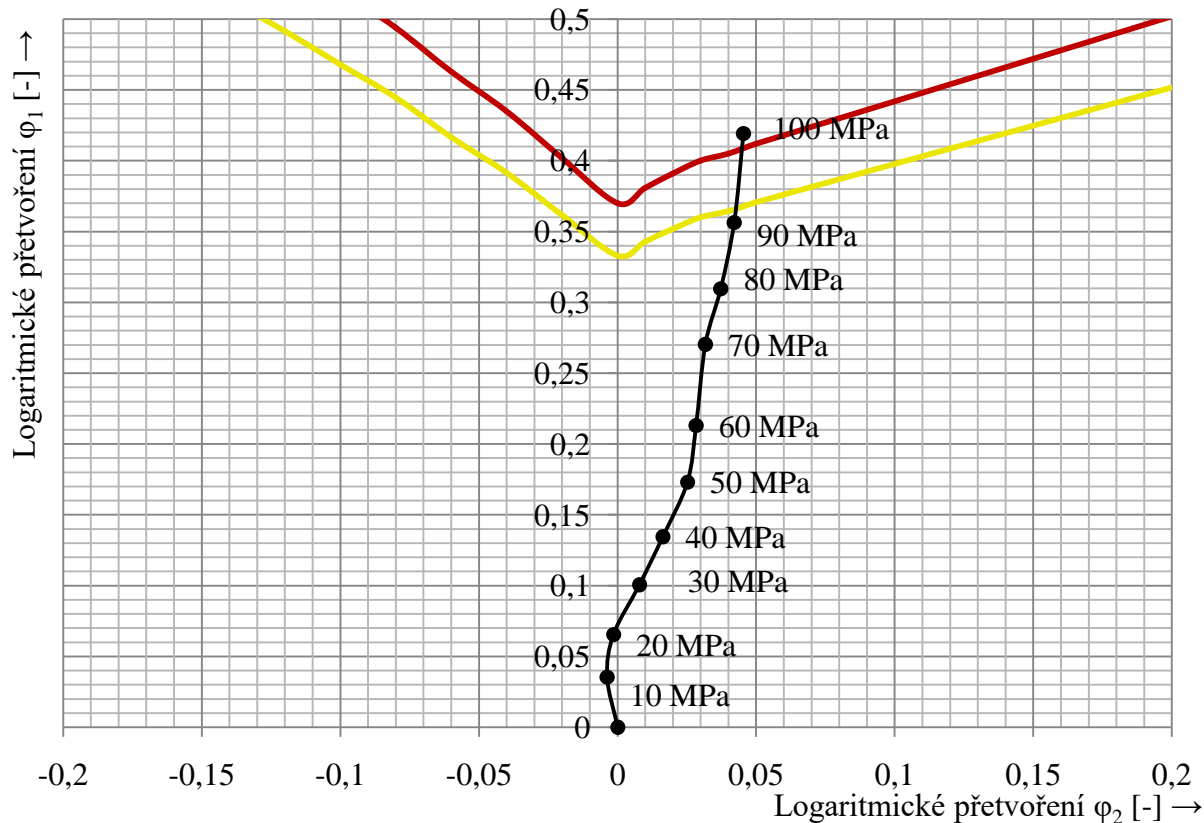


Zaoblení matrice $R = 1,5$ mm

PŘÍLOHA 8: MEZNÍ TVÁŘITELNOST JEHLANOVITÉHO TVARU DLE FLD

List 3/9

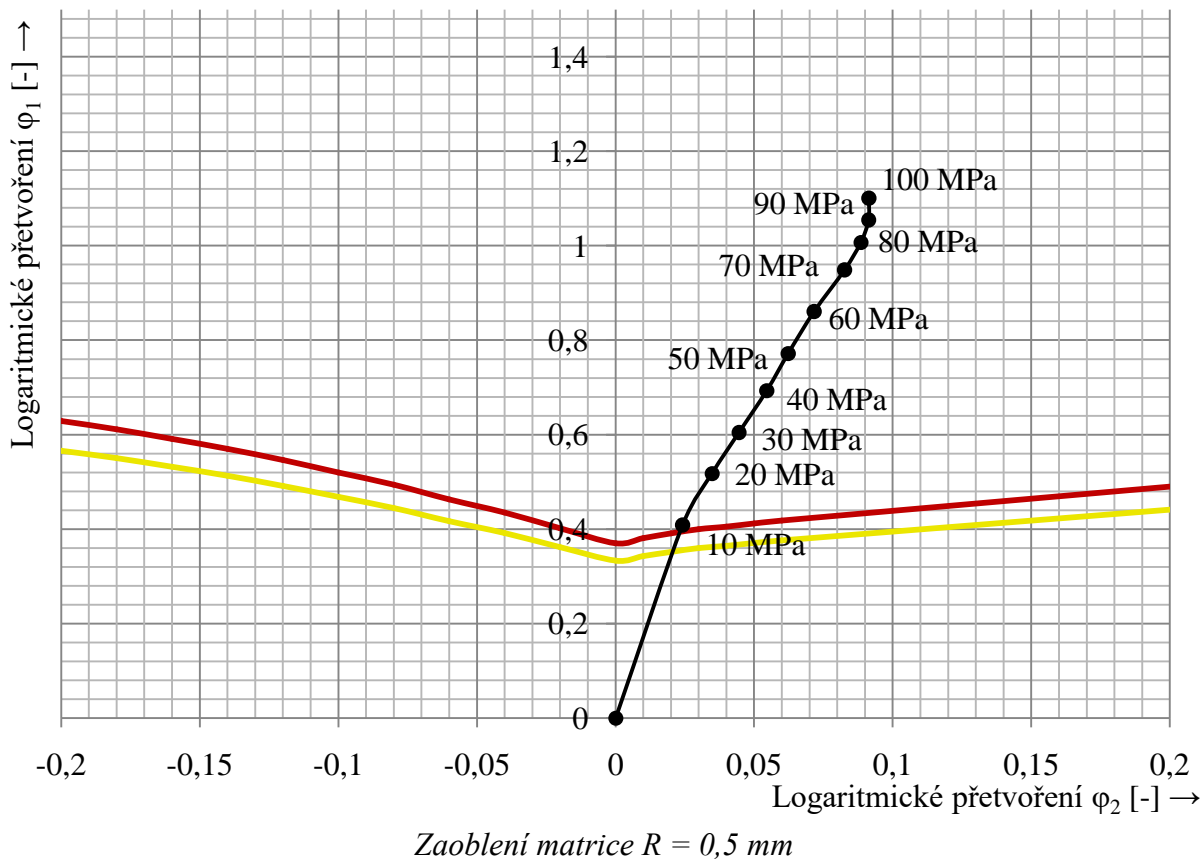
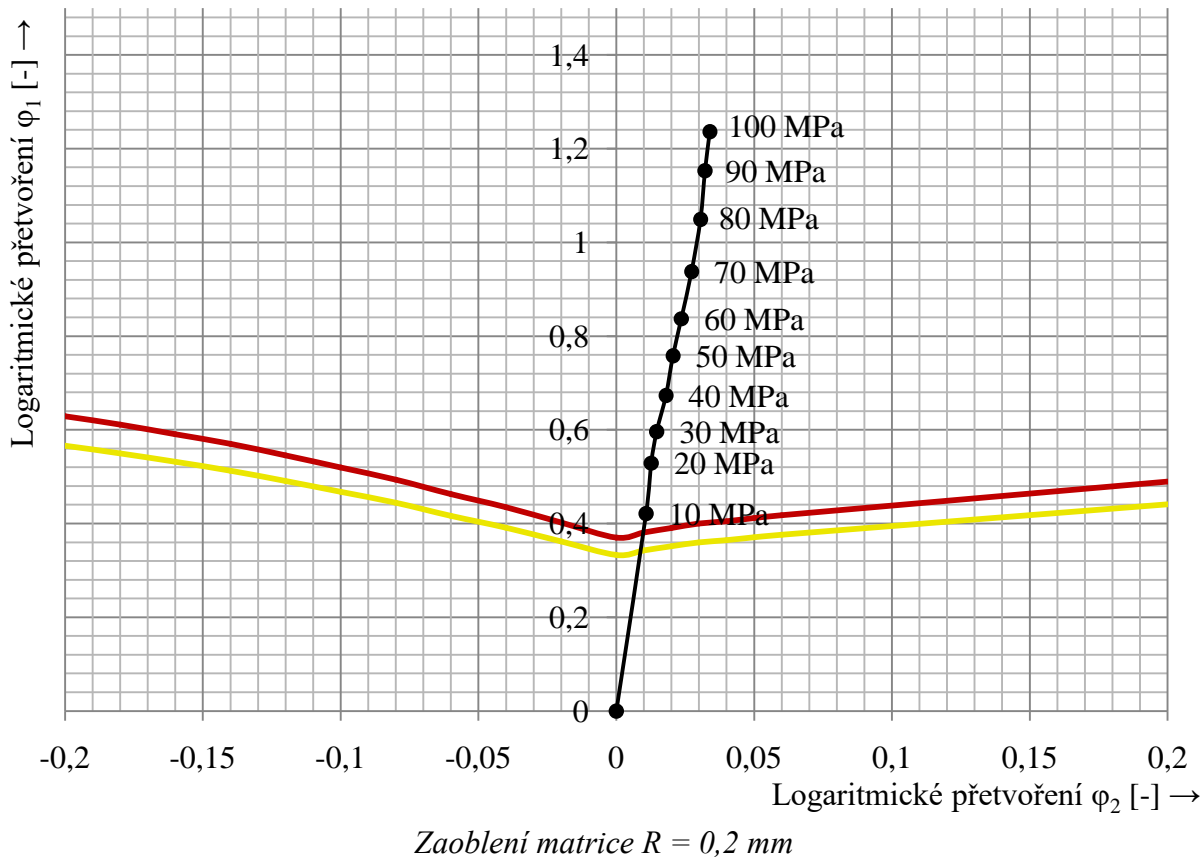
Strukturovaný povrch 90°, tloušťka materiálu $s_0 = 0,478$ mm, lisovací tlak $p = 0$ až 100 MPa



PŘÍLOHA 8: MEZNÍ TVÁŘITELNOST JEHLANOVITÉHO TVARU DLE FLD

List 4/9

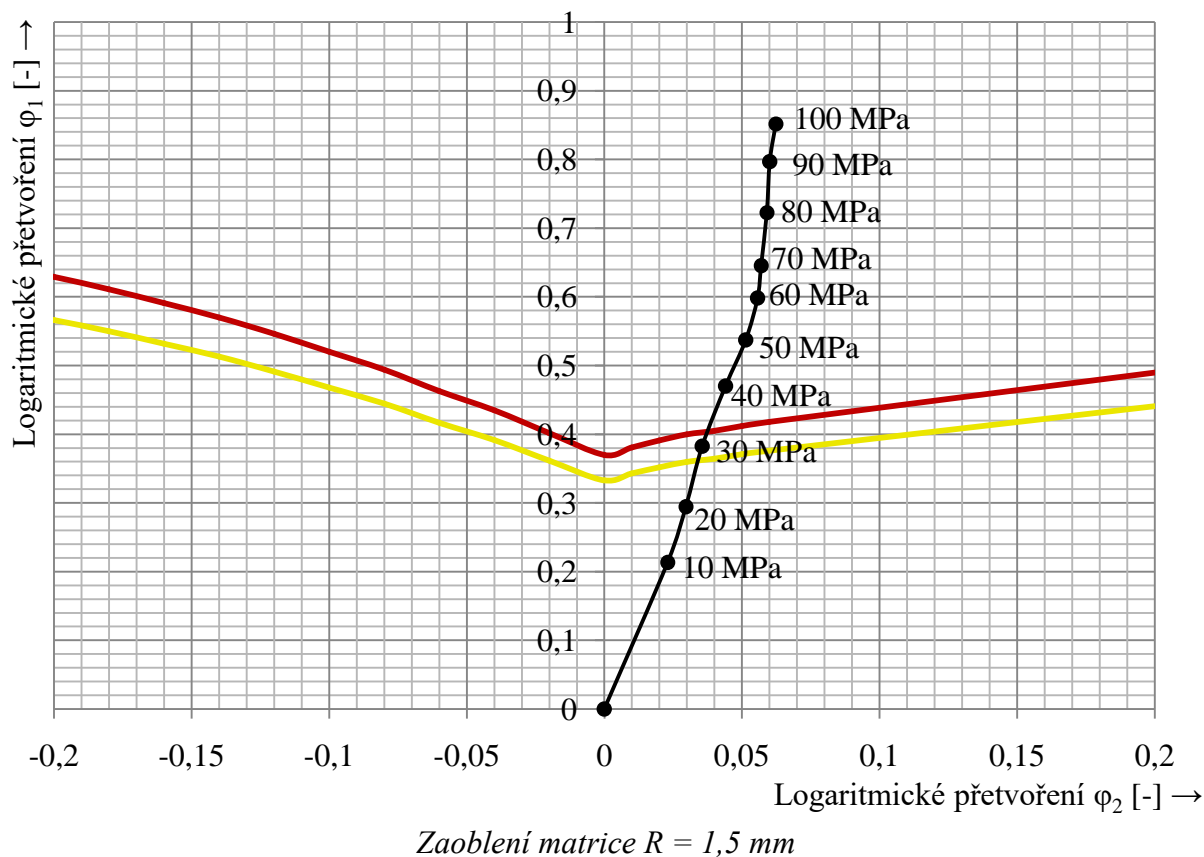
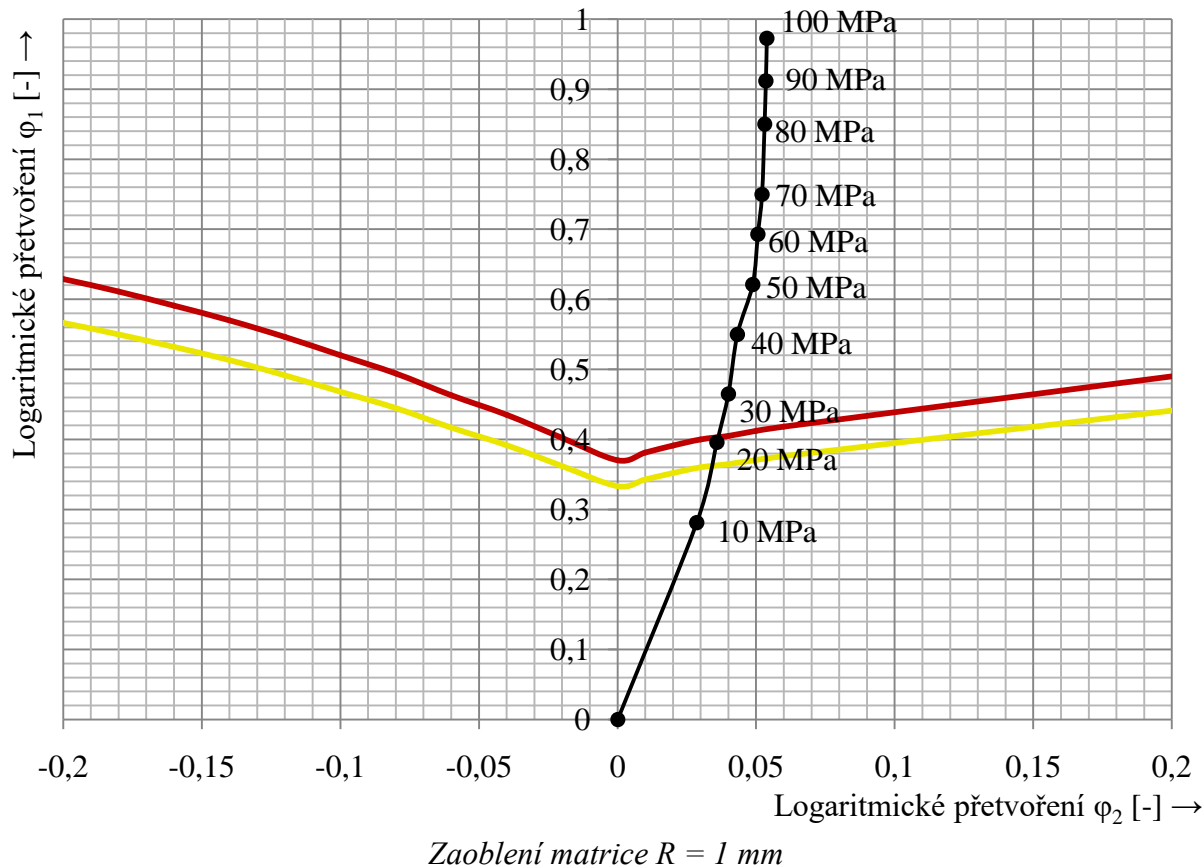
Strukturovaný povrch 60°, tloušťka materiálu $s_0 = 0,478$ mm, lisovací tlak $p = 0$ až 100 MPa



PŘÍLOHA 8: MEZNÍ TVÁŘITELNOST JEHLANOVITÉHO TVARU DLE FLD

List 5/9

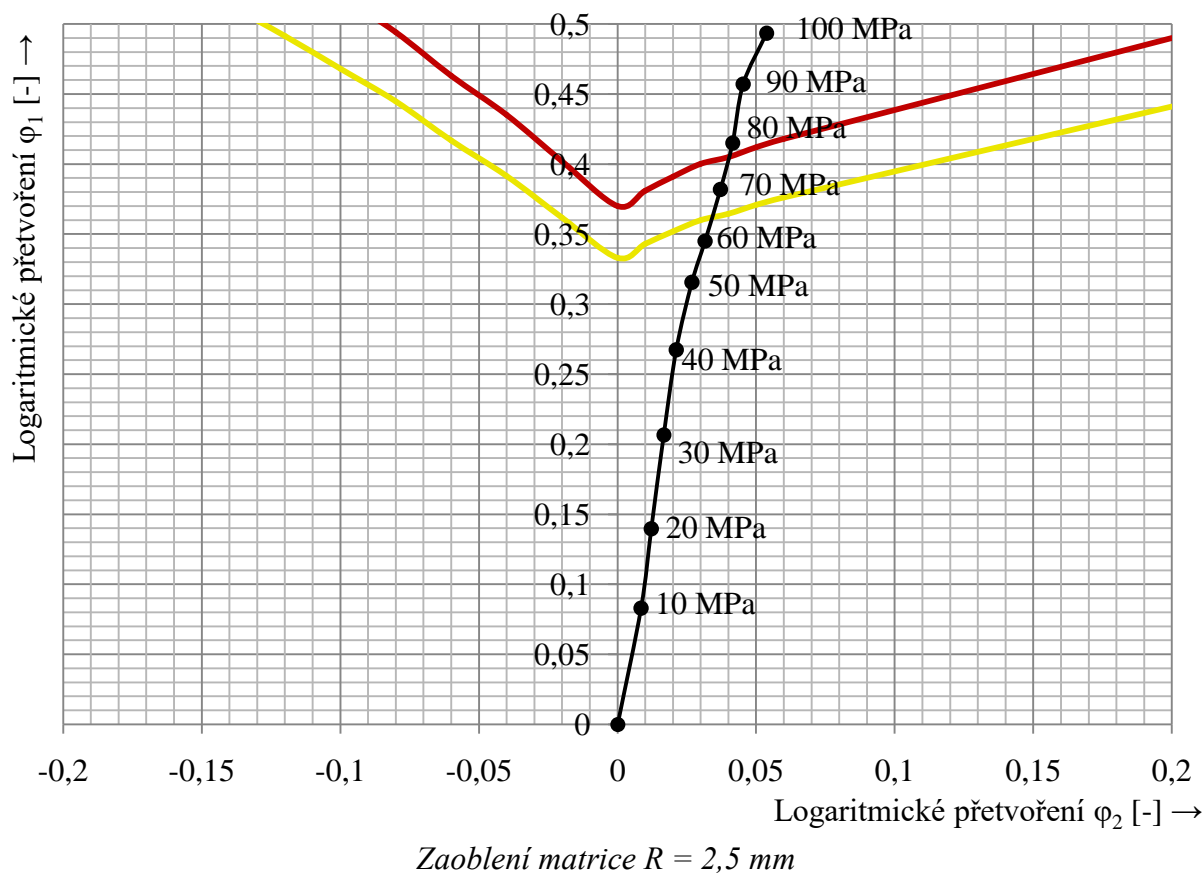
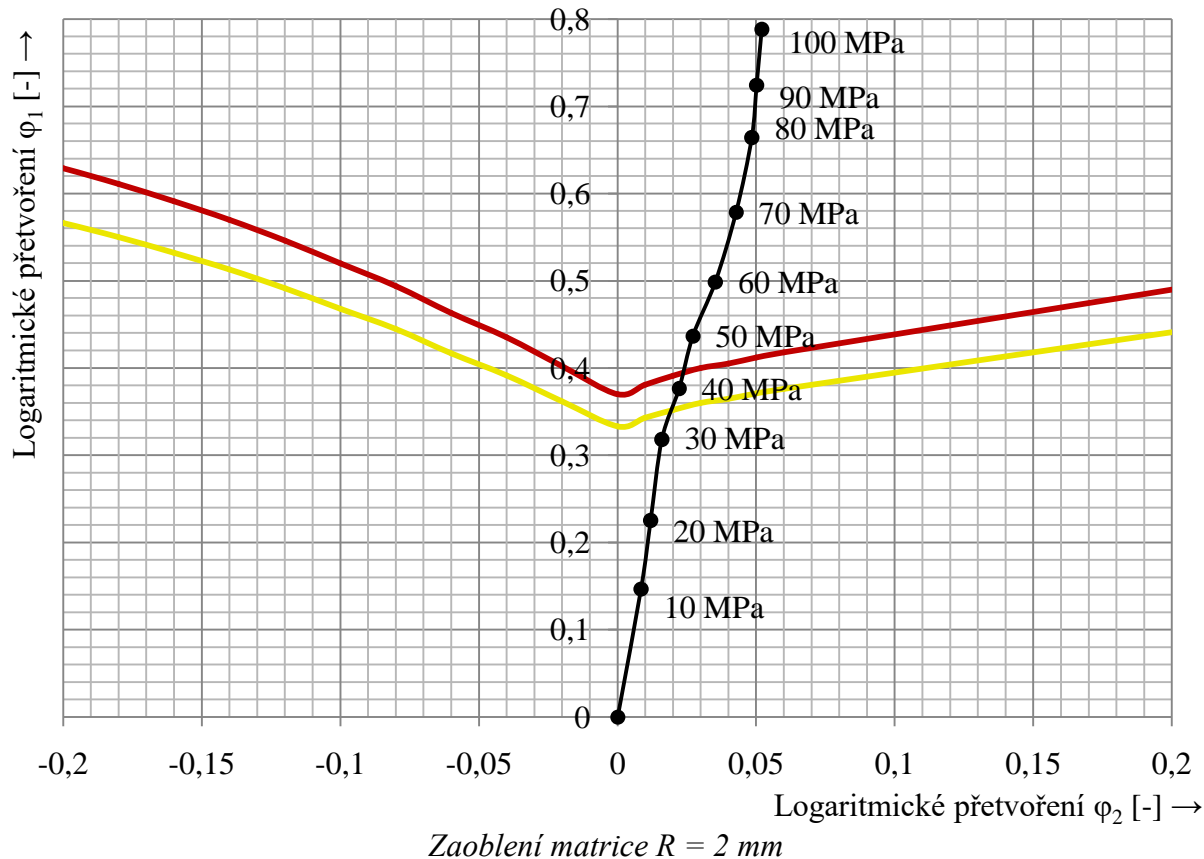
Strukturovaný povrch 60°, tloušťka materiálu $s_0 = 0,478$ mm, lisovací tlak $p = 0$ až 100 MPa



PŘÍLOHA 8: MEZNÍ TVÁŘITELNOST JEHLANOVITÉHO TVARU DLE FLD

List 6/9

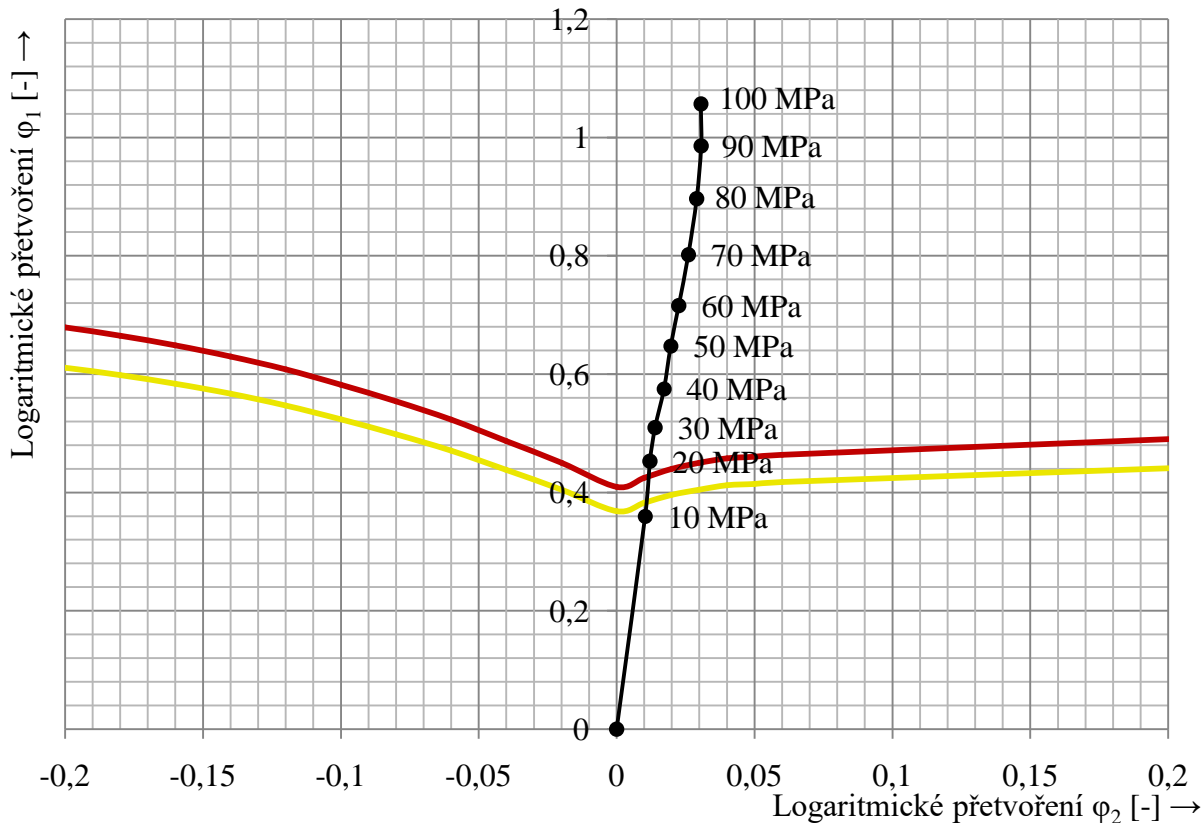
Strukturovaný povrch 60°, tloušťka materiálu $s_0 = 0,478$ mm, lisovací tlak $p = 0$ až 100 MPa



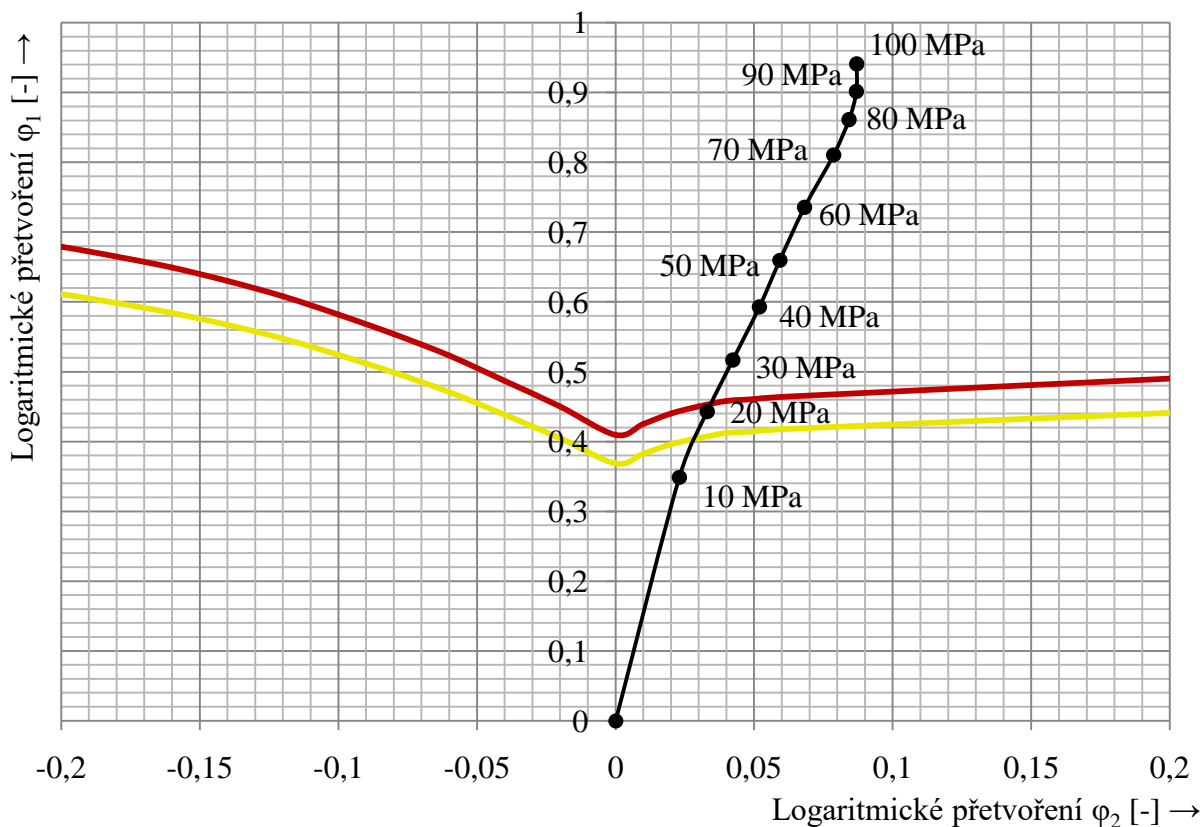
PŘÍLOHA 8: MEZNÍ TVÁŘITELNOST JEHLANOVITÉHO TVARU DLE FLD

List 7/9

Strukturovaný povrch 60°, tloušťka materiálu $s_0 = 0,787$ mm, lisovací tlak $p = 0$ až 100 MPa



Zaoblení matrice $R = 0,2$ mm

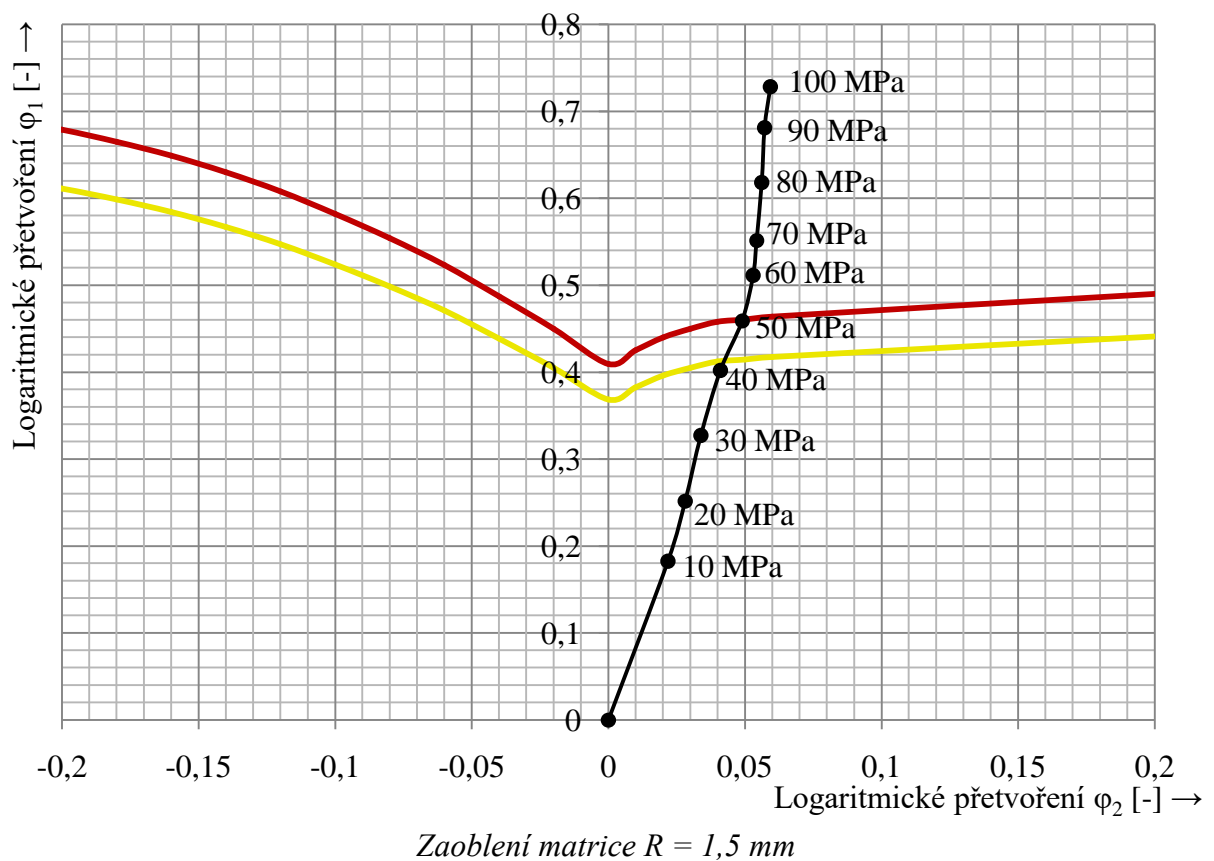
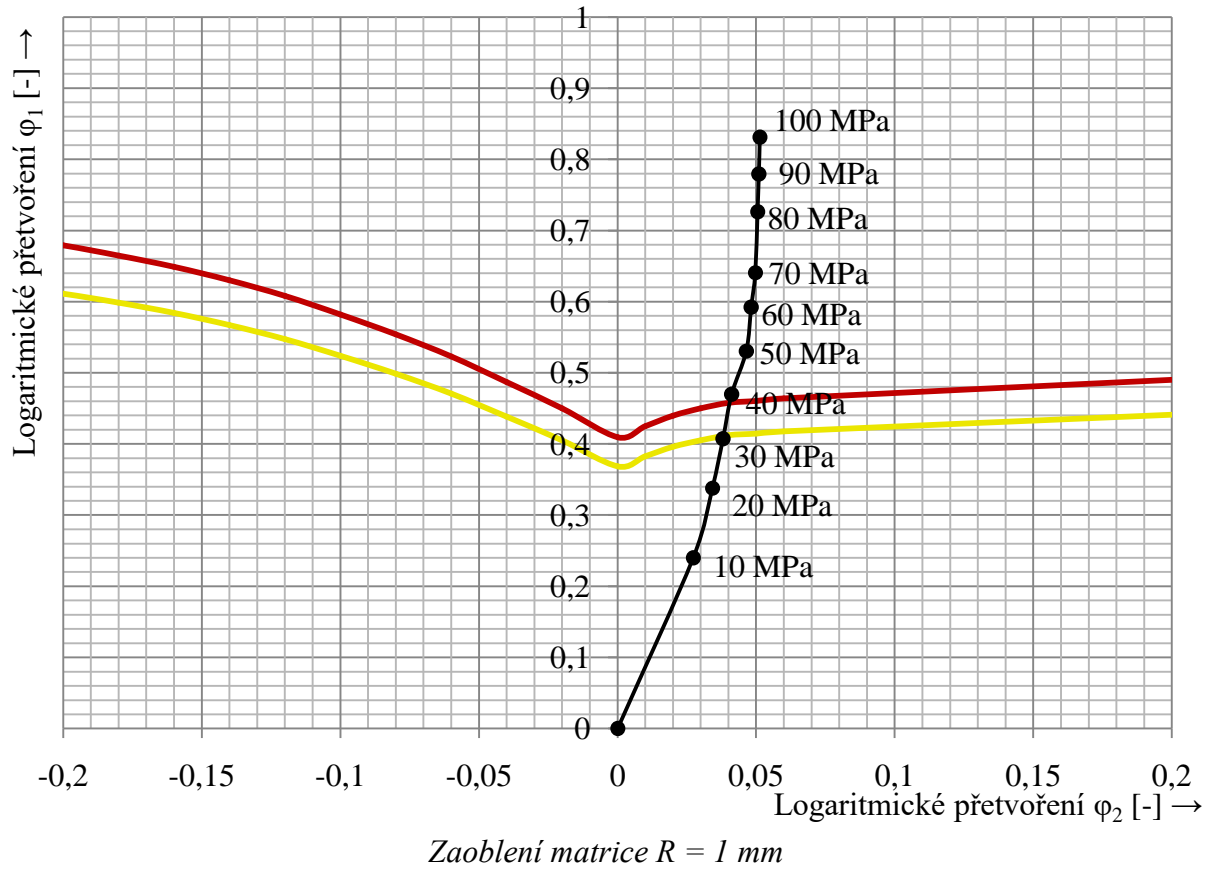


Zaoblení matrice $R = 0,5$ mm

PŘÍLOHA 8: MEZNÍ TVÁŘITELNOST JEHLANOVITÉHO TVARU DLE FLD

List 8/9

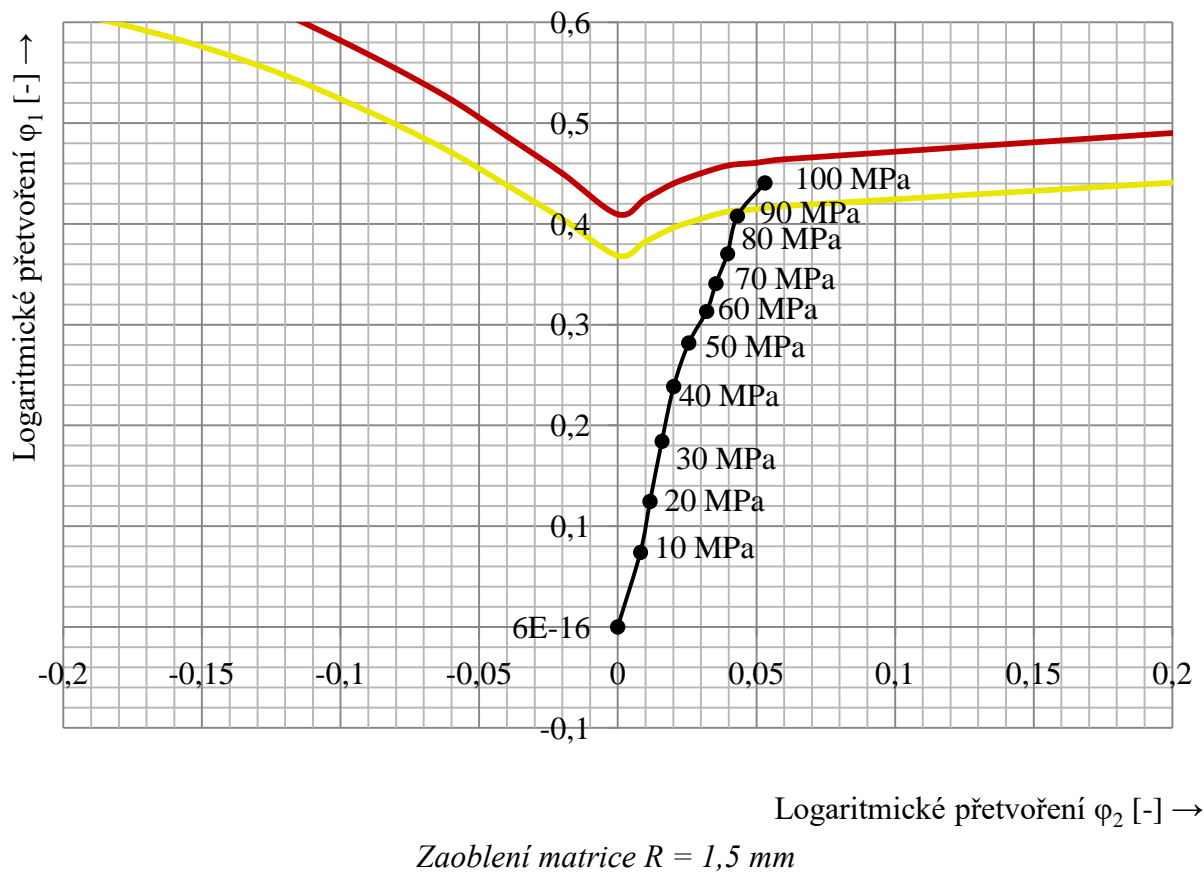
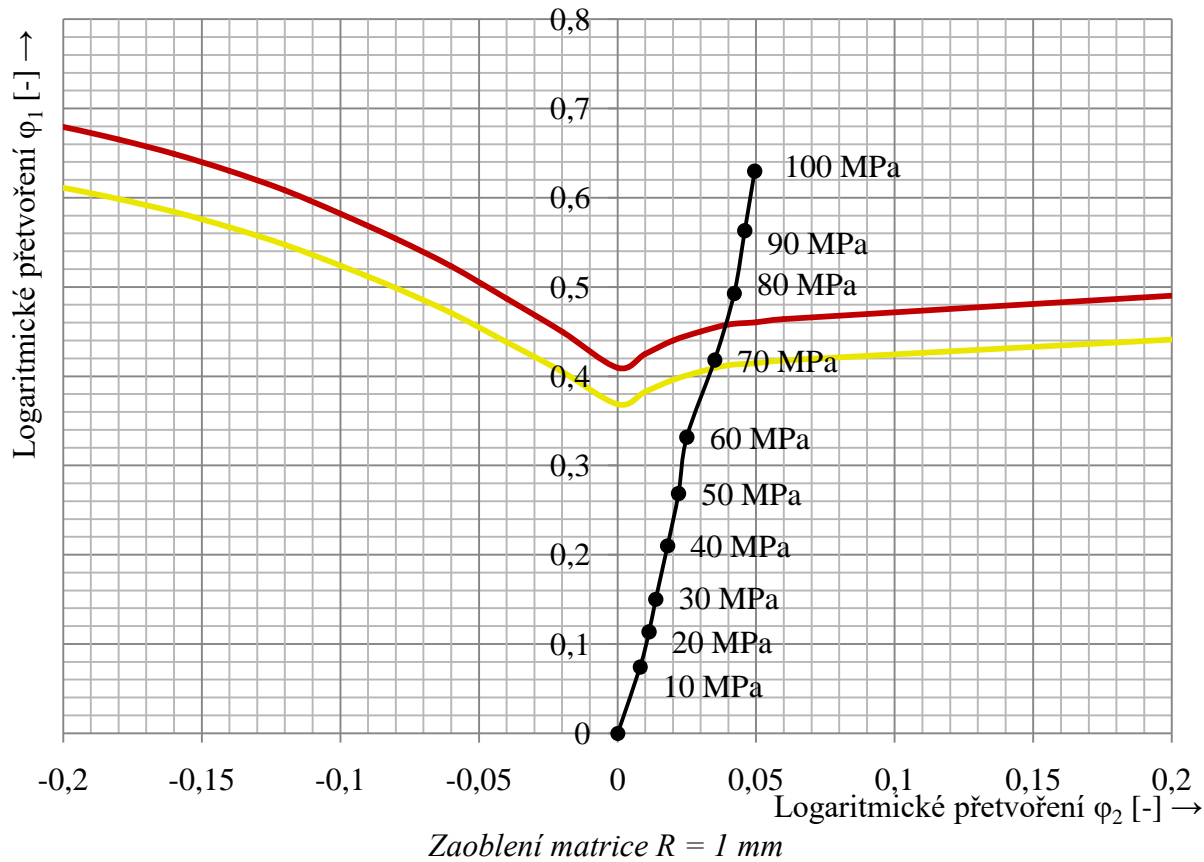
Strukturovaný povrch 60°, tloušťka materiálu $s_0 = 0,787$ mm, lisovací tlak $p = 0$ až 100 MPa



PŘÍLOHA 8: MEZNÍ TVÁŘITELNOST JEHLANOVITÉHO TVARU DLE FLD

List 9/9

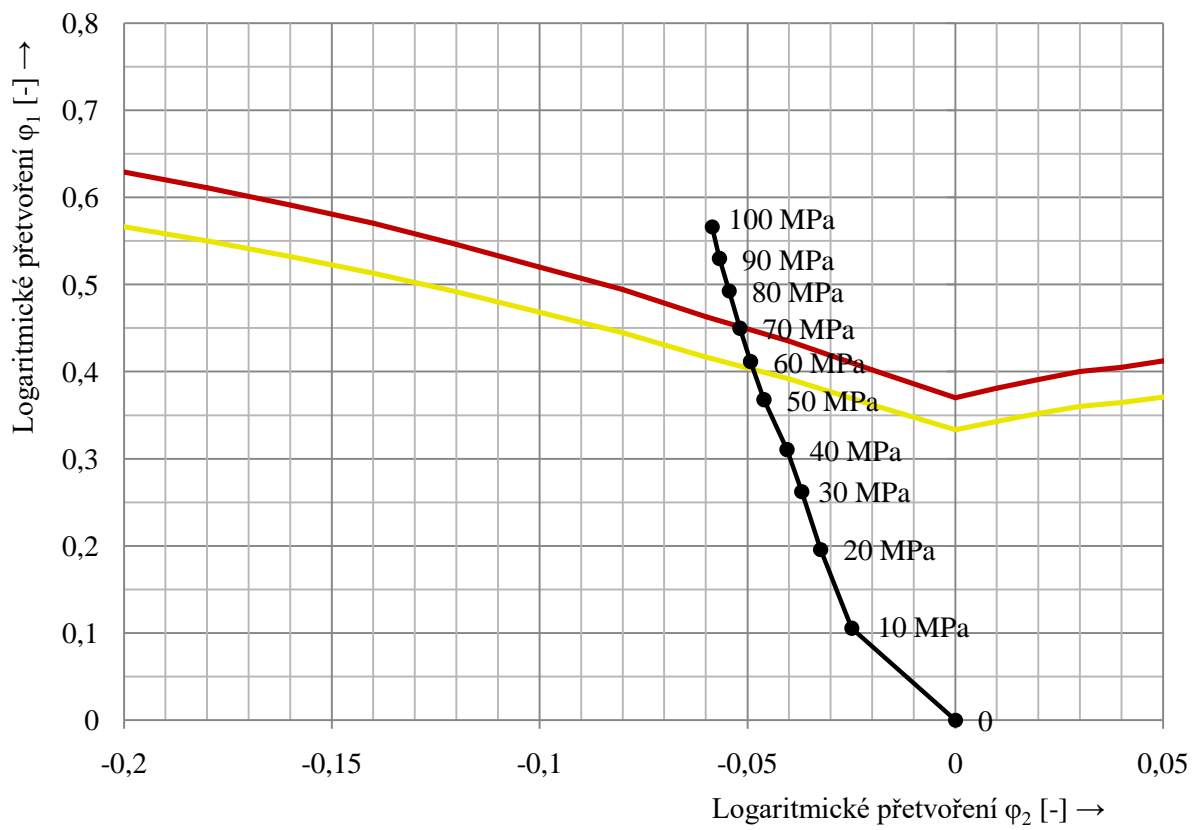
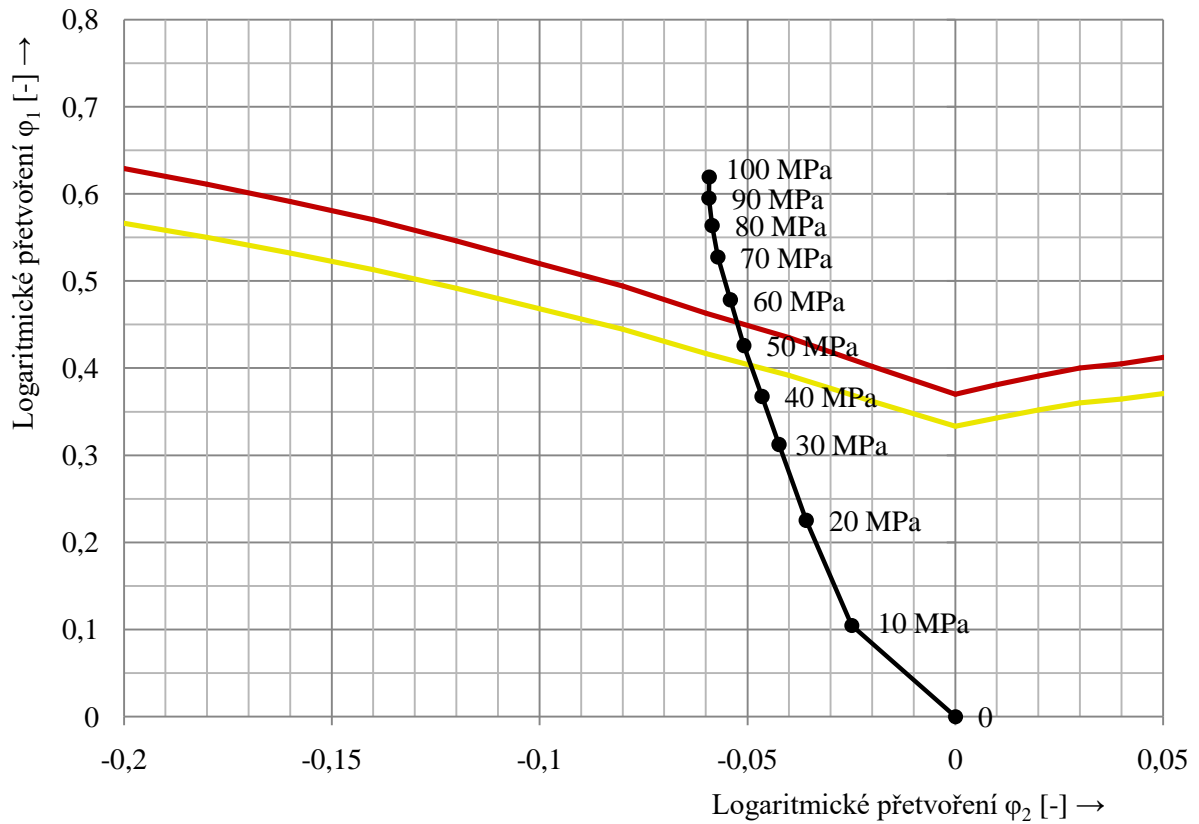
Strukturovaný povrch 60°, tloušťka materiálu $s_0 = 0,787$ mm, lisovací tlak $p = 0$ až 100 MPa



PŘÍLOHA 9: MEZNÍ TVÁŘITELNOST OBLASTI SVARU DLE FLD

List 1/6

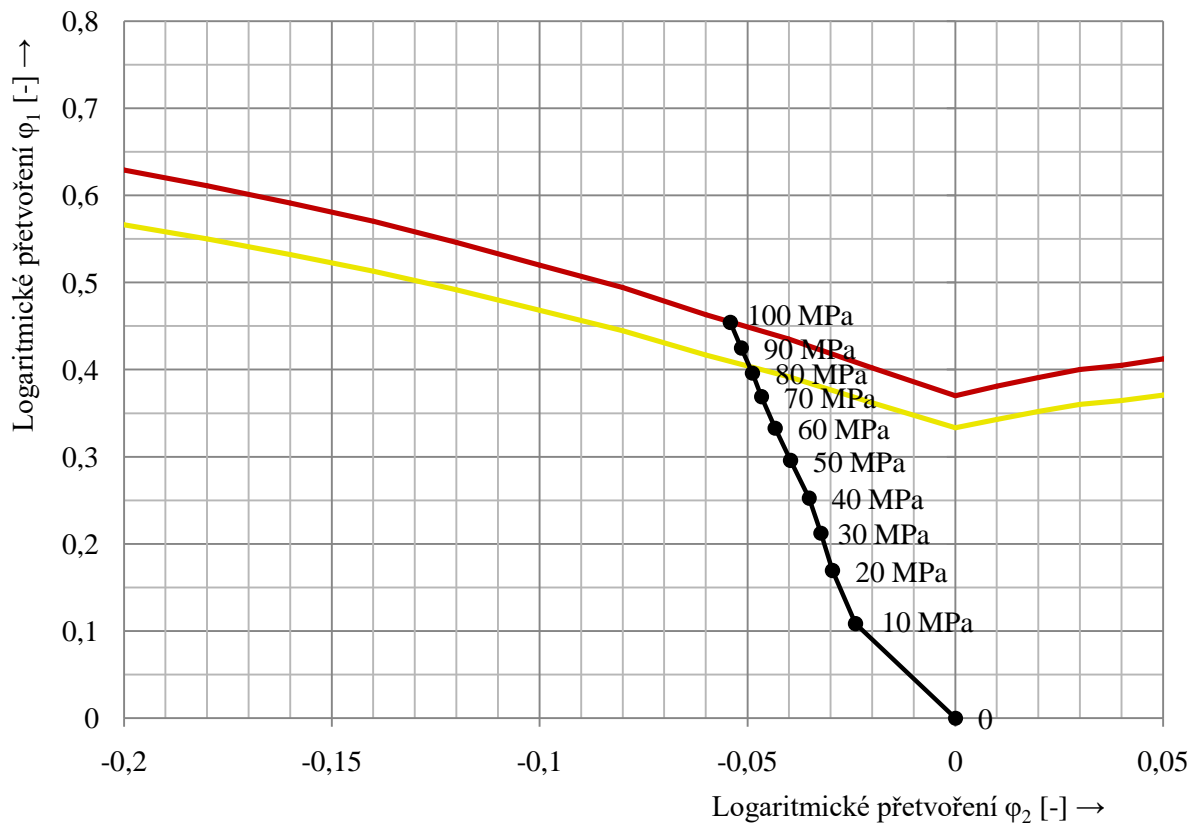
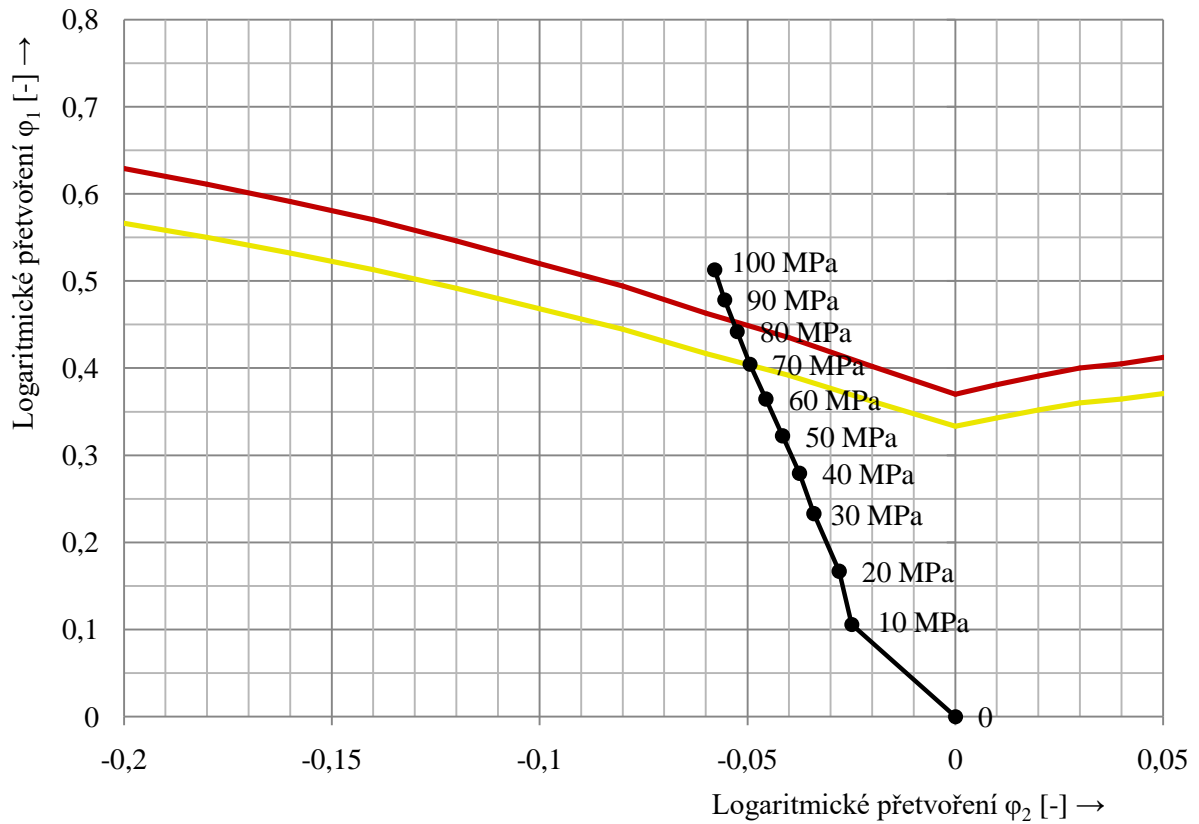
Strukturovaný povrch 90°, tloušťka materiálu $s_0 = 0,487$ mm, lisovací tlak $p = 0$ až 100 MPa



PŘÍLOHA 9: MEZNÍ TVÁŘITELNOST OBLASTI SVARU DLE FLD

List 2/6

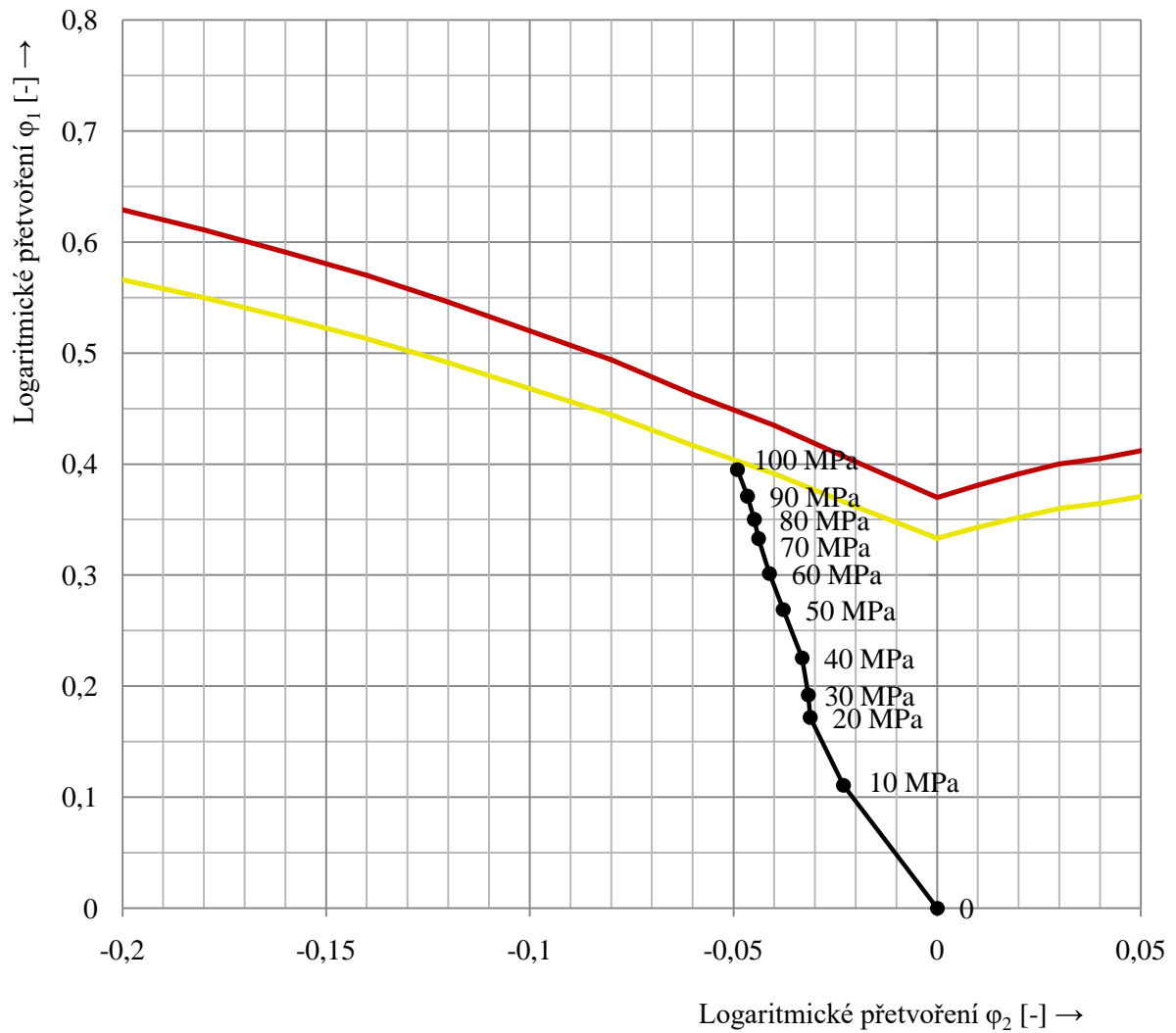
Strukturovaný povrch 90°, tloušťka materiálu $s_0 = 0,487$ mm, lisovací tlak $p = 0$ až 100 MPa



PŘÍLOHA 9: MEZNÍ TVÁŘITELNOST OBLASTI SVARU DLE FLD

List 3/6

Strukturovaný povrch 90°, tloušťka materiálu $s_0 = 0,487$ mm, lisovací tlak $p = 0$ až 100 MPa

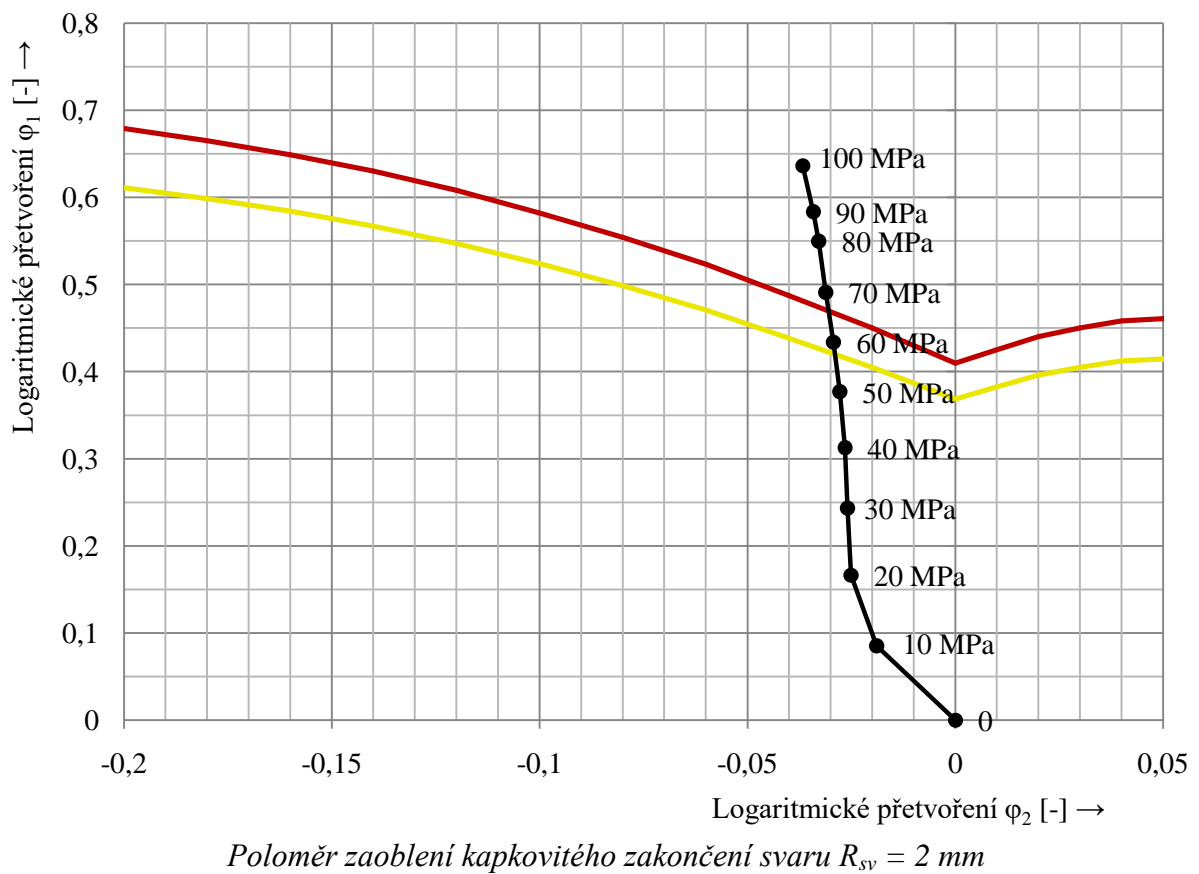
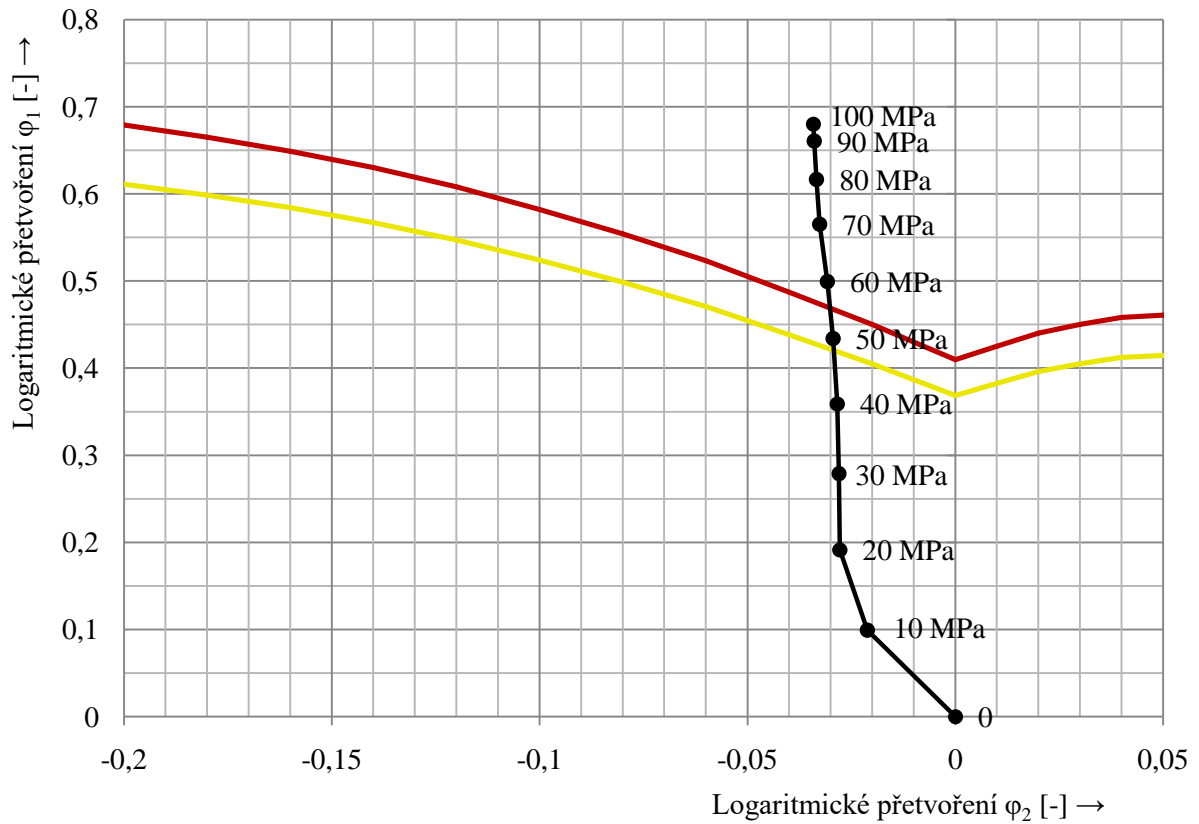


Poloměr zaoblení kapkovitého zakončení svaru $R_{sv} = 5$ mm

PŘÍLOHA 9: MEZNÍ TVÁŘITELNOST OBLASTI SVARU DLE FLD

List 4/6

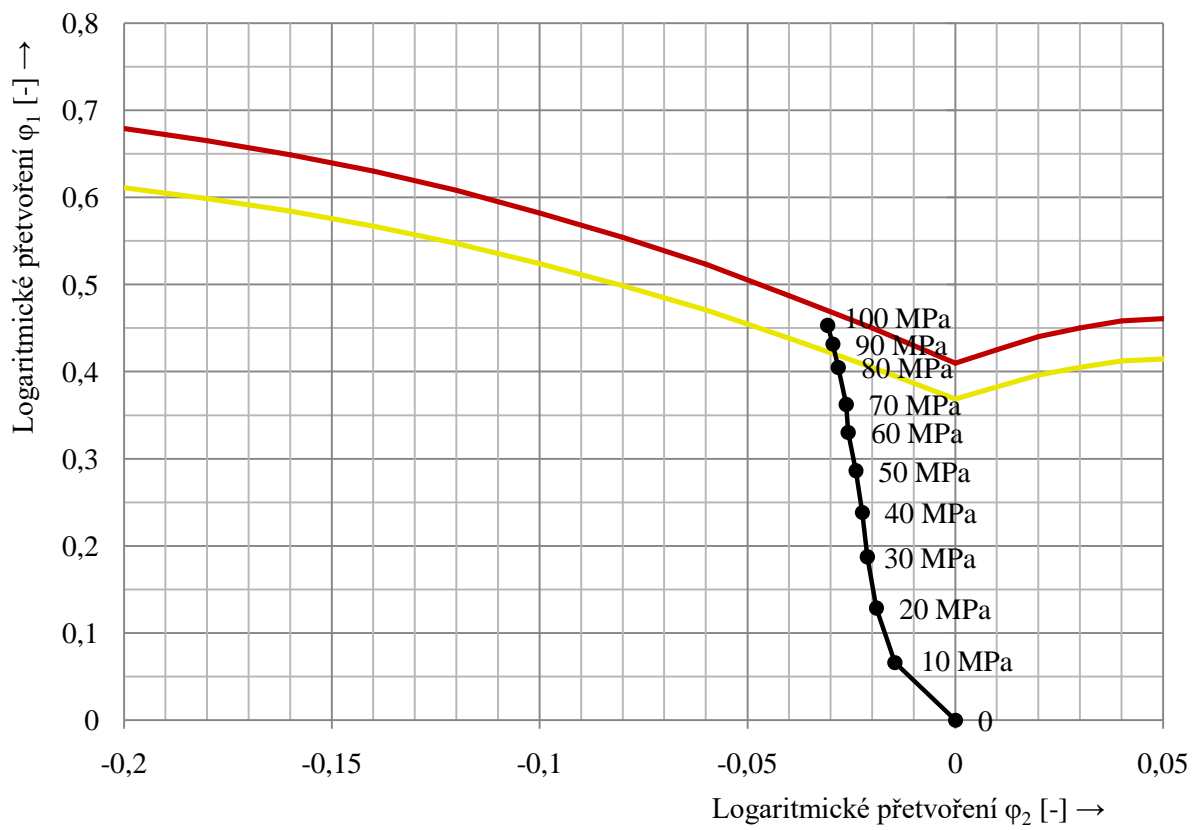
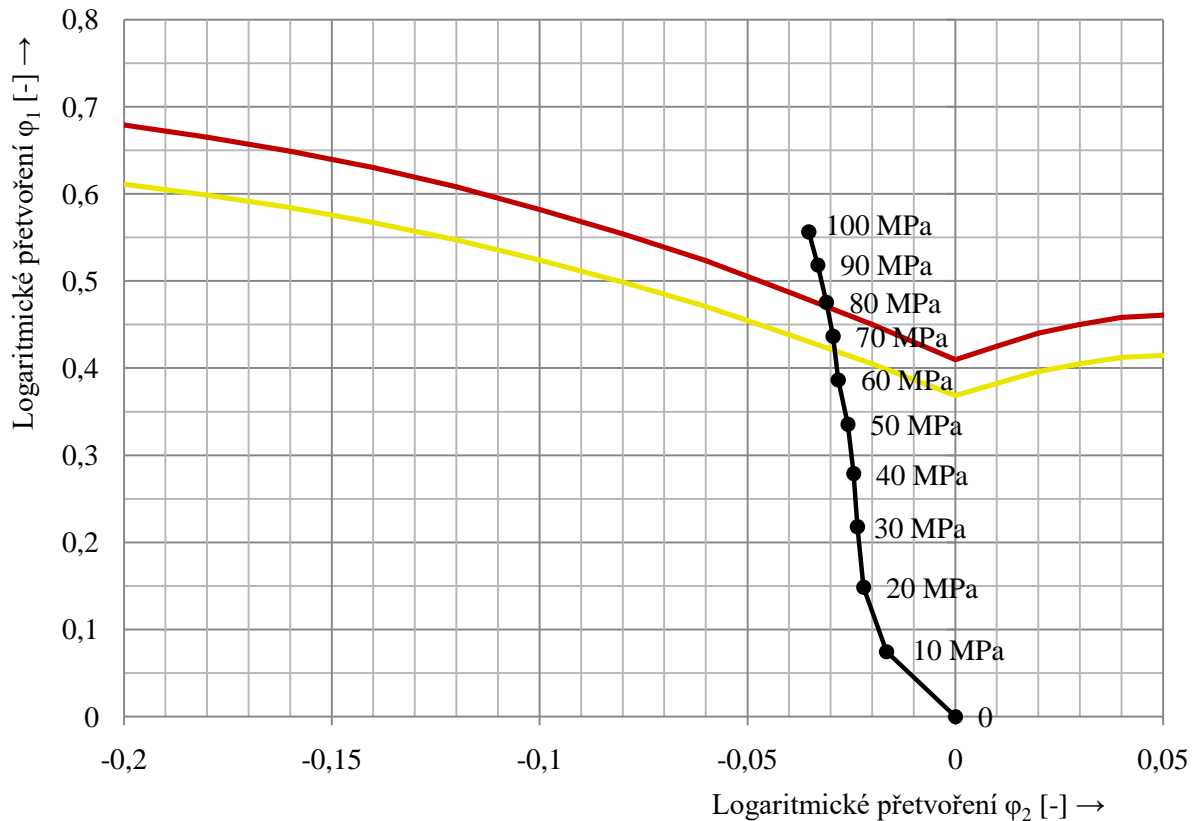
Strukturovaný povrch 60°, tloušťka materiálu $s_0 = 0,787$ mm, lisovací tlak $p = 0$ až 100 MPa



PŘÍLOHA 9: MEZNÍ TVÁŘITELNOST OBLASTI SVARU DLE FLD

List 5/6

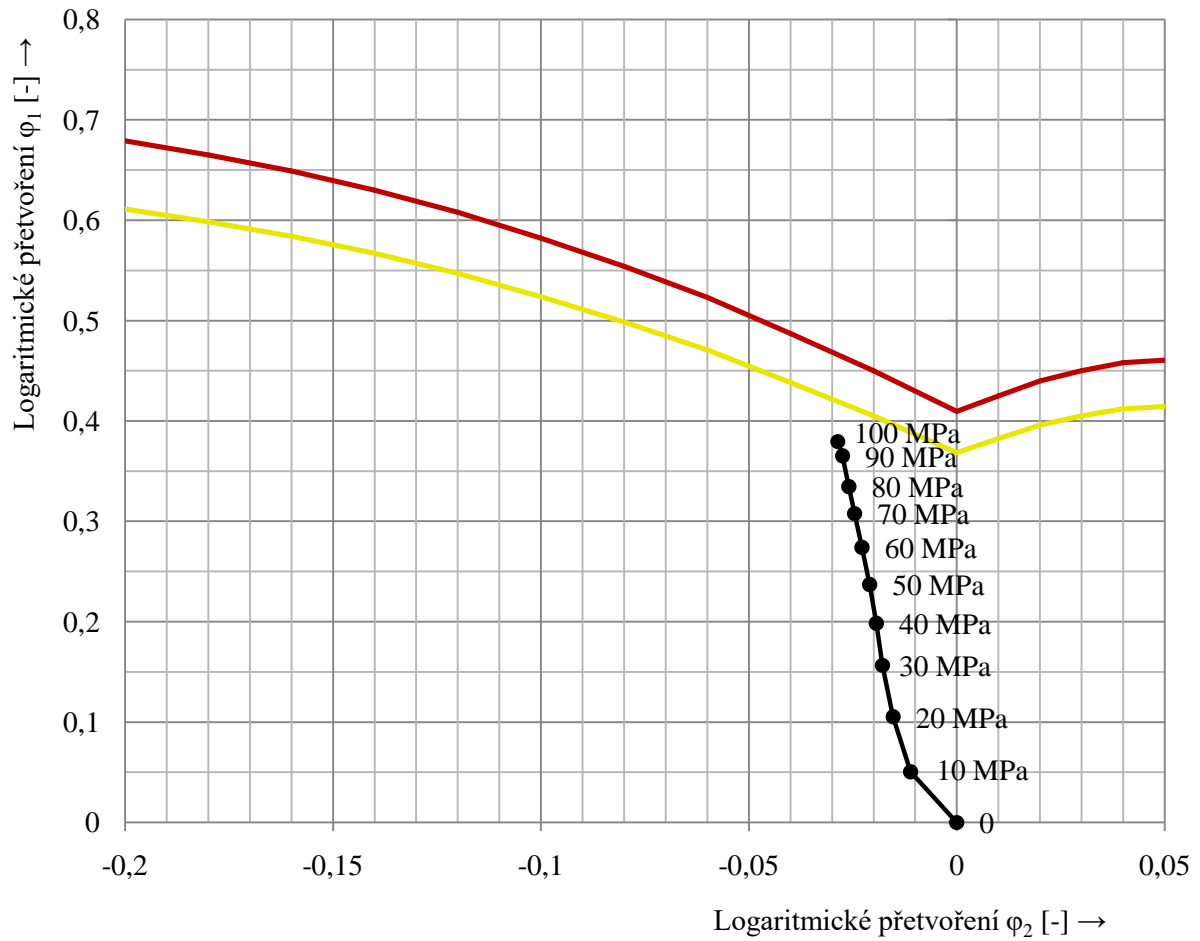
Strukturovaný povrch 60°, tloušťka materiálu $s_0 = 0,787$ mm, lisovací tlak $p = 0$ až 100 MPa



PŘÍLOHA 9: MEZNÍ TVÁŘITELNOST OBLASTI SVARU DLE FLD

List 6/6

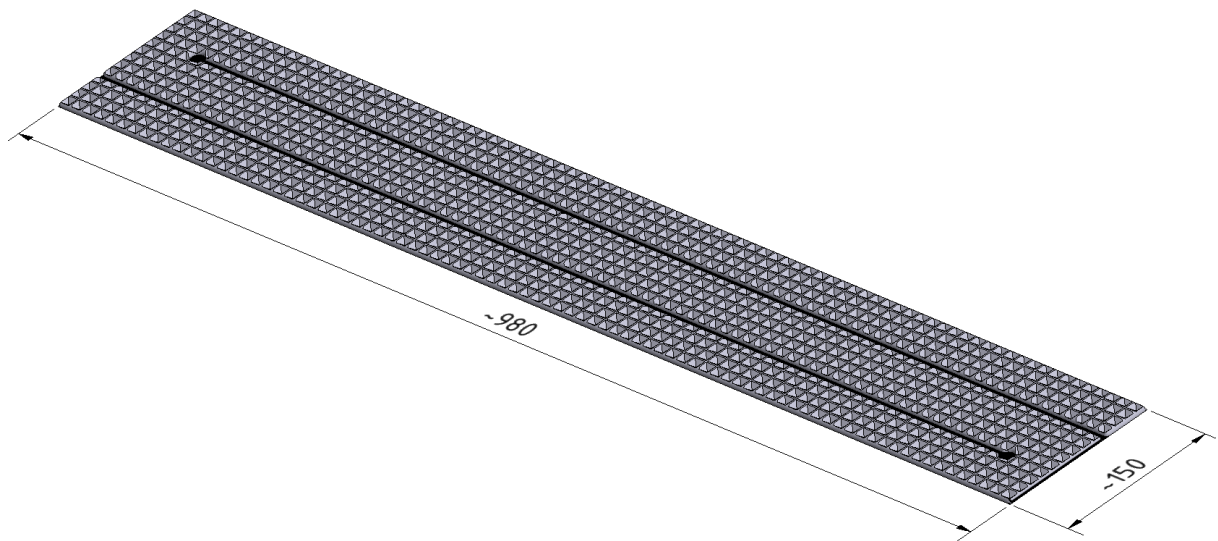
Strukturovaný povrch 60°, tloušťka materiálu $s_0 = 0,787$ mm, lisovací tlak $p = 0$ až 100 MPa



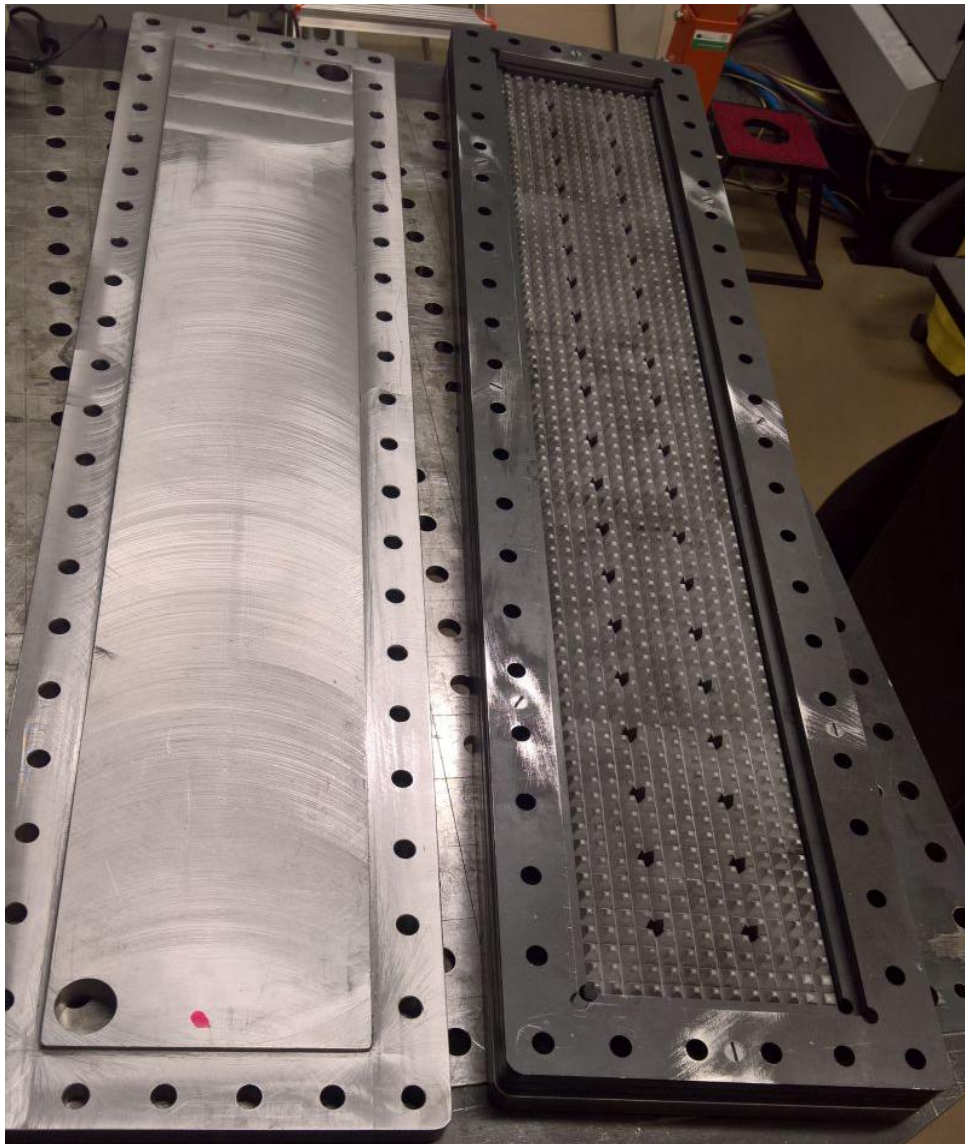
Poloměr zaoblení kapkovitého zakončení svaru $R_{sv} = 5$ mm

PŘÍLOHA 10: VÝROBA SEGMENTOVÝCH SOLÁRNÍCH ABSORBÉRŮ

List 1/1



3D model vylisované přímo protékané struktury (1 segmentu absorbéru)



Lisovací nástroj pro výrobu 1 segmentu absorbéru