ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie

Ověření velikosti deformací na malých designových hranách

Diplomová práce

Autor: Bc. Vít Šulc

Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Vedoucí práce: Ing. František Tatíček, Ph.D.

Praha 2015

ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro Bc. Víta ŠULCE

Program: Strojní inženýrství

Obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Název: Ověření velikosti deformací na malých designových hranách

Název anglicky: Verification of the magnitude of deformations on small design edges

Zásady pro vypracování:

1. Seznámení s problematikou
2. Možnosti určování deformací na designových hranách
3. Numerická simulace ostrých designových hran
4. Porovnání provedených experimentů
5. Závěrečné zhodnocení

Vedoucí diplomové práce: Ing. František Tatíček, Ph.D.

Konzultant: Ing. Tomáš Pačák

Datum zadání diplomové práce: 10. 4. 2015

Termín odevzdání diplomové práce: 19. 6. 2015

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádné neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

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

Zadání diplomové práce převzal dne: 28.4.15

.....
Student

.....
Vedoucí ústavu

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE Fakulta strojní -3-

.....
Děkan

V Praze dne 8. 4. 2015

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Františku Tatíčkovi Ph.D. a konzultantovi Ing. Tomáši Páčákovi za vedení, odbornou pomoc, za jejich podporu, poskytnutí techniky a zázemí při zpracování této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Radku Hulínovi a společnosti ŠKODA AUTO a.s. za poskytnutí pomoci a materiálů pro realizaci diplomové práce.

Anotace

Vysoká škola:	ČVUT v Praze Fakulta strojní
Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	Ing. Kolařík Ladislav, Ph.D.
Téma diplomové práce:	**Ověření velikosti deformací na malých designových hranách**
Akademický rok:	2014/2015
Autor:	Bc. Vít Šulc
Vedoucí diplomové práce:	Ing. František Tatíček, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Tomáš Pačák
Klíčová slova:	Deformace, numerické simulace, designová hrana, tvářecí nástroj, lisování plechů
Abstrakt:	Tato diplomová práce se zabývá deformací na velmi malých rádiech při lisování karoserií automobilů. Teoretická část práce je zaměřená na popisu lisovacího procesu, tvařitelností materiálu, problematikou nanášení deformačních sítí a simulačními softwary. Praktická část práce se zabývá numerickými simulacemi, jejich vyhodnocením a porovnáním s reálným výliskem. Hlavním sledovaným znakem simulací a reálného procesu je ztenčení materiálu na designové hraně.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 112

Počet obrázků: 115

Počet tabulek: 23

Počet příloh: 1

Annotation

University:	Czech Technical University in Prague Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Department of Manufacturing Technology
Head of the Department:	Ing. Kolařík Ladislav, Ph.D.
Theme:	**Verification of the magnitude of deformations on small design edges**
Academic year:	2014/2015
Author:	Bc. Vít Šulc
Supervisor:	Ing. František Tatíček, Ph.D.
Consultant:	Ing. Tomáš Pačák
Keywords:	Deformations, numerical simulations, design edge, metal forming tool, sheet metal forming
Abstract:	This diploma thesis deals with deformation on very small radius during the automobile bodywork stamping. The theoretical part is focused on description of the stamping proces, formabillity of the material, problems about applying the deformation mesh and simulation softwares. The experimental part deals with numerical simulations, their evaluation and comparison with real formed part. The main monitored parameter of simulations and real stamping proces is the thinning of the material on design edge .

Volume:

Number of pages: 112

Number of pictures: 115

Nummber of tables: 23

Number of annex: 1

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením mého vedoucího diplomové práce a použil jsem pouze podklady uvedené v přiloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne …….. ……

Podpis

Obsah

Úvod 11

1 Popis procesu lisování 12

1.1 Základní operace využité při lisování 12

1.1.1 Stříhání 12

1.1.2 Ohýbání 14

1.1.3 Tažení 18

1.2 Tvařitelnost materiálu 21

1.3 Diagramy mezního přetvoření 23

1.4 Zkoušky tvařitelnosti 25

2 Problematika deformací na malých designových hranách 28

2.1 Deformační sítě 29

2.1.1 Nanášení deformačních sítí 30

2.2 Systém Argus 33

2.3 Simulační software AutoForm 34

3 Popis experimentu 36

3.1 Tvářecí nástroj 37

3.2 Metalografický výbrusu 43

4 Numerické simulace 46

4.1 Analýza zpevnění 47

4.1.1 Zpevnění materiálu v závislosti na tloušťce plechu 48

4.1.2 Zpevnění materiálu v závislosti na směru válcování 50

4.1.3 Zpevnění materiálu v závislosti na síle přidržovače 53

4.1.4 Zpevnění materiálu v závislosti na tření 55

4.1.5 Zpevnění materiálu v závislosti na kombinaci tření a síly přidržovače 58

4.1.6 Interpretace výsledků analýzy zpevnění 59

4.2 Analýza změny tloušťky 60

4.2.1 Změna tloušťky v závislosti na původní tloušťce materiálu 60

4.2.2 Změna tloušťky v závislosti na směru válcování 62

4.2.3 Změna tloušťky v závislosti na síle přidržovače 65

4.2.4 Změna tloušťky v závislosti na tření 67

4.2.1 Změna tloušťky materiálu v závislosti na kombinaci tření a síly přidržovače 70

4.2.2 Interpretace výsledků analýzy změny tloušťky 71

4.3 Analýza hlavního napětí 72

4.3.1 Změna hlavního napětí v závislosti na tloušťce 72

4.3.2 Změna hlavního napětí v závislosti na směru válcování 74

4.3.3 Změna hlavního napětí v závislosti na síle přidržovače 77

4.3.4 Změna hlavního napětí v závislosti na tření 79

4.3.5 Změna hlavního napětí v závislosti na kombinaci tření a síly přidržovače 81

4.3.6 Interpretace výsledků analýzy hlavního napětí 83

4.4 Analýza vedlejšího napětí 84

4.4.1 Změna vedlejšího napětí v závislosti na tloušťce 84

4.4.2 Změna vedlejšího napětí v závislosti na směru válcování 86

4.4.3 Změna vedlejšího napětí v závislosti na síle přidržovače 88

4.4.4 Změna vedlejšího napětí v závislosti na tření 90

4.4.5 Změna vedlejšího napětí v závislosti na kombinaci tření a síly přidržovače 93

4.4.6 Interpretace výsledků analýzy vedlejšího napětí 94

4.5 Vyhodnocení výlisku softwarem Argus 95

4.6 Vyhodnocení metalografického výbrusu 97

4.7 Celkové vyhodnocení experimentu 100

Závěr 101

Seznam obrázků ……..…... 104
Seznam tabulek ……..…… 107
Seznam příloh ……..…….. 108
Seznam použité literatury ……. 109

ÚVOD

V dnešní době je kladen stále větší důraz na design a trendem jsou neustálé inovace vzhledu karoserie automobilů. Automobilová společnost ŠKODA AUTO a.s. používá na svých posledních modelech automobilů velmi ostré (z hlediska lisování) designové hrany, které automobilu propůjčují nadčasový design a vkusné křivky. Jednou z nejvýraznější designových křivek je tzv. *tornado linie* dle koncernového názvu. Jedná se o hranu táhnoucí se po celé délce automobilu od předních světel přes dveře až na konec vozidla navazující na zadní světla. V této diplomové práce se zabývám deformacemi a chováním materiálu při lisovacím procesu na právě těchto velmi malých rádiech.

Celý lisovací proces karoserie automobilu se skládá z několika základních operací jako je tažení, ohýbání, stříhání a kalibrování a v případě malých rádií je velmi obtížné tento proces popsat. Při tváření výlisku vzniká vlivem tvářecího nástroje velké množství deformací v různých směrech. Na velkých plochách se pomocí deformačních sítí určuje deformace snadno, na designové hraně, kde se může vyskytovat deformační špička je popis problematiky mnohem složitější a deformace se zde určují velmi složitě. Nedostatečným přetvořením (příliš malou hodnotou deformace), nebo naopak příliš velkým přetvořením mohou ve výlisku vznikat vady. Při lisování karosářských dílů se klade důraz zejména na dostatečné přetvoření a přetváření v celém objemu, kde vlivem tohoto procesu materiál zpevňuje. Čím vyšší je ale hodnota přetvoření, tím materiál více ztenčuje a nastává riziko vzniku trhlin a roztržení výlisku. Práce zkoumá vliv a zároveň velikost účinku různých parametrů na lisovací operaci.

Cílem celého experimentu bylo určit velikost deformace na designové hraně a její vliv na průběh lisování vzhledem k měnícím se parametrům, kterými jsou síla přidržovače, směr válcování plechu, výchozí tloušťka plechu a třecí síla (vliv mazání). U všech těchto parametrů byly sledovány následující změny: zpevnění materiálu, změna tloušťky materiálu (ztenčení) a změna hlavního a vedlejšího napětí.

Experimentální část práce je rozdělena na dva hlavní úseky. První obsahuje numerické simulace vytvořené pomocí softwaru AutoForm, a analýza deformací pomocí softwaru Argus. Druhým úsekem je vylisování reálného výlisku na zkušebním nástroji, který byl vyroben, zapracován a zkalibrován ve spolupráci s nářaďovnou ŠKODA AUTO a.s. Výstupem práce je porovnání výsledků simulací s hodnotami naměřenými na reálném výlisku.

1 POPIS PROCESU LISOVÁNÍ

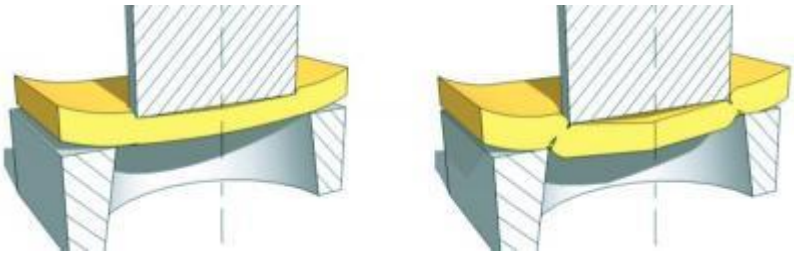
Lisování je plošné tváření charakteristické deformací ve dvou směrech (tloušťka se téměř nemění). Výchozím polotovarem je plech ve formě tabulí, pruhů nebo svitků. Principem lisování je plastická deformace plechu a následné tváření dle námi stanovených podmínek, přičemž materiál při tváření za studena intenzivně zpevňuje. [1,4]

1.1 Základní operace využité při lisování

Při lisování složitějších dílů, jako např. části karoserie automobilu, si nevystačíme s jednotlivými základními operacemi jako je pouhé stříhání, nebo ohýbání, ale musíme využít jejich kombinaci v postupovém nástroji. Popis této problematiky jako komplexního celku je velmi obtížný, proto se v následujících kapitolách budu zabývat pouze jednotlivými technologiemi, ze kterých se lisovací proces skládá. Mezi nejčastěji používané operace u lisování patří stříhání, tažení, ohýbání a kalibrování. [1,4]

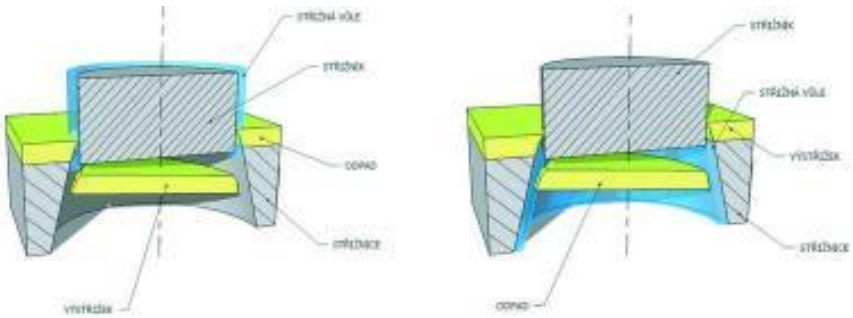
1.1.1 Stříhání

Stříhání je jedna z nejběžnějších operací výroby jednoduchých součástek z plechu. Vlivem střižných napětí dochází k oddělení materiálu v celém průřezu mezi dvěma nástroji – střižníkem a střižnicí (viz. Kap. 2). Střižný proces můžeme rozdělit do tří základních fází. V první fázi vniká nástroj do materiálu, kde hloubka vniku střižníku do stříhaného materiálu bývá 5-8 % jeho tloušťky, v závislosti na jeho mechanických vlastnostech. Stříhaný materiál je namáhán po celém obvodu střižníku a střižnice. Vlivem působení hlavní střižné síly, dochází ke vzniku dvojice sil kolmo ke střižným plochám, které deformují materiál ohybem. Jedná se o pružnou deformaci (obr. 1 vlevo). Ve druhé fázi je překročena pružná deformace materiálu a ten je tak plasticky deformován, kde hloubka vniku střižníku do stříhaného materiálu je 10–25 % tloušťky materiálu. Třetí fáze je charakteristická překročením meze pevnosti ve střihu daného materiálu, následně vzniknou mikrotrhliny na hraně střižníku a střižnice, které se dále rychle šíří až dojde k oddělení materiálu (obr. 1 – vpravo). [5]



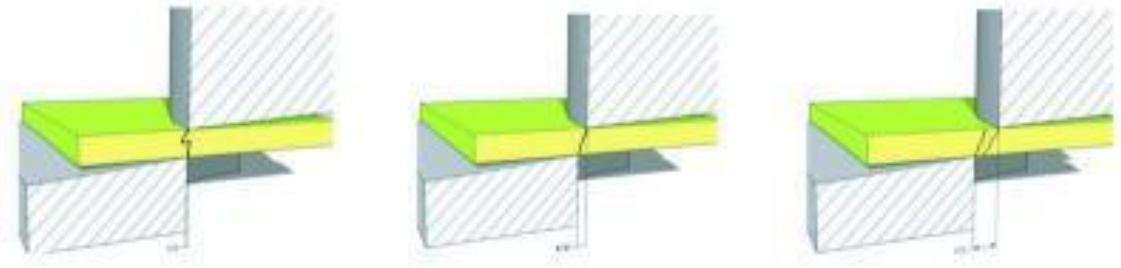
Obr. 1 Schematický průběh střižné operace [5]

Důležitým parametrem při stříhání je velikost střižné vůle, tedy rozdílem mezi pracovní částí střižníku a střižnice, která ovlivňuje kvalitu a jakost výsledného výstřižku, životnost nástroje a potřebnou tvářecí sílu. Ta by měla být po celém obvodu výstřižku stejná a rovnoměrná, v opačném případě to může negativně ovlivnit kvalitu výstřižku (nekvalitní střižná plocha, otřepy). V případě vytváření přesných děr, se střižná vůle volí zvětšení rozměru střižnice na úkor střižníku (obr. 2 – vpravo), v případě stříhání přesného vnitřního obvodu se volí střižná vůle na úkor střižníku (obr. 2 – vlevo).

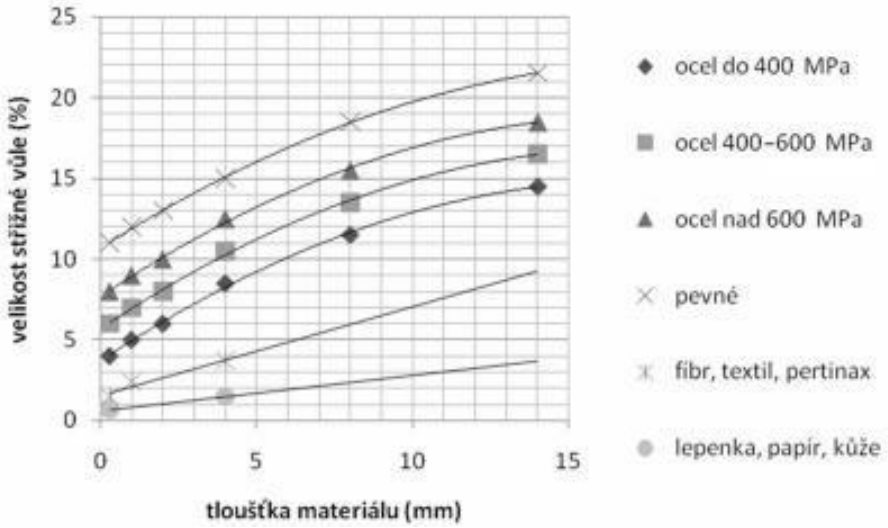


Obr. 2 Schematické zobrazení střižné vůle při střižné operaci [5]

Optimální velikost střižné vůle je závislá na tloušťce a druhu materiálu. Při optimální velikosti střižné vůle se trhliny šířící od střižníku a střižnice setkají v témže bodě a vytvoří tak střižnou plochu. Příliš malá, nebo velká střižná vůle znamená, že se trhliny nesetkají a vznikají tak otřepy, které zhoršují kvalitu povrchu. Velká střižná vůle může způsobit ohyb stříhané součásti, malá zase přestřižení. Velikost střižné vůle se volí podle tloušťky materiálu (čím větší tloušťka, tím větší střižná vůle) a obvykle pro ocel se pohybuje v rozmezí 5 – 10 % tloušťky plechu. [5]



Obr. 3 Vliv střižné vůle na pohyb trhlin [5]



Obr. 4 Závislost střižné vůle na tloušťce stříhaného materiálu.

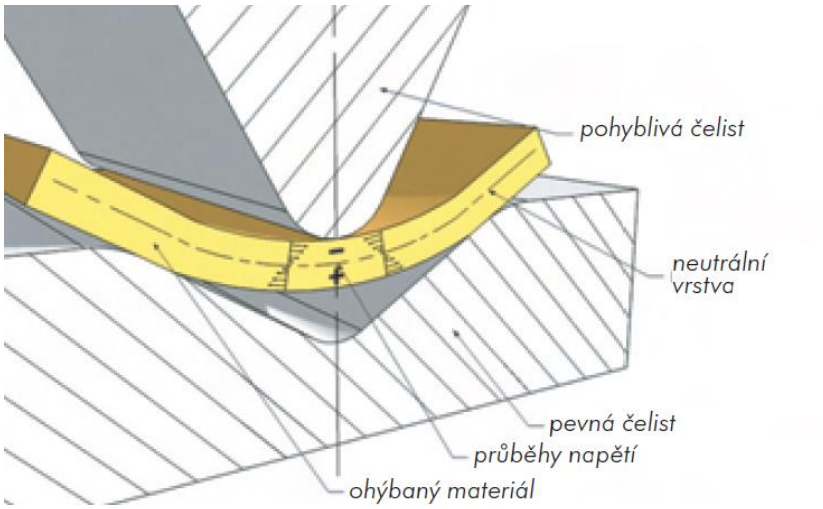
Na obr. 4 je zobrazena závislost střižné vůle různých typů materiálu na jejich tloušťce. Je patrné, že čím pevnější materiál je a čím má větší tloušťku, tím je střižná vůle větší.

Obecně platí, že výrobní tolerance IT střižníku a střižnice musí být alespoň o 3 vyšší než u součástky (pokud tedy máme vyrobit součást o toleranci IT 12, musí být tolerance IT nástroje min 9). Pro matriály do tloušťky 1 mm se pohybuje drsnost nástroje v rozmezí 0,4 – 0,8 Ra, pro větší tloušťky 1,6 – 3,2 Ra.

1.1.2 Ohýbání

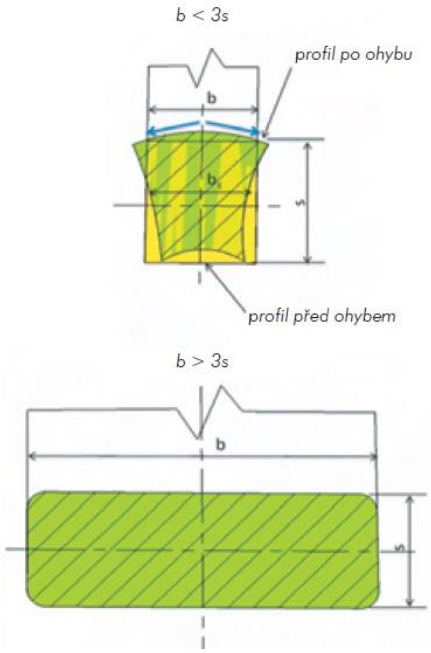
Ohyb je typ tvářecí operace, při níž se základní materiál deformuje do daného úhlu ohybu dle geometrie nástroje. Ohyb je prováděn zpravidla do tvaru písmene V nebo

U na jeden zdvih nástroje. Specifickou vlastností ohýbaného materiálu je kombinace tahových a tlakových napětí v průřezu ohýbané součásti. V případě ohybu plechu se vnitřní vlákna ohýbané součásti stlačují (vzniká tlakové napětí), naopak vnější vlákna se natahují (vzniká tahové napětí), kde je největší nebezpečí vzniku trhlin. Tyto dvě oblasti jsou oddělena neutrální osou, která není namáhána (obr. 5) a před ohybem leží uprostřed průřezu. V případě ohýbání materiálu, kde poměr r/s ≥ 12 (r = poloměr zaoblení, s = tloušťka materiálu), předpokládáme, že neutrální osa zůstane ve středu tloušťky ohýbaného materiálu, protože zde dochází pouze k malým pružně plastickým deformacím. Při provádění ostrého rádia, kde poměr r/s ≤ 6, dochází k posunu neutrální osy směrem k vnitřní straně ke stlačovaným vláknům (menšímu poloměru zaoblení) a změně průřezu. [3,6,10]



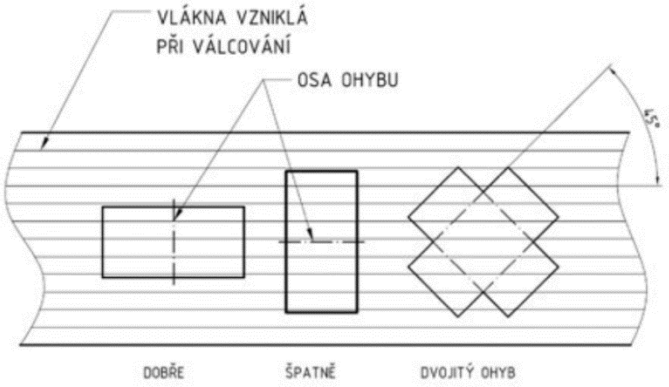
Obr. 5 Schéma ohýbání materiálu (- značí tlakové napětí, + značí tahové napětí) [10]

V případě ohybu úzkého pásu, kde b ≤ 3s (b = šířka pásu, s = tloušťka materiálu), dochází k zborcení příčného průřezu, kdežto v případě b ≥ 3s se tato skutečnost neprojevuje (obr. 6). Důvodem zborcení v prvním případě je rovinná napjatost, kdežto u širokých profilů je napjatost prostorová (deformaci v příčném směru brání odpor materiálu velké šířky). [10]



Obr. 6 Schéma deformace profilu při ohybu [10]

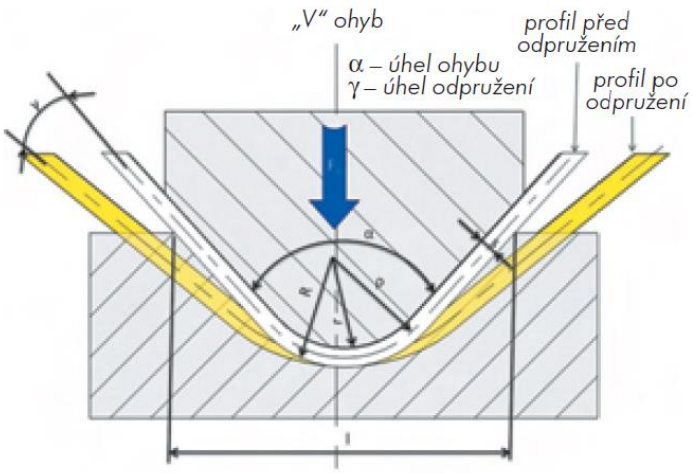
Dalším problémem při ohýbání je vznik prasklin na vnější straně materiálu, kde dojde k překročení kritické hodnoty poloměru ohybu r/s. To může být způsobeno stavem materiálu (zda je tvářen za studena, žíhán apod.), zpevněním materiálu nebo směrem vláken, který je velmi důležitý. Osa ohybu by měla být kolmá na směr vláken, nebo minimálně pod úhlem 30° (obr. 7). Při vícenásobném ohybu potočíme nástřih o 45°. Nebezpečí vzniku trhlin nastává v prostředním případě na obr. 7, kde při určité tloušťce materiálu a poloměru zaoblení mohou vznikat na vnější straně materiálu trhliny. Minimální poloměr zaoblení musí být takový, aby v krajních vláknech ohýbaného materiálu došlo k překročení meze kluzu. Naopak nesmí dosahovat takových hodnot, aby v krajních vláknech byla překročena mez pevnosti a došlo tak k trhlinám. [11]



Obr. 7 Umístění výstřižku na plechu vzhledem ke směru vláken materiálu [11]

Při ohýbání hraje významnou roli také odpružení materiálu, které je způsobeno elastickou deformací materiálu kolem neutrální osy a je nutno s ním při konstrukci součásti počítat. Odpružení je závislé na použitém materiálu, jeho mechanických vlastnostech, tloušťce ale také na velikosti úhlu a poloměru ohybu nebo geometrie nástroje. Čím větší je tloušťka materiálu a čím menší poloměr zaoblení, tím se odpružení snižuje. Odpružení u běžných materiálů se pohybuje mezi 3 – 15° a lze jej minimalizovat následujícími způsoby:

- Materiál se ohne navíc o přídavek určený buď dle empirických vztahů, nebo z tabulek, kde se výlisek po odpružení dostane do správného stavu
- Kalibrací (na konci lisovací operace se zvětší působící síla, díky níž dojde k místní plastické deformaci v místě ohybu a odpružení se snižuje, až zcela vymizí
- Použitím prolisů
- Vylisováním vyztužovacího žebra [7,10]



Obr. 8 Schématické znázornění odpružení při ohybu [10]

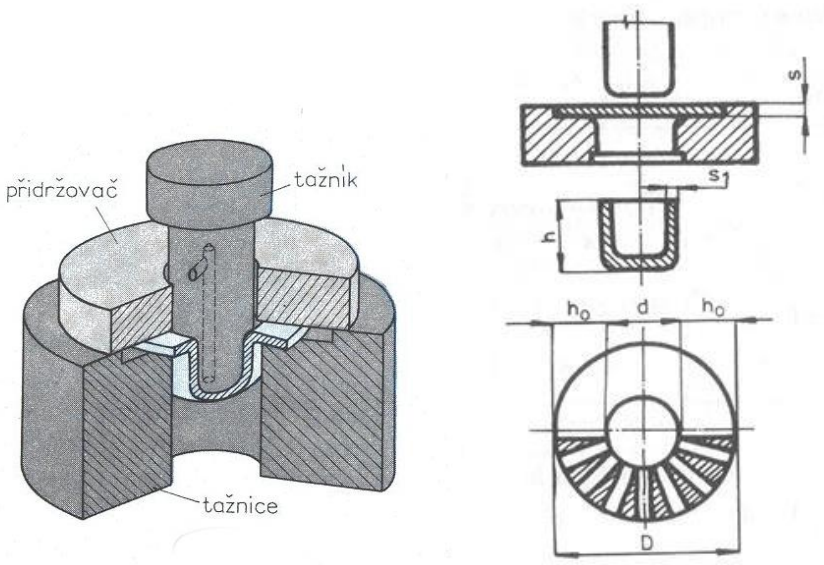
1.1.3 Tažení

Tažením polotovaru, kterým bývá přístřih plechu, pás plechu nebo již už tažený polotovar vzniká prostorový výtažek. Nejčastěji používané technologie jsou prosté tažení, zpětné tažení, žlábkování, lemování nebo tažení se ztenčením stěny.

Na obr. 9 je znázorněno prosté tažení válcové nádoby s přidržovačem. Platí zde zákon o zachování objemu. Při tažení se materiál značně deformuje a je přemísťován zejména z vyšrafovaných trojúhelníků (Obr 9. vpravo). Při vysokých deformacích, např. při hlubokém tažení, kde dochází ke ztenčení stěny materiálu, mohou vznikat vlny a přeložky. Nejnebezpečnější oblasti jsou zaoblení dna nádoby, kde působí největší tlakové napětí a je zde nejvyšší riziko porušení materiálu. [1]

Tvar přístřihu pro rotační tělesa se určí buď z tabulek dle rozměrů finálních výtažků, nebo podle jednoduchého vzorce, který je závislostí výšky a průměru výtažku následné operace. Výpočet je založen na rovnosti ploch a objemů přístřihu a jeho výtažku, přičemž se předpokládá poloměr zaoblení r dle rov. 1, kde t = tloušťka stěny. U složitějších výtažků se plocha rozdělí na menší spočítatelné části a výsledná velikost přístřihu je navýšena o přídavek na odstřižení. V současné době se využívá numerických simulací a výpočetních systémů pro určení velikosti a tvaru přístřihu, které jsou založeny na principu rovnosti povrchů. [9,12,14]

$$r = (3 - 8) * t \qquad \text{[rov. 1]}$$

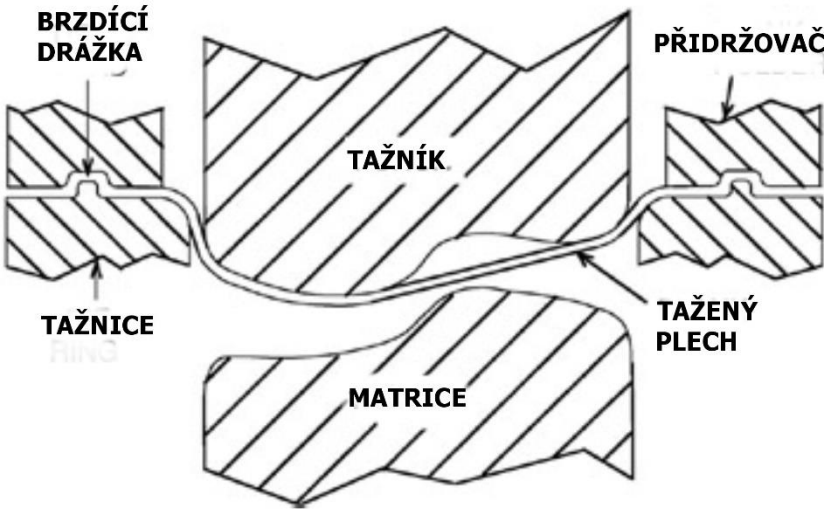


Obr. 9 Schématické znázornění technologie prostého tažení, vlevo s přidržovačem, vpravo náčrt bez přidržovače

Při tváření hlubších nádob může dojít v oblasti příruby ke zvlnění plechu díky kritickým hodnotám tečného napětí, a to má za následek vzrůst tažné síly a utržení dna nádoby. K zamezení vzniku vln se používá přidržovací systém. K jeho použití je potřeba znát hodnotu tlaku přidržovače, která je závislá na tloušťce taženého materiálu, jeho jakosti a součiniteli tažení. [14]

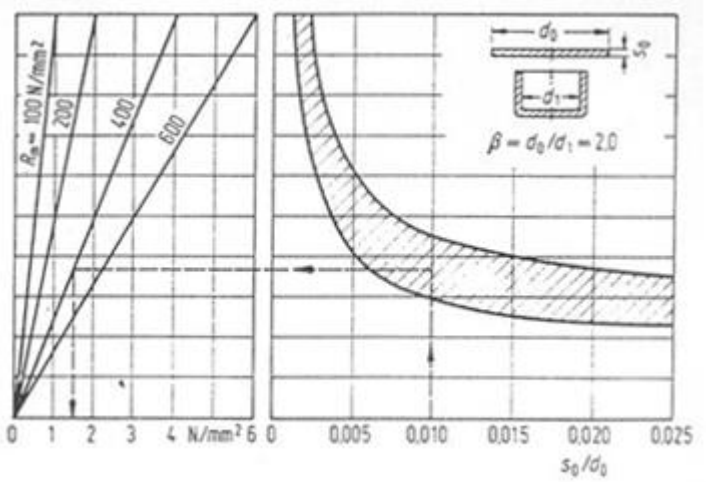
Důležité je tření mezi nástroji a plechem. Je snaha vytvořit co nejmenší tření na přidržovači a tažnici a naopak co největší na tažníku. Snížit tření lze použitím vhodného maziva (např. maziva MOLYDUVAL Moralub nebo MOLYDUVAL Carat určené pro hluboké tažení) a vysokou kvalitou povrchu tažnice a přidržovače. Kvalita povrchu přidržovače je omezena dle požadavků na finální jakost vnitřní plochy výtažku (hodnota drsnosti nesmí přesáhnout určitou mez kvůli požadavkům na nízkou hodnotu tření). [12,29]

K zamezení proklouznutí materiálu a vzniku vln se po obvodu tažných hran umísťují brzdící drážky, čímž se zmenší radiální tahové napětí. Brzdící drážky jsou součástí přidržovacího systému a jejím úkolem je kontrolovat a zpomalovat tok materiálu v nástroji. Plech, který je tažen přes brzdící drážky je kontrolovaně vypínán, což zamezuje tvorbě zvlnění. Navržení velikosti a rozložení brzdících drážek po obvodu výlisku je velmi složitý proces, který se neobejde bez simulací a experimentálního zkoušení. [13,28]



Obr. 10 Schématické znázornění brzdících drážek [28]

Jedním z ukazatelů tvařitelnosti je součinitel tažení, který vypovídá o míře přetvoření pro každý další tah výlisku. Hodnota součinitele tažení závisí na materiálu, tvaru výtažku, poměru tloušťky plechu a průměru nádoby a zpevnění předchozími tahy. Pro první tah se součinitel tažení určí z poměru průměru výtažku a průměru původního přístřihu, kde hodnota součinitele tažení je vždy menší než 1. Pro další tahy je hodnota součinitele tažení definována obdobně, tedy vždy průměr po tažení/průměru před tažením. Obvyklá hodnota součinitele tažení pro první tah m = 0,6, pro další tahy m = 0,8. Tvařitelnost materiálu se s rostoucím počtem operací snižuje, protože se vyčerpává plasticita materiálu. Tvařitelnost lze obnovit vložením mezioperačního žíhání do výrobního procesu. Celkový součinitel tažení je roven součinu všech součinitelů. Z toho lze pak jednoduše určit počet tažných operací potřebných k vylisování dané součástky. Tlak přidržovače lze pro velmi jednoduché výlisky přibližně určit z normo grafů, při lisování složitějších dílů karoserie je ale problematika mnohem komplikovanější. [1,10]



Obr. 11 Graf určení tlaku přidržovače pro první tah. U grafu vpravo na ose x nalezneme poměrnou tloušťku, na ose y mez pevnosti materiálu, v levém grafu na ose x určíme přibližný tlak přidržovače [1]

U lisování, zejména v automobilovém průmyslu, se používá technologie žlábkování, pro zpevnění a vyztužení výlisků. Rozměry žlábků jsou limitovány plasticitou matriálu. [1]

1.2 Tvařitelnost materiálu

Tvařitelnost materiálu lze rozdělit do dvou základních skupin na *tvařitelnost materiálu* a t*echnologickou tvařitelnost*:

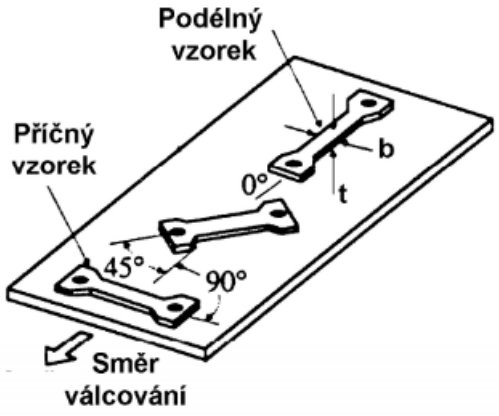
- **Tvařitelnost materiálu** je schopnost materiálu trvale měnit svůj tvar při působení vnějších sil, aniž by došlo k jeho porušení.
- **Technologická tvařitelnost** je fyzikální stav materiálu závislý na jeho chemickém složení, krystalické struktuře, teplotě tvářecího procesu, napětí a obecně podmínkách tváření.

Tvařitelnost za tepla ovlivňuje zejména rychlost deformace, chemické složení, struktura materiálu a napěťový stav. Dále jsou to metalurgické (krystalická struktura, chemické složení, velikost zrna) a technologické faktory (typ stroje a nástroje, mazání, teplota, způsob ohřevu materiálu).

Tvařitelnost při lisování (za studena) ovlivňují obecně stejné faktory, jako tvařitelnost za tepla, je zde ale kladen větší důraz na kvalitu a geometrii povrchu. Velký

vliv má také anizotropie plechu, tzn. nestejnorodost vlastností v různých směrech souřadného systému. Technologickou tvařitelnost nejvíce ovlivňuje součinitel plastické anizotropie r, maximální rovnoměrná deformace ε_r a exponent deformačního zpevnění n. [17]

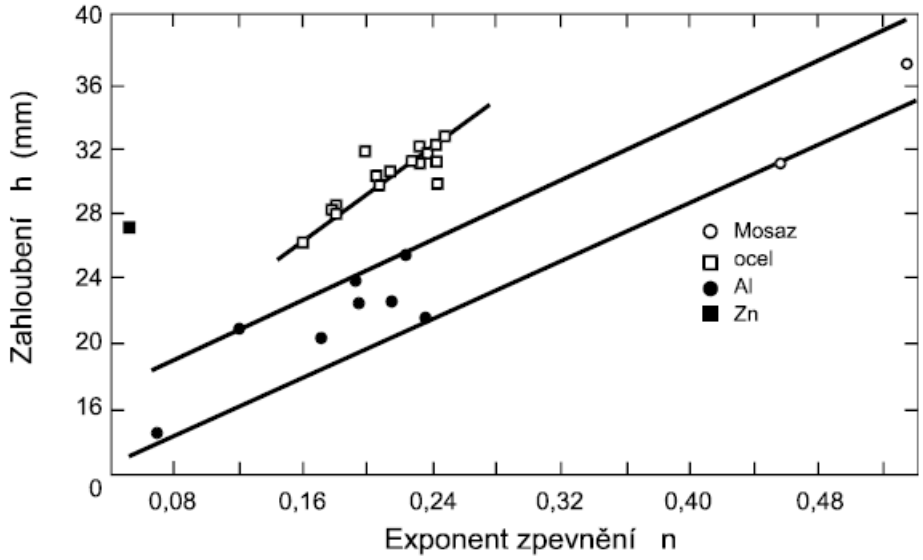
Součinitel plastické anizotropie (označujeme r) je poměr skutečné deformace šířky ke skutečné deformaci tloušťky při jednoosém namáhání. Jeho hodnota je závislá na směru tvářecí síly vzhledem ke směru válcování a získá se z tahové zkoušky vzorků, které jsou odebrány z plechu pod úhlem 0°, 45° a 90° ve směru válcování. Součinitel plastické anizotropie popisuje nerovnoměrnost mechanických vlastností plechu v podélném a kolmém směru na směr válcování. Čím vyšší je jeho hodnota tím je lepší hodnota tvařitelnosti, ale zároveň tím vyšší je riziko vzniku cípatosti při hlubokém tažení. [17,11]



Obr. 12 Schématické znázornění odebírání vzorků pro zkoušku plastické anizotropie [14]

Exponent deformačního zpevnění (označujeme *n)* vyjadřuje intenzitu, jakou materiál při deformaci zpevňuje. Jeho hodnota se zjišťuje experimentálně tahovou zkouškou.

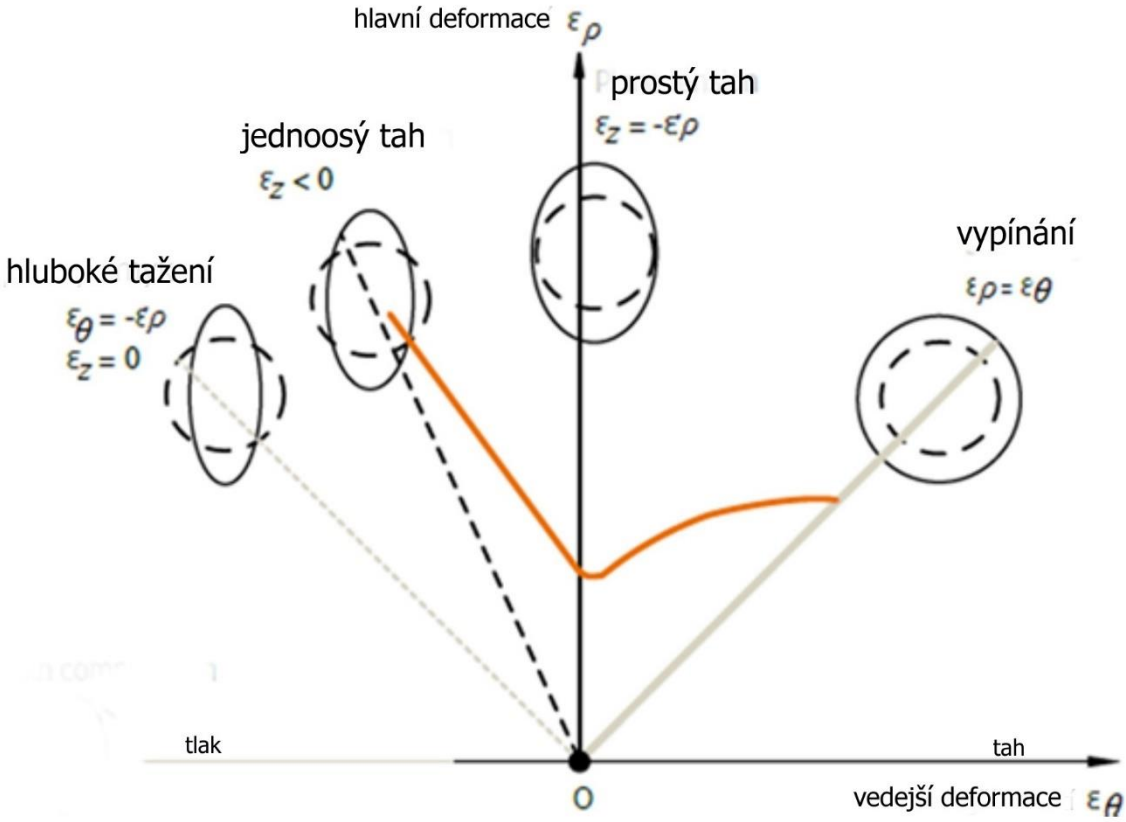
Hodnota rovnoměrné deformace (označujeme ε_r) je závislá na hodnotě exponentu deformačního zpevnění. Závislost exponentu zpevnění n na velikosti hloubení v Erichsonově zkoušce je znázorněna na obr. 13. Z grafu je vidět, že nejnižších hodnot exponentu zpevnění dosahuje zinek, naopak nejvyšších hodnot mosaz. [17,11]



Obr. 13 Závislost exponentu deformačního zpevnění na velikosti zahloubení [17]

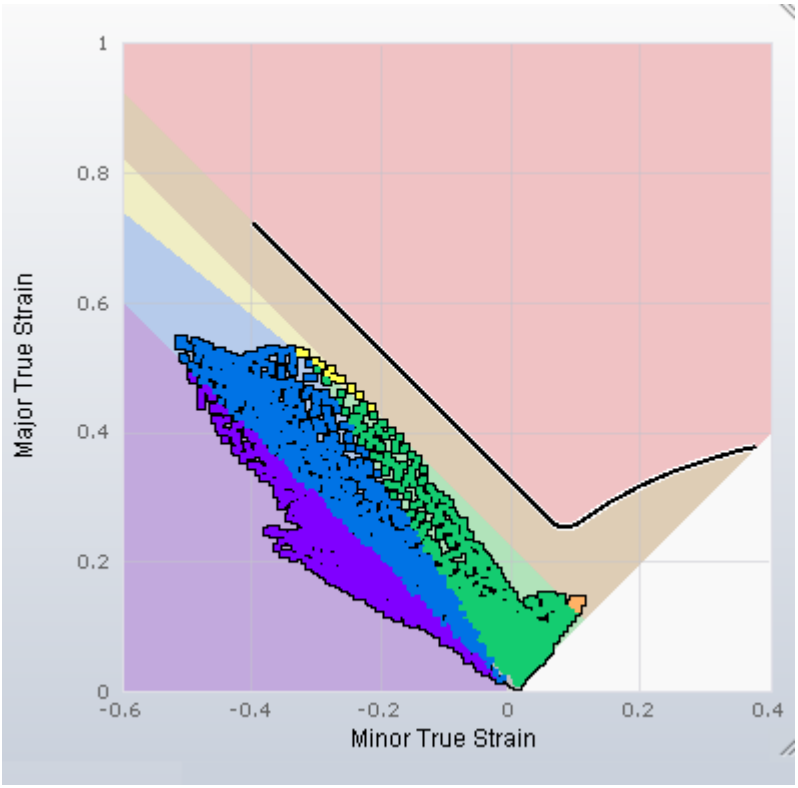
1.3 Diagramy mezního přetvoření

Diagram mezních přetvoření, označován jako FLD diagram (Forming limit diagram), je nástroj, který nám pomáhá při analýze deformace výlisku. Je tvořen mezní křivkou, která odděluje bezpečnou přípustnou oblast od nepřípustné oblasti, kde dochází k porušení materiálu. Křivka mezních přetvoření FLC (Forming limit curve) se určí experimentálně. Principem je vytvoření stavu napjatosti, při kterém dojde k porušení materiálu. Vznikne nám takto množina bodů, jejichž proložením vznikne křivka FLC. Ta je ale kvůli rozptylu výsledků při experimentálním získávání bodů nahrazena rizikovou oblastí tzv. pásmem kritických deformací. V této oblasti může, ale nemusí dojít k porušení materiálu. Snahou je, aby všechny body zkoušeného materiálu ležely v bezpečné oblasti pod FLC křivkou. Zároveň ale, pokud leží příliš nízko, dostáváme se do oblasti zvlnění a napěchování materiálu, které je také nepřípustné. Optimální oblast tedy leží v oblasti pod FLC křivkou a nad oblastí, kde vzniká zvlnění (dle obr. 15 se jedná o zelené a žluté body) [8]



Obr. 14 FLD diagram [25]

FLD diagram závisí hlavně na tloušťce materiálu a jeho mechanických vlastnostech. Se zvětšující se tloušťkou materiálu dochází k lineárnímu posunu křivky směrem nahoru, naopak se zmenšující se mezí kluzu dochází k posunu křivky směrem dolů. To znamená čím tenčí a pevnější plech máme, tím je bezpečná oblast deformací menší a nastává tak vyšší riziko vzniku trhlin. [8]



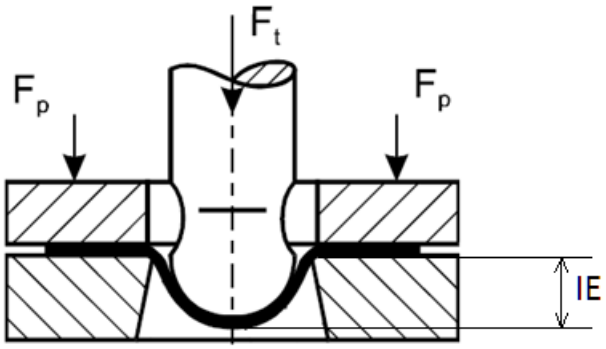
Obr. 15 Praktická ukázka FLD diagramu ze softwaru Autoform

Na obr. 15 je znázorněn reálný FLD diagram výlisku, kde zelená a žlutá barva značí body deformace v bezpečné oblasti. Oranžové jsou body nacházející se v pásmu kritických deformací a červené blížící se křivce FLD. Nad touto křivkou v oblasti porušení se mohou nacházet body, které vykazují defekt materiálu. Modré a fialové body sice také leží v bezpečné oblasti, ale dochází zde ke zvlnění a pěchování materiálu, což je také nepřípustné.

1.4 Zkoušky tvařitelnosti

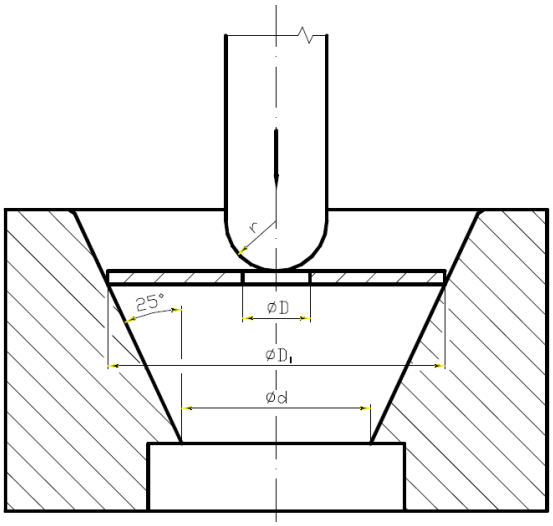
Pro zjištění tvařitelnosti za studena jsou charakteristické technologické zkoušky, které napodobují reálné operace při plošném tváření. Mezi nejznámější zkoušky patří Erichsenova, Fukuiho nebo kalíškovací zkouška. Existuje mnoho dalších jako např. zkouška zvlněním, kombinovaná Engelhartova-Grossova zkouška nebo zkouška rozšiřováním otvoru, které nebudou dále podrobněji popisovány. Pro tvařitelnost za tepla se používá pěchovací zkouška, nebo zkouška krutem za tepla.

Erichsenova zkouška jako jedna z nejznámějších zkoušek je založena na principu vnikání kulovitého tělesa do plechu. Určuje se hloubka vniku při objevení první trhliny na čele vyboulení. Výsledné zahloubení IE [mm] je měřítkem hlubokotažnosti. Tato zkouška je velmi levná a jednoduchá, její nevýhodou je ale velký rozptyl měření, malá citlivost na jakost plechu. [3,17]



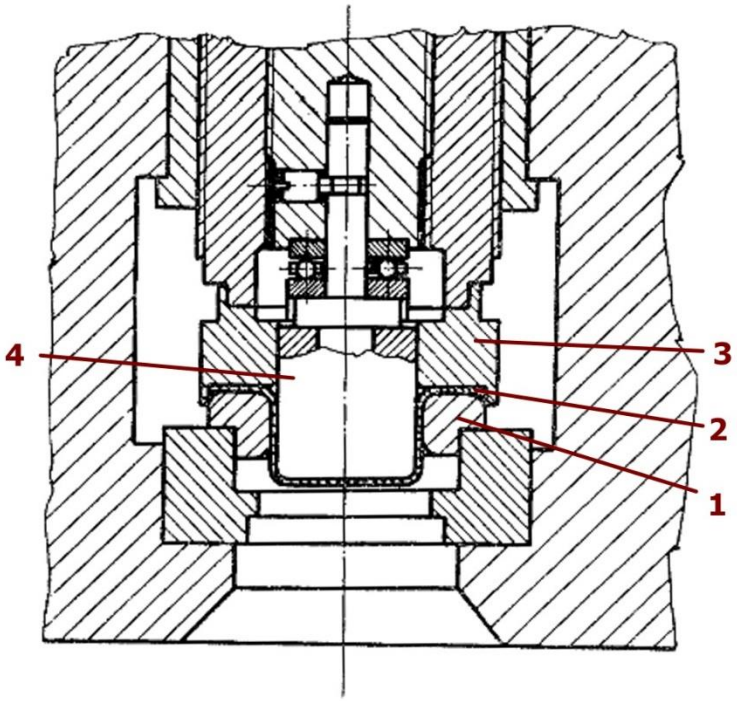
Obr. 16 Erichsenova zkouška hloubením, F_t je síla tažníku, F_p síla přidržovače, IE hodnota zahloubení [17]

Fukuiho zkouška spočívá v tažení kruhového přístřihu plechu s otvorem umístěnýcm uprostřed (nebo bez) kulovou tažnicí do okamžiku vytvoření trhliny na hraně otvoru nebo dně výtažku (obr. 17). Není zde použit přidržovač. Hodnotí se zde součinitel tažení m_f, který je definován jako d/D, kde d je největší průměr výtažku v okamžiku, kdy vznikne první trhlina, D průměr přístřihu. [18]



Obr. 17 Schéma Fukuiho zkoušky [18]

Kalíškovací zkouška (známá také jako Schmidtova nebo Swiftova) věrně napodobuje proces hlubokého tažení. Mírou hlubokotažnosti je součinitel tažení *M*, který je definován jako poměr *d/D*, kde *d* je průměr tažníku, *D* průměr přístřihu. [18]

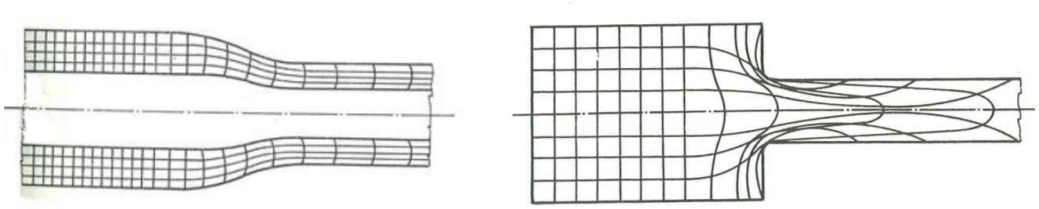


Obr. 18 Schéma kalíškovací zkoušky, 1 – tažnice, 2 – plech, 3 – přidržovač, 4 - tažník [30]

2 PROBLEMATIKA DEFORMACÍ NA MALÝCH DESIGNOVÝCH HRANÁCH

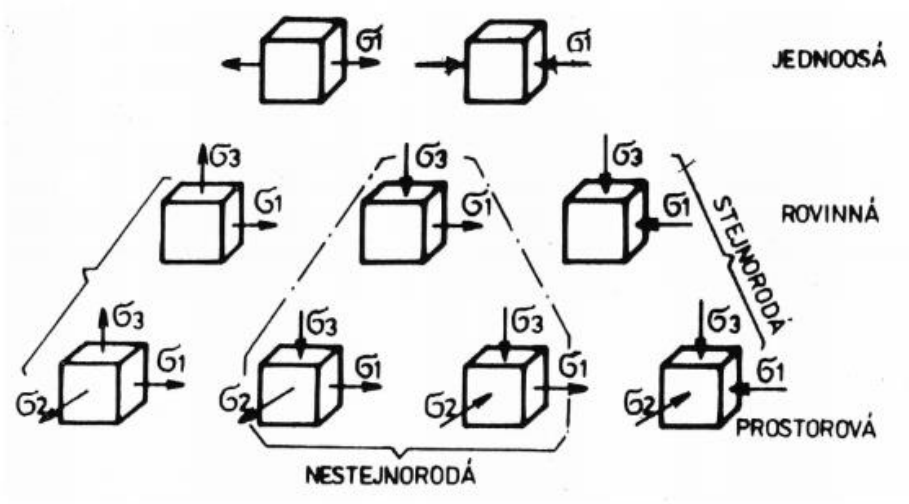
Deformace je vektorová veličina definující, jakým způsobem a směrem se posouvají určité body v hmotném tělese. Problematiku deformací si lze představit na drátěném modelu tělesa, jehož uzlové body se vlivem působení síly posunou z původní pozice ať už vratně nebo nevratně. Každé dva uzlové body se od sebe vždy přímočaře přibližují nebo vzdalují, případně se vůči sobě pootočí. Rozlišujeme lineární deformace, které jsou vyvolány tlakovým nebo tahovým napětím a smykové deformace vyvolány tangenciální napětí v krutu nebo smyku. [20]

U homogenní deformace se původně čtvercové elementy deformují ve směru osy trubky, síť zůstává stále pravoúhlá (obr. 19 vlevo). Toto se děje až do té doby, než se začne vytvářet krček. V této oblasti se elementy vzájemně natáčí a nastává oblast nehomogenní deformace (obr. 19 vpravo), která je charakteristická např. pro protlačování, kování a válcování. [8]

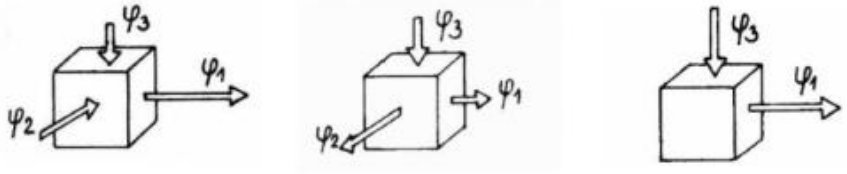


Obr. 19 Vlevo – Oblast homogenní deformace, vpravo – oblast nehomogenní deformace

V praxi se lze setkat s 9 různými schématy stavu napjatosti a 3 schématy deformace. Na obr. 20 vidíme rozčlenění dle směru působení napětí (šipka dovnitř značí tlakové napětí, šipka ven tahové napětí). V prvním řádku značí tyto dvě schémata jednoosou napjatost, v druhém řádku rovinnou a ve třetím prostorovou. Schémata deformace nám znázorňují, jak materiál teče podle směru šipky (Obr. 21). Z hlediska tvařitelnosti je výhodnější tlakové napětí oproti tahovému. [4]



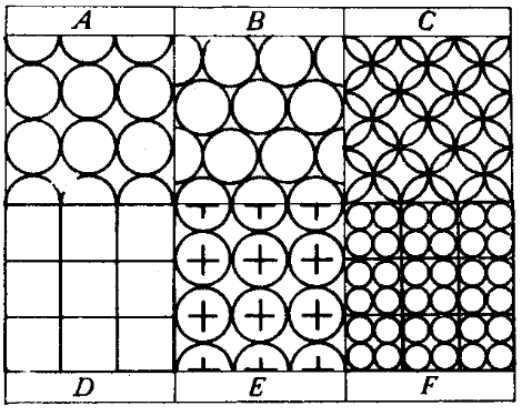
Obr. 20 Schémata napjatosti [14]



Obr. 21 Schémata deformace [14]

2.1 Deformační měrné sítě

Deformační měrné sítě se používají k analýze tvářecího procesu, zejména při lisování. Jedná se v praxi o velmi často používaný způsob, kterým lze spolehlivě vyhodnotit deformace výlisku. Před tvářením je na plech nanesena síť, nejčastěji s kruhovými elementy (obr. 22). Po následné tvářecí operaci je sít deformována spolu s plechem a pouhým okem je tak viditelné její zdeformování. Na měřících přístrojích a s pomocí specializovaných softwarů (např. Argus od společnosti GOM mbH) je pak možné tuto deformaci přesně změřit, provést porovnání s původními nezdeformovanými elementy a vyhodnotit ji. Velikost jednotlivých elementů závisí na složitosti výrobku, a jak moc přesné výsledky očekáváme.[16]



Obr. 22 Různé typy deformačních sítí [16]

Deformace na malých designových hranách se těžko určuje z důvodu, že je potřeba dostatečně malých elementů k vyhodnocení. Na obr. 23. je schematicky znázorněn případ dvou různých velikostí elementů deformační sítě. Vlevo jsou elementy tak velké, že software není schopen objektivně deformaci vyhodnotit, při tak malém počtu bodů. Situace vpravo je znázorněn ideální stav, kde už je možné deformaci vyhodnotit s určitou požadovanou přesností. Minimální počet elementů zasahující přes rádius by měl být alespoň čtyři.

Obr. 23 Vliv velikosti elementů deformační sítě na vyhodnocení deformace na malé designové hraně (vlevo – velké elementy, vpravo – malé elementy)

2.1.1 Nanášení deformačních sítí

Existuje celá řada metod, jak lze deformační sítě nanést. V následující kapitole budou shrnuty a stručně popsány jen ty nejznámější, dále se budeme zabývat speciální metodou měření deformací ARGUS, která byla použita ke zjištění deformací v praktické části experimentu.

Nejznámější metody nanášení deformačních sítí:

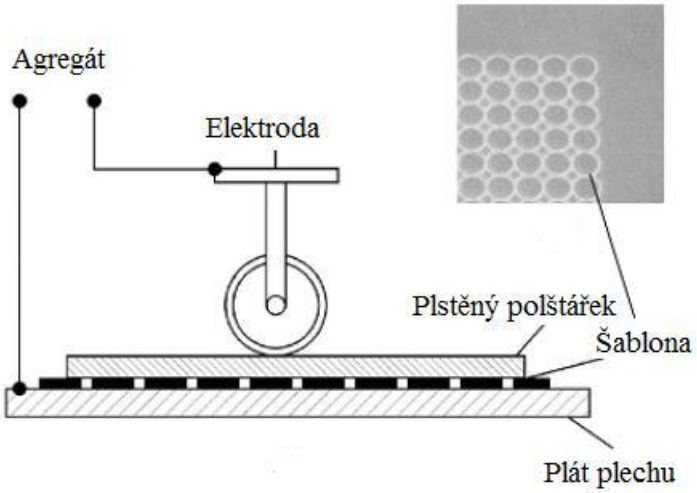
- Sítotisk
- Elektrochemické leptání
- Fotochemické leptání
- Nanášení laserem
- Elektroerozivní vyjiskřování [16]

Sítotisk

Mezi nejstarší metody patří sítotisk. Principem je obtisknutí šablony na hedvábnou sítku napnutou na rámu, přičemž šablona je negativem sítě, kterou chceme na plech obtisknout. Síťka je potřena emulzí, která je citlivá na UV záření a je následně umístěna na šablonu s požadovaným vzorem. Potom je šablona prosvícena UV zářením, které reaguje jen s emulzí, která není zakryta šablonou. Následně se položí rám se síťkou na očištěný plech a pomocí stěrky je inkoust protlačován na očištěný plech, přičemž projde jen přes místa, kudy prošlo UV záření. Vznikne tak kopie sítě, kterou chceme nanést na plech. Jedná se o velmi jednoduchý a levný způsob nanášení sítí. [16]

Elektrochemické leptání

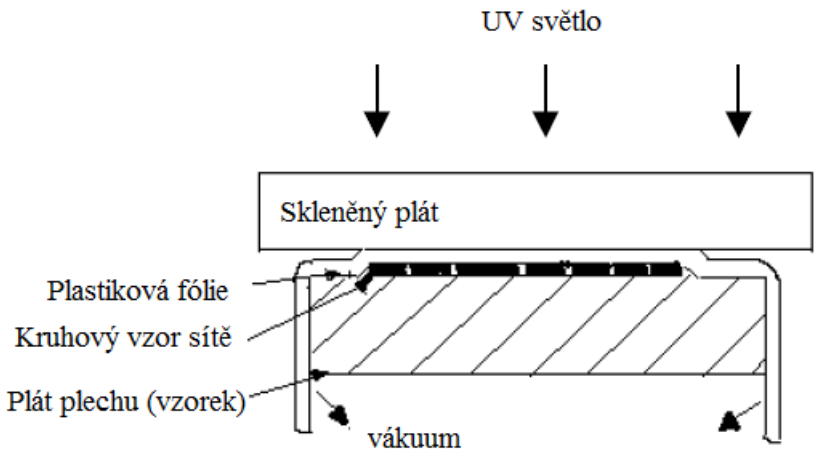
Tato metoda funguje na principu průchodu proudu přes leptací roztok a vytvoření tak potřebné sítě. (obr. 24). Zdroj proudu připojíme k elektrodě a plátu plechu, na který chceme nanést síť. Na očištěný plech je následně položena šablona a poté plstěný polštářek nasycený vhodný leptacím roztokem. Elektrodou s válečkem přejíždíme přes plstěný polštářek a vytlačujeme tak roztok skrz šablonu, který se dostane na povrch plechu. Tato metoda je velmi jednoduchá, rychlá a levná. Nevýhodou této metody je omezení z hlediska velikosti elementů, kde se obtížně dosahuje malých elementů.



Obr. 24 Princip elektrochemického leptání [9]

Fotochemické leptání

Povrch pro fotochemické leptání musí být důkladně očištěn, následně je nanesena emulze odolná UV záření. Dalším krokem je přiložení průhlední folie s vytvořeným rastrem, který chceme vytvořit. Mezi plechem a folií se vytvoří hluboké vakuum, kvůli dosažení vysoké přilnavosti. Plech následně osvětlíme UV zářením, vznikne nám tak obraz, který je tvořen nezakrytými místy folie. V další fázi se síť leptá roztokem kyseliny dusičné (HNO_3) nebo chlorovodíkové (HCl) a nakonec očistí toluenem nebo trichloretylenem. Vznikne nám velice kvalitní a ostrá síť, nevýhodou je ale vysoká pracnost. Princip fotochemického leptání je zachycen na obr. 25. [16]



Obr. 25 Princip fotochemické metody nanášení sítě [16]

Laserové nanášení sítě

Pomocí laserového paprsku je možné nanášet jakýkoliv vzor sítě. Tato metoda je velmi přesná a v porovnání s ostatními metodami má stopa sítě poloviční hloubku i šířku. Nevýhodou je pomalý výrobní proces, vysoké náklady, zdravotní riziko z hlediska ochrany očí a velikost nanášené plochy. Další negativem je nízký kontrast a nemožnost volby barvy sítě. [16]

Elektroerozivní vyjiskřování

Metoda založená na elektroerozivním obrábění kovů (EDM – electric discharge machining). Ve vaně s dielektrikem ji umístěn plech, na který chceme nanést síť. Vyjiskřovací elektroda má tvar mezikruží. Podmínky obrábění jsou dány frekvencí, pracovním proudem a napětím. [16]

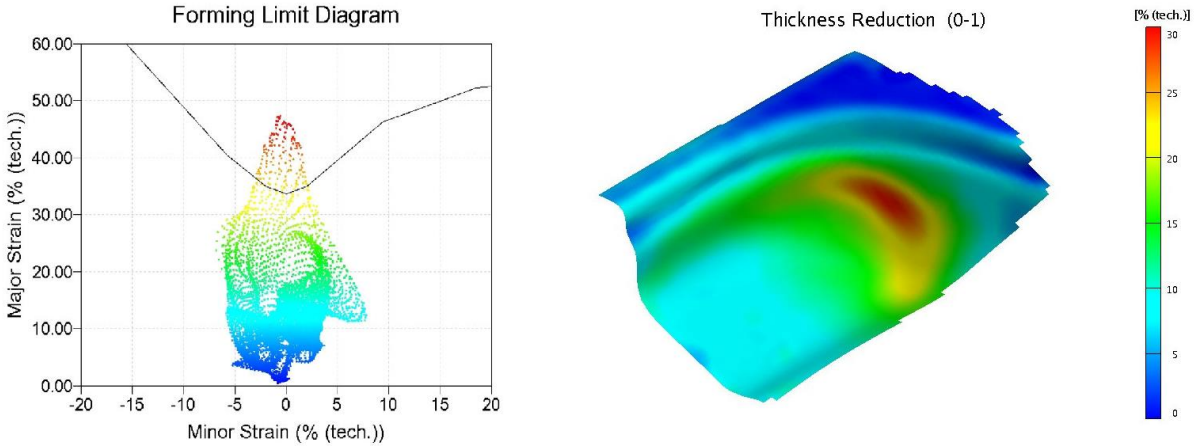
2.2 Software Argus

Metoda Argus spol. MCAE Systems v ČR (ve světě GOM mbH) je bezkontaktní optický systém využívaný při lisování pro měření mezních stavů deformace. Na plech, který je následně lisován, je nanesena deformační síť (laserem nebo elektrochemicky). Po vylisování je výlisek umístěn na podstavec, upevněn a následně osazen magnetickými měřícími kameny. Dále umístíme magnetické měrky, které mají kalibrovaný pevný rozměr, podle nichž systém vyhodnocuje výlisek. Tyto měrky jsou zpravidla dvě a jsou umístěný tak, aby byly k sobě vzájemně kolmé. Každý kámen je označen speciálním seskupením znaků, které se liší na každé straně každého kamenu. Systém tak podle uskupení znaků na kamenech, jejich úhlu vůči fotoaparátu a na základě kalibračních měrek vyhodnotí daný výlisek.

Snímání fotoaparátem probíhá tak, že nejprve pořídíme 4 fotografie kolmo z vrchu výlisku, poté pořizujeme fotografie kolem celého výlisku pod jedním úhled

(min. 8 fotografií) a pod druhým úhlem (min. 8 fotografií), abychom získaly všechny detaily výlisku. Minimální počet fotografií je 20. Fotografie, které jsou přesvícené, nebo rozostřené systém automaticky vyloučí z výpočtu. Fotoaparát musí být před samotným focením nastaven na pevnou ohniskovou vzdálenost, které se po celou dobu focení nesmí měnit. Je velmi důležité, aby všechny kameny, měrky i celý výlisek zůstal na svém místě, v opačném případě i při sebemenším posunutí systém výlisek nevyhodnotí.

Výstupem ze systému Argus skenované součásti je 3D model s možností zobrazení např. velikosti hlavní a vedlejší deformace (z těchto údajů je vytvořen FLD diagram), ztenčení materiálu, směr toku materiálu nebo procento přetvoření. Systém Argus je určen především pro optimalizaci tvářecího procesu a eliminaci kritických míst výlisku. [8,19,20]



Obr. 26 Ukázka ze systému Argus: FLD diagram (vlevo), model součásti se znázorněním ztenčení stěny (vpravo) [19]

2.3 Simulační software AutoForm

Software od společnosti AutoForm Engineering je nástroj využívaný pro simulaci celého lisovacího procesu zejména pro proces hlubokého tažení s velkou možností nastavení parametrů lisovacího procesu a množstvím zobrazení. Je používán v předvýrobní fázi pro zjištění vyrobitelnosti součásti s cílem snížit čas a náklady a dále přímo během výroby k optimalizování výrobního procesu. Nachází tak využití v plánování výroby a sestavování rozpočtů. Výstupem ze simulace je FLD diagram a možnost analyzovat simulovaný proces několika způsoby [8,21]

V programu je nutno před vlastní simulací nastavit řadu základních parametrů potřebných pro výpočet, mezi které patří např. materiál, velikost a tvar přístřihu, přítomnost a rozmístění brzdících drážek, směr válcování plechu, tlak přidržovače, velikost třecí síly a další. Po nastavení všech vstupních parametrů a nadefinování nástrojů je možné spustit simulaci. Jejím výstupem je např. ztenčení plechu, zvlnění, analýza tvařitelnosti, zpevnění materiálu. Všechny analýzy je možné sledovat v barevné stupnici, značící míru daného problému. Součástí je i FLD diagram.

AutoForm využívá k výpočtu metodu konečných prvků, což je numerická metoda pro řešení řady inženýrských aplikací. Princip je v rozsíťování součásti na konečný počet velmi malých prvků, které mají konkrétní konečný rozměr. Neznámou funkcí je potom lineární kombinace vhodně zvolených funkcí a neznámých parametrů (např. teploty, změna tloušťky). Pro každý prvek je charakteristický počet a poloha jeho uzlů, tedy bodů, které se během technologického procesu posouvají a otáčejí. Omezením metody konečných prvků je pouze výkon výpočetní techniky a časové nároky na výpočet. Nevýhodou je i to, že v případě jakékoliv změny nebo zásahu do modelu musíme celou úlohu řešit znovu. [20,22]

3 POPIS EXPERIMENTU

Popsat chování materiálu v případě lisování tvarově složitých výrobků, zejména na ostrých hranách, je velmi obtížné a neobejde se bez experimentálního zkoušení. Proto ve spolupráci se ŠKODA AUTO a.s. byl navržen zkušební nástroj s ostrou hranou s poloměrem zaoblení 1 mm. V první fázi experimentu jsem navrhl a nastavil numerické simulace, které jsou nezbytné k získání potřebných informací celého lisovacího procesu. Výsledky numerických simulací se nikdy 100 % neshodují s reálným lisovacím procesem. Materiál se v reálné výrobě chová jinak, protože do děje vstupuje velké množství proměnných, které nejsme schopni ovlivnit (např. rozptyl mechanických vlastností, nestejnorodé chemické složení materiálu, přesnost nastavení simulace a její korespondence s realitou, přesnost výpočtu simulace). Simulace nám předpoví s určitou vysokou pravděpodobností chování materiálu a naznačí možná kritická místa, kterých bychom se měli vyvarovat. Ve druhé fázi experimentu jsem ve spolupráci se ŠKODA AUTO a.s. realizoval testovací výlisek na zkušebním nástroji a následně jsem změřil tloušťky plechu v místě designové hrany pomocí metalografického výbrusu a elektronového mikroskopu ve spolupráci s Fakultou strojní ČVUT v Praze. Následně jsem porovnal změnu tloušťky mezi výsledky z numerických simulací a metalografickým výbrusem z reálného výlisku.

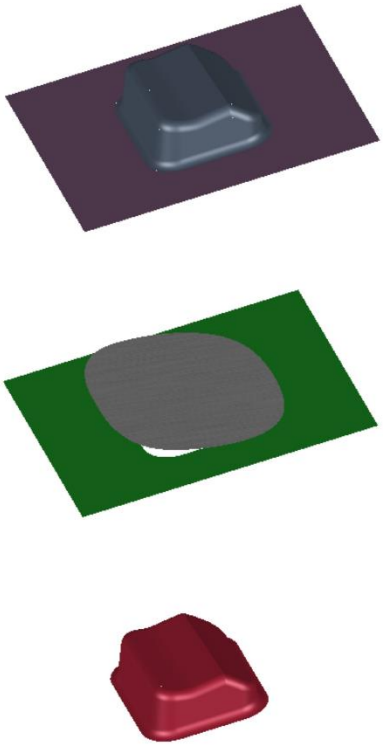
Cílem práce bylo zjistit chování výlisku na designové ostré hraně s velmi malým poloměrem zaoblení. *Designová hrana* je linie, táhnoucí se po celé délce vozidla (obr. 27). Tato ostrá hrana má v řezu charakter křivky dle obr. 28. Jedná se o dvě konkávní křivky, které spojuje rádius o velikosti 1 mm. Z hlediska tvařitelnosti se jedná o velmi problematické místo, kde velmi často vznikají vady v důsledku nedostatečné, nebo naopak příliš velké deformace Následující kapitola je právě proto věnována numerickým simulacím SW AutoForm, které určí citlivost na změnu jednotlivých parametrů tváření.

Obr. 27 Škoda Superb 3. generace – designová hrana. Červený výřez značí místo karoserie, které byla simulována a prakticky zkoušena na připraveném nástroji [26]

Obr. 28 Řez designovou hranou

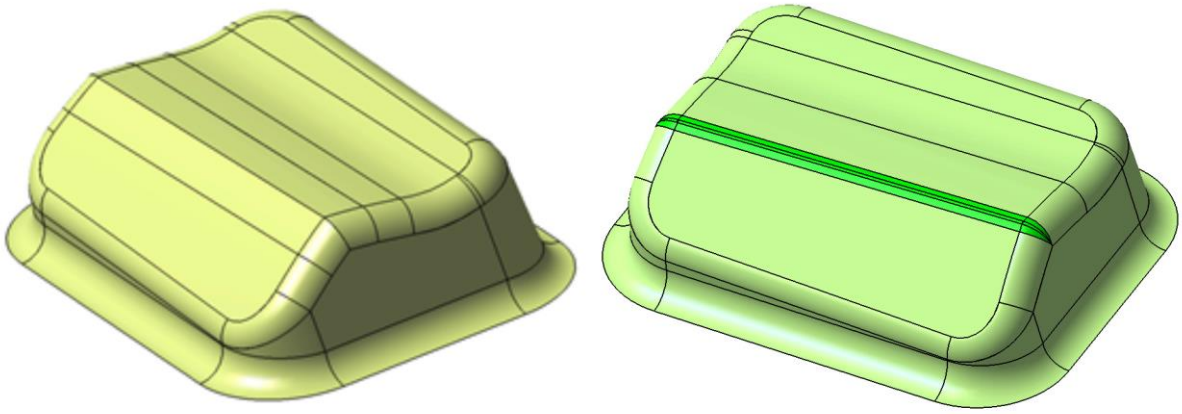
3.1 Tvářecí nástroj

Tvářecí nástroj se skládá ze tří částí: tažníku, tažnice (matrice) a přidržovače (Obr. 29). Celý proces je nastaven tak, že tažník je nepohyblivý a nemění svou polohu. Plech je položen automatických systémem na přidržovač, matrice provede pohyb směrem dolů ze své výchozí polohy a vylisuje plech přes tažník.

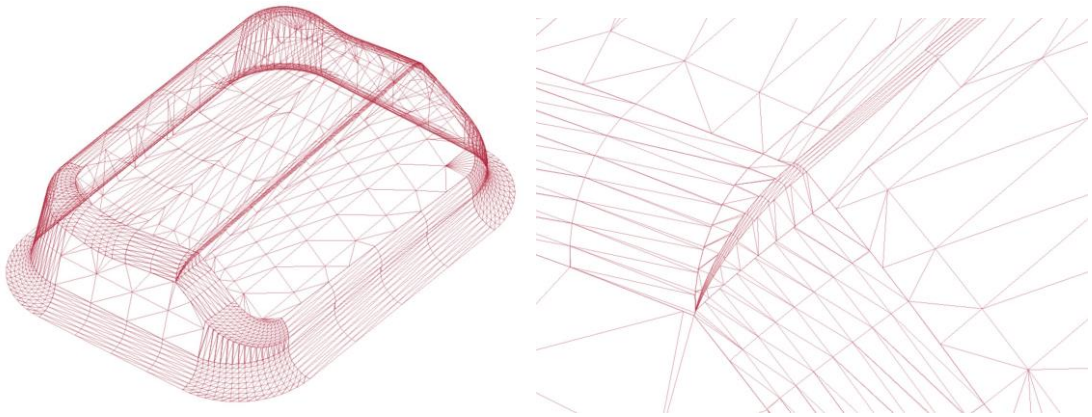


Obr. 29 Schématické znázornění sestavy tvářecího procesu experimentu (fialová – tažnice, zelená – přidržovač, červená – tažník, šedá – tvářený plech).

Tažník má vyfrézovaný rádius o poloměru 1 mm, u tažnice je vytvořena ideálně ostrá hrana, která vznikne přejetím frézy podél profilu nástroje a vytvoří tak jakousi špičku. Snahou je, aby byl tento rádius co nemenší. Poloměr zaoblení se zde pohybuje kolem 0,1 mm. Na obr. 31 je znázorněno zasíťování nástroje, kde nejvyšší hustota sítě je nastavena na hranách, především na designové hraně, kvůli přesnějším výpočtům simulace v těchto místech. Na plochách, kde deformace nejsou tolik důležité, je síť mnohem řidší kvůli rychlosti výpočtu. Software AutoForm si zesíťování objektů nastavuje sám dle předem zadaných parametrů, jako jsou např. maximální velikost elementu, maximální úhel mezi elementy apod.

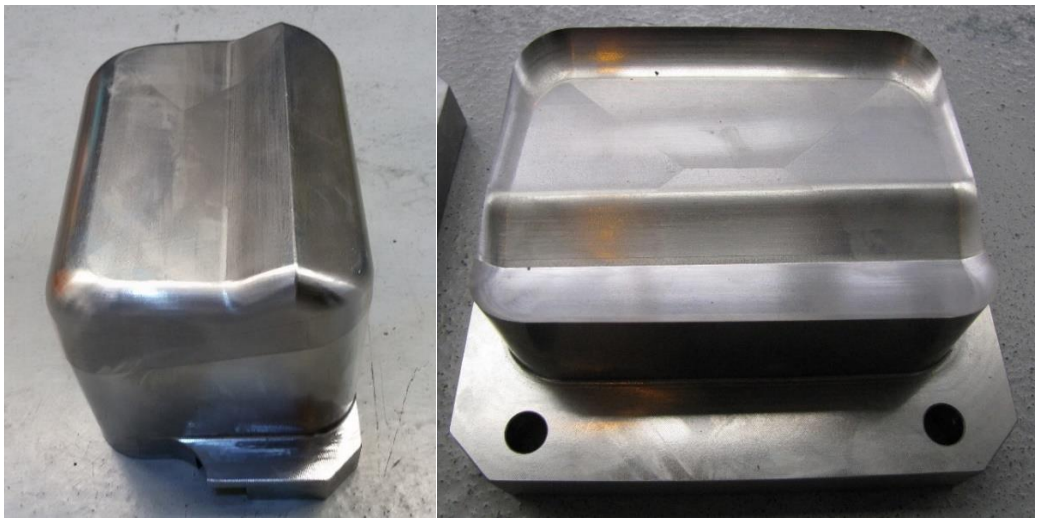


Obr. 30 Model lisovacího zkušebního nástroje (vlevo – tažnice, vpravo – tažník)

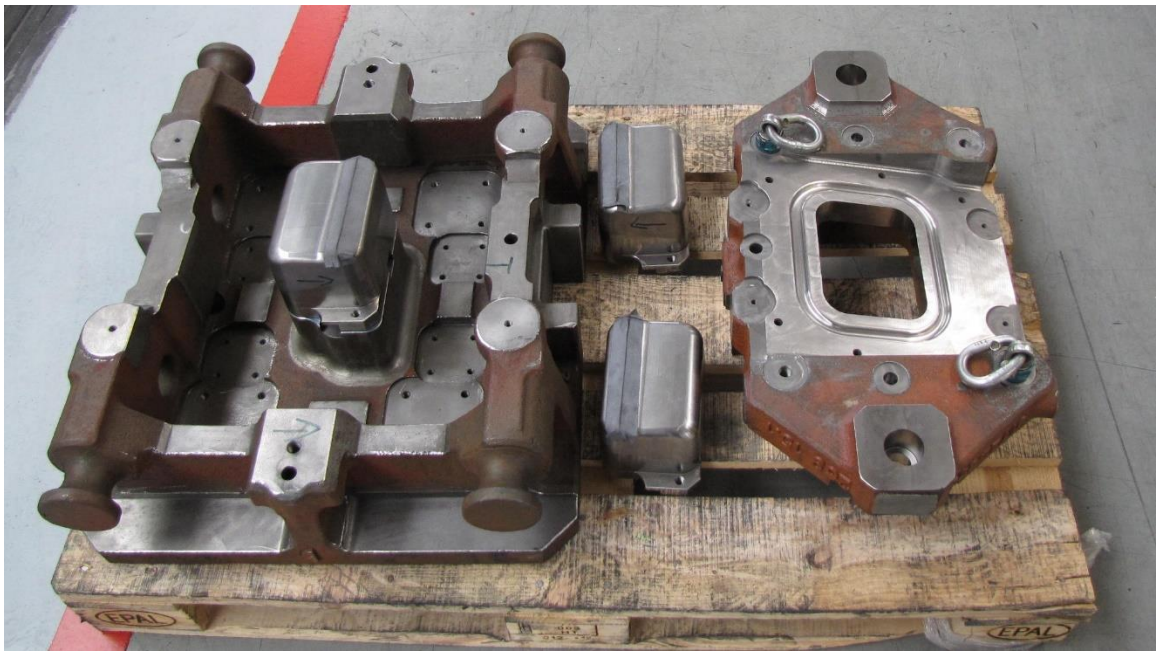


Obr. 31 Zasíťování tažníku (vlevo – celý nástroj, vpravo – detail radiusu)

Na obr. 32 je zobrazen reálný tažník vyrobený ve ŠKODA AUTO a.s. s ostrou designovou hranou o poloměru zaoblení 1 mm a tažnice s ideálně ostrou hranou. Samotné části nástroje byly následně zkompletovány dohromady do lože (obr. 33), které bylo vyrobené metodou spalitelného modelu, a následně byly obrobeny funkční plochy. Následně byly všechny části nástroje vsazeny do lisu, který bylo nutné seřídit na příslušný lisovací proces (obr. 34)

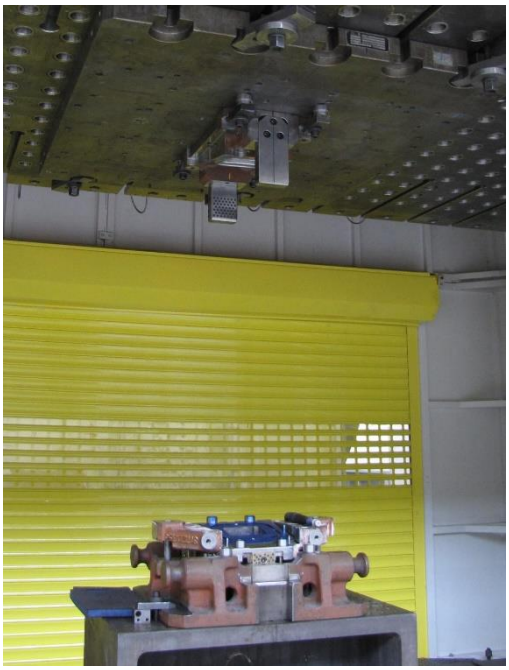


Obr. 32 Fotografie reálného nástroje (vlevo - tažník, vpravo – tažnice) [30]

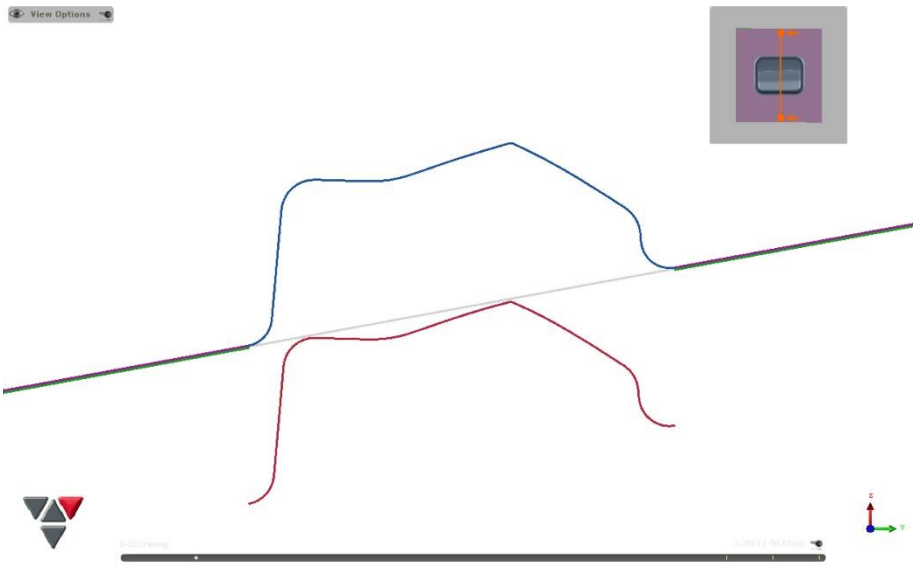


Obr. 33 Vlevo - fotografie tažníku usazeného v loži, vpravo – lože pro umístění tažnice [30]

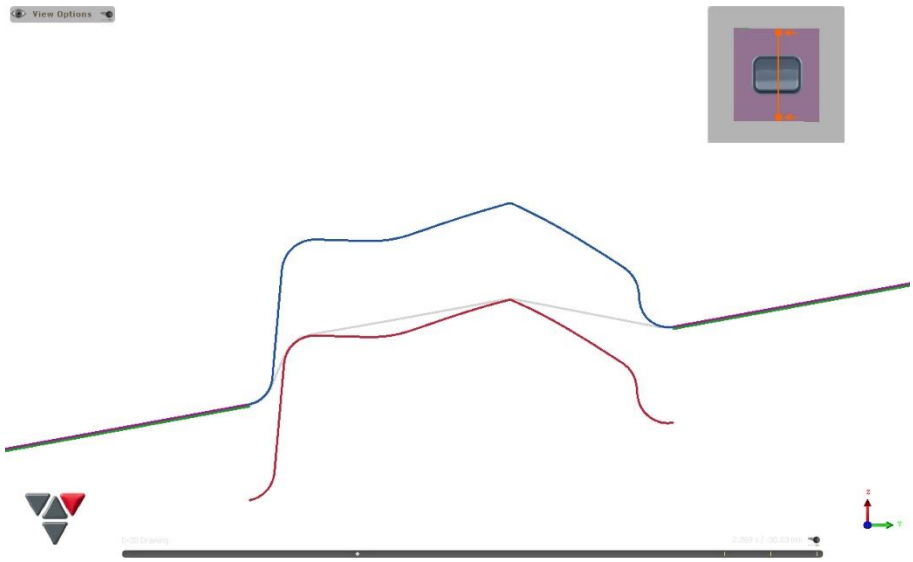
Následující obrázky (obr. 35 – 38) schematicky znázorňují průběh lisování designové hrany pořízené softwarem AutoForm. Proces je zobrazen v řezu, který je veden kolmo na designovou hranu středem nástroje. Červeně je znázorněn tažník, šedou barvou tažený plech a modře tažnice. U obr. 38 je zvětšen právě detail designové hrany právě na konci lisovacího procesu, těsně před odjetím nástroje zpět do počáteční polohy.



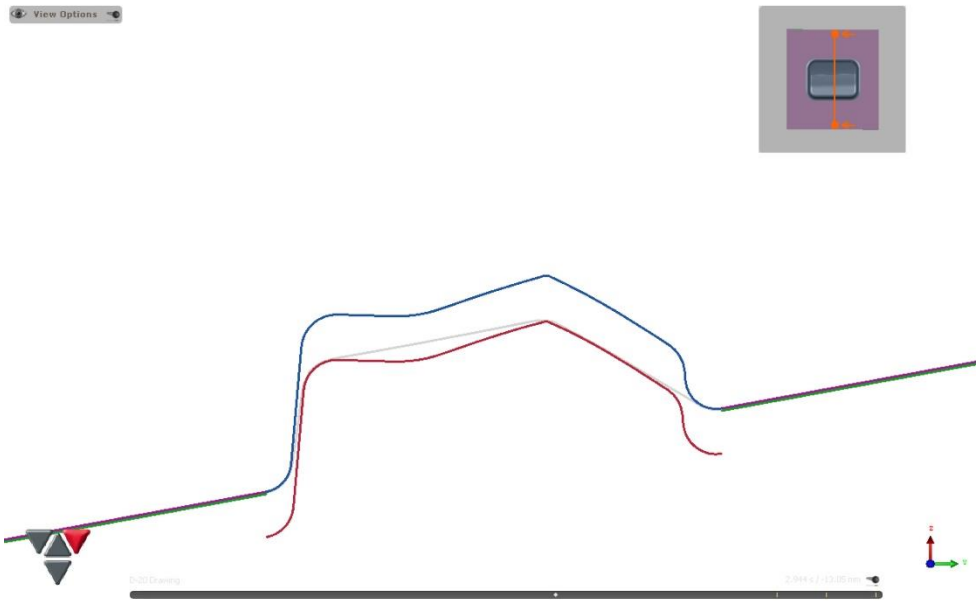
Obr. 34 Nástroje usazené do hydraulického lisu [30]



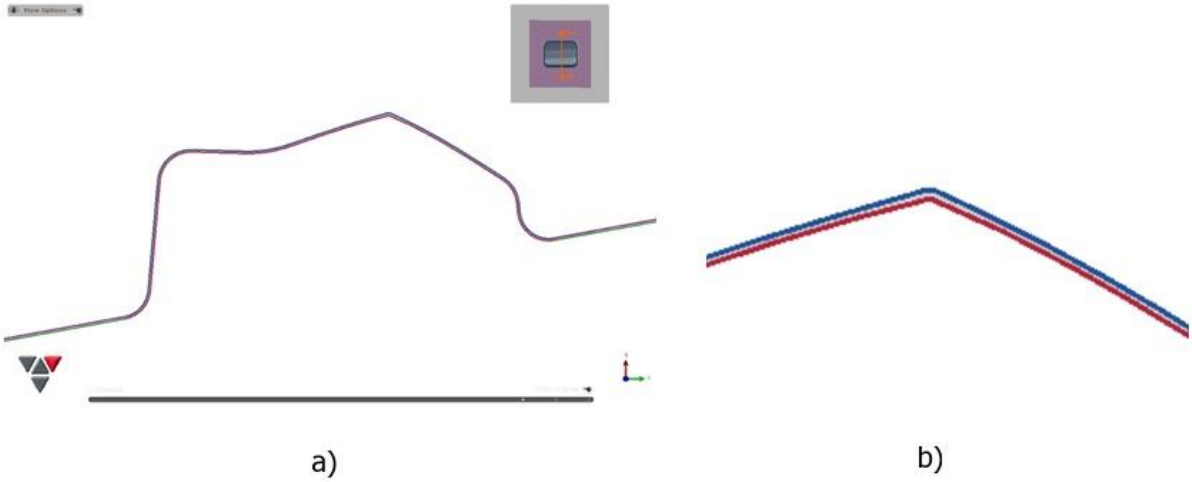
Obr. 35 Řez nástroji v počátku procesu lisování



Obr. 36 Řez nástroji v 30% procesu lisování



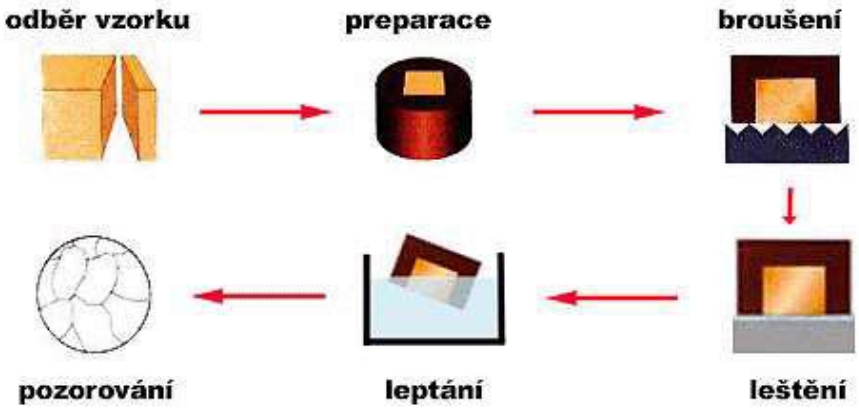
Obr. 37 Řez nástroji v 60% procesu lisování



Obr. 38 a) Řez nástroji ve 100% procesu lisování, b) detail designové hrany

3.2 Metalografický výbrusu

Metalografický výbrus je experimentální metoda odběru vzorku z reálného procesu, u kterého chceme pozorovat strukturu materiálu, kontrolovat jeho vlastnosti (jako mezioperační kontrola) nebo hledat příčiny vad. Pro potřeby této práce je metalografický výbrus použit k zjištění tloušťky plechu po deformaci.



Obr. 39 Postup při metalografickém výbrusu [23,24]

Postup při pořizování metalografického výbrusu:

- **Odběr vzorku**

Vzorky jsou odebírány tak, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění základního materiálu (teplota nesmí přesáhnout teploty fázových přeměn). Není proto vhodné použít tepelné metody dělení materiálu jako řezání laserem, kyslíkem apod. Vhodnou metodou je řezání, frézování (pro měkké materiály), odlamování, elektroeroze (pro tvrdé materiály).

- **Preparace vzorku**

Oddělený vzorek je ve formě zalit plastovou hmotou, která se následně vytvrdí. Preparace vzorků může probíhat za tepla i za studena. Za studena se preparují vzorky s nízkou teplotou tání. Ty jsou zality kapalinou, která po určité době ztuhne (Dentakryl, epoxidová pryskyřice) Naopak preparace za tepla je prováděna tak, že vzorek je umístěn do speciální tlakové komory, zasypán polymerem a následně slisován za působení vysoké teploty.

- **Broušení vzorku**

Operací broušení je odebírán z povrchu vzorku materiál a jsou tak zahlazovány nerovnosti povrchu. Postupuje se postupně od nejhrubší po ty nejjemnější brusné papíry. Na proces broušení má vliv mnoho faktorů jako např. drsnost a typ brusného papíru, typ brusiva, rychlost otáčení kotouče nebo přítlačná síla na vzorky. Na povrchu vzorku vlivem broušení vzniká natvářená vrstva kovu, tzv. Beilbyho vrstva. To je způsobení tlakem brousícího kotouče a zvýšenou teplotou na povrchu vzorku. Materiál ztrácí původní strukturu a zhoršuje to její čitelnost.

- **Leštění vzorku**

Leštěním se odstraní rýhy vzniklé předchozí operací, broušením. Můžeme ho provádět mechanicky, elektrolyticky nebo chemicky. Nejjednodušší je mechanické leštění, které lze přirovnat k broušení, jen je zde použita menší přítlačná síla a rychlost otáčení vzorků. Úběr materiálu je zde minimální. Výsledek leštění ovlivňuje materiál leštícího kotouče, typ tvar a velikost částic (jejich tvrdost a chemické složení), chladící prostředek a leštící suspenze.

- **Leptání**

Tento proces se provádí právě k odstranění Beilbyho vrstvy a zviditelnění jednotlivých strukturních částí. Bez naleptání bychom nebyli schopno pozorovat strukturu vzorků. Existuje mnoho druhů leptání podle toho, jakého výsledku chceme dosáhnout. Obecný princip je ponoření vzorků do leptacího činidla o určité teplotě, koncentraci a expoziční době. Mezi nejznámější je leptán na hranice zrn, kde dochází k napadení hlavně hranic zrn a zviditelnění tak celé struktury, nebo leptání plošné, které barevně zvýrazní a odliší jednotlivá zrna. Nyní je vzorek připraven k pozorování pod mikroskopem. [23,24]

4 NUMERICKÉ SIMULACE

Celý proces lisování byl simulován v softwaru AutoForm. Nástroj (ve formě digitálních dat) poskytla ŠKODA AUTO a.s. Cílem simulací bylo zjistit citlivost různých parametrů tváření na celý proces. Výsledkem simulací vznikl přehled všech parametrů a jejich míra ovlivnění při lisování designové hrany.

Vstupní parametry a základní nastavení simulace

- Materiál DC06 (viz příloha č. 1: materiálový list)
- Tloušťka plechu 0,7 ± 0,03 mm
- Poloměr zaoblení designové hrany r = 1 mm
- Směr válcování 0° (vzhledem ke hraně)
- Velikost přístřihu plechu 260 x 248 mm
- Součinitel smykového tření $\mu = 0{,}15$
- Zdvih nástroje $z_n = 400$ mm
- Rychlost pohybu nástroje $v_n = 235$ mm/s
- Čas lisování $t_l = 1{,}7$ s
- Celkový čas potřebný na výrobu 1 výlisku $t_c = 3{,}4$ s

Parametry tváření, které jsou v simulaci měněny

- Tloušťka plechu: 0,6 – 0,8 mm
- Směr válcování: 0°, 45° a 90°
- Síla přidržovače: 100 – 250 kN
- Tření: 0,1 – 0,25
- Kombinace tření a síly přidržovače 0,1 – 0,2; 100 – 200 kN

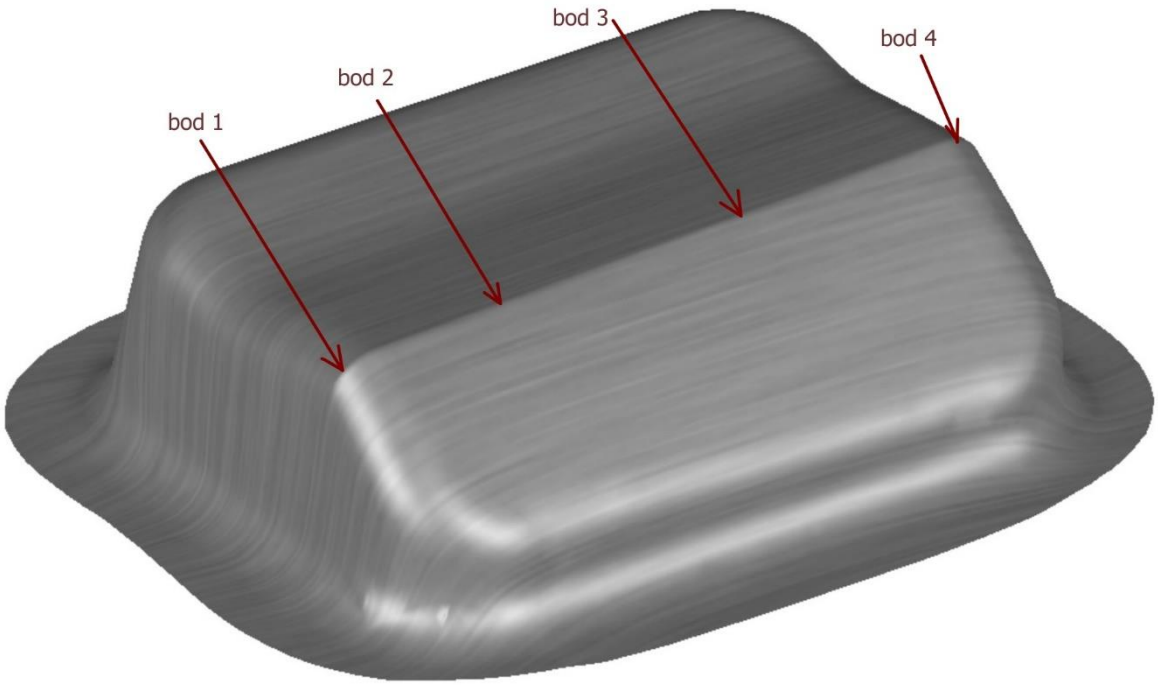
Hodnota tloušťky plechu byla měněna pouze v jeho toleranci z důvodu dodání materiálu v jeho dolní nebo horní hranici tloušťky. Jedná se tedy o rozmezí tloušťky 0,67 – 0,73 mm. Hodnoty 0,6 a 0,8 mm jsou uvedeny jen jako doplňující údaje pro představu změn. Směr válcování plechu je buď 0° (tzn. rovnoběžně s designovou hranou), 45° nebo 90°. Síla přidržovače se mění v rozmezí 100 – 250 kN a součinitel smykového tření je nastaven v rozmezí 0,1 – 0,25. Dále byla simulována kombinace dvou faktorů, které budeme měnit současně. Jedná se o vzájemný efekt tření a síly přidržovače, které

se mohou vzájemně vyrušit (v případě nízkého tření a vysoké síly přidržovače, nebo naopak vysokého tření a nízké síly přidržovače). Konkrétní hodnoty ze simulací jsou uvedeny v tabulkách č. 1 až 21.

Způsob vyhodnocování

Všechny analýzy byly vyhodnoceny na dvou místech, a to na hraně nástroje (bod 1) a přímo na samotné designové hraně (bod 2). Body jsou znázorněny na obr. č. 40.

Na oba dva body byly provedeny celkem 4 analýzy, a to analýza zpevnění, analýza změny tloušťky a analýza hlavního a vedlejšího napětí. Všechny výsledky analýz jsem zobrazil formou grafu a obrázky ze simulací s barevnou stupnicí (výstup softwaru AutoForm).



Obr. 40 Body k vyhodnocování (bod 1 je ve stejném místě na opačné straně nástroje, jako bod 4, bod 2 a 3 jsou body na designové hraně)

4.1 Analýza zpevnění

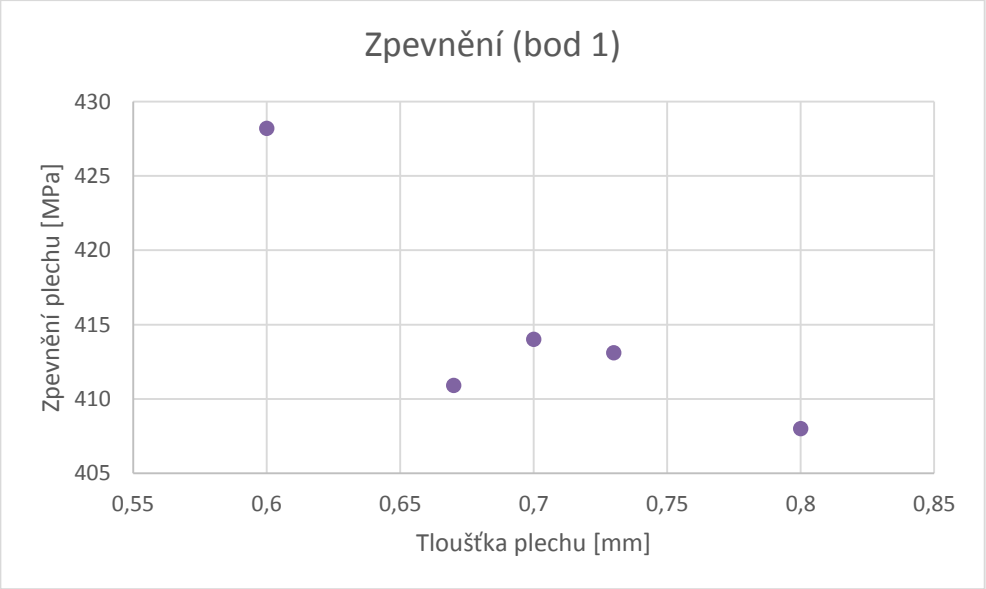
Pokud materiál intenzivně deformujeme za studena (teplota procesu je nižší než teplota rekrystalizace), dochází k jeho zpevnění vlivem vzniku nových dislokací.

Na zkušebním nástroji jsem provedl analýzu deformačního zpevnění pomocí softwaru AutoForm. Nejvyšší hodnota zpevnění je očekávána na místech s největším přetvořením, tj. na hranách a rádiech. [27]

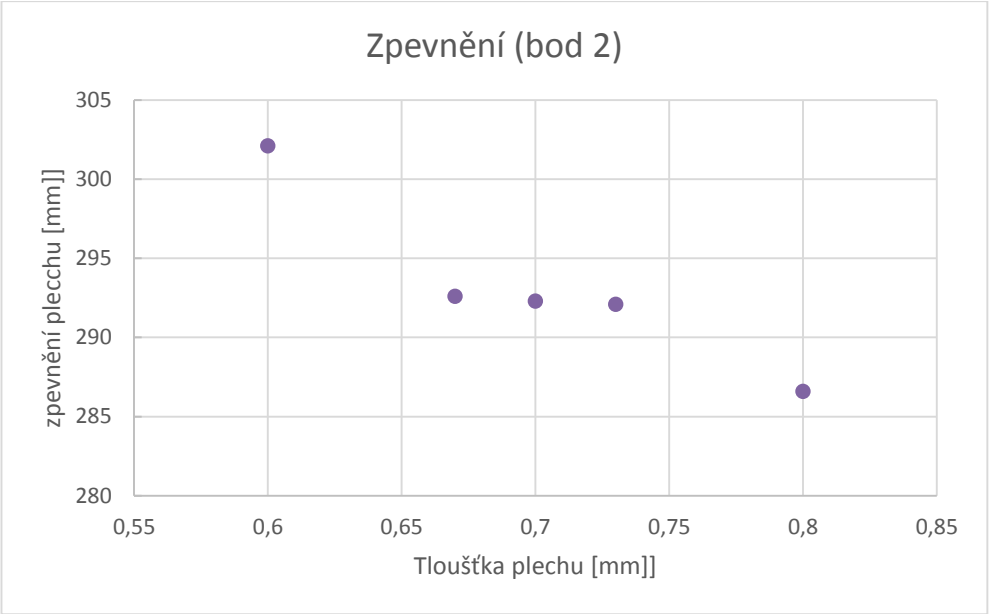
4.1.1 Zpevnění materiálu v závislosti na tloušťce plechu

Tab. 1 Zpevnění materiálu závislé na tloušťce plechu

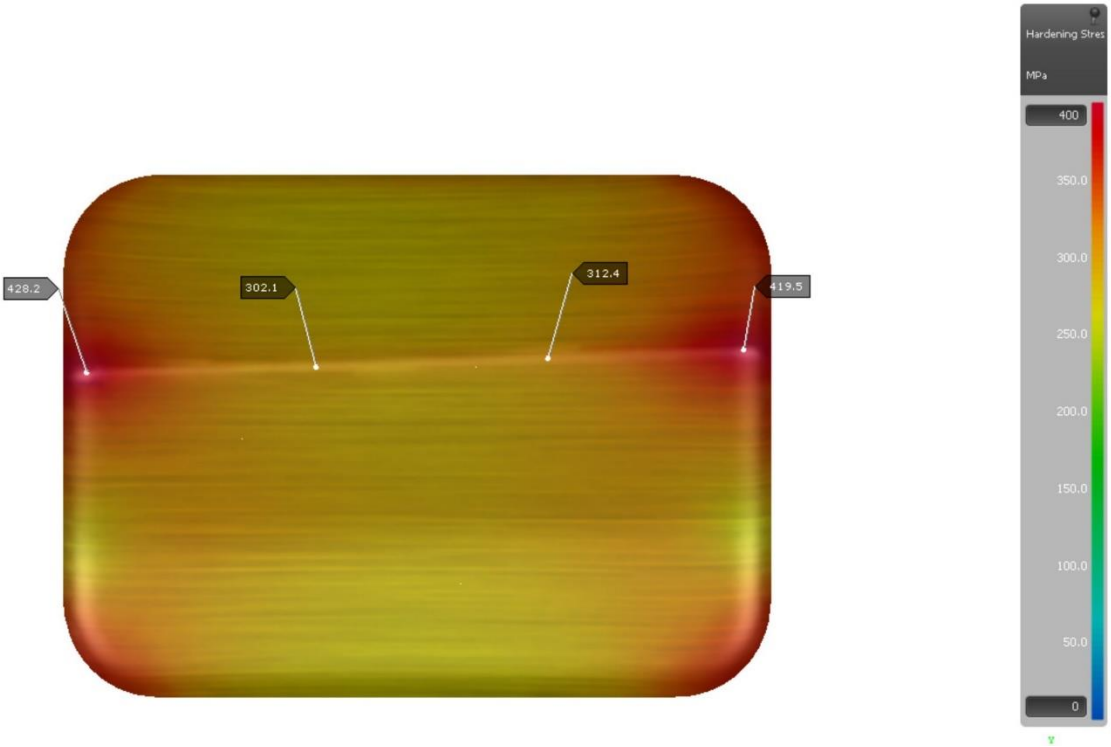
Tloušťka plechu[mm]	Zpevnění [MPa]			
	bod 1	bod 2	bod 3	bod 4
0,6	428,2	302,1	312,1	419,5
0,67	410,9	292,6	299,6	407,3
0,7	414	292,3	301,3	406,4
0,73	413,1	292,1	309	405,8
0,8	408	286,6	297,2	398,2



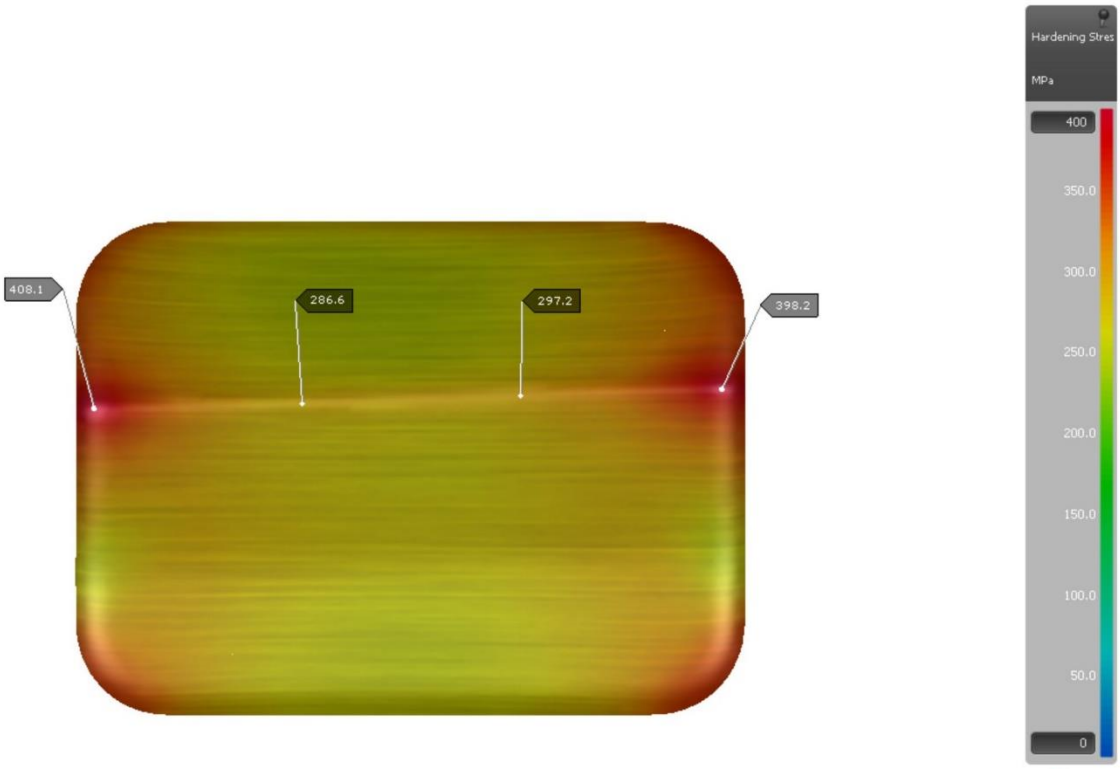
Obr. 41. Graf zpevnění materiálu v závislosti na tloušťce plechu (bod 1)



Obr. 42. Graf zpevnění materiálu v závislosti na tloušťce plechu (bod 2)



Obr. 43 Analýza zpevnění materiálu pro tloušťku plechu 0,6 mm

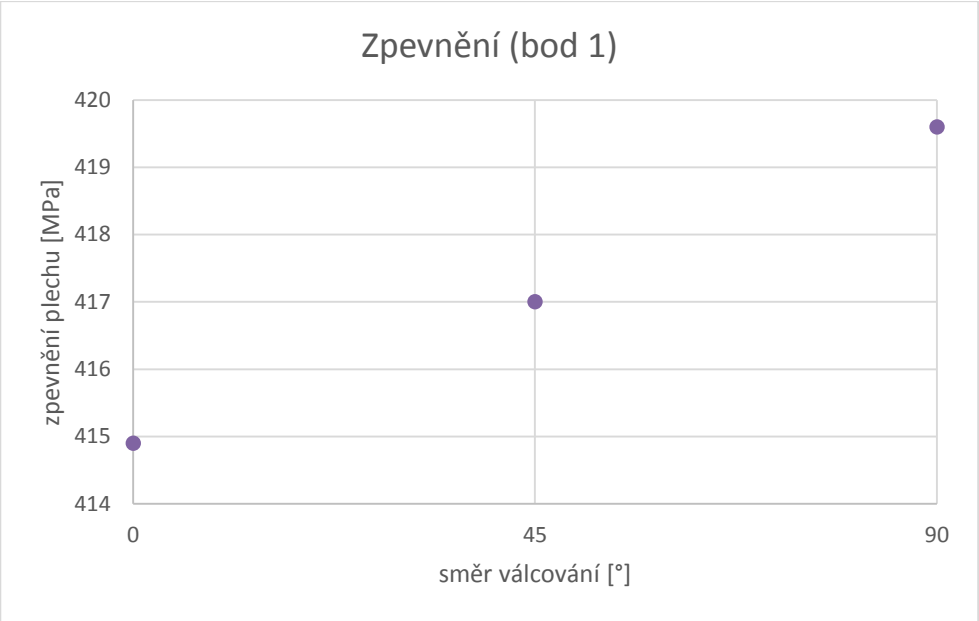


Obr. 44 Analýza zpevnění materiálu pro tloušťku plechu 0,8 mm

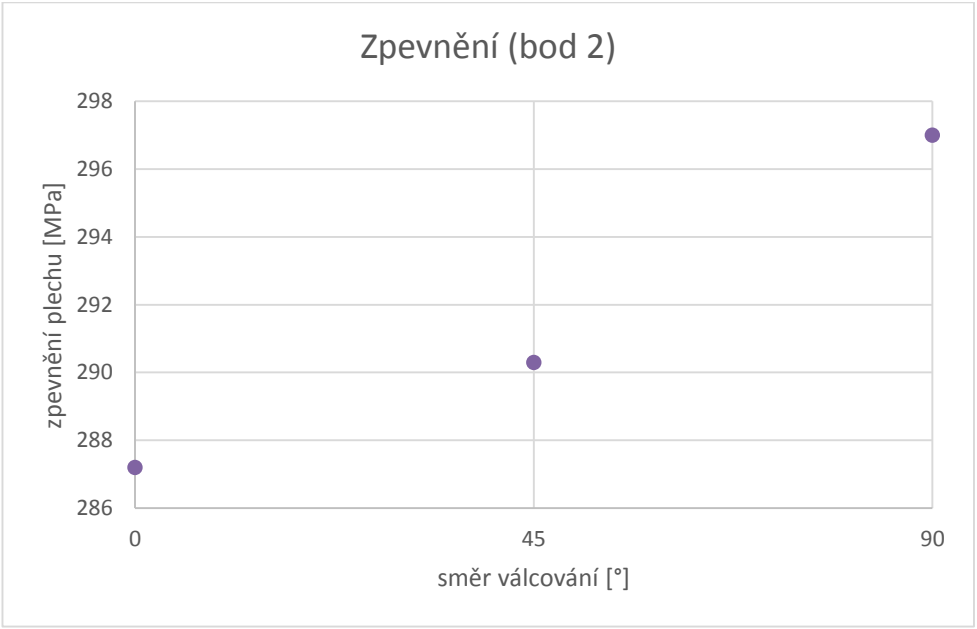
4.1.2 Zpevnění materiálu v závislosti na směru válcování

Tab. 2 Zpevnění závislé na směru válcování

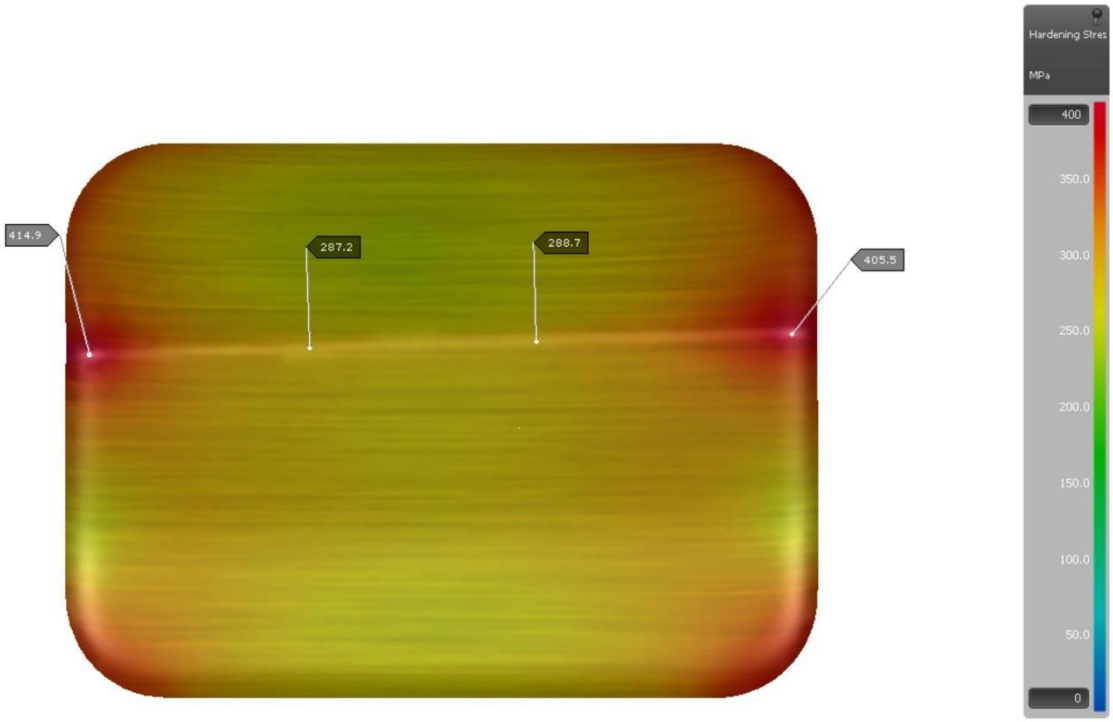
Směr válcování[°]	Zpevnění [Mpa]			
	bod 1	bod 2	bod 3	bod 4
0	414,9	287,2	288,7	405,5
45	417	290,3	289,7	414,3
90	419,6	297	298,3	415,6



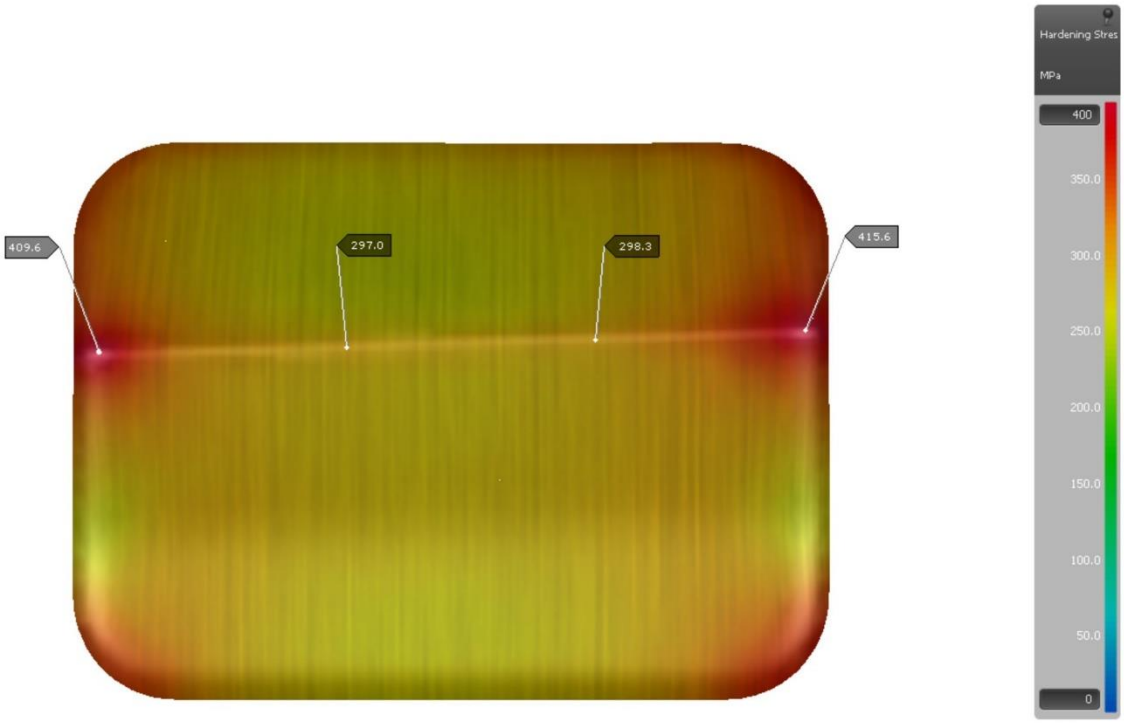
Obr. 45. Graf zpevnění materiálu v závislosti na směru válcování (bod 1)



Obr. 46. Graf zpevnění materiálu v závislosti na směru válcování (bod 2)



Obr. 47 Analýza zpevnění materiálu pro plech se směrem válcování 0°

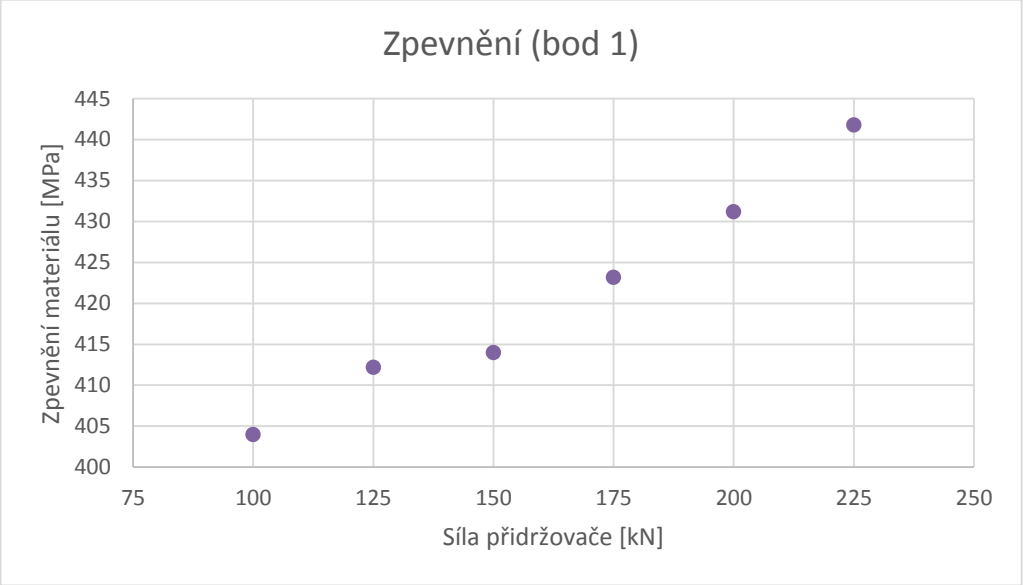


Obr. 48 Analýza zpevnění materiálu pro plech se směrem válcování 90°

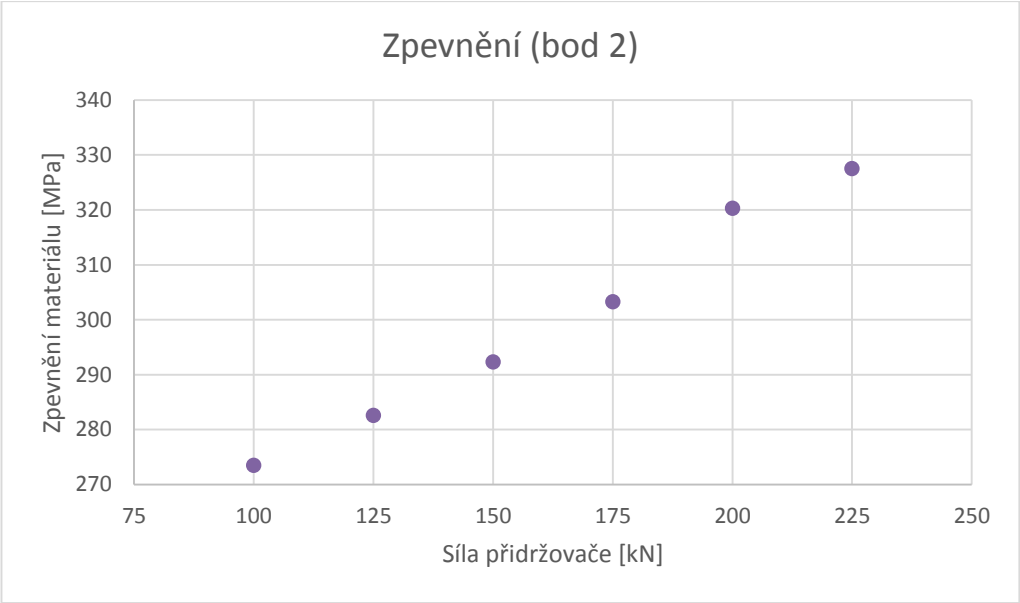
4.1.3 Zpevnění materiálu v závislosti na síle přidržovače

Tab. 3 Zpevnění závislé na síle přidržovače

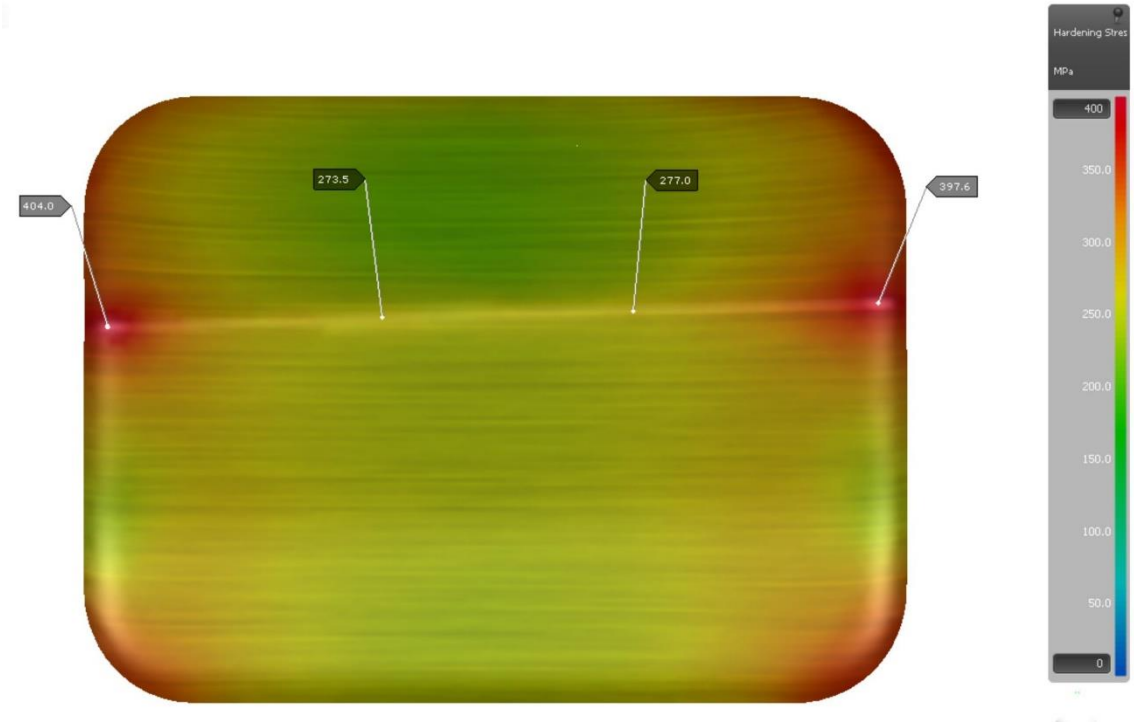
Síla přidržovače [kN]	Zpevnění [Mpa]			
	bod 1	bod 2	bod 3	bod 4
100	404	273,5	277	397,6
125	412,2	282,6	286,7	396,3
150	414	292,3	301,3	406,4
175	423,2	303,3	305,9	421,7
200	431,2	320,3	320,1	429,3
225	441,8	327,5	332,3	432,8
250	Porušení materiálu			



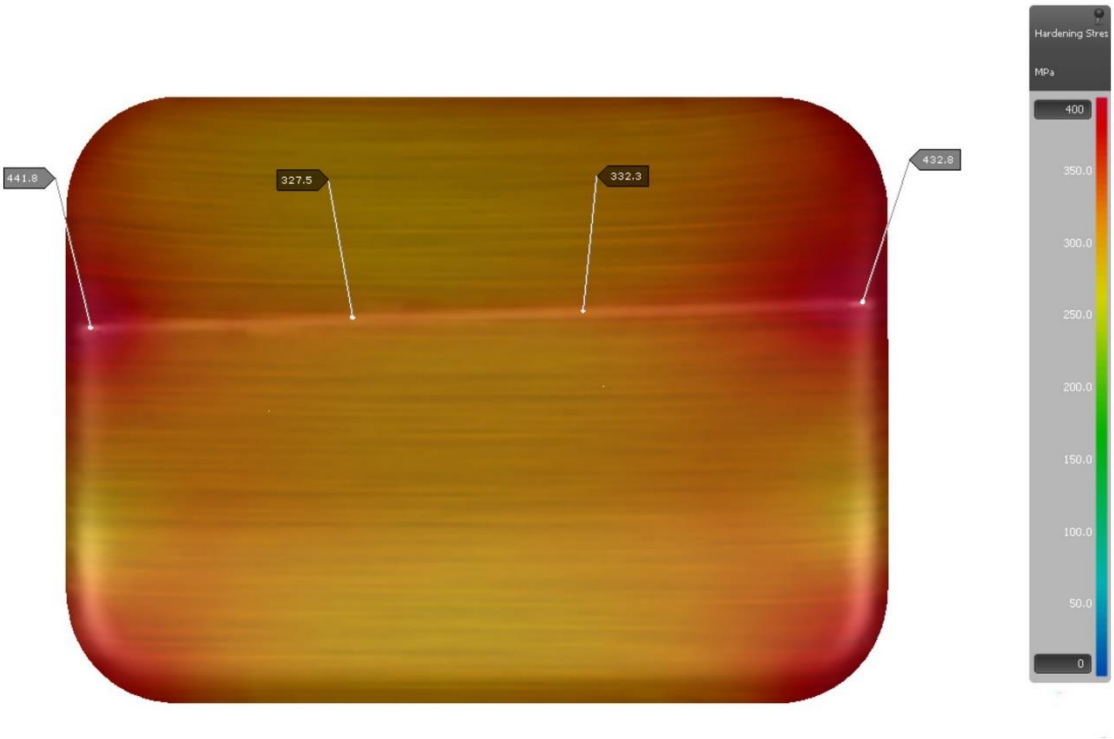
Obr. 49 Graf zpevnění materiálu v závislosti na síle přidržovače (bod 1)



Obr. 50 Graf zpevnění materiálu v závislosti na síle přidržovače (bod 2)



Obr. 51 Analýza zpevnění materiálu pro sílu přidržovače 100 kN

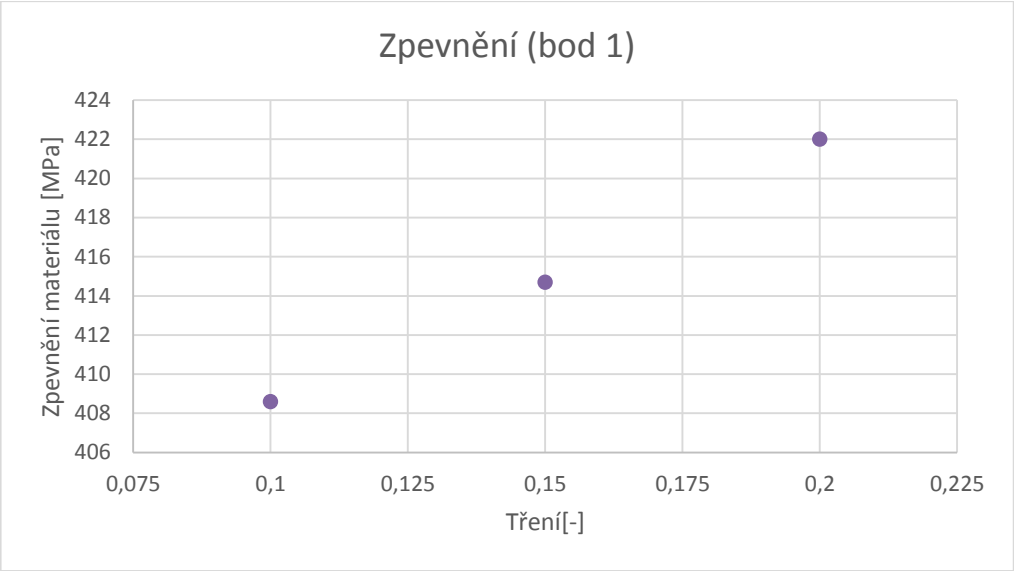


Obr. 52 Analýza zpevnění materiálu pro sílu přidržovače 225 kN

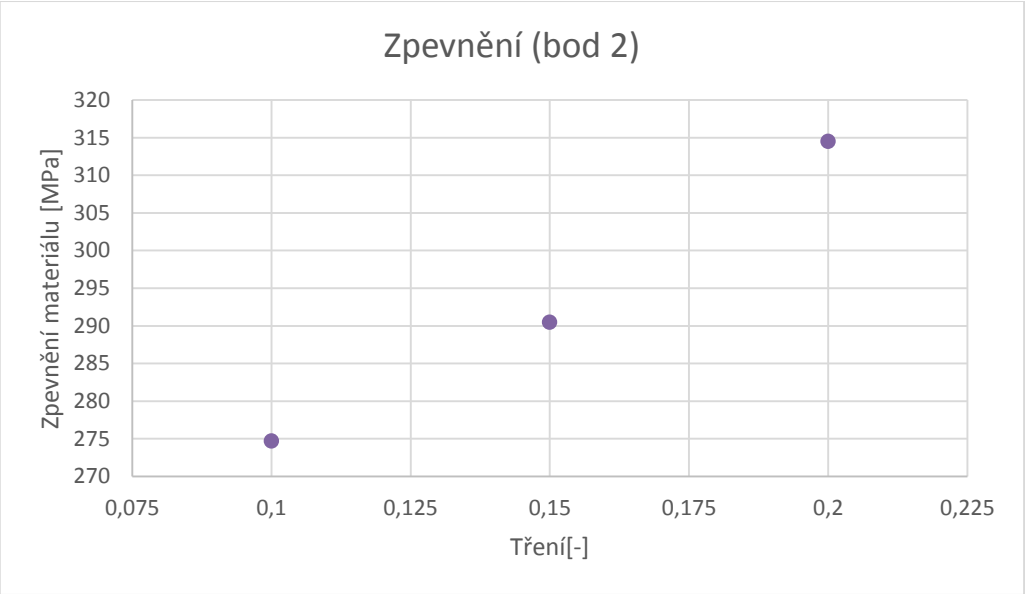
4.1.4 Zpevnění materiálu v závislosti na tření

Tab. 4 Zpevnění závislé na velikosti tření

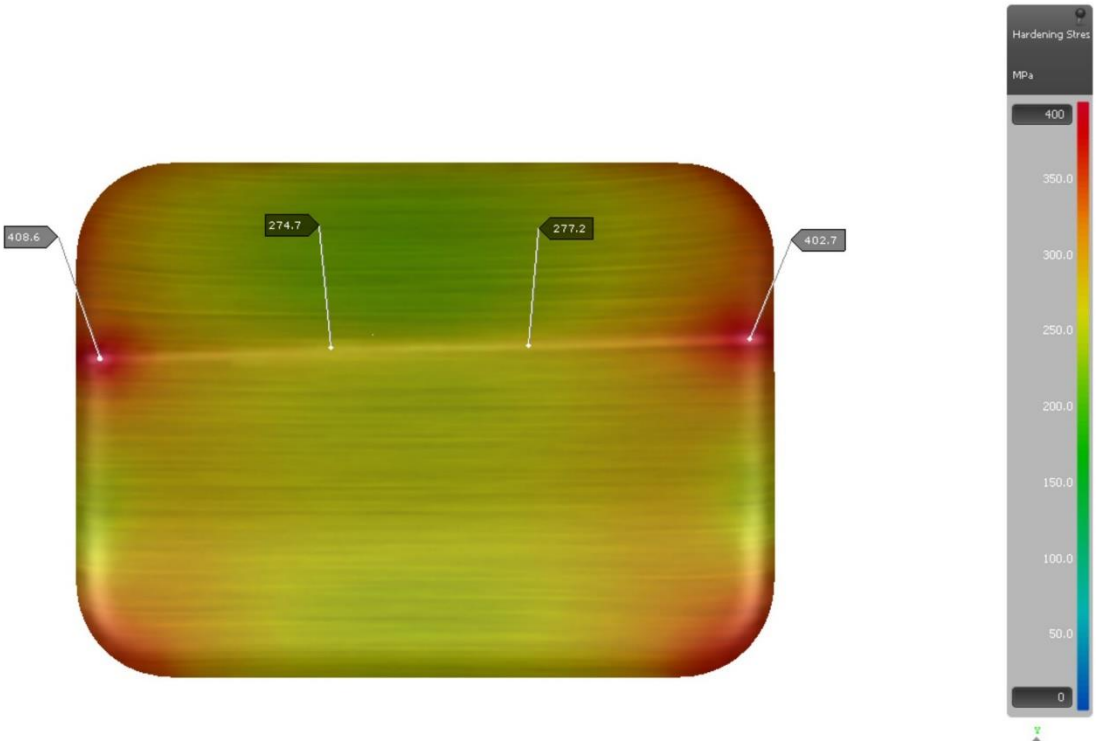
Tření [-]	Zpevnění [Mpa]			
	bod 1	bod 2	bod 3	bod 4
0,1	408,6	274,7	277,2	402,7
0,15	414,7	290,5	299,6	411,4
0,2	422	314,5	308,2	415,5
0,25	Porušení materiálu			



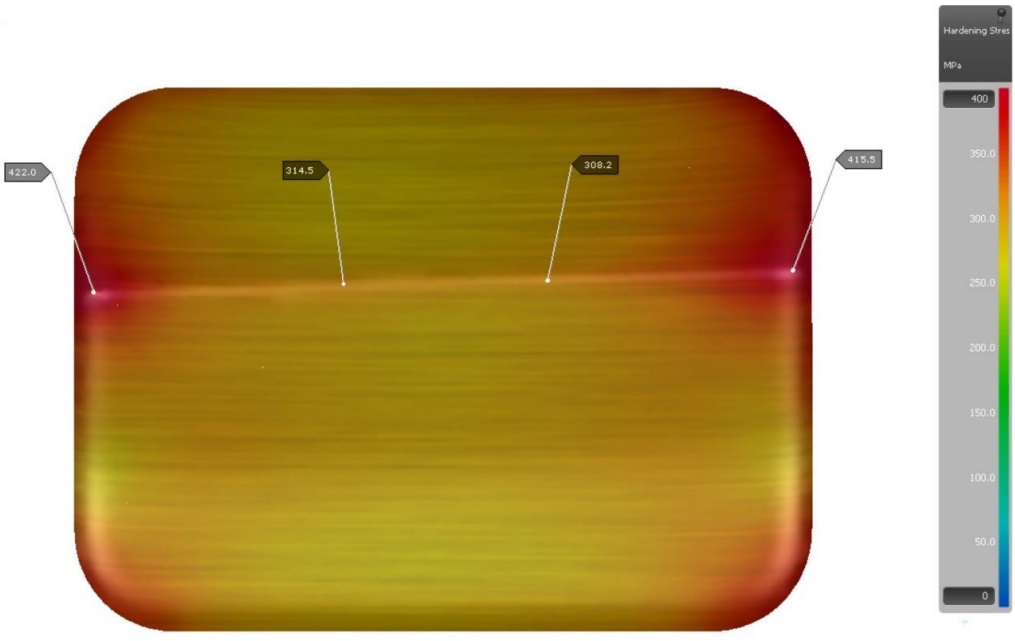
Obr. 53 Graf zpevnění materiálu v závislosti na tření (bod 1)



Obr. 54 Graf zpevnění materiálu v závislosti na tření (bod 2)



Obr. 55 Analýza zpevnění materiálu pro koeficient tření 0,1

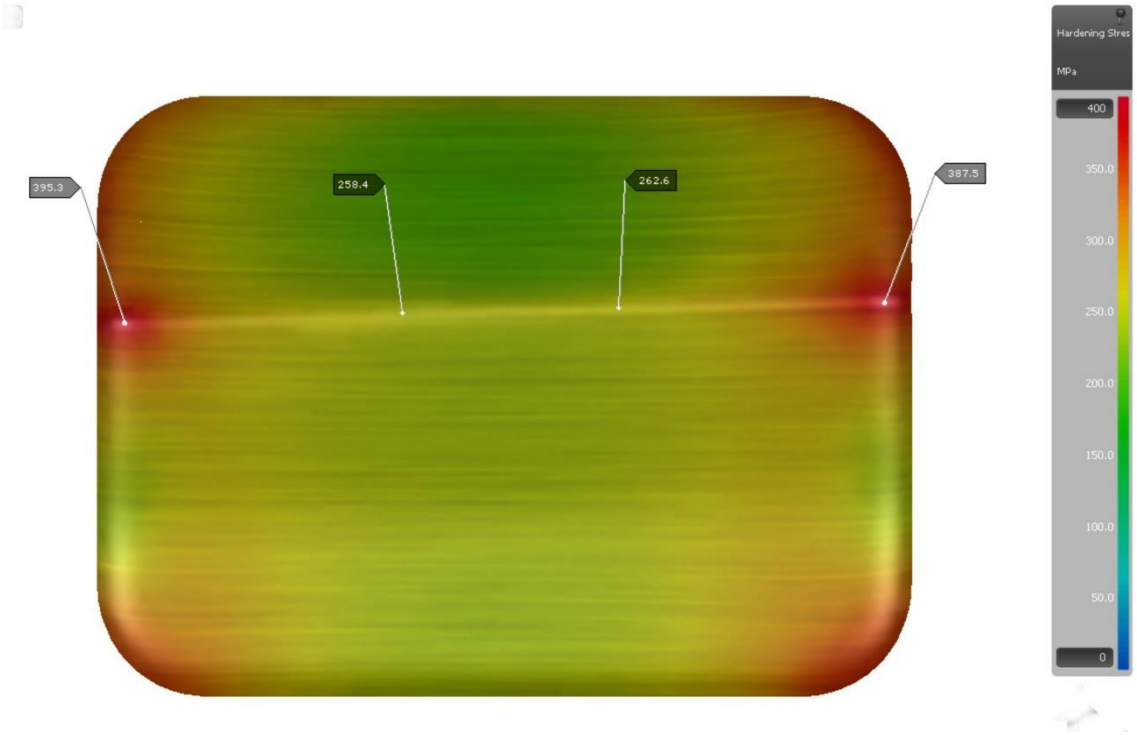


Obr. 56 Analýza zpevnění materiálu pro koeficient tření 0,2

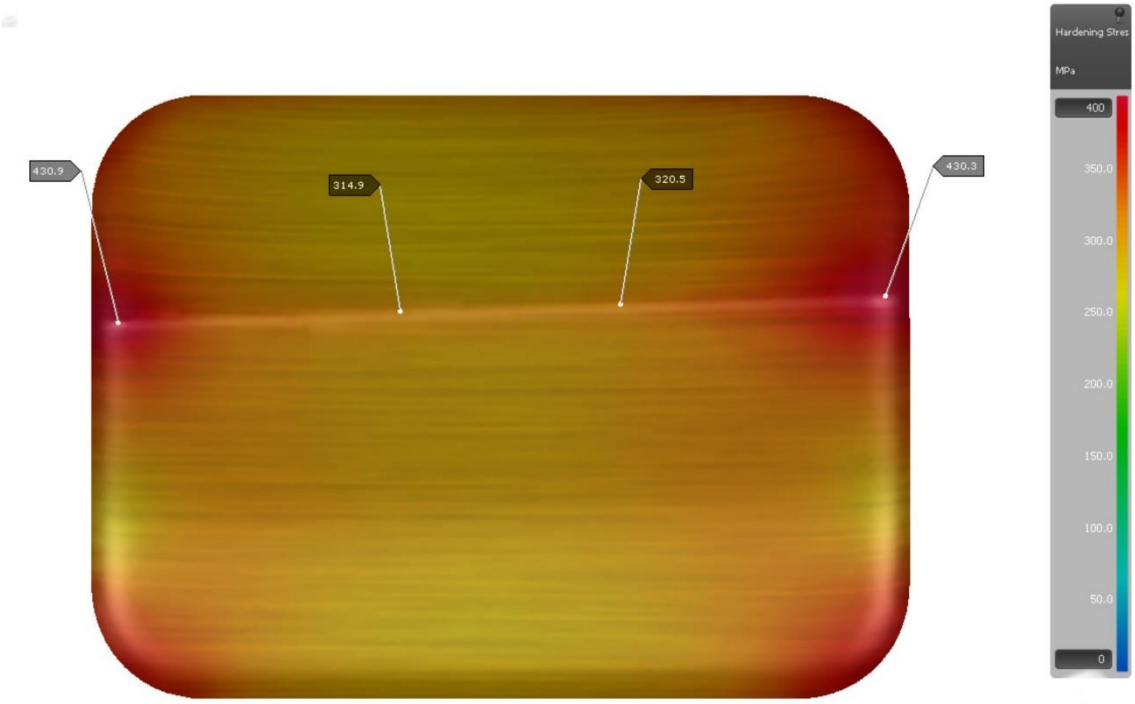
4.1.5 Zpevnění materiálu v závislosti na kombinaci tření a síly přidržovače

Tab. 5 Zpevnění závislé na kombinaci tření a síly přidržovače

tření [-]	síla přidržovače [kN]	zpevnění [Mpa]			
		bod 1	bod 2	bod 3	bod 4
0,1	100	395,3	258,4	262,6	387,5
0,1	150	408,6	275,5	276,7	398,8
0,1	200	419,3	289,4	293,6	430,9
0,15	100	406	270,2	275,8	408
0,15	150	415,8	293,2	288,7	405,5
0,15	200	430,9	314,9	320,5	430,9
0,2	100	405,6	277,3	284,2	391,3
0,2	150	422	312,5	309,4	413,7
0,2	200	Porušení materiálu			



Obr. 57 Analýza zpevnění materiálu pro sílu přidržovače 100 kN a koeficient tření 0,1



Obr. 58 Analýza zpevnění materiálu pro sílu přidržovače 200 kN a koeficient tření 0,15

4.1.6 Interpretace výsledků analýzy zpevnění

Z hlediska tloušťky plechu v jeho toleranci, tzn. v rozmezí 0,67 – 0,73 mm se během simulací neprojevila žádná větší změna zpevnění materiálu. Odskok hodnot měly až krajní hodnoty 0,6 a 0,8 mm, přičemž z grafu obecně vyplývá, že čím větší tloušťka plechu, tím méně materiál zpevňuje. (viz tab. 1, obr. 41 a 42). Je to dáno tím, že s rostoucí tloušťkou plechu roste i hodnota tvařitelnosti, materiál méně ztenčuje, tím pádem je méně protvářen a hodnota zpevnění je nižší. Naopak zpevnění nejvíce ovlivňuje tlak přidržovače (tab. 3, obr. 49 a 50) a tření mezi materiálem a nástroji (tab. 4, obr. 53 a 54). Čím vyšší je síla přidržovače a čím vyšší tření, tím materiál zpevňuje více. Je to dáno tím, že při velkém tlaku přidržovače je materiál více brzděn proti proklouznutí a tím je materiál více vypnutý a je větší mírou tvářen. To samé platí i pro tření mezi nástroji a tvářeným plechem. V kombinaci tření a síly přidržovače (tab. 5) je toto tvrzení potvrzeno a jejich vliv na zpevnění materiálu se sčítá, neplatí zde synergický efekt, kdy by byly hodnoty vyšší než jejich prostý součet. Dále je možné zpevnění ovlivnit umístěním plechu do nástroje, resp. volbou vhodného směru válcování (tab. 2, obr. 45 a 46). Nejvyšších hodnot zpevnění bylo dosaženo při směru válcování 90° vzhledem k designové hraně, nejmenší hodnoty při směru 0°.

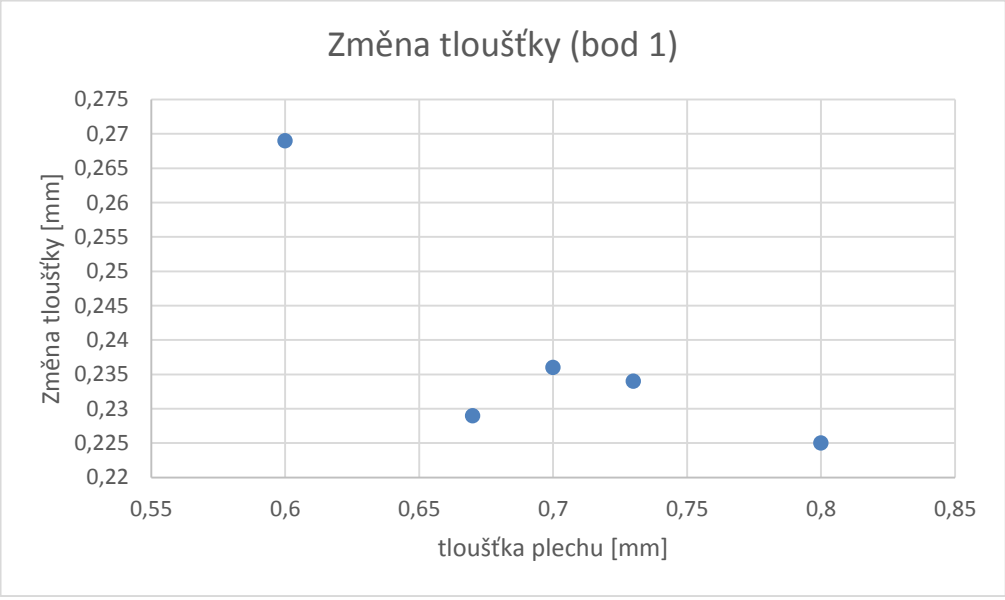
4.2 Analýza změny tloušťky

Ztenčení materiálu je jedním z negativních znaků lisování. Nejvíce materiál ztenčuje na hranách a rádiech, kde je materiál tažen přes hranu nástroje. Při příliš velkém ztenčení může dojít ke vzniku trhlin a protržení výlisku. Následujícími analýzami bylo ověřeno, jaké parametry ovlivňují ztenčení materiálu nejvíce, které naopak vůbec.

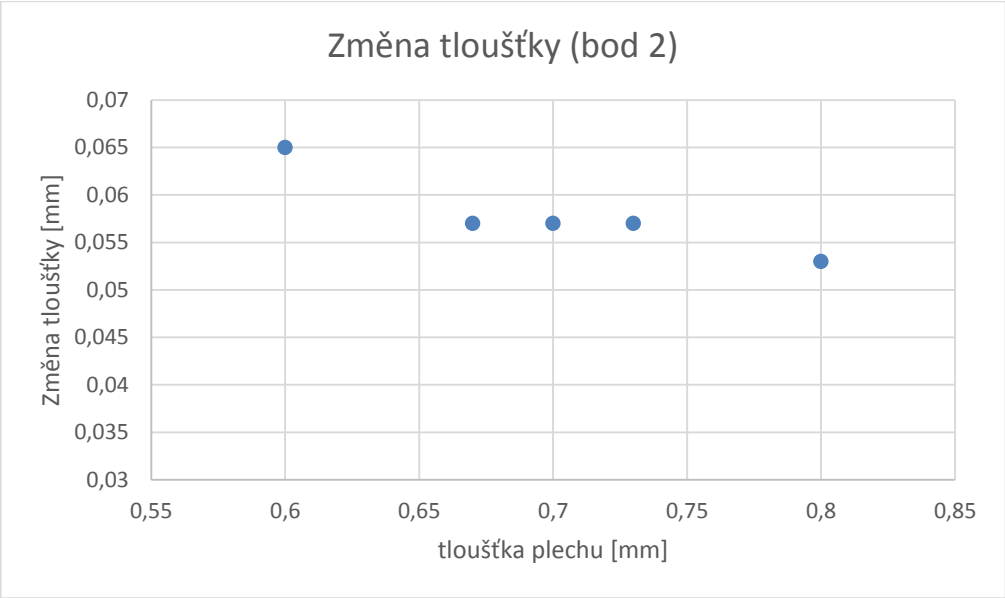
4.2.1 Změna tloušťky v závislosti na původní tloušťce materiálu

Tab. 6 Změna tloušťky závislá na původní tloušťce materiálu

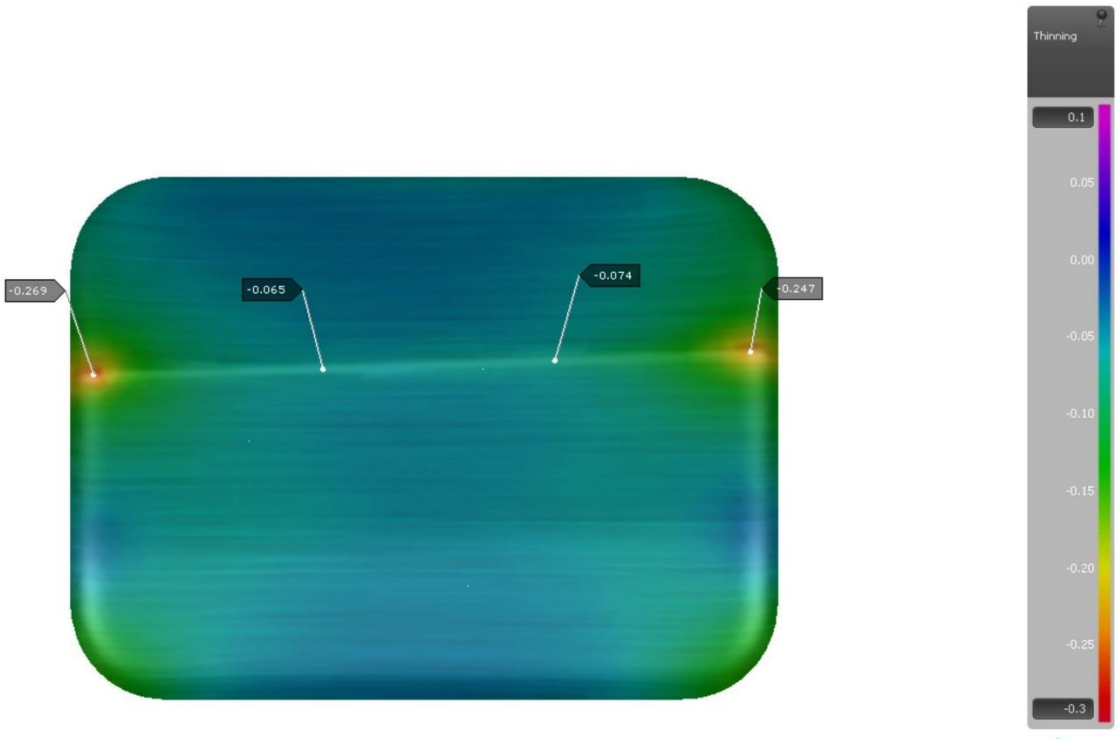
Tloušťka plechu[mm]	Změna tloušťky [mm]			
	bod 1	bod 2	bod 3	bod 4
0,6	0,269	0,065	0,074	0,247
0,67	0,229	0,057	0,063	0,221
0,7	0,236	0,057	0,064	0,219
0,73	0,234	0,057	0,07	0,217
0,8	0,225	0,053	0,06	0,203



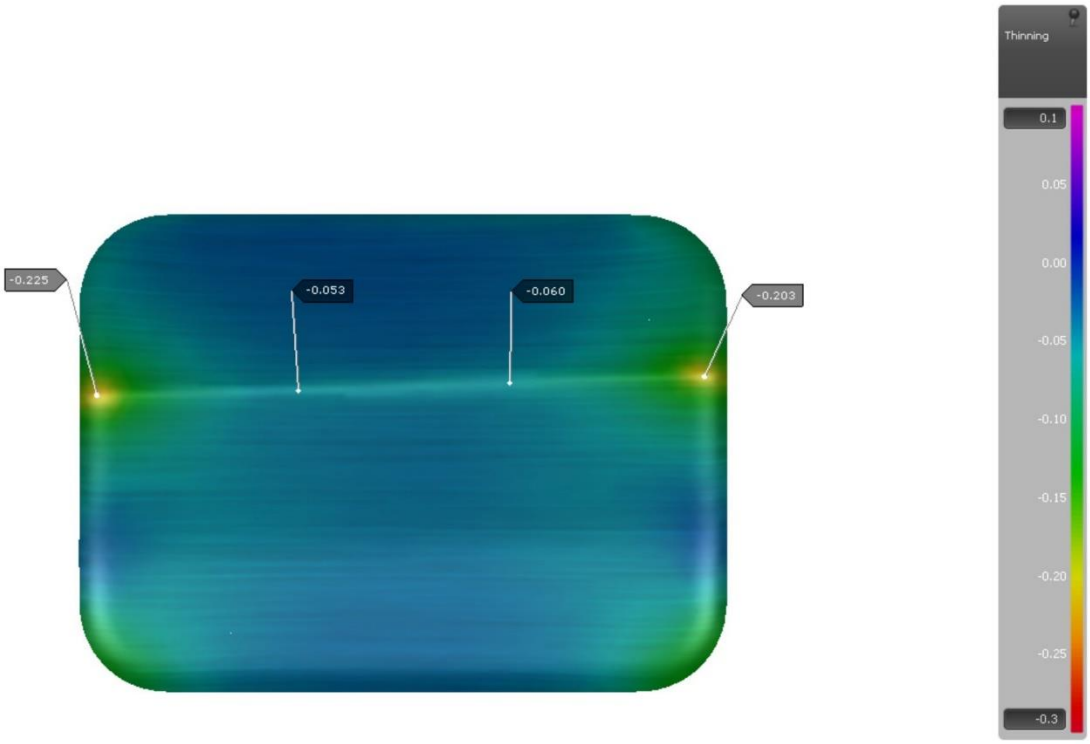
Obr. 59. Graf změny tloušťky materiálu v závislosti na původní tloušťce (bod 1)



Obr. 60 Graf změny tloušťky materiálu v závislosti na původní tloušťce (bod 2)



Obr. 61 Analýza změny tloušťky pro tloušťku plechu 0,6 mm

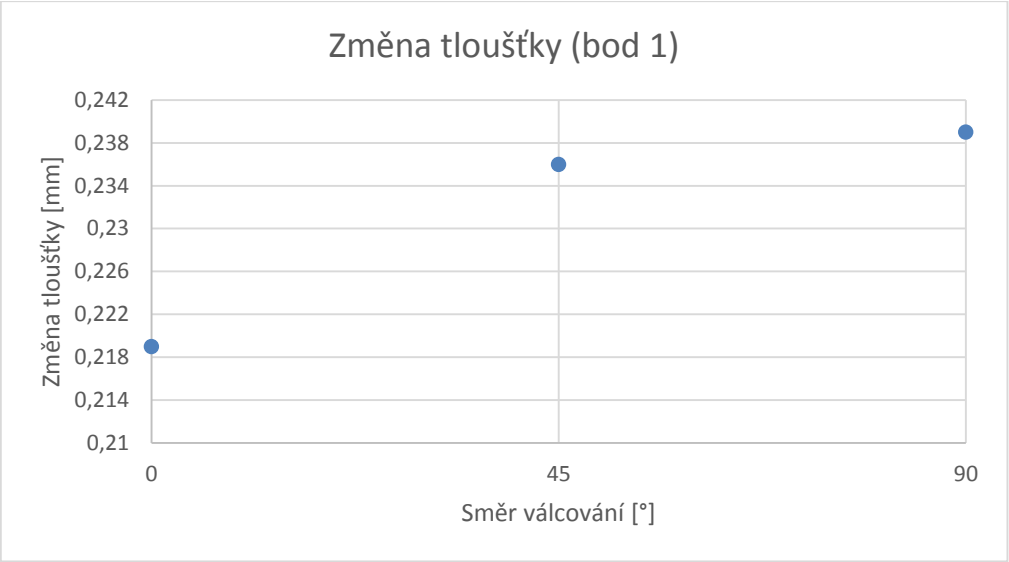


Obr. 62 Analýza změny tloušťky pro tloušťku plechu 0,8 mm

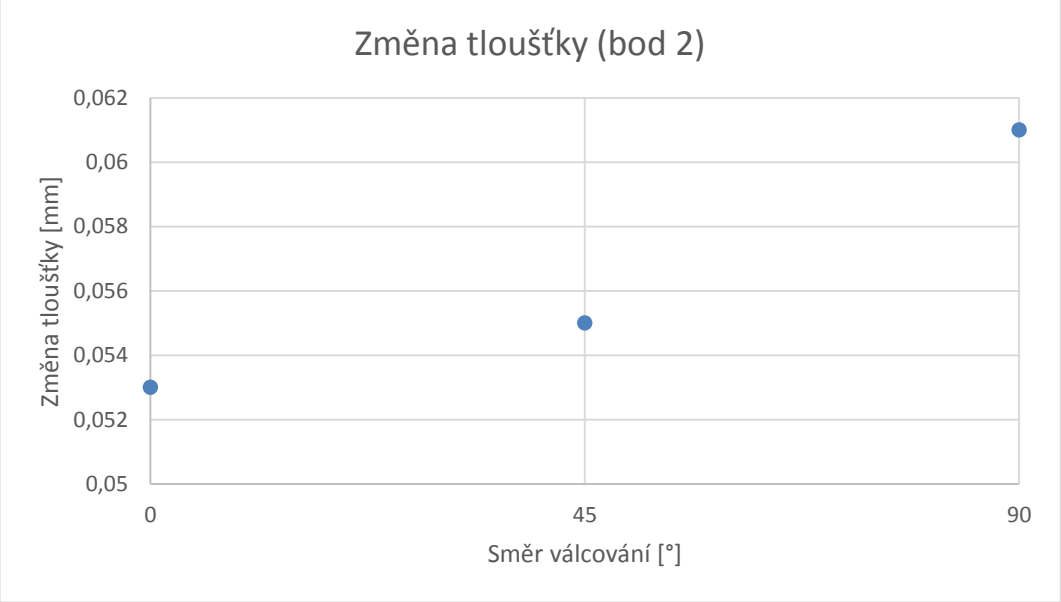
4.2.2 Změna tloušťky v závislosti na směru válcování

Tab. 7 Změna tloušťky závislá na směru válcování

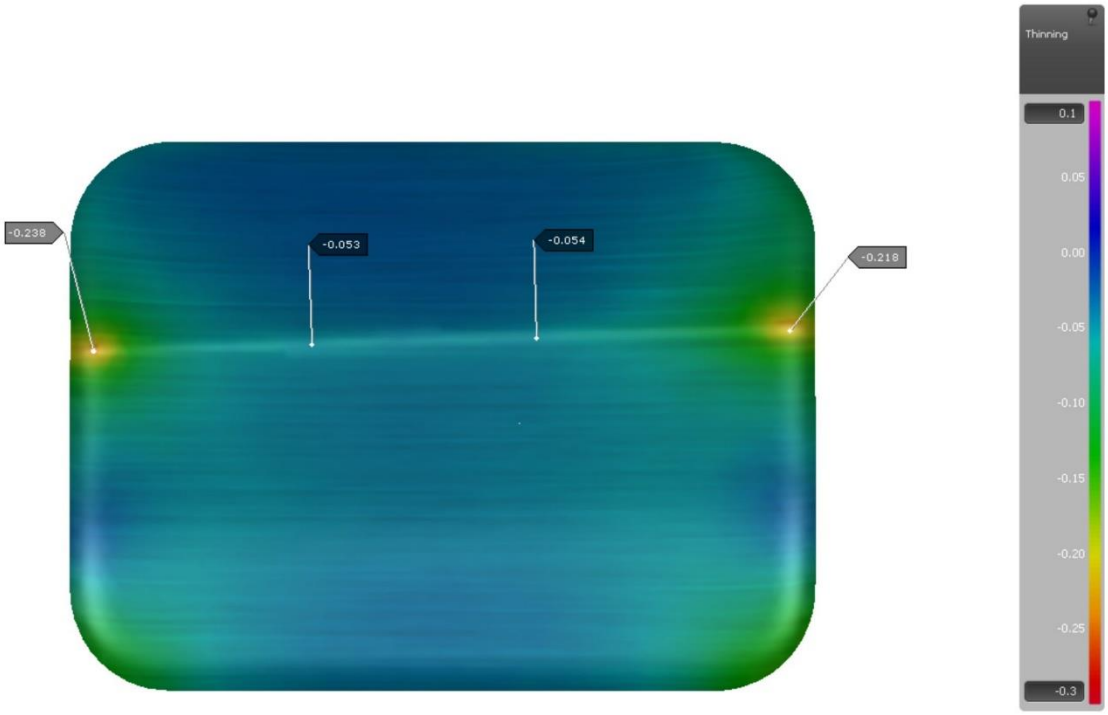
Směr válcování[°]	Změna tloušťky [mm]			
	bod 1	bod 2	bod 3	bod 4
0	0,238	0,053	0,054	0,219
45	0,241	0,055	0,055	0,236
90	0,225	0,061	0,062	0,239



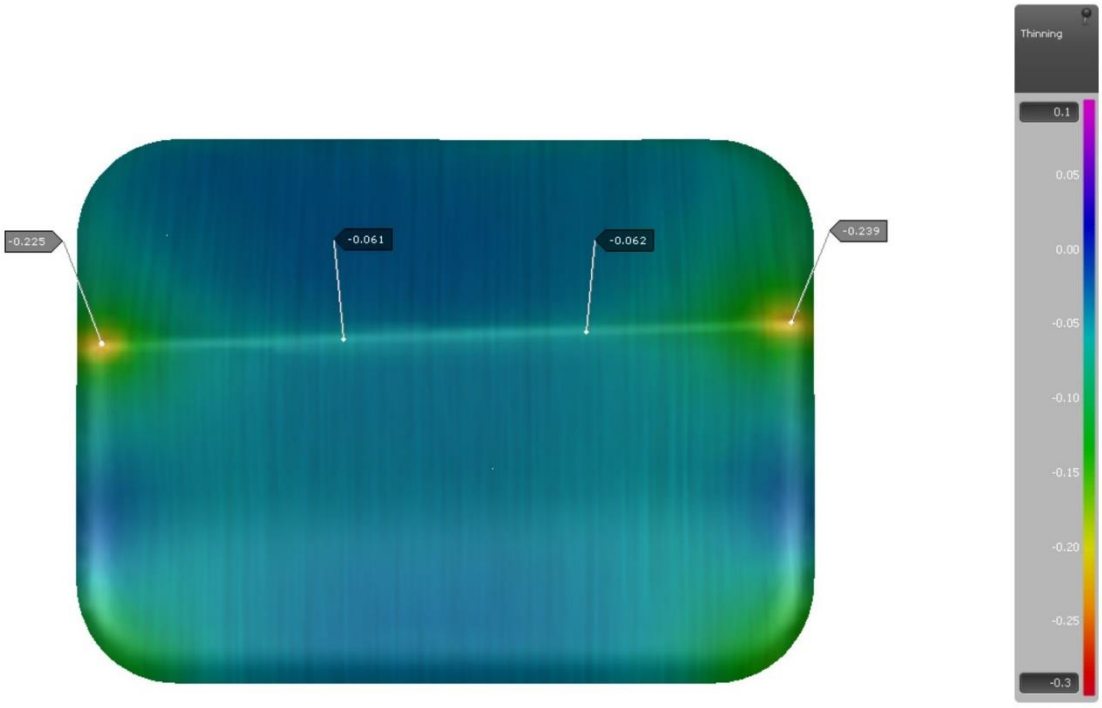
Obr. 63 Graf změny tloušťky materiálu v závislosti na směru válcování (bod 1)



Obr. 64 Graf změny tloušťky materiálu v závislosti na směru válcování (bod 2)



Obr. 65 Analýza změny tloušťky pro směr válcování plechu 0°

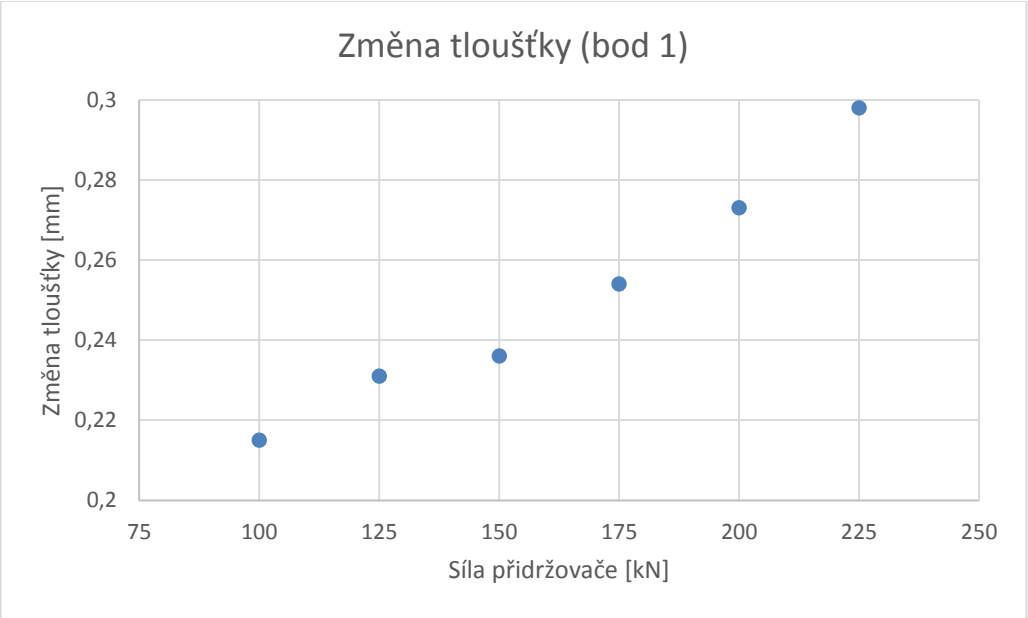


Obr. 66 Analýza změny tloušťky pro směr válcování plechu 90°

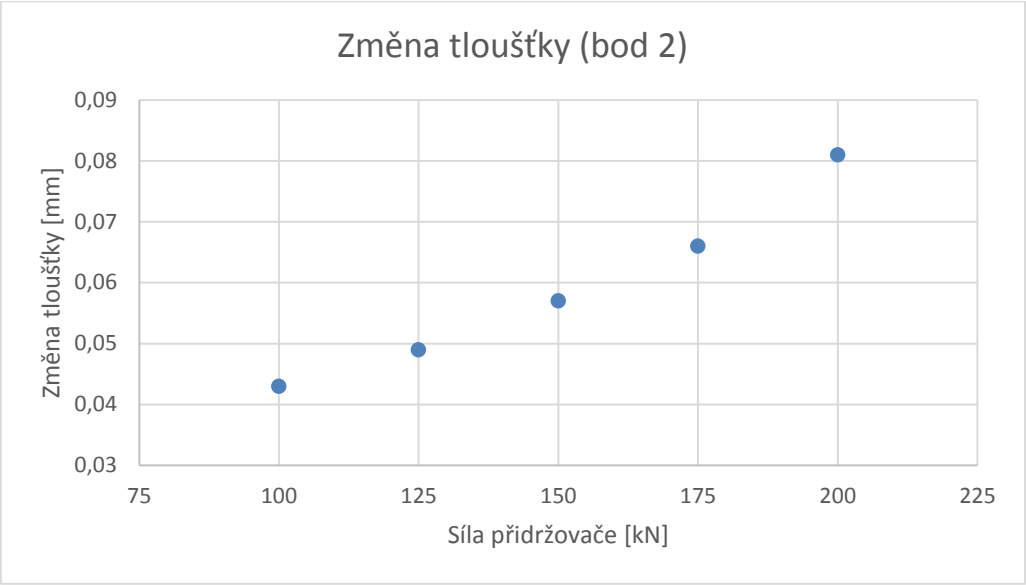
4.2.3 Změna tloušťky v závislosti na síle přidržovače

Tab. 8 Změna tloušťky závislá na síle přidržovače

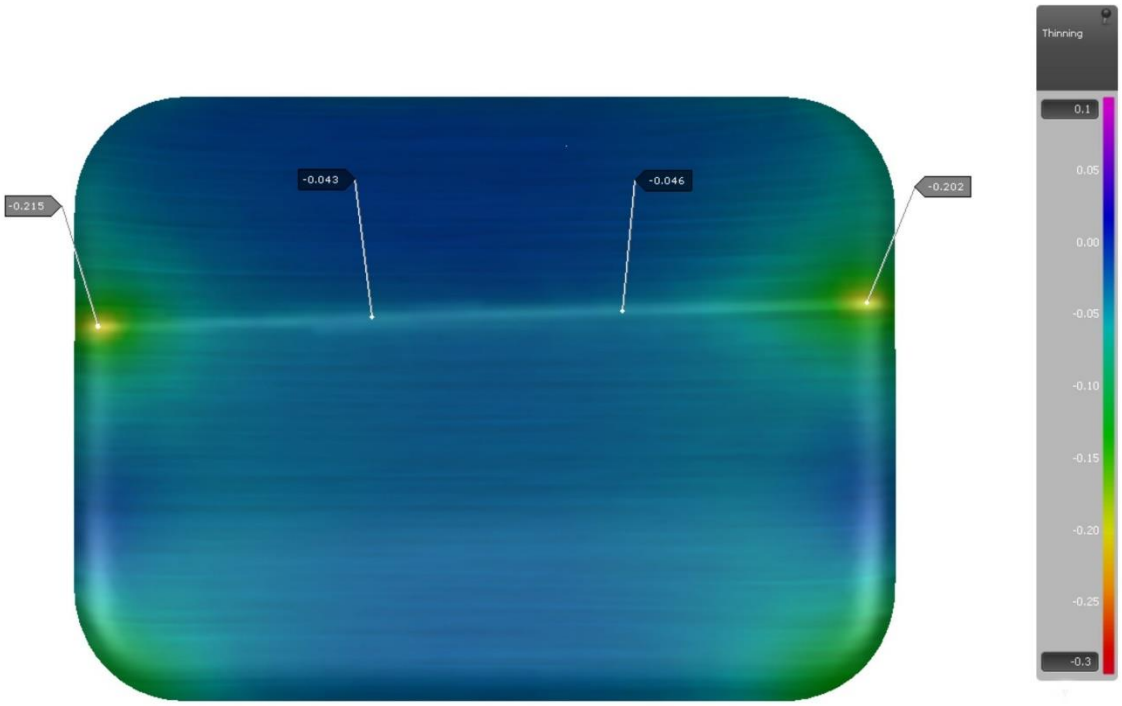
Síla přidržovače [kN]	Změna tloušťky [mm]			
	bod 1	bod 2	bod 3	bod 4
100	0,215	0,043	0,046	0,202
125	0,231	0,049	0,052	0,2
150	0,236	0,057	0,064	0,219
175	0,254	0,066	0,069	0,252
200	0,273	0,081	0,081	0,27
225	0,298	0,089	0,095	0,278
250	Porušení materiálu			



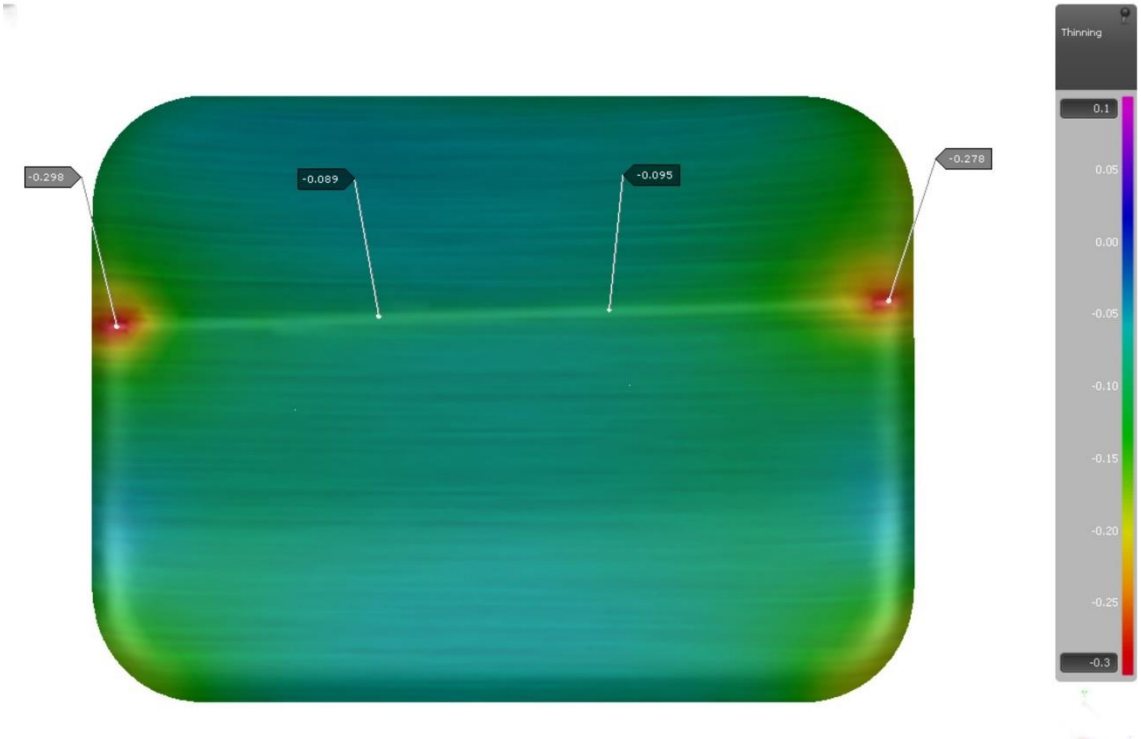
Obr. 67 Graf změny tloušťky materiálu v závislosti na síle přidržovače (bod 1)



Obr. 68 Graf změny tloušťky materiálu v závislosti na síle přidržovače (bod 2)



Obr. 69 Analýza změny tloušťky pro sílu přidržovače 100 kN

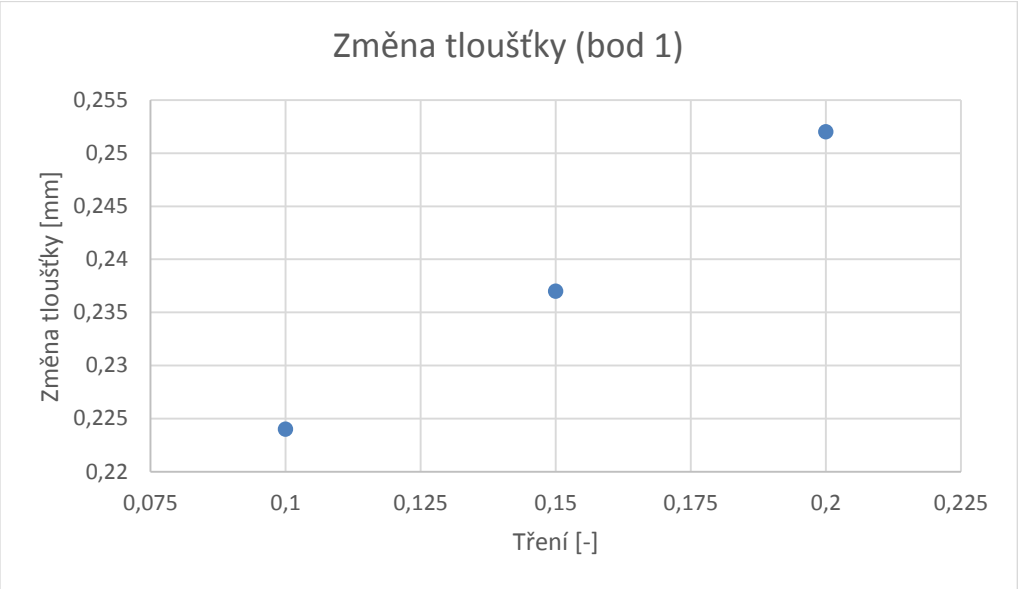


Obr. 70 Analýza změny tloušťky pro sílu přidržovače 225 kN

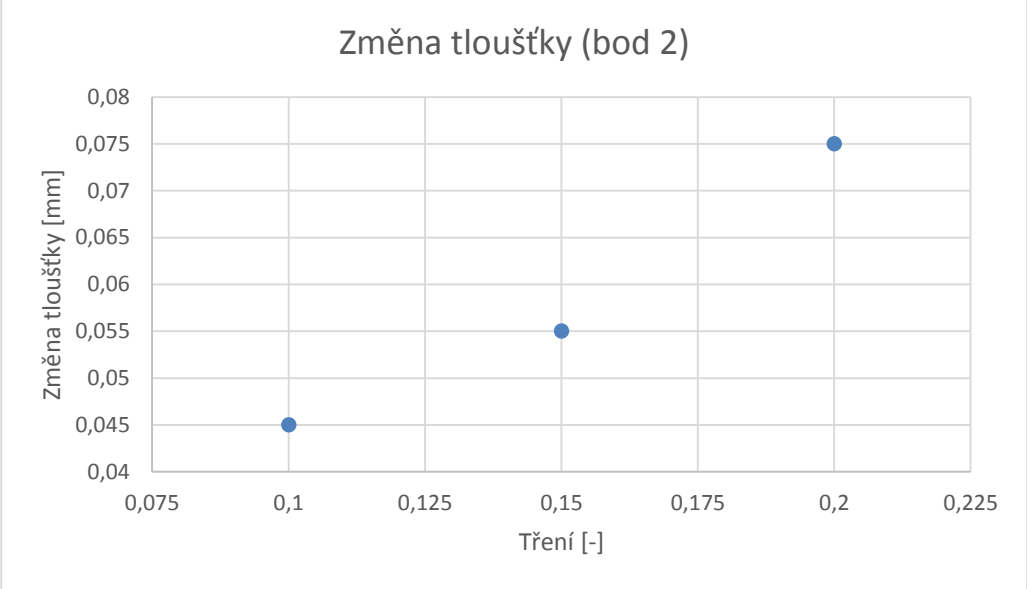
4.2.4 Změna tloušťky v závislosti na tření

Tab. 9. Změna tloušťky závislá na tření

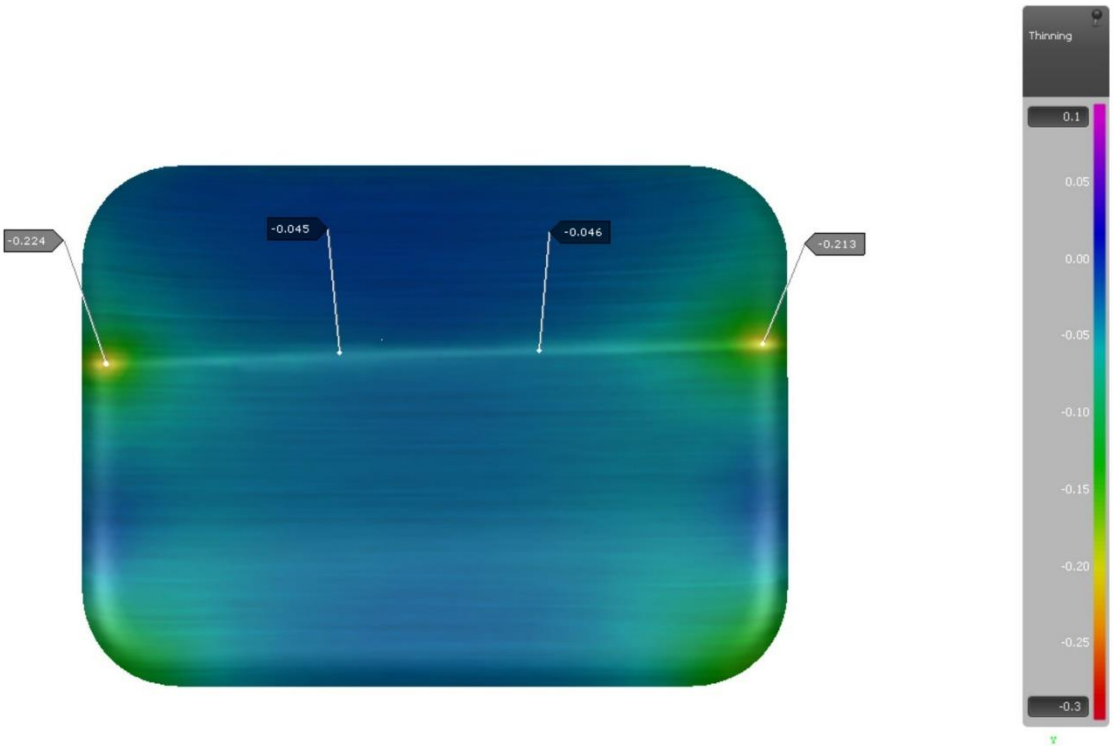
Tření [-]	Změna tloušťky [mm]			
	bod 1	bod 2	bod 3	bod 4
0,1	0,224	0,045	0,046	0,213
0,15	0,237	0,055	0,06	0,23
0,2	0,252	0,075	0,069	0,238
0,25	přetržení			



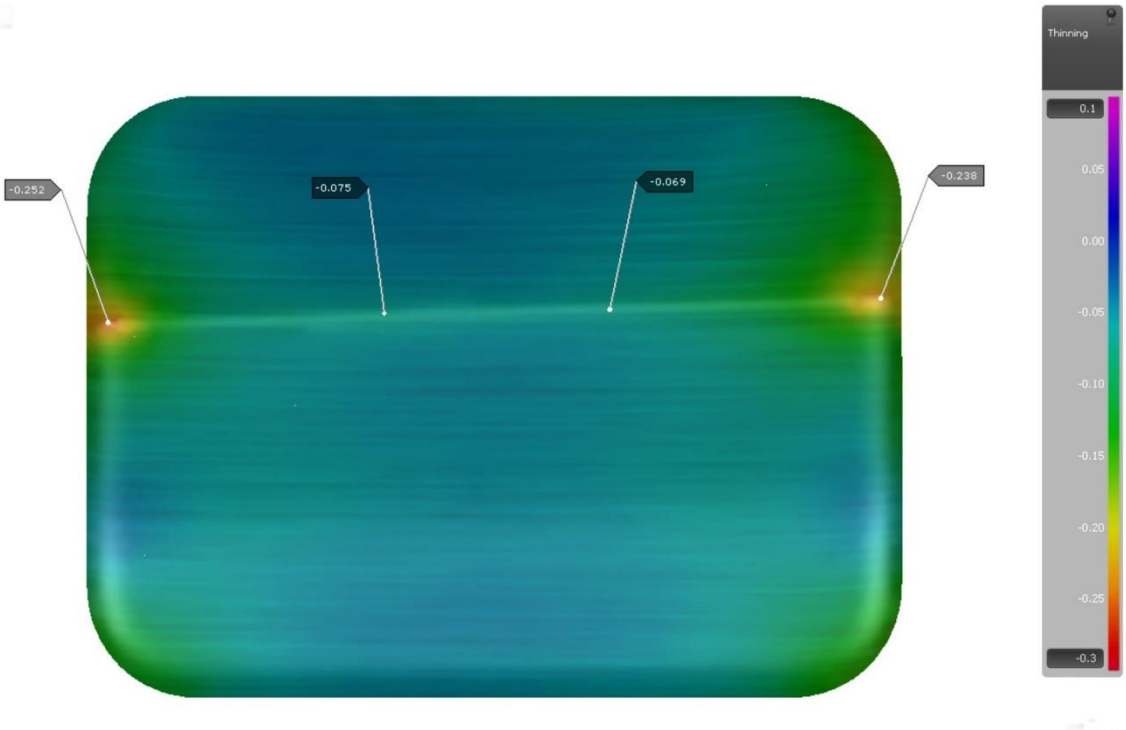
Obr. 71 Graf změny tloušťky v závislosti na tření (bod 1)



Obr. 72 Graf změny tloušťky v závislosti na tření (bod 2)



Obr. 73 Analýza změny tloušťky pro koeficient tření 0,1

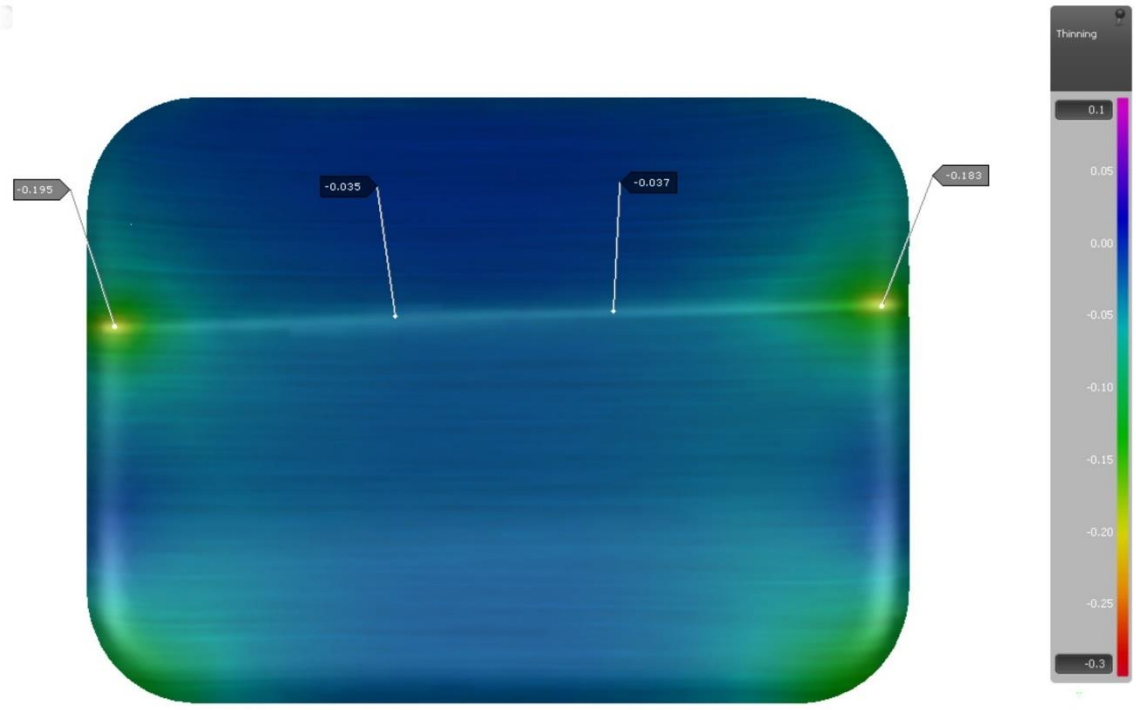


Obr. 74 Analýza změny tloušťky pro koeficient tření 0,2

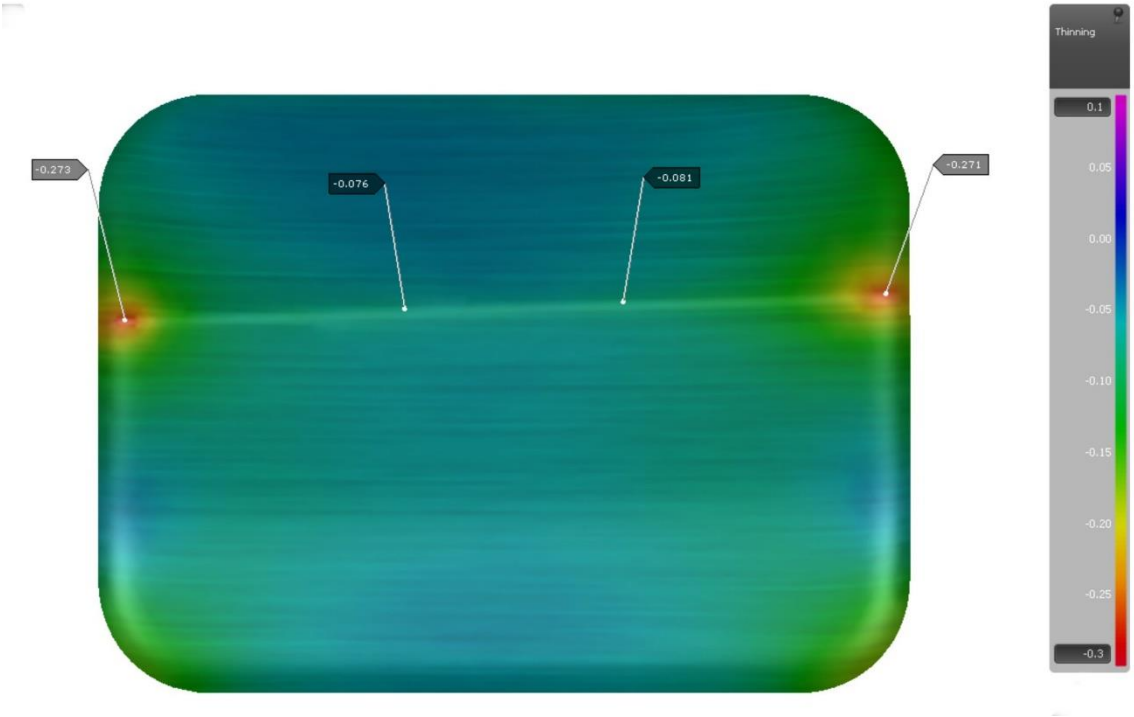
4.2.1 Změna tloušťky materiálu v závislosti na kombinaci tření a síly přidržovače

Tab. 10 Kombinace tření a síly přidržovače závislá na změně tloušťky

Tření [-]	Síla přidržovače [kN]	Ztenčení [mm]			
		bod 1	bod 2	bod 3	bod 4
0,1	100	0,195	0,035	0,037	0,218
0,1	150	0,224	0,045	0,046	0,205
0,1	200	0,247	0,055	0,058	0,223
0,15	100	0,218	0,042	0,045	0,207
0,15	150	0,239	0,057	0,054	0,218
0,15	200	0,273	0,076	0,081	0,271
0,2	100	0,218	0,046	0,048	0,19
0,2	150	0,252	0,073	0,07	0,235
0,2	200	Porušení materiálu			



Obr. 75 Analýza změny tloušťky pro sílu přidržovače 100 kN a koeficient tření 0,1



Obr. 76 Analýza změny tloušťky pro sílu přidržovače 200 kN a koeficient tření 0,15

4.2.2 Interpretace výsledků analýzy změny tloušťky

Změna tloušťky plechu má podobný průběh jako změna zpevnění materiálu v závislosti na tloušťce, kterou měníme. Změna tloušťky v toleranci plechu nemá značný vliv na konečnou změnu tloušťky po lisování (tab. 6, obr. 59 a 60). V rozmezí původní tloušťky plechu 0,6 – 0,8 mm byla zaznamenána největší změna tloušťky v případě nejmenší původní tloušťky plechu. (0,6 mm). Z grafů (obr. 67, 68, 71, 72) je patrné,

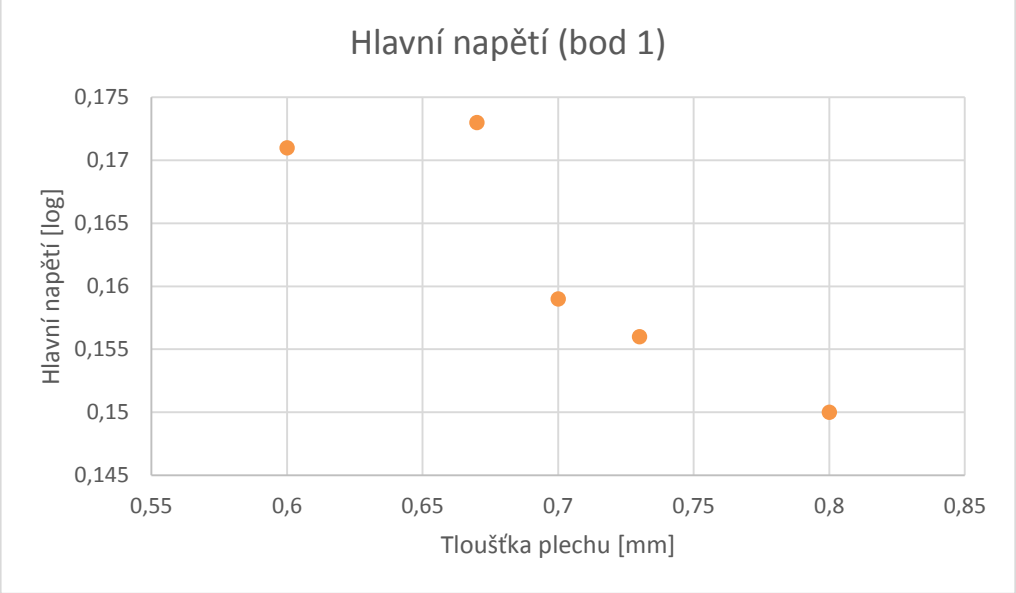
že se zvyšujícími se hodnotami parametrů síly přidržovače a tření roste také změny tloušťky materiálu. Čím vyšší jsou tyto hodnoty, tím více materiál ztenčuje, protože více drží v přidržovacím systému, má menší možnost proklouznutí a tak se materiál musí více přetvořit. Z hlediska směru válcování (obr. 63 a 64) vykázaly nejvyšší hodnoty ztenčení opět simulace se směrem válcování 90°, rozdíly jsou ale pouze v desítkách mikrometrů.

4.3 Analýza hlavního napětí

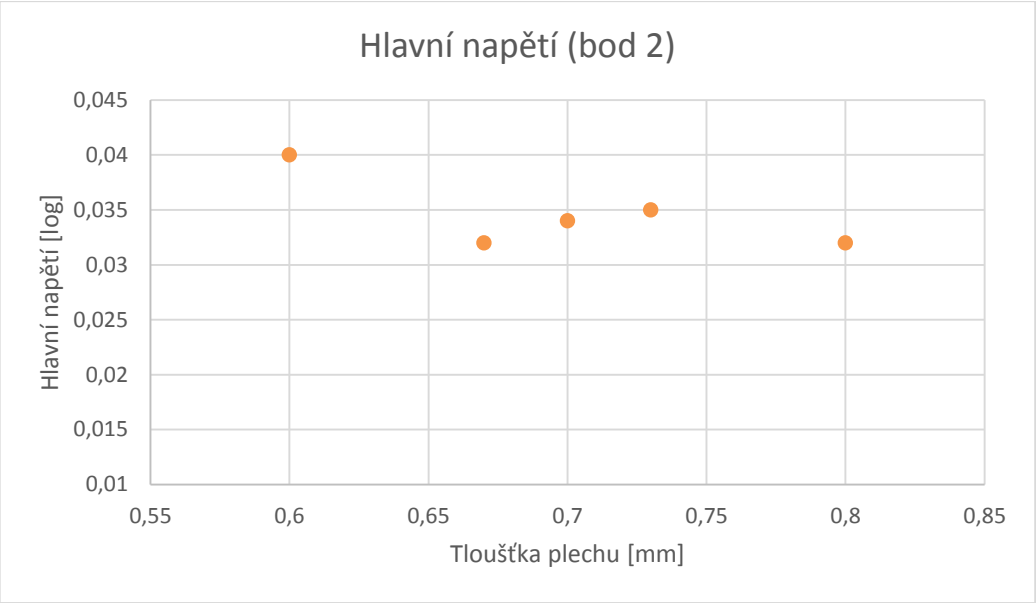
4.3.1 Změna hlavního napětí v závislosti na tloušťce

Tab. 11 Hlavní napětí závislé na tloušťce

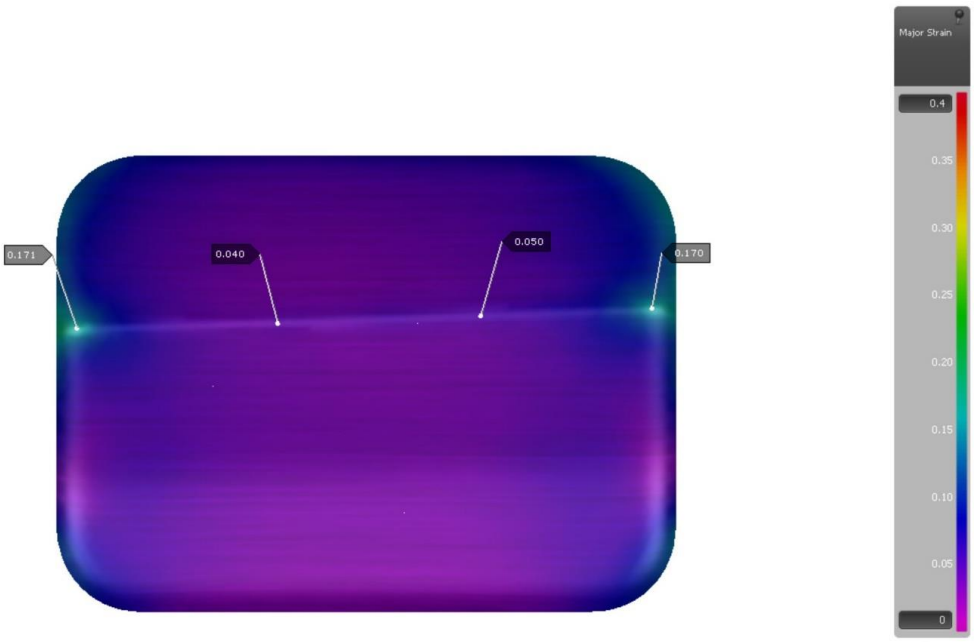
Tloušťka plechu[mm]	Hlavní napětí [log]			
	bod 1	bod 2	bod 3	bod 4
0,6	0,171	0,04	0,05	0,17
0,67	0,173	0,032	0,04	0,146
0,7	0,159	0,034	0,042	0,145
0,73	0,156	0,035	0,047	0,151
0,8	0,15	0,032	0,044	0,157



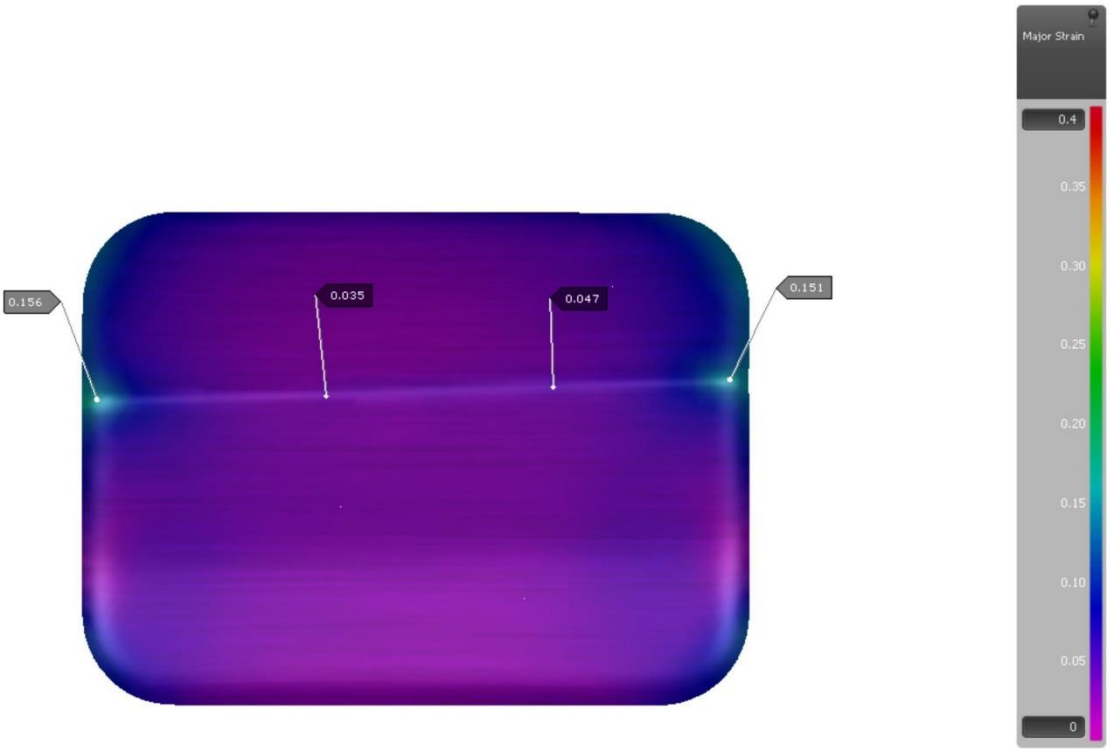
Obr. 77 Graf změny hlavního napětí v závislosti na tloušťce (bod 1)



Obr. 78 Graf změny hlavního napětí v závislosti na tloušťce (bod 2)



Obr. 79 Analýza hlavního napětí pro tloušťku plechu 0,6 mm

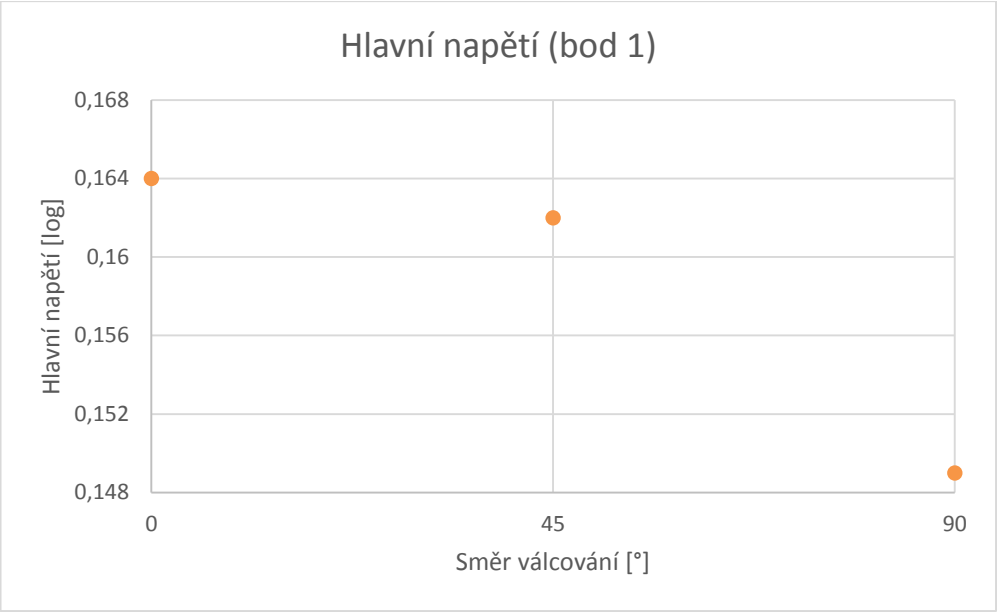


Obr. 80 Analýza hlavního napětí pro tloušťku plechu 0,73 mm

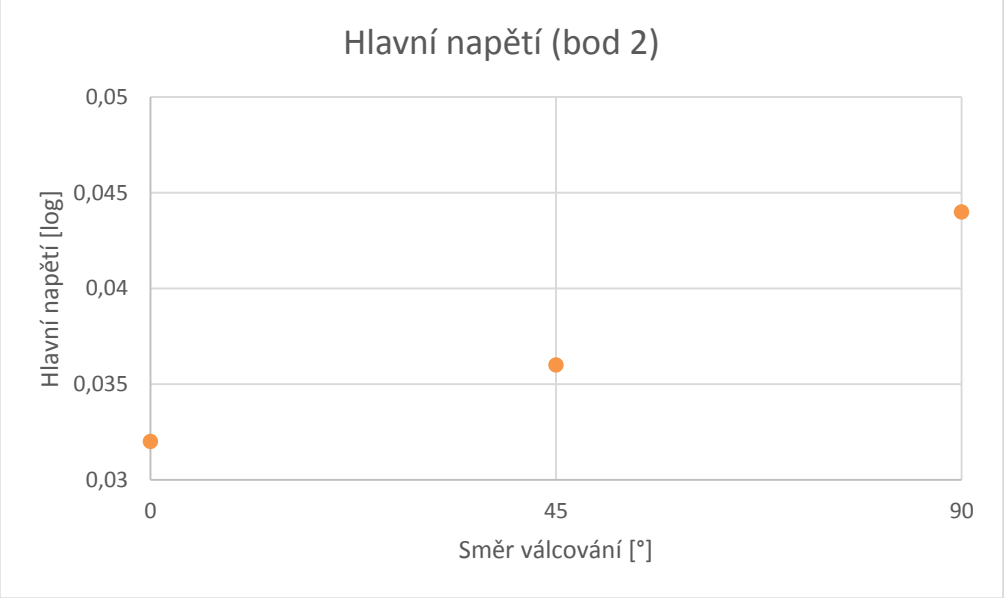
4.3.2 Změna hlavního napětí v závislosti na směru válcování

Tab. 12 Hlavní napětí závislé na směru válcování

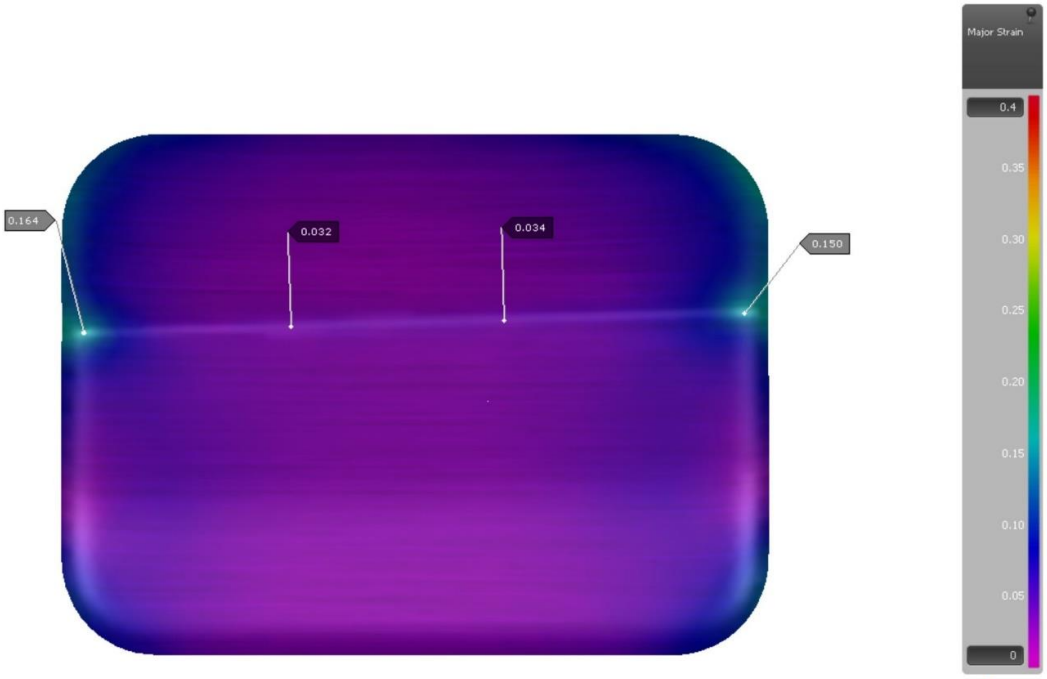
Směr válcování[°]	Hlavní napětí [log]			
	bod 1	bod 2	bod 3	bod 4
0	0,164	0,032	0,034	0,15
45	0,162	0,036	0,036	0,166
90	0,149	0,044	0,045	0,164



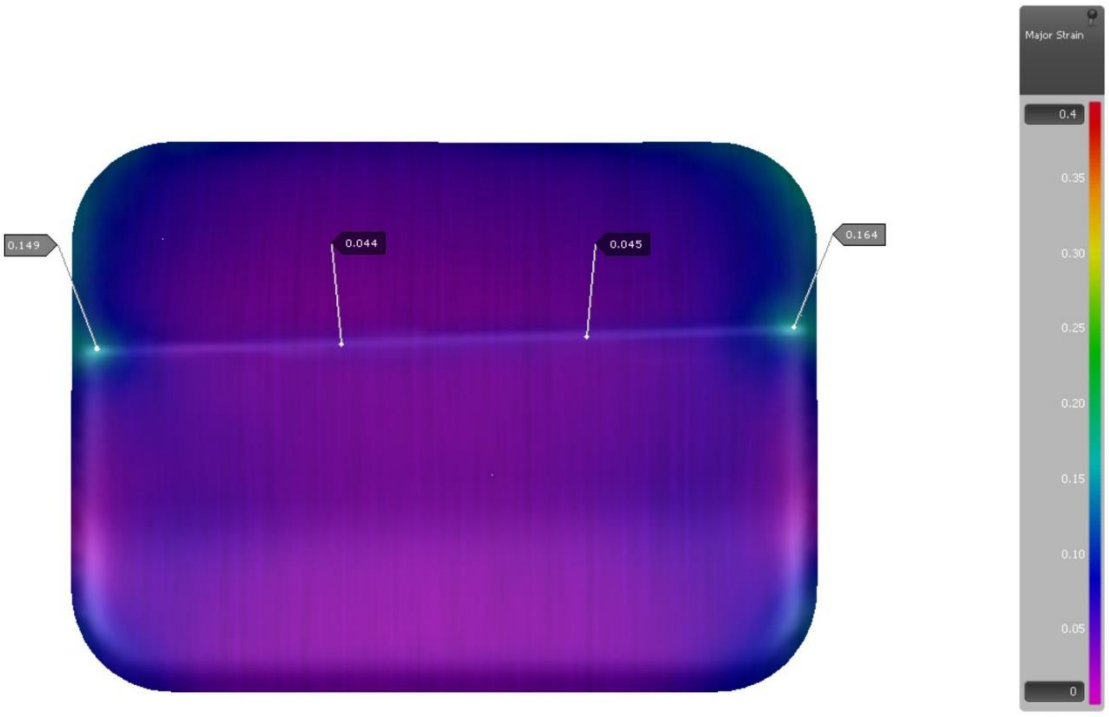
Obr. 81 Graf změny hlavního napětí v závislosti na směru válcování (bod 1)



Obr. 82 Graf změny hlavního napětí v závislosti na směru válcování (bod 2)



Obr. 83 Analýza hlavního napětí pro směr válcování plechu 0°

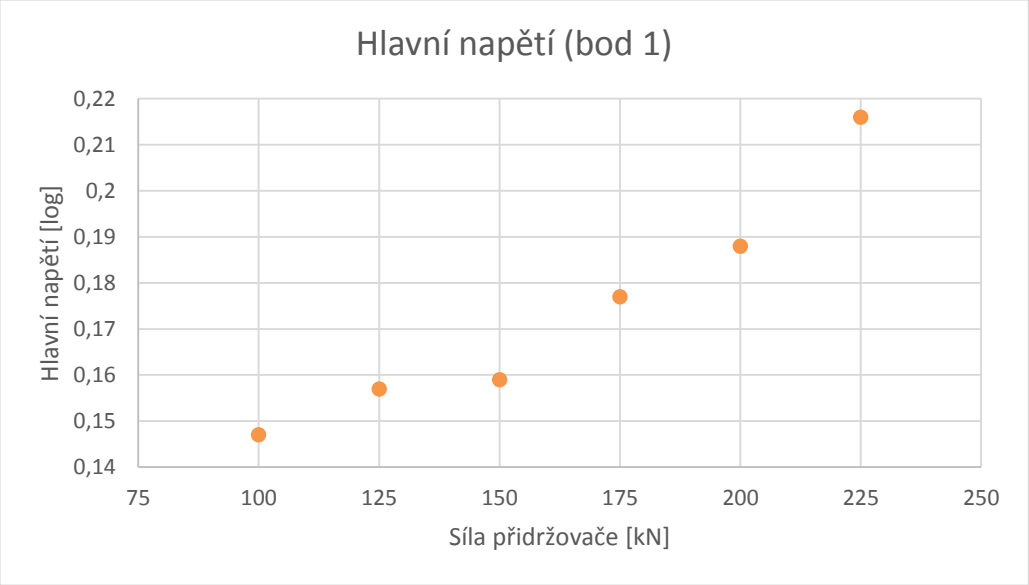


Obr. 84 Analýza hlavního napětí pro směr válcování plechu 90°

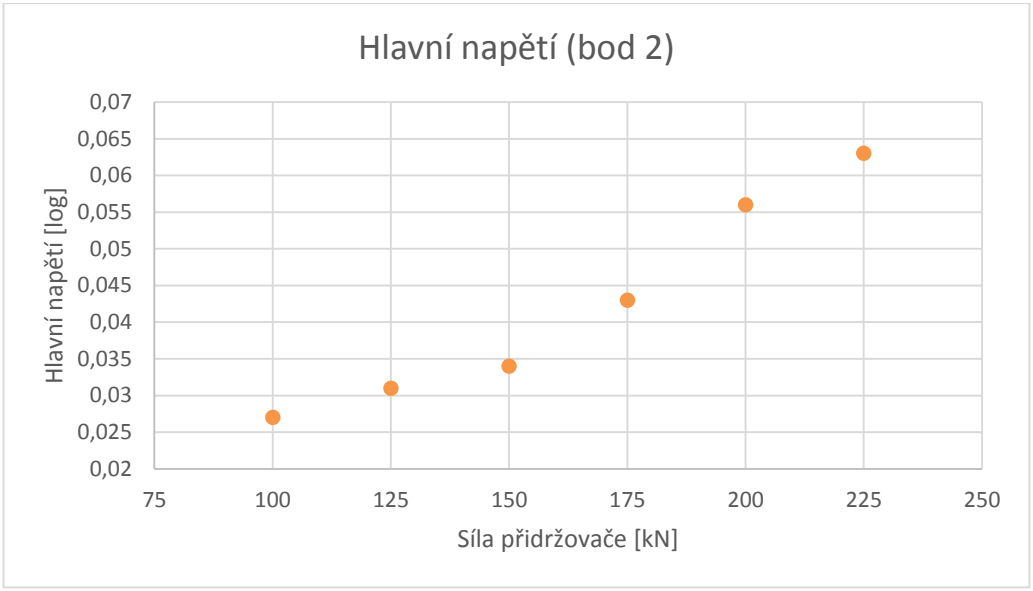
4.3.3 Změna hlavního napětí v závislosti na síle přidržovače

Tab. 13 Hlavní napětí závislé na síle přidržovače

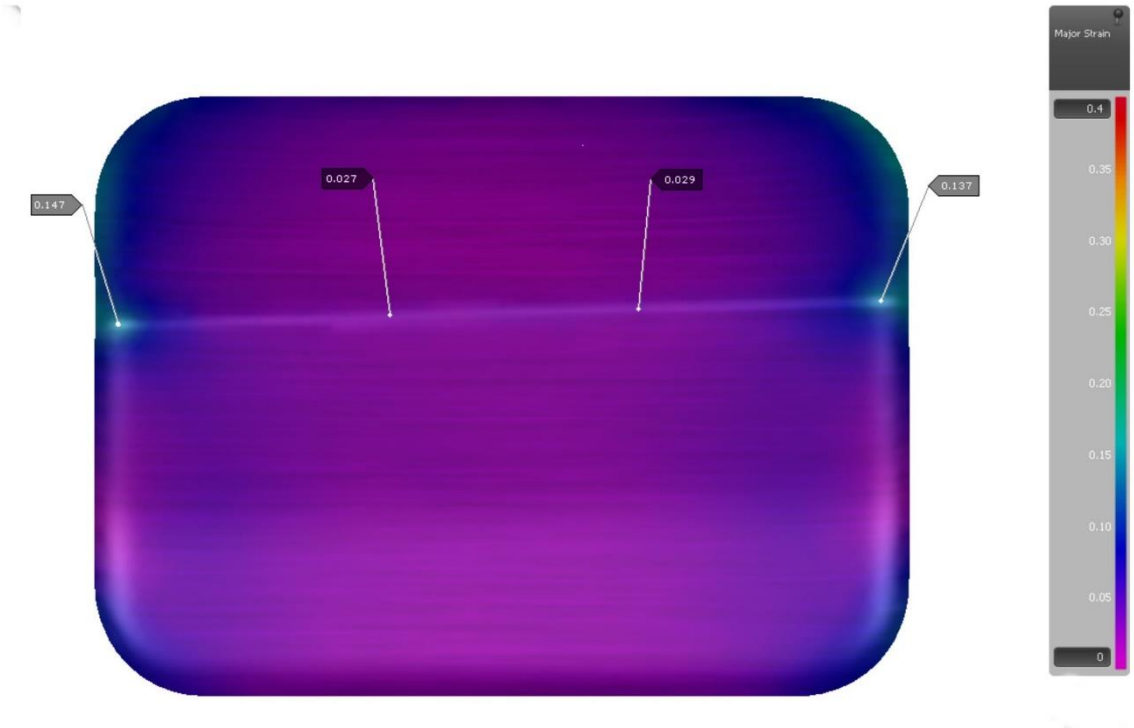
Síla přidržovače [kN]	Hlavní napětí [log]			
	bod 1	bod 2	bod 3	bod 4
100	0,147	0,027	0,029	0,137
125	0,157	0,031	0,035	0,135
150	0,159	0,034	0,042	0,145
175	0,177	0,043	0,045	0,174
200	0,188	0,056	0,057	0,188
225	0,216	0,063	0,069	0,192
250	Porušení materiálu			



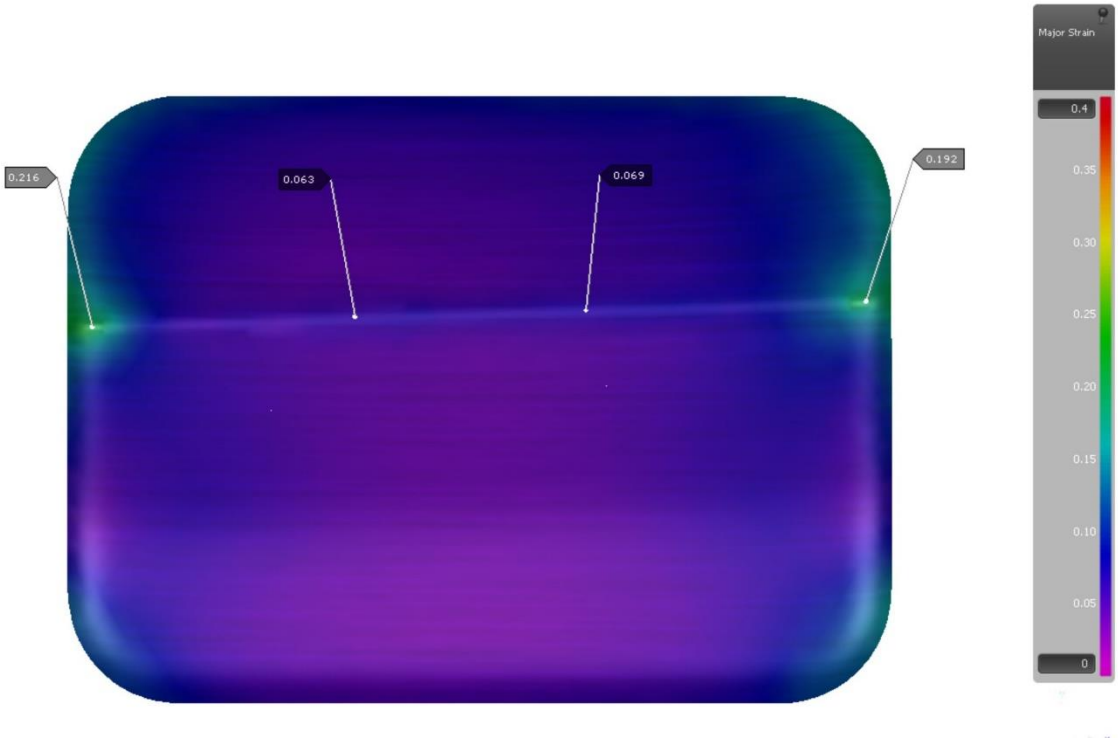
Obr. 85 Graf změny hlavního napětí v závislosti na síle přidržovače (bod 1)



Obr. 86 Graf změny hlavního napětí v závislosti na síle přidržovače (bod 2)



Obr. 87 Analýza hlavního napětí pro sílu přidržovače 100 kN

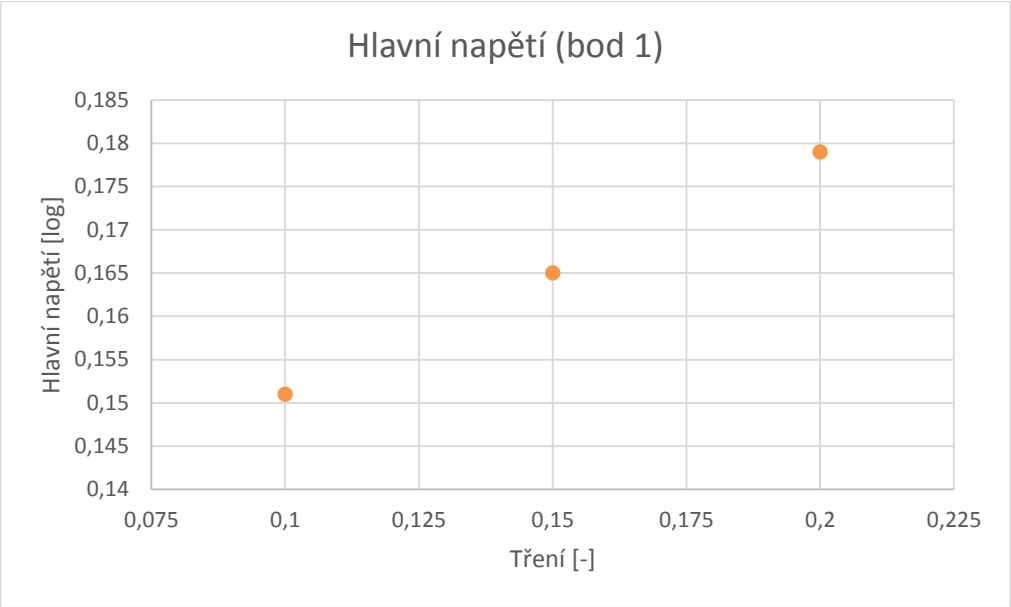


Obr. 88 Analýza hlavního napětí pro sílu přidržovače 225 kN

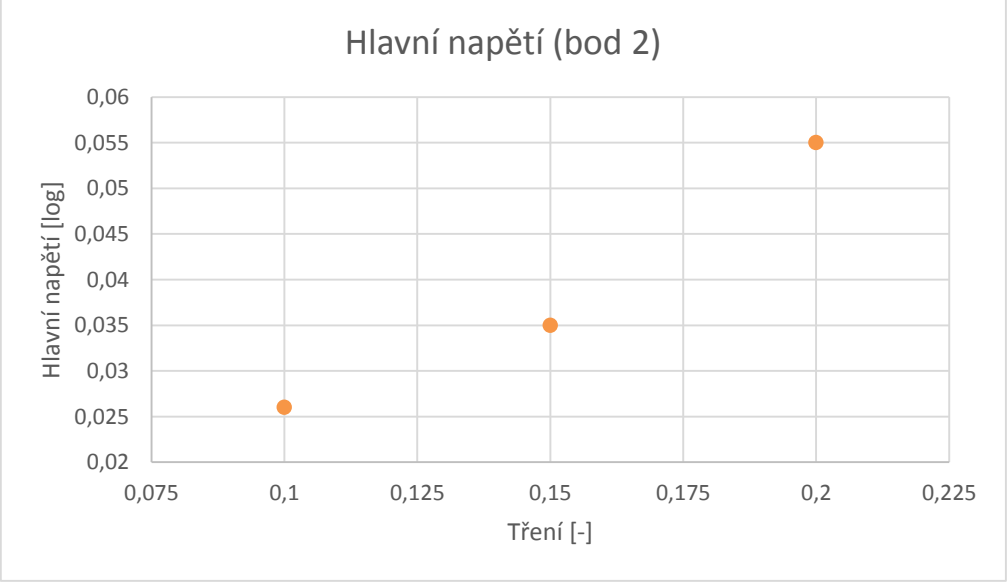
4.3.4 Změna hlavního napětí v závislosti na tření

Tab. 14 Hlavní napětí závislé na tření

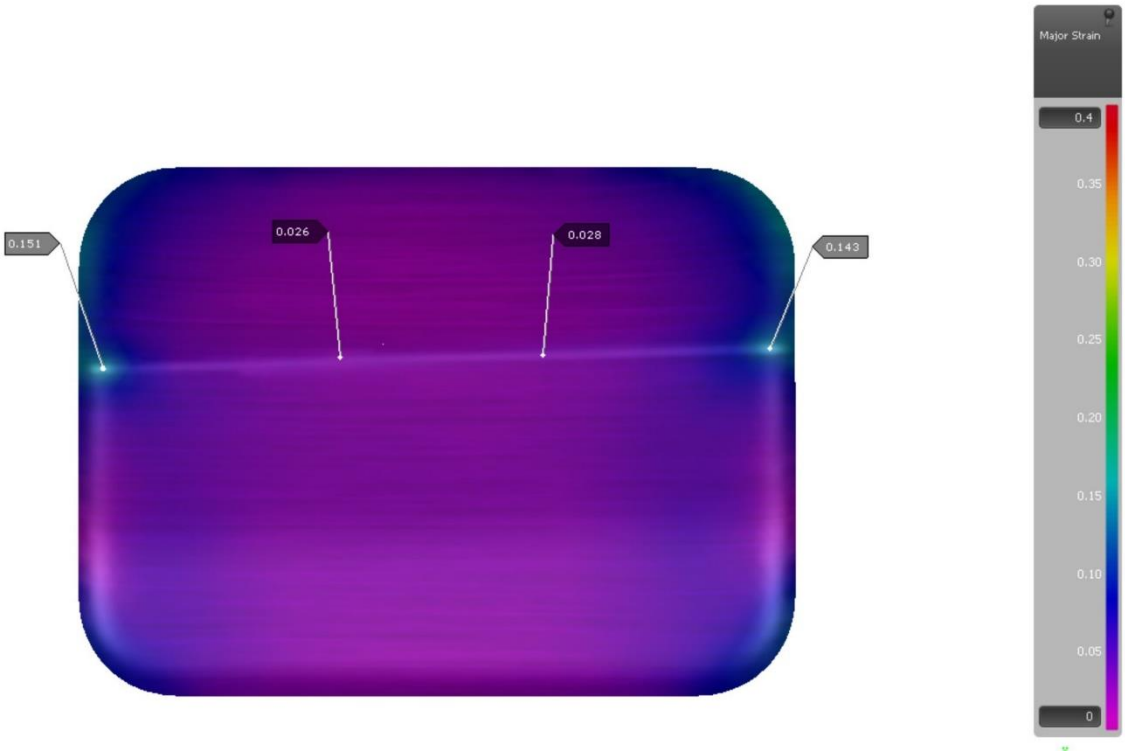
Tření [-]	Hlavní napětí [log]			
	bod 1	bod 2	bod 3	bod 4
0,1	0,151	0,026	0,028	0,143
0,15	0,165	0,035	0,04	0,16
0,2	0,179	0,055	0,048	0,164
0,25	Porušení materiálu			



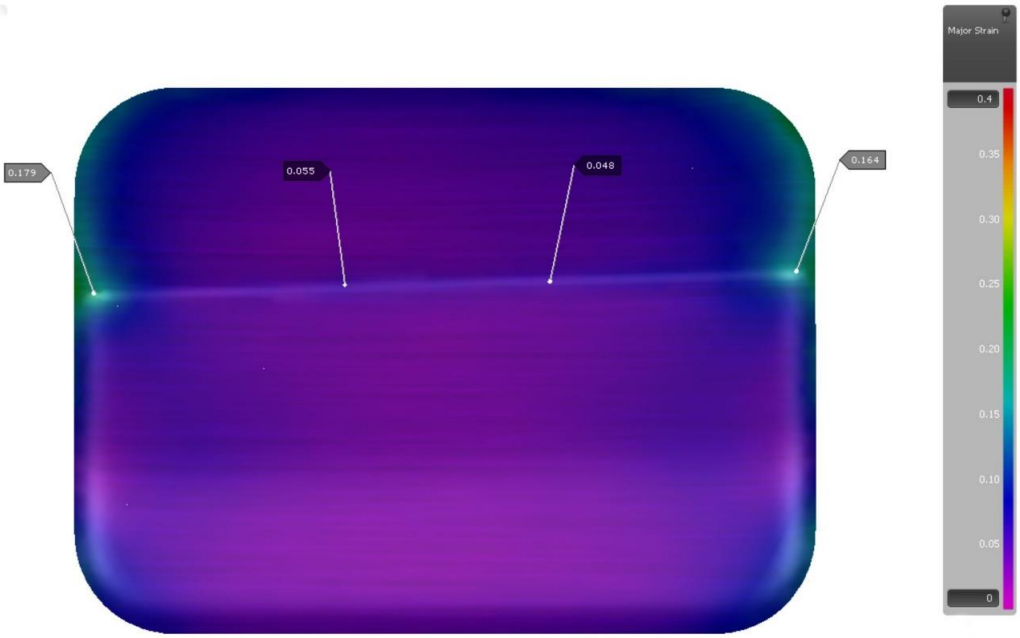
Obr. 89 Graf změny hlavního napětí v závislosti na tření (bod 1)



Obr. 90 Graf změny hlavního napětí v závislosti na tření (bod 2)



Obr. 91 Analýza hlavního napětí pro koeficient tření 0,1

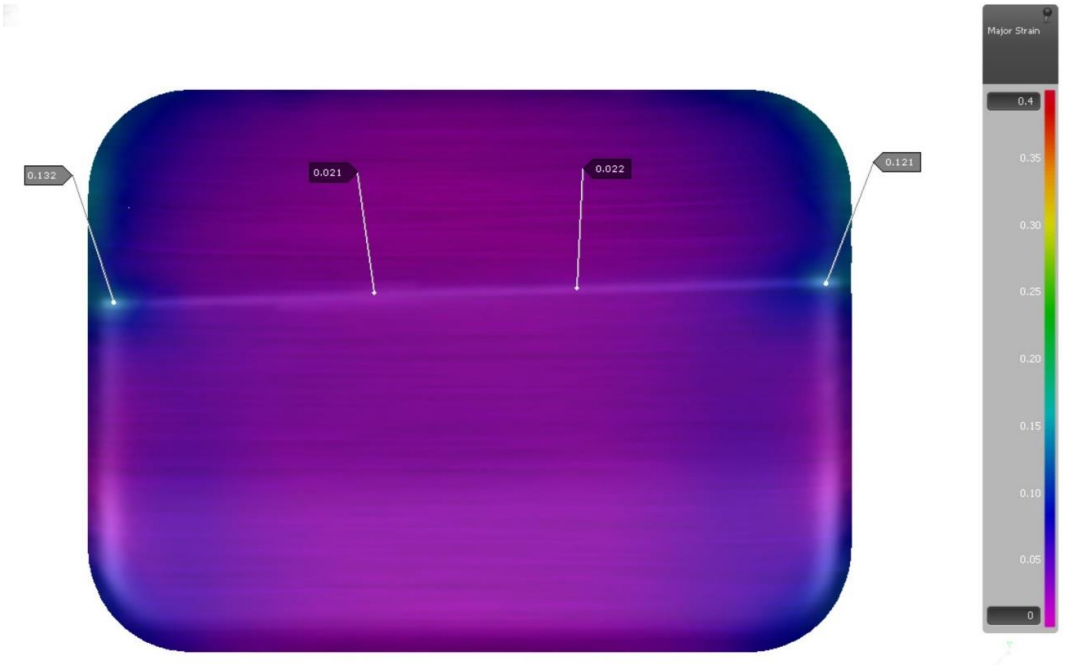


Obr. 92 Analýza hlavního napětí pro koeficient tření 0,2

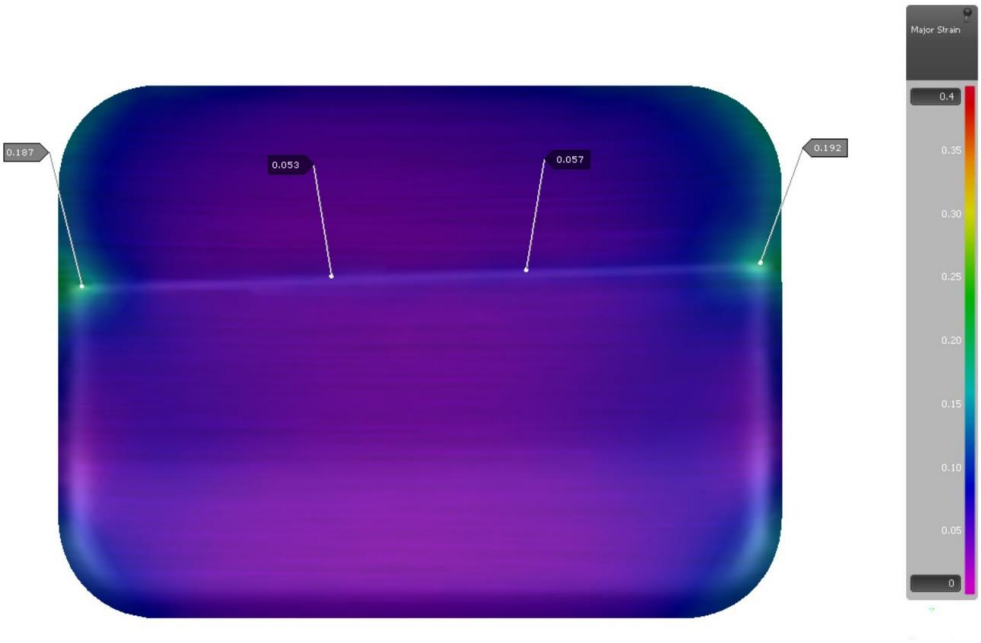
4.3.5 Změna hlavního napětí v závislosti na kombinaci tření a síly přidržovače

Tab. 15 Kombinace tření a síly přidržovače závislá na hlavním napětí

Tření [-]	Síla přidržovače [kN]	Hlavní napětí [log]			
		bod 1	bod 2	bod 3	bod 4
0,1	100	0,132	0,021	0,022	0,121
0,1	150	0,151	0,027	0,027	0,138
0,1	200	0,17	0,032	0,037	0,151
0,15	100	0,148	0,026	0,027	0,139
0,15	150	0,165	0,037	0,034	0,15
0,15	200	0,187	0,053	0,057	0,192
0,2	100	0,152	0,03	0,033	0,129
0,2	150	0,179	0,052	0,049	0,163
0,2	200	Porušení materiálu			



Obr. 93 Analýza hlavního napětí pro sílu přidržovače 100 kN koeficient tření 0,1



Obr. 94 Analýza hlavního napětí pro sílu přidržovače 200 kN koeficient tření 0,15

4.3.6 Interpretace výsledků analýzy hlavního napětí

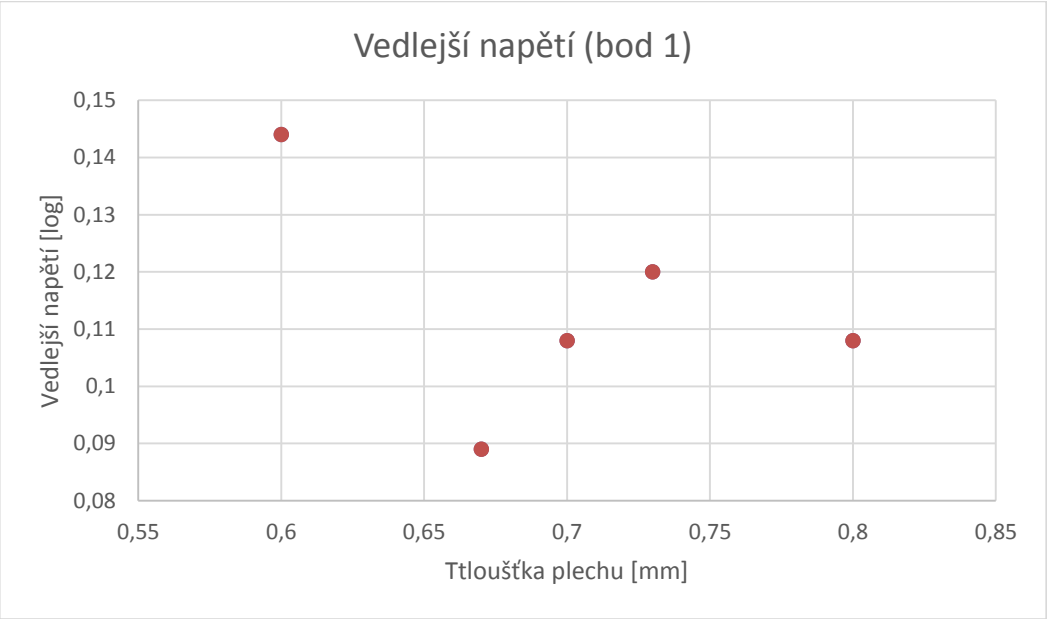
Změna tloušťky, kterou je zadávána do simulací jako vstupní parametr mírně ovlivňuje velikost hlavního napětí, ovšem jen v případě bodu 1, tedy na hraně nástroje. Křivka má klesající tendenci, tzn. čím větší tloušťka materiálu, tím nižší je hodnota hlavního napětí. Je to dáno tím, že při větších tloušťkách plechu materiál méně zpevňuje a je potřeba k přetvoření nižší hodnoty napětí. V případně samotné designové hrany je změna hlavního napětí zanedbatelná. (tab. 11, obr. 77 a 78). Nejvyšších hodnot hlavního napětí bylo zaznamenáno při směru válcování 90°, nejnižších při směru 0° na designové hraně. K přetvoření materiálu a vytvoření rádia proti směru vláken je potřeba menší tvářecí síla a hodnota hlavního napětí je tím také menší než proti směru vláken. Největší vliv na velikost hlavního napětí má síla přidržovače a tření. Z grafu (obr. 85, 86, 89, 90) je patrné, že čím vyšší je hodnota tření a síly přidržovače, tím je vyšší i hodnota hlavního napětí. Je to způsobeno větším přetvořením a větší tvářecí silou, kterou je potřeba působit proti méně se prokluzujícímu materiálu. V případě kombinace těchto dvou parametrů (viz tab. 15), je výsledná hodnota rovna přibližně nejvyšší hodnotě jednoho z těchto parametrů, neplatí zde sčítací efekt.

4.4 Analýza vedlejšího napětí

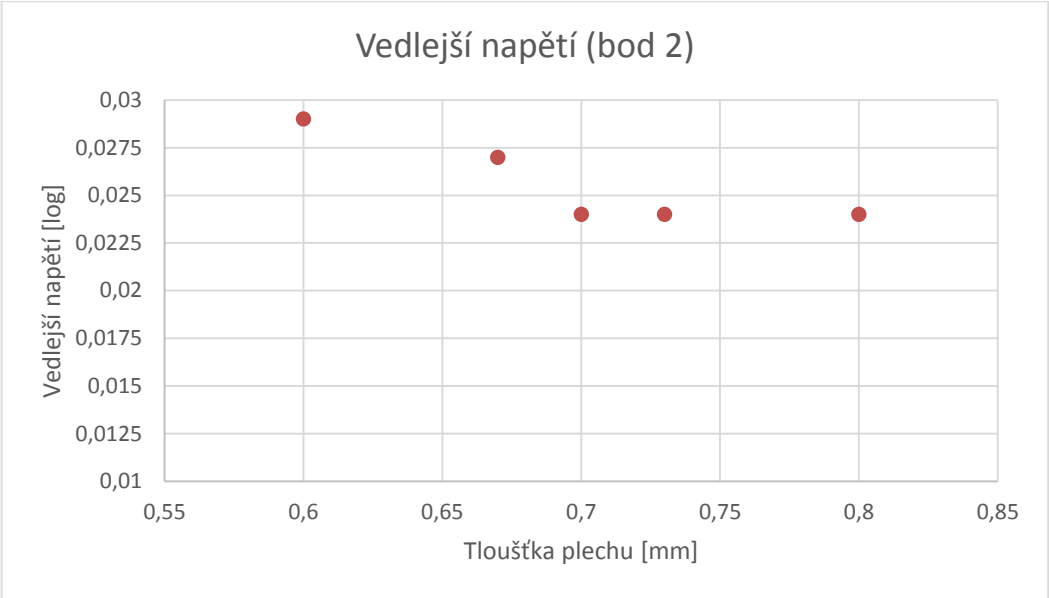
4.4.1 Změna vedlejšího napětí v závislosti na tloušťce

Tab. 16 Vedlejší napětí závislé na původní tloušťce

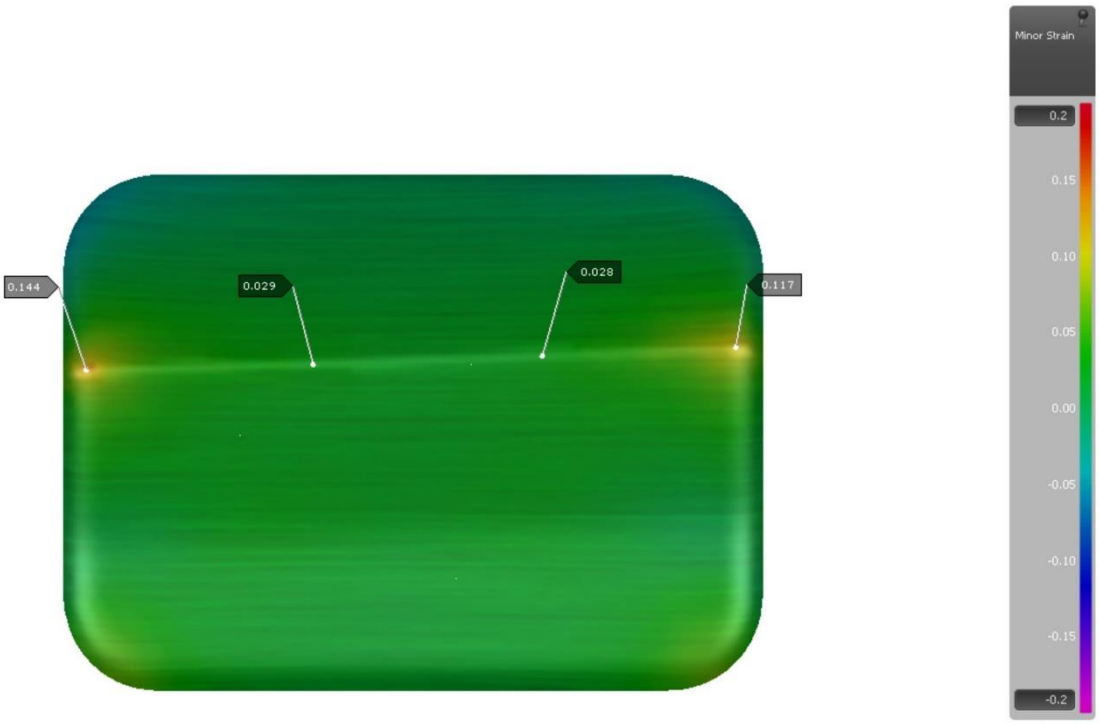
Tloušťka plechu[mm]	Vedlejší napětí [log]			
	bod 1	bod 2	bod 3	bod 4
0,6	0,144	0,029	0,028	0,117
0,67	0,089	0,027	0,025	0,1
0,7	0,108	0,024	0,025	0,102
0,73	0,12	0,024	0,025	0,097
0,8	0,108	0,024	0,023	0,095



Obr. 95 Graf změny vedlejšího napětí v závislosti na tloušťce (bod 1)



Obr. 96 Graf změny vedlejšího napětí v závislosti na tloušťce (bod 2)

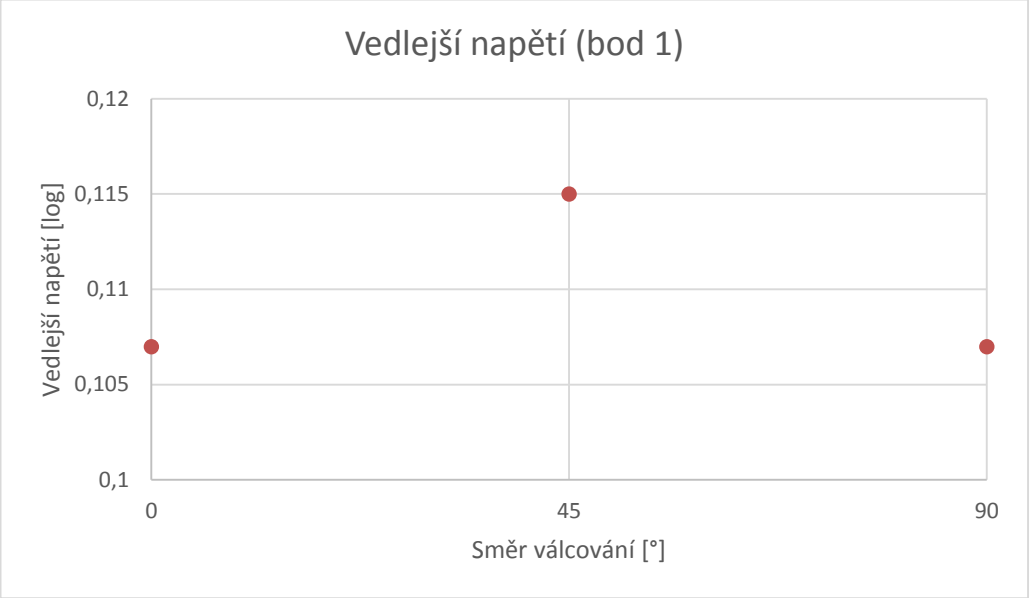


Obr. 97 Analýza vedlejšího napětí pro tloušťku plechu 0,6 mm

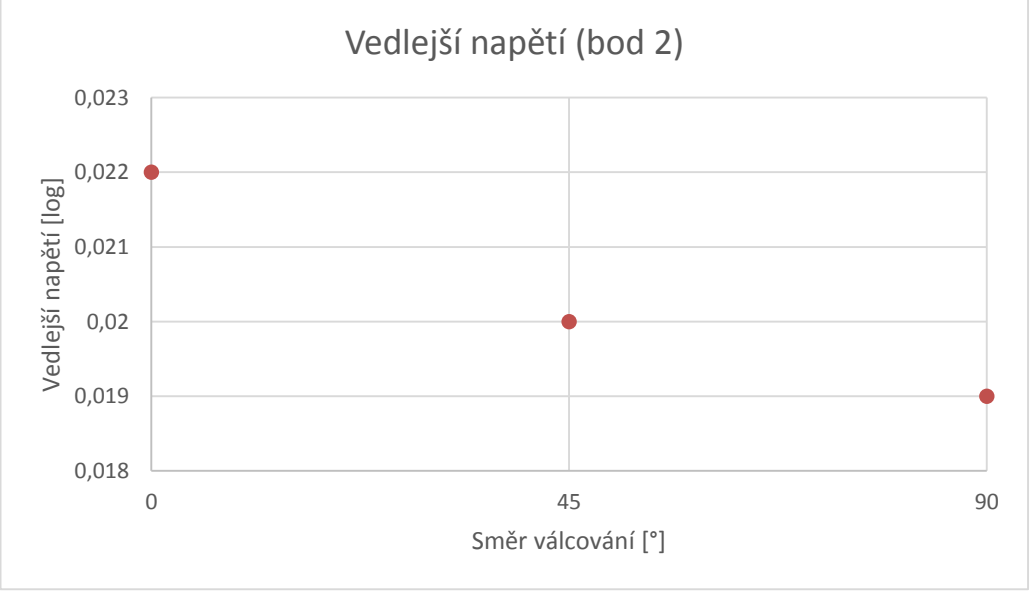
4.4.2 Změna vedlejšího napětí v závislosti na směru válcování

Tab. 17 Vedlejší napětí závislé na směru válcování

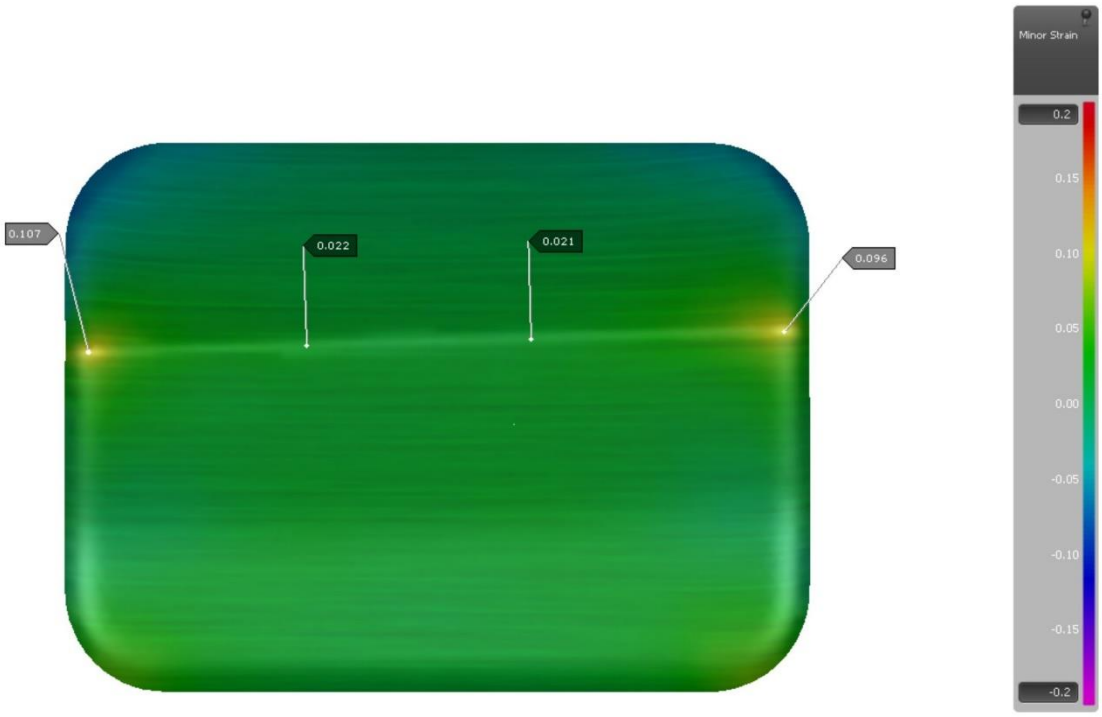
Směr válcování [°]	Vedlejší napětí [log]			
	bod 1	bod 2	bod 3	bod 4
0	0,107	0,022	0,021	0,096
45	0,115	0,02	0,021	0,101
90	0,107	0,019	0,019	0,109



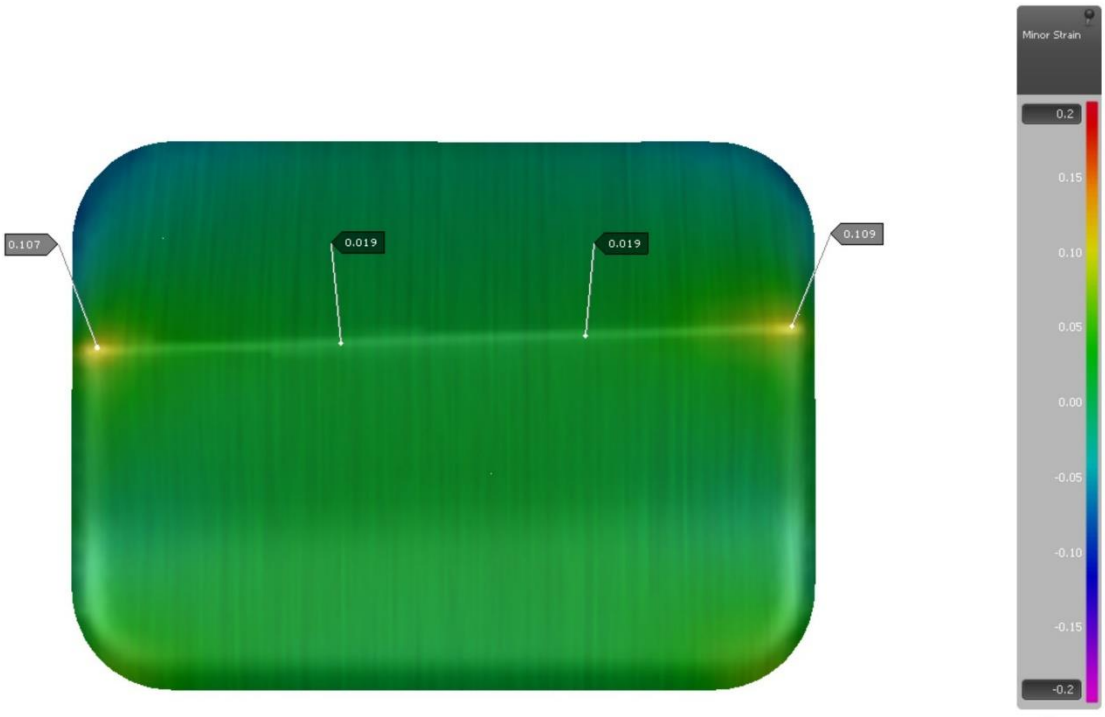
Obr. 98 Graf změny vedlejšího napětí v závislosti na směru válcování (bod 1)



Obr. 99 Graf změny vedlejšího napětí v závislosti na směru válcování (bod 2)



Obr. 100 Analýza vedlejšího napětí pro směr válcování plechu 0°

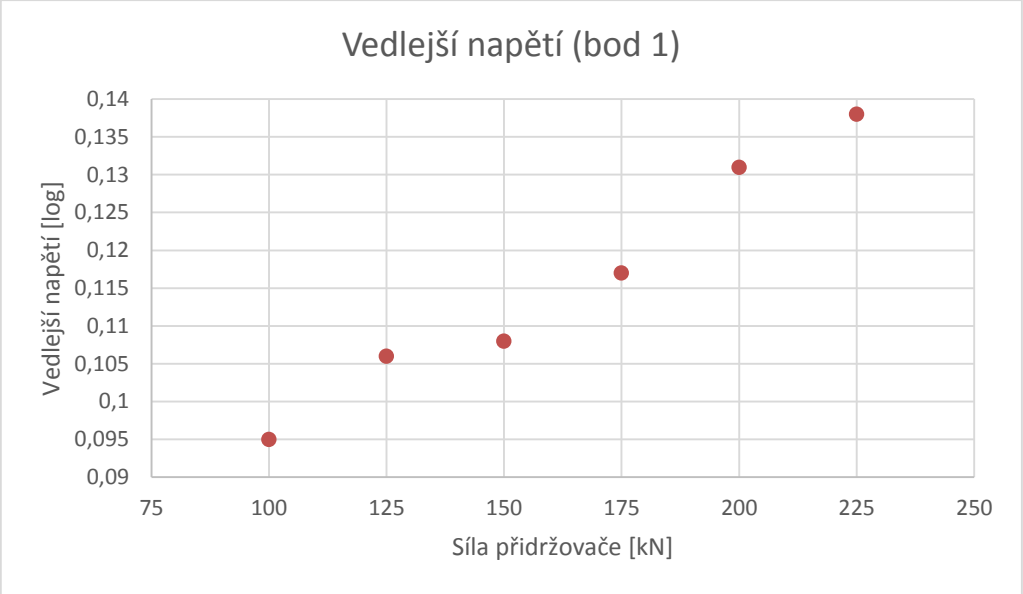


Obr. 101 Analýza vedlejšího napětí pro směr válcování plechu 90°

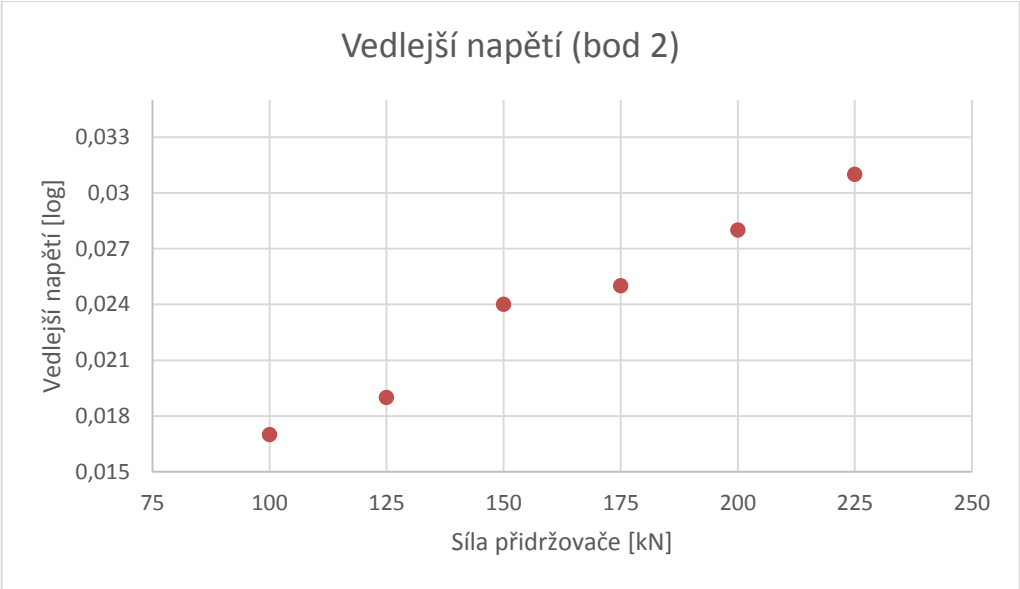
4.4.3 Změna vedlejšího napětí v závislosti na síle přidržovače

Tab. 18 Vedlejší napětí závislé na síle přidržovače

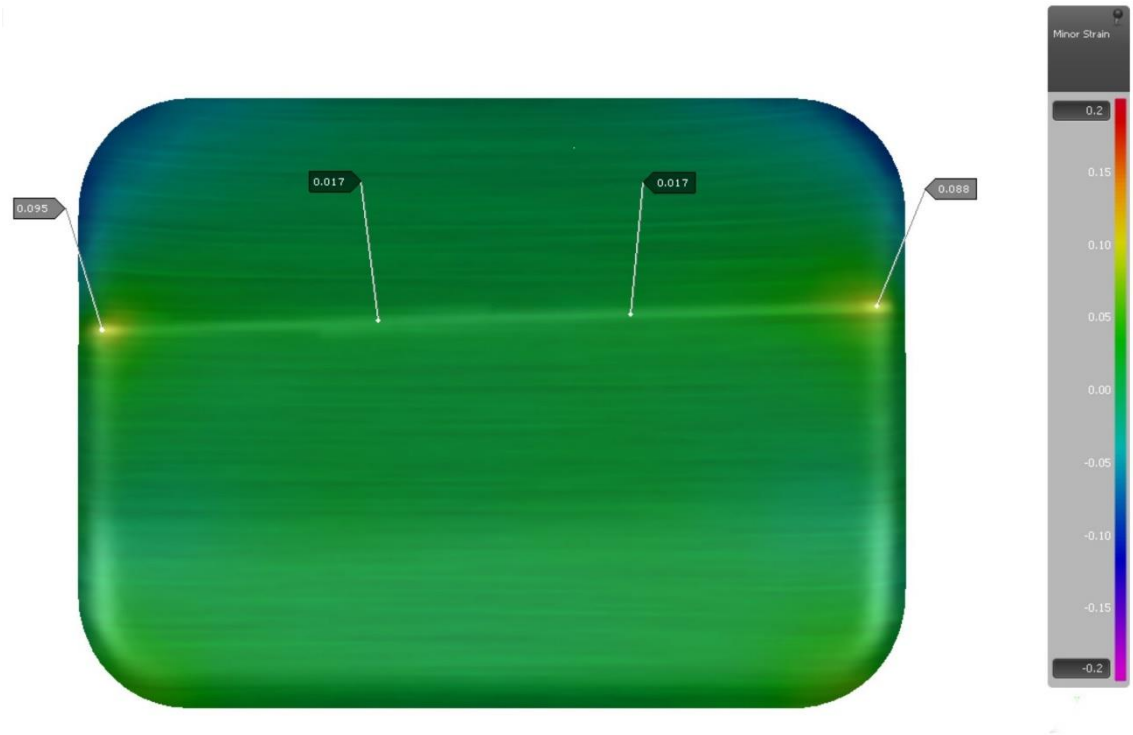
Síla přidržovače [kN]	Vedlejší napětí [log]			
	bod 1	bod 2	bod 3	bod 4
100	0,095	0,017	0,017	0,089
125	0,106	0,019	0,018	0,088
150	0,108	0,024	0,025	0,102
175	0,117	0,025	0,025	0,117
200	0,131	0,028	0,028	0,126
225	0,138	0,031	0,03	0,134
250	Porušení materiálu			



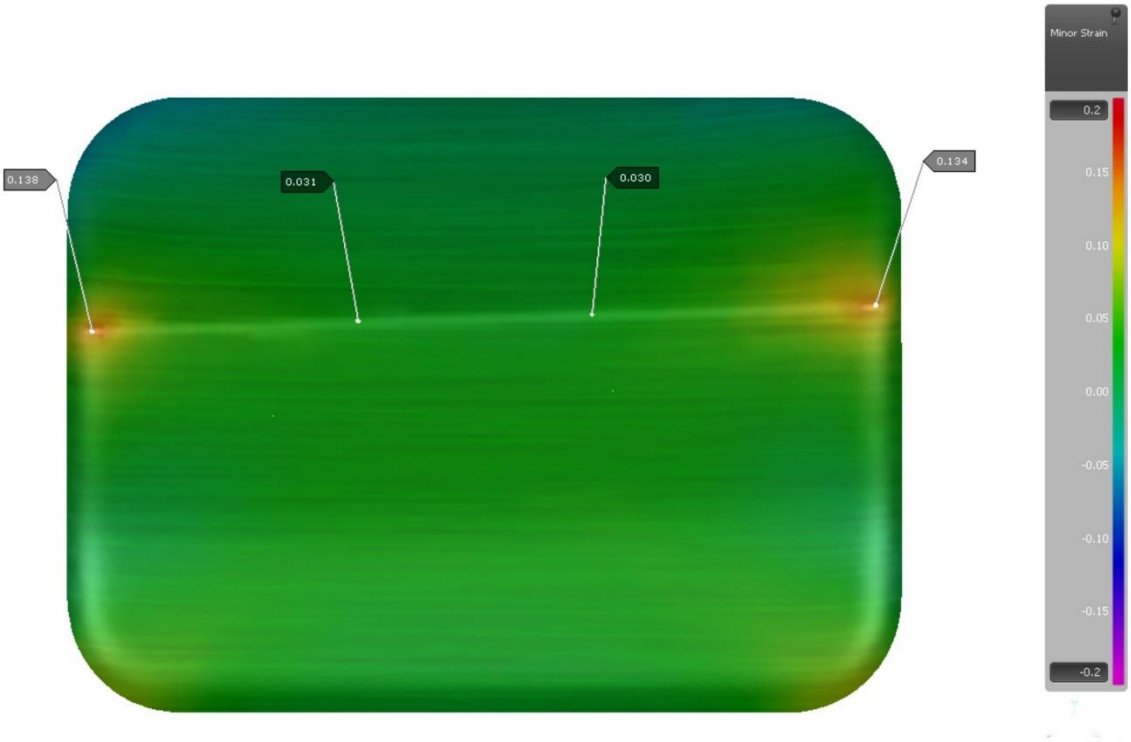
Obr. 102 Graf změny vedlejšího napětí v závislosti na síle přidržovače (bod 1)



Obr. 103 Graf změny vedlejšího napětí v závislosti na síle přidržovače (bod 2)



Obr. 104 Analýza vedlejšího napětí pro sílu přidržovače 100 kN

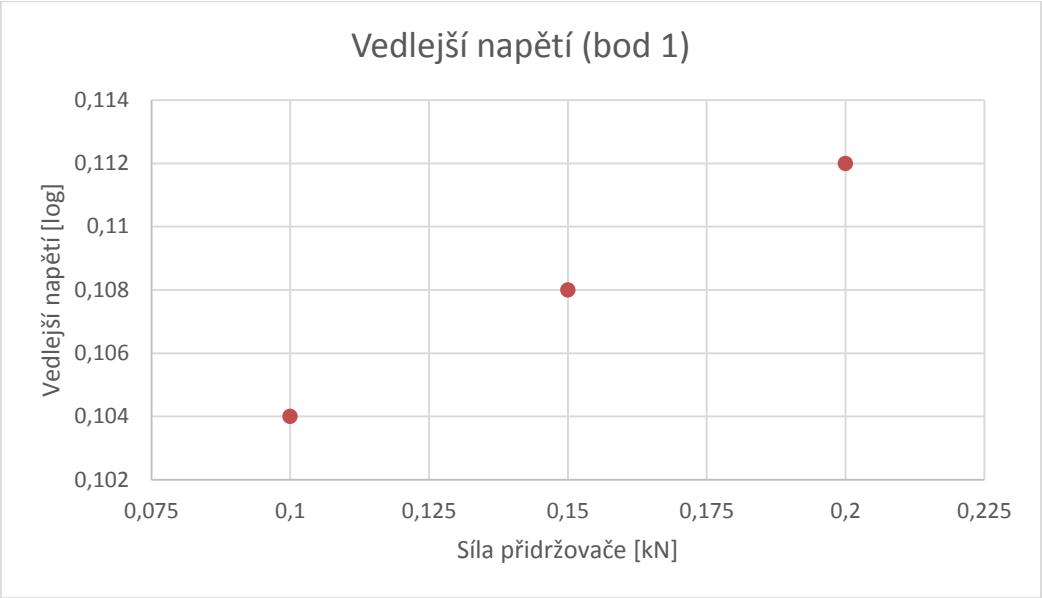


Obr. 105 Analýza vedlejšího napětí pro sílu přidržovače 225 kN

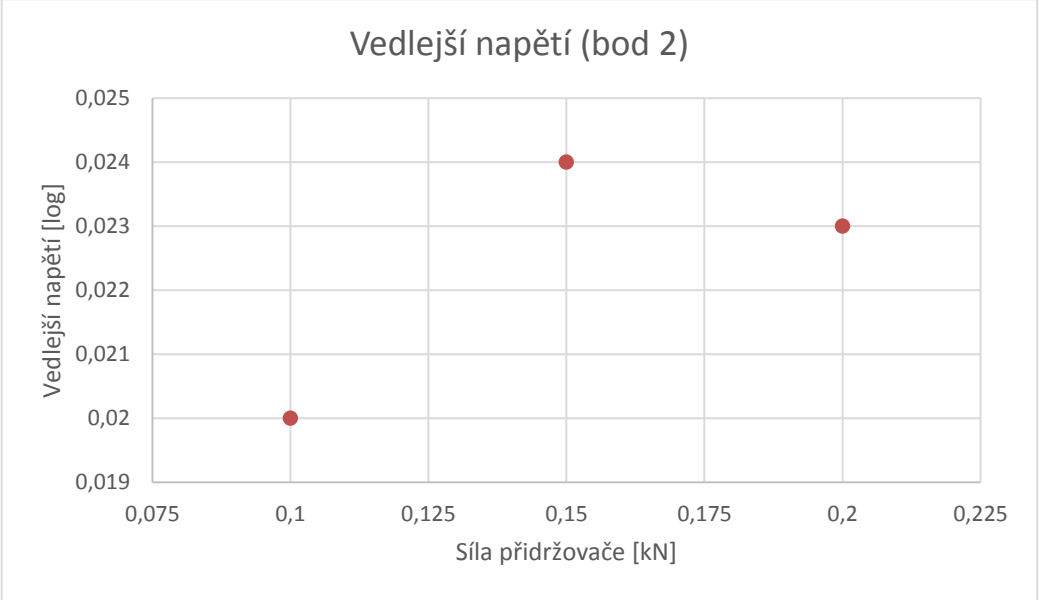
4.4.4 Změna vedlejšího napětí v závislosti na tření

Tab. 19 Vedlejší napětí závislé na tření

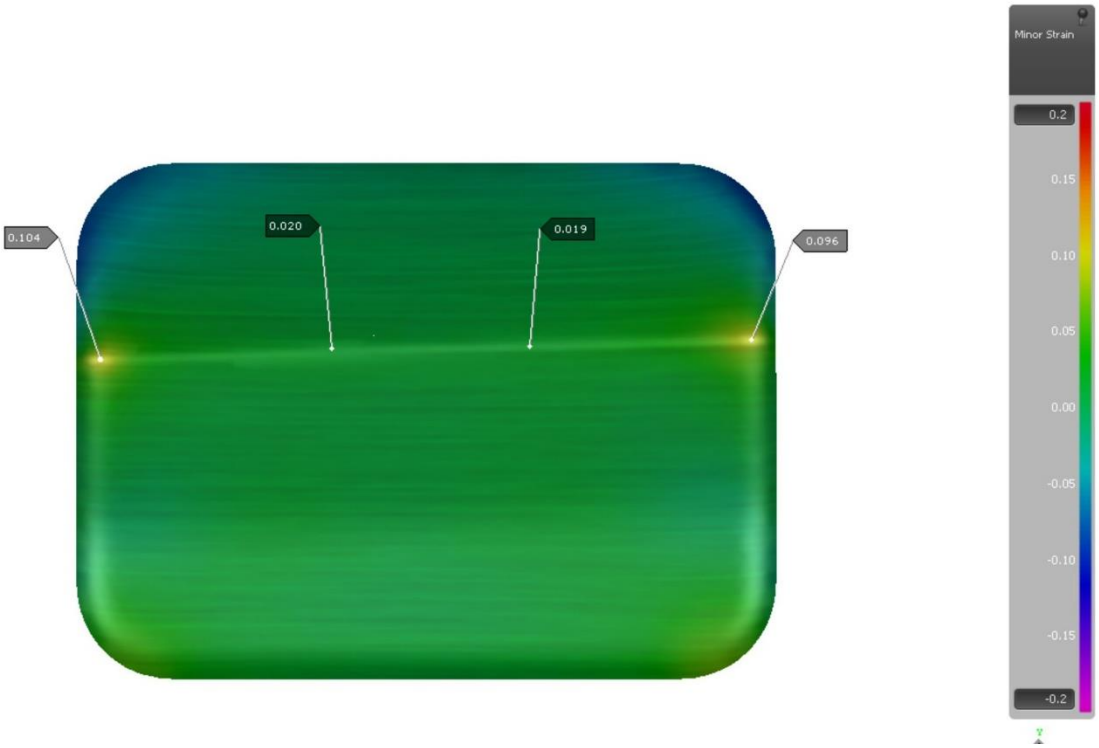
Tření [-]	Vedlejší napětí [log]			
	bod 1	bod 2	bod 3	bod 4
0,1	0,104	0,02	0,019	0,096
0,15	0,108	0,024	0,025	0,102
0,2	0,112	0,023	0,023	0,108
0,25	Porušení materiálu			



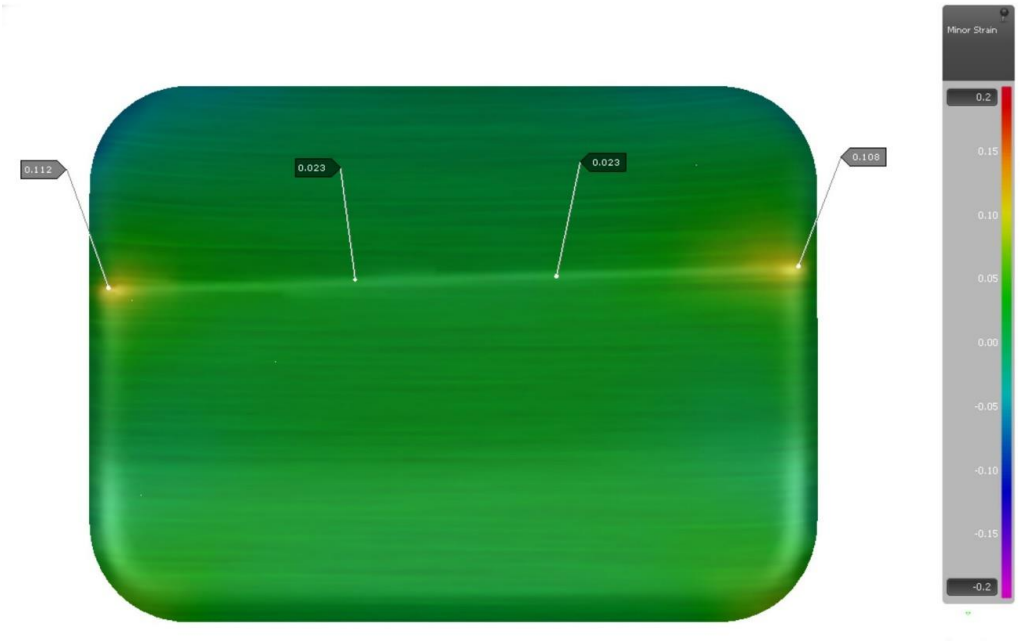
Obr. 106 Graf změny vedlejšího napětí v závislosti na tření (bod 1)



Obr. 107 Graf změny vedlejšího napětí v závislosti na tření (bod 2)



Obr. 108 Analýza vedlejšího napětí pro koeficient tření 0,1

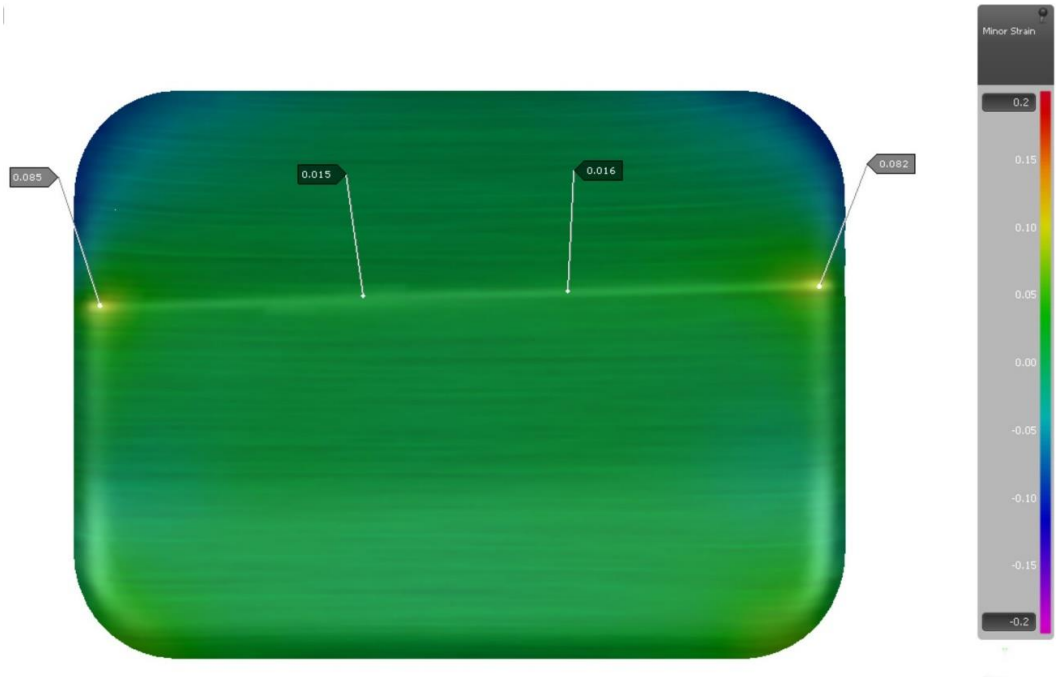


Obr. 109 Analýza vedlejšího napětí pro koeficient tření 0,2

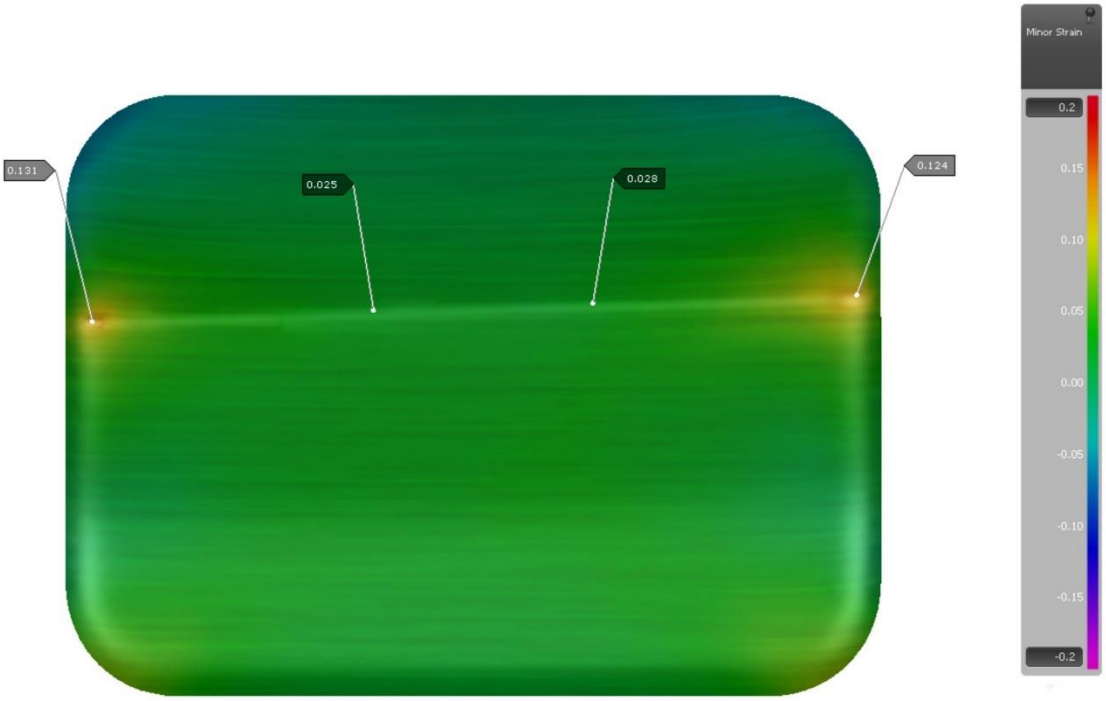
4.4.5 Změna vedlejšího napětí v závislosti na kombinaci tření a síly přidržovače

Tab. 20 Kombinace tření a síly přidržovače závislá na hlavním napětí

Tření [-]	Síla přidržovače [kN]	Vedlejší napětí			
		bod 1	bod 2	bod 3	bod 4
0,1	100	0,085	0,015	0,016	0,082
0,1	150	0,104	0,019	0,02	0,091
0,1	200	0,114	0,024	0,023	0,101
0,15	100	0,099	0,017	0,019	0,093
0,15	150	0,108	0,022	0,021	0,096
0,15	200	0,131	0,025	0,028	0,124
0,2	100	0,094	0,017	0,017	0,082
0,2	150	0,112	0,024	0,024	0,105
0,2	200	Porušení materiálu			



Obr. 110 Analýza vedlejšího napětí pro sílu přidržovače 100 kN a koeficient tření 0,1



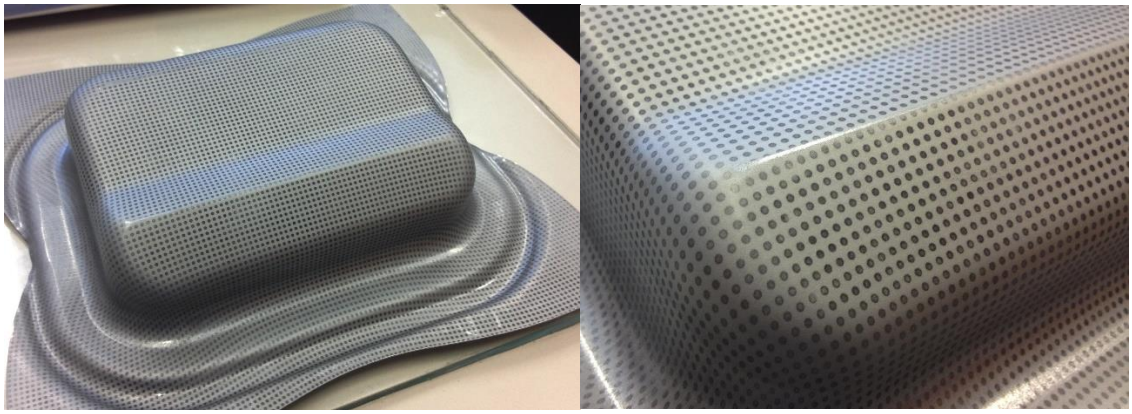
Obr. 110 Analýza vedlejšího napětí pro sílu přidržovače 200 kN a koeficient tření 0,15

4.4.6 Interpretace výsledků analýzy vedlejšího napětí

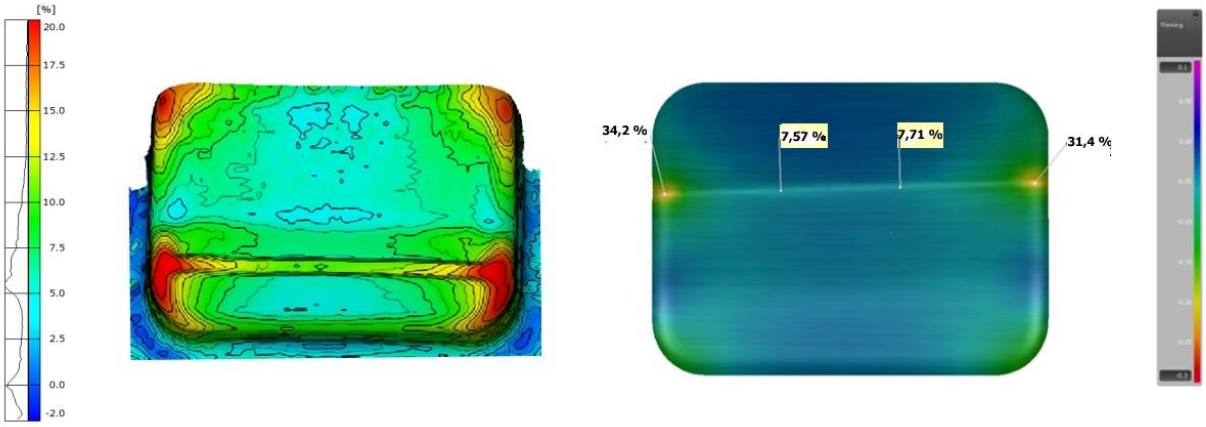
Vedlejší napětí má v rozmezí tolerance plechu opačný charakter než hlavní napětí (obr. 95 a 96), tzn. čím vyšší tloušťka materiálu, tím vyšší vedlejší napětí. Důvodem je, že vedlejší napětí působí v jiném směru než hlavní napětí a v případě hlubokého tažení, čím více roste hodnota hlavního napětí, tím více klesá hodnota vedlejšího napětí. Po zohlednění hodnot tloušťky 0,6 a 0,8 mm se vedlejší napětí chová dle grafu na obr. č 95. Na samotné designové hraně je změna hodnot opět zanedbatelná. Směr válcování má průběh dle obr. 98 a 99. a má logicky opačnou tendenci než hlavní napětí, které působí v jiném směru. Síla přidržovače a tření má téměř stejný efekt jako v případě hlavního napětí, tzn. s rostoucí hodnotou tření a síly přidržovače roste odpor proti tváření a tím jsou i vyšší hodnoty vedlejšího napětí (tab. 18 a 19, obr. 102, 103, 106, 107). Kombinace síly přidržovače (tab. 20) a tření má stejný efekt jako v případě hlavního napětí, tedy hodnota kombinace těchto dvou parametrů se rovná přibližně nejvyšší hodnotě jednoho z parametrů.

4.5 Vyhodnocení výlisku softwarem Argus

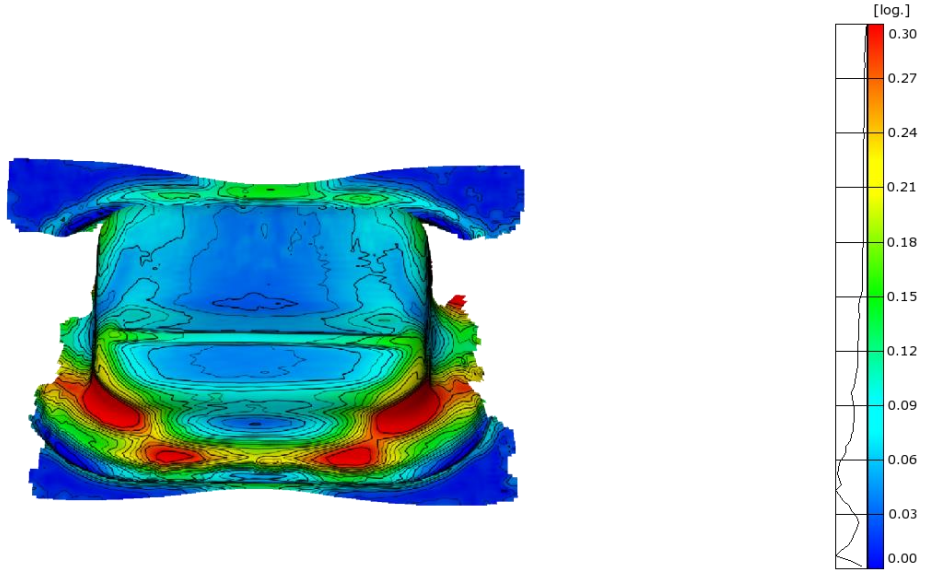
Softwarem Argus, poskytnutý společností ŠKODA AUTO a.s., jsem změřil zkušební výlisek, na kterém byla nanesená měrná deformační síť o velikosti elementu 1 mm a roztečí elementů 2mm (obr. 111). Vyhodnotil jsem změnu tloušťky a změnu hlavního a vedlejšího napětí. Na obr. 112 je znázorněno porovnání měřící metody deformací Argus se simulacemi ze softwaru Autoform. Při srovnání těchto dvou výsledků, jsem zjistil, že na designové hraně bylo simulacemi vyhodnoceno ztenčení materiálu přes 7,5 %. Ve skutečnosti byla naměřena deformace pomocí Argusu přes 10 %. Na hraně nástroje ukázaly simulace ztenčení materiálu přes 31%, v reálném procesu bylo toto ztenčení jen 20%, kvůli zabrušování hran a změně geometrie nástroje v této části nástroje. Změna hlavního a vedlejšího napětí vyhodnocená softwarem Argus (obr. 113 a 114) se shodují s vyhodnocením, které jsem získal ze softwaru AutoForm (hodnoty hlavních a vedlejších napětí jsou si velmi podobné).



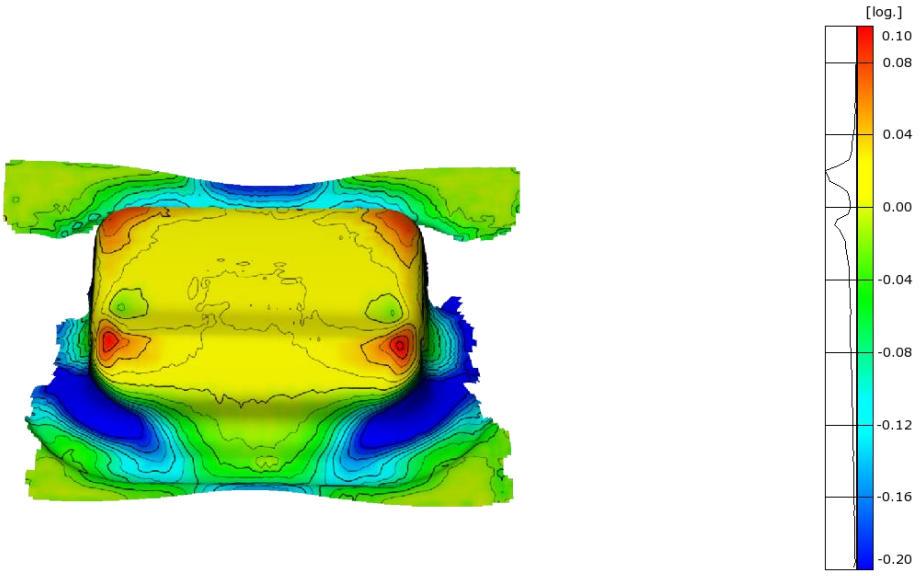
Obr. 111 Zkušební výlisek z plechu s nanesenou deformační sítí určenou pro měření softwarem Argus (vlevo – celý výlisek, vpravo – detail designové hrany)



Obr. 112 Ztenčení materiálu – porovnání metody Argus (vlevo) a simulačního softwaru Autoform (vpravo) [30]



Obr. 113 Hlavní napětí a jeho průběh - výstup z programu Argus [30]



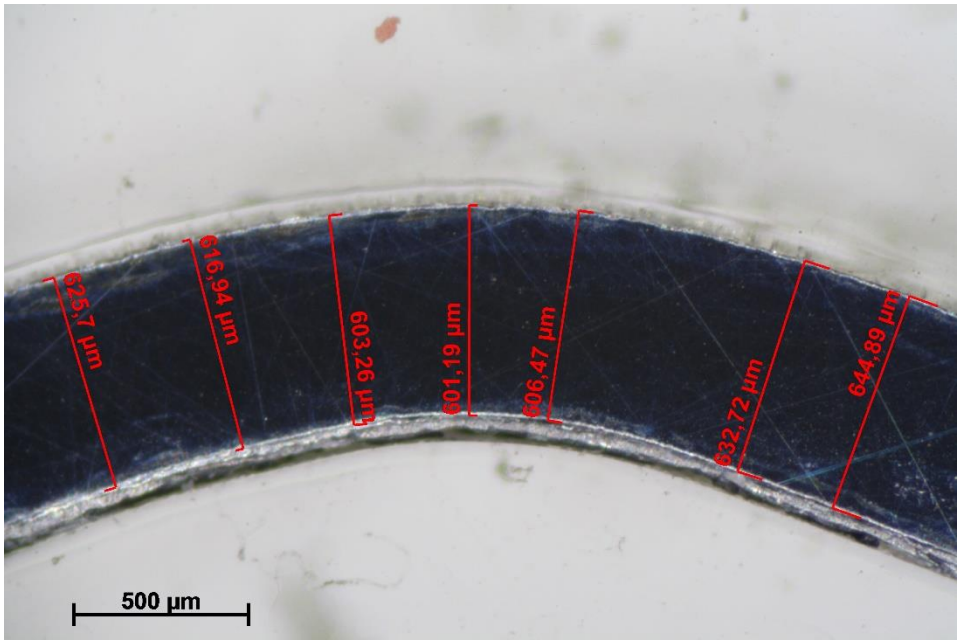
Obr. 114 Vedlejší napětí a jeho průběh - výstup z programu Argus [30]

Výsledky ze softwaru Argus se mírně liší od výsledků ze simulací pomocí softwaru Autoform. Důvodem je nedostatečně jemná deformační síť, která není schopná zachytit průběh deformace na tak malých rádiech, jako je designová hrana a boční hrana nástroje. (obr. 111). Pro přesnější výsledky bych volil deformační měrnou síť s menším průměrem a roztečí elementů.

4.6 Vyhodnocení metalografického výbrusu

K porovnání reálného lisovacího procesu se simulacemi jsem použil metodu měření pomocí metalografického výbrusu. Díky této metodě jsem změřil pomocí mikroskopu tloušťku plechu v místě designové hrany a vyhodnotil tak reálné ztenčení materiálu. Následně jsem porovnal výsledky ztenčení ze simulací a z metalografického výbrusu. Na obr. 115 je vidět snímek metalografického výbrusu z mikroskopu s naměřenými hodnotami tloušťky materiálu. V tab. 21 je uvedena reálná tloušťka plechu na designové hraně změřená pomocí mikroskopu z metalografického výbrusu. V posledním řádku tabulky jsou tučně zvýrazněny vypočítané průměrné hodnoty z naměřených tlouštěk. Z tabulky je vidět, že reálné ztenčení má o **20,4 µm** vyšší

hodnotu, než jakou vyhodnotili numerické simulace. Důvodem je řada vstupujících faktorů, se kterými numerické simulace nepočítají a které nejsme schopni ovlivnit, jako např. teplota okolí, chyba lidského faktoru, intenzita a druh mazacího prostředku. Doporučuji při dalším postupu navrhování nástroje a designové hrany počítat s jistou odchylkou, se kterou vyhodnocení numerických simulací od reálného procesu.



Obr. 115 Snímek z mikroskopu metalografického výbrusu designové hrany

Tab. 21. Porovnání výsledků ztenčení materiálu simulací a metalografického výbrusu

Tloušťka plechu [µm]	Ztenčení reálné [µm]	Ztenčení ze simulací [µm]
625,7	74,3	57
616,94	83,06	55
603,26	96,74	55
610,19	89,81	57
606,47	93,53	55
632,2	67,8	56
645,73	54,27	57
644,89	55,11	57
623,1725	**76,8**	**56,1**

4.7 Celkové vyhodnocení experimentu

Všechna data a výsledky byly mezi sebou porovnány a následně vyhodnoceny. Z provedených analýz vyplývá, že největší vliv na všechny proměnně (tzn. zpevnění, ztenčení, hlavní a vedlejší napětí) má síla přidržovače, kde výsledky dosahovali největších rozdílů hodnot. Důvodem je, že čím je větší síla přidržovače, tím více brání materiálu k proklouznutí a značně tím roste přetvárný odpor a síla nutná k provedení operace. Proto byly rozdíly hodnot zpevnění, ztenčení a napětí vyšší při změnách síly přidržovače, než např. u změnách hodnot výchozích tlouštěk materiálu nebo změny směru válcování. Tloušťka plechu a směr válcování má menší vliv než síla přidržovače, ale není zanedbatelný. Tyto dva parametry příliš neovlivňují tvářecí proces, proto jsou změny hodnoty z analýz malé. Značný význam na tyto všechny proměnné (výjimkou je vedlejšího napětí) má i tření, jehož změna má podobné důsledky jako změna síly přidržovače. Celkový souhrn výsledků je zobrazen v tabulce č. 22 a 23. Všechny hodnoty pro výsledné vyhodnocení jsou vztahovány pro bod na designové hraně (bod 2).

Následující tabulka č. 22 zobrazuje, jakou mírou určitý parametr ovlivňuje daný materiál v určité oblasti. Hodnoty v tabulce jsou vždy rozdíly maximální a minimální naměřené hodnoty v dané kategorii. Např. hodnota 15,5 MPa zpevnění byla vypočtena jako rozdíl zpevnění největší a nejmenší tloušťky materiálu. To samé bylo provedeno se zpevněním u parametru směr válcování, tření a síla přidržovače.

Následující tabulka č. 22 zobrazuje hodnoty ovlivnění daného parametru (tloušťka, směr válcování, …) určitou proměnnou (zpevnění, změna tloušťky, …). Tyto hodnoty byly vypočítány z tabulek č. 1 až 20 následujícím způsobem: Pro každou proměnnou se číslo v tabulce rovná rozdílu naměřené hodnoty pro nejmenší a největší sledovanou hodnotu každého parametru. Např. číslo 15,5 MPa značí rozdíl zpevnění mezi krajními tloušťkami plechu 0,6 a 0,8 mm. Číslo 9,8 MPa značí rozdíl ve zpevnění mezi směrem válcování 0 a 90° atd.

Tabulka č. 23 zobrazuje v procentech, jakou mírou ovlivňuje určitý parametr (tloušťka, směr válcování, …) určitou proměnnou (zpevnění, změna tloušťky, …). Nejvyšší naměřené hodnotě pro každou proměnnou bylo vždy přiřazeno 100 %, ostatní hodnoty byly poměrově dopočítány.

Tab. 22 Celkové zhodnocení vlivu parametrů na určité oblasti (růžová – velmi ovlivňuje, žlutá – ovlivňuje, zelené – ovlivňuje minimálně)

Analýza	Změna z hlediska daného parametru			
	Toušťka	Směr válcování	Síla přidržovače	Tření
Zpevnění [Mpa]	15,5	9,8	54	39,8
Změna tloušťky [mm]	0,012	0,008	0,046	0,03
Hlavní napětí	0,008	0,012	0,036	0,029
Vedlejší napětí	0,005	0,003	0,014	0,003

Tab. 23 Celkové zhodnocení vlivu parametrů na určité oblasti převedené na % jednotky

Analýza	Změna z hlediska daného parametru			
	Toušťka	Směr válcování	Síla přidržovače	Tření
Zpevnění [Mpa]	28,7	18,1	100	73,7
Změna tloušťky [mm]	26	17,4	100	65,2
Hlavní napětí	17,4	33,3	100	80,5
Vedlejší napětí	35,7	21,4	100	21,4

ZÁVĚR

Cílem mé diplomové práce bylo vyhodnotit velikost deformace na ostré designové hraně automobilu s poloměrem zaoblení 1 mm. Pro lisovací proces je takto malá hodnota rádia velmi nepříznivá a jedná se o kritické místo s velmi vysokou pravděpodobností vzniku trhlin.

Ve své práci jsem provedl pomocí softwaru AutoForm nastavení základních parametrů včetně definice nástroje poskytnutého v digitální podobě od ŠKODA AUTO a.s. a zaměřil jsem se na čtyři základní analýzy: zpevnění materiálu, změna tloušťky plechu, změna hlavního a vedlejšího napětí. Všechny analýzy jsem vyhodnocoval na základě změny následujících čtyř parametrů: výchozí tloušťka materiálu, směr válcování plechu, síla přidržovače a koeficient tření. Z celkových 16 analýz provedených vždy pro dva body, z nichž jeden se nacházel přímo na designové hraně, druhý na hraně nástroje, jsem dospěl k následujícím výsledkům:

- **Síla přidržovače** ovlivňuje celý lisovací proces v největším rozsahu, naměřil jsem nejvyšší změny hodnot u všech sledovaných parametrů, tj. u zpevnění, změny tloušťky i hlavního a vedlejšího napětí.
- **Třecí síla** rovněž významně ovlivňuje lisovací proces s vysokými naměřenými hodnotami změn u všech parametrů. Výjimkou byly hodnoty vedlejšího napětí.
- Změny výchozí **tloušťky materiálu** nebo **směru válcování plechu** ovlivňují lisovací proces jen minimálně a lze jej považovat za zanedbatelné

Dále jsem porovnal ztenčení materiálu vyhodnocené numerickými simulacemi a reálným výliskem, který byl rozřezán za účelem vytvoření metalografického výbrusu. Na designové hraně jsem naměřil o cca 30% větší ztenčení materiálu na metalografickém výbrusu, než jaké vyhodnotili numerické simulace. Při reálném vylisování plechu byla hodnota ztenčení průměrně 76,8 μm, numerické simulace vyhodnotili průměrně 56,1 μm, což je o 20,4 μm méně.

Pro budoucí vývoj a optimalizaci lisovacího procesu designových hran v automobilovém průmyslu primárně doporučuji optimalizovat sílu přidržovacího systému, rozložení a velikost brzdících drážek a zvolit vhodné mazací prostředky

tvářecích nástrojů. Výsledky numerických simulací nám pomohou přiblížit situaci, je ale nutné počítat s tím, že se nikdy nebudou shodovat s reálnou problematikou a je třeba vždy počítat s určitou rezervou při vyhodnocování.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Schematický průběh střižné operace
Obr. 2 Schematické zobrazení střižné vůle při střižné operaci
Obr. 3 Vliv střižné vůle na pohyb trhlin
Obr. 4 Závislost střižné vůle na tloušťce stříhaného materiálu.
Obr. 5 Schéma ohýbání materiálu (- značí tlakové napětí, + značí tahové napětí)
Obr. 6 Schéma deformace profilu při ohybu
Obr. 7 Umístění výstřižku na plechu vzhledem ke směru vláken materiálu
Obr. 8 Schématické znázornění odpružení při ohybu
Obr. 9 Schématické znázornění technologie prostého tažení, vlevo
s přidržovačem, vpravo náčrt bez přidržovače
Obr. 10 Schématické znázornění brzdících drážek
Obr. 11 Graf určení tlaku přidržovače pro první tah. U grafu vpravo na ose x nalezneme poměrnou tloušťku, na ose y …. v levém grafu na ose x určíme přibližný tlak přidržovače
Obr. 12 Schématické znázornění odebírání vzorků pro zkoušku plastické anizotropie
Obr. 13 Závislost exponentu deformačního zpevnění na velikosti zahloubení
Obr. 14 FLD diagram
Obr. 15 Praktická ukázka FLD diagramu ze softwaru Autoform
Obr. 16 Erichsenova zkouška hloubením, F_t je síla tažníku, F_p síla přidržovače, IE hodnota zahloubení
Obr. 17 Schéma Fukuiho zkoušky
Obr. 18 Schéma kalíškovací zkoušky, 1 – tažnice, 2 – plech, 3 – přidržovač, 4 – tažník
Obr. 19 Vlevo – Oblast homogenní deformace, vpravo – oblast nehomogenní deformace
Obr. 20 Schémata napjatosti
Obr. 21 Schémata deformace
Obr. 22 Různé typy deformačních sítí
Obr. 23 Vliv velikosti elementů deformační sítě na vyhodnocení deformace na malé designové hraně (vlevo – velké elementy, vpravo – malé elementy)
Obr. 24 Princip elektrochemického leptání
Obr. 25 Princip fotochemické metody nanášení sítě
Obr. 26 Ukázka ze systému Argus: FLD diagram (vlevo), model součásti se znázorněním ztenčení stěny (vpravo)

Obr. 27 Škoda Superb 3. generace – designová hrana. Červený výřez značí místo karoserie, které byla simulována a prakticky zkoušena na připraveném nástroji
Obr. 28 Řez designovou hranou
Obr. 29 Schématické znázornění sestavy tvářecího procesu experimentu (fialová – tažnice, zelená – přidržovač, červená – tažník, šedá – tvářený plech).
Obr. 30 Model lisovacího zkušebního nástroje (vlevo – tažnice, vpravo – tažník)
Obr. 31 Zasíťování tažníku (vlevo – celý nástroj, vpravo – detail radiusu)
Obr. 32 Fotografie reálného nástroje (vlevo - tažník, vpravo – tažnice
Obr. 33 Vlevo - fotografie tažníku usazeného v loži, vpravo – lože pro umístění tažnice
Obr. 34 Nástroje usazené do hydraulického lisu
Obr. 35 Řez nástroji v počátku procesu lisování
Obr. 36 Řez nástroji v 30% procesu lisování
Obr. 37 Řez nástroji v 60% procesu lisování
Obr. 38 a) Řez nástroji ve 100% procesu lisování, b) detail designové hrany
Obr. 39 Postup při metalografickém výbrusu
Obr. 40 Body k vyhodnocování (bod 1 je ve stejném místě na opačné straně nástroje, jako bod 4, bod 2 a 3 jsou body na designové hraně)
Obr. 41. Graf zpevnění materiálu v závislosti na tloušťce plechu (bod 1)
Obr. 42. Graf zpevnění materiálu v závislosti na tloušťce plechu (bod 2)
Obr. 43 Analýza zpevnění materiálu pro tloušťku plechu 0,6 mm
Obr. 44 Analýza zpevnění materiálu pro tloušťku plechu 0,8 mm
Obr. 45. Graf zpevnění materiálu v závislosti na směru válcování (bod 1)
Obr. 46. Graf zpevnění materiálu v závislosti na směru válcování (bod 2)
Obr. 47 Analýza zpevnění materiálu pro plech se směrem válcování 0°
Obr. 48 Analýza zpevnění materiálu pro plech se směrem válcování 90°
Obr. 49 Graf zpevnění materiálu v závislosti na síle přidržovače (bod 1)
Obr. 50 Graf zpevnění materiálu v závislosti na síle přidržovače (bod 2)
Obr. 51 Analýza zpevnění materiálu pro sílu přidržovače 100 kN
Obr. 52 Analýza zpevnění materiálu pro sílu přidržovače 225 kN
Obr. 53 Graf zpevnění materiálu v závislosti na tření (bod 1)
Obr. 54 Graf zpevnění materiálu v závislosti na tření (bod 2)
Obr. 55 Analýza zpevnění materiálu pro koeficient tření 0,1
Obr. 56 Analýza zpevnění materiálu pro koeficient tření 0,2
Obr. 57 Analýza zpevnění materiálu pro sílu přidržovače 100 kN a koeficient tření 0,1

Obr. 58 Analýza zpevnění materiálu pro sílu přidržovače 200 kN a koeficient tření 0,15
Obr. 59. Graf změny tloušťky materiálu v závislosti na původní tloušťce (bod 1) Obr.
Obr. 60 Graf změny tloušťky materiálu v závislosti na původní tloušťce (bod 2 Obr.
Obr. 61 Analýza změny tloušťky pro tloušťku plechu 0,6 mm
Obr. 62 Analýza změny tloušťky pro tloušťku plechu 0,8 mm
Obr. 63 Graf změny tloušťky materiálu v závislosti na směru válcování (bod 1)
Obr. 64 Graf změny tloušťky materiálu v závislosti na směru válcování (bod 2)
Obr. 65 Analýza změny tloušťky pro směr válcování plechu 0°
Obr. 66 Analýza změny tloušťky pro směr válcování plechu 90°
Obr. 67 Graf změny tloušťky materiálu v závislosti na síle přidržovače (bod 1)
Obr. 68 Graf změny tloušťky materiálu v závislosti na síle přidržovače (bod 2)
Obr. 69 Analýza změny tloušťky pro sílu přidržovače 100 kN
Obr. 70 Analýza změny tloušťky pro sílu přidržovače 225 kN
Obr. 71 Graf změny tloušťky v závislosti na tření (bod 1)
Obr. 72 Graf změny tloušťky v závislosti na tření (bod 2)
Obr. 73 Analýza změny tloušťky pro koeficient tření 0,1
Obr. 74 Analýza změny tloušťky pro koeficient tření 0,2
Obr. 75 Analýza změny tloušťky pro sílu přidržovače 100 kN a koeficient tření 0,1
Obr. 76 Analýza změny tloušťky pro sílu přidržovače 200 kN a koeficient tření 0,15
Obr. 77 Graf změny hlavního napětí v závislosti na tloušťce (bod 1)
Obr. 78 Graf změny hlavního napětí v závislosti na tloušťce (bod 2)
Obr. 79 Analýza hlavního napětí pro tloušťku plechu 0,6 mm
Obr. 80 Analýza hlavního napětí pro tloušťku plechu 0,73 mm
Obr. 81 Graf změny hlavního napětí v závislosti na směru válcování (bod 1)
Obr. 82 Graf změny hlavního napětí v závislosti na směru válcování (bod 2)
Obr. 83 Analýza hlavního napětí pro směr válcování plechu 0°
Obr. 84 Analýza hlavního napětí pro směr válcování plechu 90°
Obr. 85 Graf změny hlavního napětí v závislosti na síle přidržovače (bod 1)
Obr. 86 Graf změny hlavního napětí v závislosti na síle přidržovače (bod 2)
Obr. 87 Analýza hlavního napětí pro sílu přidržovače 100 kN
Obr. 88 Analýza hlavního napětí pro sílu přidržovače 225 kN
Obr. 89 Graf změny hlavního napětí v závislosti na tření (bod 1)
Obr. 90 Graf změny hlavního napětí v závislosti na tření (bod 2)
Obr. 91 Analýza hlavního napětí pro koeficient tření 0,1

Obr. 92 Analýza hlavního napětí pro koeficient tření 0,2
Obr. 93 Analýza hlavního napětí pro sílu přidržovače 100 kN koeficient tření 0,1
Obr. 94 Analýza hlavního napětí pro sílu přidržovače 200 kN koeficient tření 0,15
Obr. 95 Graf změny vedlejšího napětí v závislosti na tloušťce (bod 1)
Obr. 96 Graf změny vedlejšího napětí v závislosti na tloušťce (bod 2)
Obr. 97 Analýza vedlejšího napětí pro tloušťku plechu 0,6 mm
Obr. 98 Graf změny vedlejšího napětí v závislosti na směru válcování (bod 1)
Obr. 99 Graf změny vedlejšího napětí v závislosti na směru válcování (bod 2)
Obr. 100 Analýza vedlejšího napětí pro směr válcování plechu 0°
Obr. 101 Analýza vedlejšího napětí pro směr válcování plechu 90°
Obr. 102 Graf změny vedlejšího napětí v závislosti na síle přidržovače (bod 1)
Obr. 103 Graf změny vedlejšího napětí v závislosti na síle přidržovače (bod 2)
Obr. 104 Analýza vedlejšího napětí pro sílu přidržovače 100 kN
Obr. 105 Analýza vedlejšího napětí pro sílu přidržovače 225 kN
Obr. 106 Graf změny vedlejšího napětí v závislosti na tření (bod 1)
Obr. 107 Graf změny vedlejšího napětí v závislosti na tření (bod 2)
Obr. 108 Analýza vedlejšího napětí pro koeficient tření 0,1
Obr. 109 Analýza vedlejšího napětí pro koeficient tření 0,2
Obr. 110 Analýza vedlejšího napětí pro sílu přidržovače 100 kN a koeficient tření 0,1
Obr. 110 Analýza vedlejšího napětí pro sílu přidržovače 200 kN a koeficient tření 0,15
Obr. 111 Zkušební výlisek z plechu s nanesenou deformační sítí určenou pro měření softwarem Argus (vlevo – celý výlisek, vpravo – detail designové hrany)
112 Ztenčení materiálu – porovnání metody Argus (vlevo) a simulačního softwaru Autoform (vpravo)
Obr. 113 Hlavní napětí a jeho průběh - výstup z programu Argus
Obr. 114 Vedlejší napětí a jeho průběh - výstup z programu Argus
Obr. 115 Snímek z mikroskopu metalografického výbrusu designové hrany

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Zpevnění materiálu závislé na tloušťce plechu
Tab. 2 Zpevnění závislé na směru válcování
Tab. 3 Zpevnění závislé na síle přidržovače
Tab. 4 Zpevnění závislé na velikosti tření
Tab. 5 Zpevnění závislé na kombinaci tření a síly přidržovače
Tab. 6 Změna tloušťky závislá na původní tloušťce materiálu
Tab. 7 Změna tloušťky závislá na směru válcování
Tab. 8 Změna tloušťky závislá na síle přidržovače
Tab. 9. Změna tloušťky závislá na tření
Tab. 10 Kombinace tření a síly přidržovače závislá na změně tloušťky
Tab. 11 Hlavní napětí závislé na tloušťce
Tab. 12 Hlavní napětí závislé na směru válcování
Tab. 13 Hlavní napětí závislé na síle přidržovače
Tab. 14 Hlavní napětí závislé na tření
Tab. 15 Kombinace tření a síly přidržovače závislá na hlavním napětí
Tab. 16 Vedlejší napětí závislé na původní tloušťce
Tab. 17 Vedlejší napětí závislé na směru válcování
Tab. 18 Vedlejší napětí závislé na síle přidržovače
Tab. 19 Vedlejší napětí závislé na tření
Tab. 20 Kombinace tření a síly přidržovače závislá na hlavním napětí
Tab. 21 Porovnání výsledků ztenčení materiálu simulací a metalografického výbrusu
Tab. 22 Celkové zhodnocení vlivu parametrů na určité oblasti (růžová – velmi ovlivňuje, žlutá – ovlivňuje, zelené – ovlivňuje minimálně)
Tab. 23 Celkové zhodnocení vlivu parametrů na určité oblasti převedené na % jednotky

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Materiálový list DC06

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] NOVOTNÝ, Jiří. *Technologie I slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy*. 2. Praha: ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02351-6.

[2] KOTOUČ, Jiří. *Tvářecí nástroje*. 1. Praha: ČVUT, 1993. ISBN 80-01-01003-1.

[3] EFFMARK, Jiří. *Tváření kovů*. 1. Praha: SNTL, 1992. ISBN 80-03-00651-1.

[4] ČERMÁK, Jan. *Teorie a metodika tváření kovů*. [přednáška]. Praha: ČVUT, 23.9 – 14.12 2014.

[5] Akademie tváření: Stříhání. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2010 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-strihani.html

[6] *Učíme v prostoru: Tváření* [online]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2924

[7] HULÍN, Radek. *Chování nástrojů při výrobě výlisků v oblastech designových hran*. Praha, 2014. Diplomová práce.

[8] ŠIMÁNĚ, Marek. *Analýza deformace výlisku na malých rádiusech*. Praha, 2013. Diplomová práce.

[9] BEZDĚK, Jiří. *TECHNOLOGIE VÝROBY TVAROVÉ SOUČÁSTI*. Brno, 2009. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18795. Diplomová práce.

[10] Akademie tváření: Technologičnost konstrukce při ohýbání. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2012 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-technologicnost-konstrukce-pri-ohybani.html

[11] *The strain-dependence of plastic strain ratio (rm value) of deep drawing sheet steels determined by simple tension test* [online]. In: HU, Hsun. 1975 [cit. 2015-06-12]. Dostupné z: http://download.springer.com/static/pdf/270/art%253A10.1007%252FBF02672326.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Farticle%2F10.1007%2FBF02672326&token2=exp=1434117479~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F270%2Fart%25253A10.1007%25252FBF02672326.pdf%3ForiginUrl%3Dhttp%253A%252F%252Flink.springer.com%252Farticle%252F10.1007%252FBF026

72326*~hmac=d2649b85414667eea3ac0ac0bf55bb50d31d128b71781257ad378bd625b77886

[12] Akademie tváření: Hluboké tažení. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2011 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-hluboke-tazeni.html

[13] ČADA, Radek. *TECHNOLOGIE I: studijní opora* [online]. Ostrava, 2007 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/TECH1/Technologie-I.pdf

[14] COLGAN, Marc a John MONAGHAN. *Deep drawing process: analysis and experiment* [online]. [cit. 2015-06-12]. DOI: 10.1016/S0924-0136. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013602002534#

[15] *Techlab* [online]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: http://www.techlab.fr/htm/deformation.htm

[16] KUČERA, Radek. *VÝZNAM DEFORMAČNÍ SÍŤE V OBLASTI TVÁŘENÍ*. Brno, 2012.Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=51373. Bakalářská práce.

[17] PETRUŽELKA, Jiří a Richard BŘEZINA. *TVAŘITELNOST KOVOVÝCH MATERIÁLŮ*. Ostrava, 2011. Technická univerzita Ostrava.

[18] PAGÁČ, Aleš. *POUŽITÍ TECHNOLOGICKÝCH ZKOUŠEK*. Brno, 2012. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54946. Bakalářská práce.

[19] DRÁPELA, Miloslav. *3D optické merení deformace pri tvárení materiálu* [online]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: http://www.mcae.cz/data/files/clanek2-mcae-drapela-3d-opticke-mereni-deformace-pri-tva-23.pdf

[20] JENSEN, M.R., F.F. DAMBORG, K.B. NIELSEN a J. DANCKERT. *Applying the finite-element method for determination of tool wear in conventional deep-drawing* [online].[cit.2015-06-12].Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013698000478

[21] Autoform: *Forming reality* [online]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: http://www.autoform.com/en/

[22] *Metoda konečných prvků* [online]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska1_mkp.pdf

[23] ŠEBESTOVÁ, Hana. *Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii* [online]. [cit.2015-05-17].Dostupné z: http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf

[24] *METALOGRAFIE I* [online]. In: . [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/document.php?docId=9608 [25] http://file.scirp.org/Html/9-2710141_40047.htm

[26] *2015 Toyota Camry* [online]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: http://2015toyotacamry2016.com/skoda-superb-review/#page

[27] *Deformační zpevnění* [online]. In: . [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-600-1/pdf/048.pdf

[28] *IHS Engineering360: Chapter 16: Stamping* [online]. [cit. 2015-06-12]. Dostupné z: http://www.globalspec.com/reference/70325/203279/chapter-16-stamping

[29] *Deckenbach* [online]. [cit. 2015-06-03]. Dostupné z: http://www.fina-oleje.cz/files/produkty/molyduval/spec_maziva_pro_tvareni_kovu.pdf

[30] Interní materiály ŠKODA AUTO a.s.