

Optimalizace tvaru a designu plechového dílu části karosérie plošným tvářením a optimalizace samotné technologie

Bc. Marek Wrobel

Diplomová práce
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Marek Wrobel
Osobní číslo:	T22393
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Optimalizace tvaru a designu plechového dílu části karosérie plošným tvářením a optimalizace samotné technologie

Zásady pro vypracování

1. Vypracovat literární studii pro dané téma.
2. Provést 3D konstrukci modelu plechové součásti.
3. Vytvořit simulace procesu tváření v software AutoForm.
4. Navrhnout optimalizace tvaru součásti a technologie.
5. Vyhodnocení jednotlivých variant.

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

Seznam doporučené literatury:

DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 169 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 9788021447479.

HU, Ping, Ning MA a Yi-guo ZHU. Theories, methods and numerical technology of sheet metal cold and hot forming: analysis, simulation and engineering applications. London: Springer, [2013], xiv, 210 s. Springer series in advanced manufacturing. ISBN 978-1-4471-4098-6.

WANG, Darren, ed. Handbook of metal forming process. New York: NY research press, [2015], vi, 212 s. ISBN 978-1-63238-253-5.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Martin Ovsík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2024**
Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 27. února 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užit své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou tvářitelnosti kovových plechových polotovarů do konečných výrobků komplexních tvarů pro aplikace hlavně v automobilovém průmyslu. K analýze schopnosti tváření polotovaru do požadovaného výrobku se využívá podpory počítačového softwaru AutoForm Forming R8.

Cílem práce je vytvoření simulace celého procesu výroby zadaného dílu, aby nebyly překročeny kritické hodnoty na stupnici pro výsledky max. porušení a ztenčení. V programu CATIA V5 se vymodelují plochy pro technologii tažení, ohýbání a křivky pro technologii stříhání.

Klíčová slova: AutoForm, tvářitelnost, plošné tváření, diagram mezních deformací, vysokopevnostní ocel, simulace tváření

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the issue of the processability of semi-finished products from metal sheet into final products of complex shapes for applications mainly in the automotive industry. The support of computer software AutoForm Forming R8 is used to analyze the ability to form the semi-finished product into the desired product.

The aim of the work is to simulate the entire production process for the specified part, so that the critical values on the scale were not exceeded for the results of max. failure and thinning. For drawing and bending technology are surfaces modeled in the program CATIA V5. For cutting technology are prepared curves.

Keywords: AutoForm, formability, sheet forming, forming limit diagram, high-strength steel, simulation of forming

Rád bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za jeho čas, příkladný přístup, odborné konzultace a kontrolování moji diplomové práce. Dále chci poděkovat inženýrům z firmy PWO za sdílení jejich znalostí a zkušeností. Nakonec bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu během mého studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 MATERIÁLY URČENÉ K TVÁŘENÍ.....	12
1.1 OCEL	12
1.1.1 Chemické složení	12
1.2 VYSOKOPEVNOSTNÍ OCELI	14
1.2.1 Pokročilé vysokopevnostní oceli.....	15
1.2.2 Dvoufázové oceli	17
1.2.3 TRIP oceli	18
1.2.4 Komplexní fázové oceli	19
1.2.5 TWIP oceli	20
1.2.6 Martenzitické oceli.....	20
1.2.7 Nerezová ocel.....	21
1.3 HLINÍK	22
1.4 HOŘČÍK	23
2 TESTOVÁNÍ TVAŘITELNOSTI.....	24
2.1 ZKOUŠKY TAŽNOSTI	24
2.1.1 Zkouška hloubením podle Erichsena	24
2.1.2 Zkouška kalíškovací.....	25
2.1.3 Zkouška tažením v kuželové tažnici (Fukuiho zkouška)	26
2.1.4 Zkouška hydraulická (Tomlenova)	27
2.2 ZKOUŠKY OHYBATELNOSTI	27
2.2.1 Zkouška lámavosti	27
2.2.2 Zkouška střídavým ohybem	28
2.2.3 Zkouška podle Gütha	28
2.3 DIAGRAM MEZNÍCH DEFORMACÍ	29
2.3.1 Diagram mezních deformací při zatížení	30
2.3.2 Diagram mezních deformací při porušení.....	30
2.3.3 Historické lineární metody	31
2.3.4 Experimentální stanovení FLD	31
2.3.5 Nakajima test.....	32
2.4 ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	33
2.4.1 Zkouška podle Rockwella	33
2.4.2 Zkouška podle Brinella	34
2.4.3 Zkouška podle Vickerse	35
3 PLOŠNÉ TVÁŘENÍ.....	36
3.1 HLUBOKÉ TAŽENÍ.....	36
3.1.1 Tažná síla	38
3.1.2 Síla působící na přidržovač	39

3.1.3	Defekty	39
3.1.4	Mazání	40
3.2	OHYB	40
3.2.1	Ohýbací síly	43
3.2.2	Minimální poloměr ohybu	43
3.2.3	Odpružení	44
3.2.4	Rovnění	44
3.3	STŘIH	45
3.3.1	Vystřihování	46
3.3.2	Střížná síla	47
3.3.3	Střížná vůle	48
4	SIMULACE TVÁŘENÍ	49
4.1	POČÍTAČOVÁ PODPORA	49
4.1.1	Autoform Forming	50
4.2	MODELOVÁNÍ PRVKŮ	50
4.2.1	Síťování prvků	51
4.3	POPIS VÝSLEDKŮ	52
4.3.1	Tvářitelnost	52
4.3.3	Zvlnění	53
4.3.4	Odpružení	54
4.3.5	Síly nástroje	55
II	PRAKTICKÁ ČÁST	56
5	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	57
6	3D KONSTRUKCE PLECHOVÉHO DÍLU	58
6.1	POPIS DÍLU	58
6.2	VOLBA MATERIÁLU	59
6.3	KONTROLA ODFORMOVÁNÍ	61
7	NASTAVENÍ SIMULACE	63
8	OPTIMALIZACE TVARU SOUČÁSTÍ A VÝROBNÍ TECHNOLOGIE	84
8.1	PLOCHA TAŽNÍKU A PŘIDRŽOVAČE VERZE A	84
8.2	PLOCHA TAŽNÍKU A PŘIDRŽOVAČE VERZE B	88
8.3	PLOCHA TAŽNÍKU A PŘIDRŽOVAČE VERZE C	95
8.4	PLOCHA TAŽNÍKU A PŘIDRŽOVAČE VERZE D	100
8.5	PLOCHA TAŽNÍKU A PŘIDRŽOVAČE VERZE E	105
8.5.1	Proces tvarování platiny	110
8.6	PLOCHA TAŽNÍKU A PŘIDRŽOVAČE VERZE F	113
9	DISKUZE VÝSLEDKŮ A VYHODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH VARIANT	121

ZÁVĚR	123
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	124
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	127
SEZNAM OBRÁZKŮ	129
SEZNAM TABULEK.....	133
SEZNAM PŘÍLOH.....	134

ÚVOD

Pro automobilový průmysl je zásadní neustálé zdokonalování procesu výroby automobilů. Důležitou částí je výroba karosérie, která slouží, jako základna pro další přidávání komponentů. Samotná karosérie se skládá z několika částí, které mají komplexní tvary a díry o malé tloušťce. Pro vytvarování požadovaného tvaru se využívá technologie hlubokého tažení, ohýbání, stříhání a rovnání. Pro samotný proces musí být kovový polotovar tažný, ale zároveň pro aplikaci v karosériích musí být pevný.

V dnešní době existuje velký rozsah ocelových materiálů, které se využívají pro složení karosérie automobilů. Většina z nich se využívá, jako konstrukční prvek absorbující nárazy. Výzkum ocelových materiálů se stále rozvíjí, protože je kladen velký důraz na co největší možnou ochranu pro pasažéry automobilu a zároveň na co nejmenší hmotnost automobilů pro snížení emisí.

Podle požadavků zákazníka je potřeba optimalizovat proces technologie výroby. Za tímto účelem se využívá počítačové podpory, zejména program AutoForm Forming. Díky tomuto programu můžeme simulovat výrobní proces při zadání podmínek. Zadáváme materiál, plochu tažníku a přidržovače, použité síly a mazivo. Program obsahuje rozsáhlou knihovnu materiálů, pro které byly experimentálně zjištěny vlastnosti a diagramy mezních deformací.

Podle podkladů ze simulace se můžou vyrobit nástroje, tažník a tažnice, které se umístí do lisovacího stroje a započne výroba lehkých kovových dílů. Vyrobené díly se kontrolují pomocí 3D skeneru pro dodržení přísných tolerancí rozměrů a kontrole případných vad, jako je zvlnění pro pohledové díly.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 MATERIÁLY URČENÉ K TVÁŘENÍ

1.1 Ocel

Většina současné generace aut má ocelovou konstrukci, jejíž výroba vyžaduje přibližně půl tuny plochého válcovaného ocelového polotovaru. Ocel má výjimečnou všestrannost z hlediska tvarovatelnosti, pevnosti a ceny. Navíc s tímto materiálem průmysl byl schopen rychle reagovat na měnící potřeby automobilek. Jednoduše řečeno, výhody oceli, jako materiál karosérie zahrnuje:

- nízké náklady;
- snadné tvarování;
- snadné mechanické spojování;
- recyklovatelnost;
- vynikající absorpce energie při nárazu [1,2].

Hlavní nevýhody oceli v aplikacích na karoserie jsou:

- je těžší než alternativní materiály;
- bez povrchové úpravy dochází ke korozi [1,2].

Vyšší pevnost oceli s širokým rozsahem hodnot meze kluzu nyní přesahující přes 1200 MPa jsou v současnosti dostupné pro výrobce. Taktéž koroze je mnohem menší problém než před 10 lety. Řada pozinkované oceli, jmenovitě galvanicky pozinkované, žárové, legované jsou dostupné. Preference jednotlivých automobilových společností jsou diktovány cenou, historické preference a výrobní politikou. Obecně platí, s těmito povlakovanými produkty je k dispozici stejný rozsah vlastností oceli, jako pro normální tváření a vysokopevnostní třídy, ale někdy nastane mírné snížení v důsledku působení tepla při zotavování [1,2,3].

1.1.1 Chemické složení

Tvářitelnost ocelí je možné ovlivnit:

- vlivem přítomných prvků na strukturu oceli v oblasti teplot tváření a kritických teplot fázových přeměn;

- rozpustností základních strukturních prvků a způsobu umístění nerozpuštěných příměsí;
- vlivem na kinetiku při procesech výrazně ovlivňujících teplotu materiálu [3].

Hlavní přísady v oceli:

- uhlík - nízkouhlíkové oceli mají sníženou tvářitelnost v oblasti teplot 800 až 1000°C. Optimální tvářitelnost oceli je možné dosáhnout při obsahu uhlíku kolem 0,25 %C. Se stoupajícím hmotnostním obsahem uhlíku se tvářitelnost snižuje a zvětšuje se tendence růstu zrna v oblasti vysokých teplot;
- mangan - odstraňuje křehkost oceli při působení tepelných procesů. V lité oceli podporuje anizotropii mechanických vlastností;
- chrom - zvyšuje deformační odpory a snižuje tvářitelnost. Chromové oceli jsou velmi citlivé na tepelné pnutí;
- nikl - v tuhém roztoku neovlivňuje podmínky tváření za tepla;
- síra – k odstranění lámavosti při tváření za tepla, se síra potřebuje navázat na prvky vytvářející oceli s vyšší teplotou tání, jako jsou např. mangan, zinek, chrom atd.;
- fosfor - podporuje křehkost za studena. Pokud je přítomen při tváření za tepla v tuhém roztoku, neovlivňuje tvářitelnost. Fosfor působí jako prvek vytvářející feritickou strukturu. V místě zvýšeného výskytu může vyvolat vznik nežádoucí dvoufázové struktury;
- měď - při hmotnostním obsahu mědi nad 0,2 % vzniká při tváření za tepla potenciál utváření povrchových trhlin. Trhliny se vytvářejí zeslabením hranic austenitických zrn. Zlepšení tvářitelnosti lze docílit např. přidáním niklu, který s mědí vytvoří tuhé roztoky s vyššími teplotami tání;
- dusík - v oceli se dusík váže hlavně na nitridy, které mohou snížit tváření za tepla a snížit odolnost proti křehkosti za studena;
- vodík - nemá vliv na tvářitelnost, ale může být příčinou vzniku vločkovitých trhlin u některých vysokouhlíkových a legovaných ocelí [4].

1.2 Vysokopevnostní oceli

S důrazem na bezpečnost cestujících a konkurenční tlak na dosažení pětihvězdičkového hodnocení NCAP (New Car Assessment Programme) konstruktéři stále více využívají oceli s hodnotami až do a více než 1200 MPa. Ty jsou zabudovány, jako podélné prvky, které absorbují zatížení při předním a zadním nárazu, a také jako B nebo C-sloupky a související střešní ližiny pro maximální ochranu při bočním nárazu. Klíčovou charakteristikou materiálů v těchto aplikacích je tedy absorpce energie. Tyto panely často složitěho tvaru je obecně nutné tvarovat pomocí lisovacích zařízení, a proto vyžadují vysoké hodnoty parametrů, jako je prodloužení nebo koeficient zpevnování [1].

Oceli TRIP (Transformation Induced Plasticity), které se již používají v mnoha sériových automobilech, získávají svou vysokou pevnost z transformace jejich zadržené austenitické fáze na martenzit při tváření a také při nárazu. Podporuje vysoký obsah křemíku a uhlíku při zadržení austenitu. Jak je zřejmé z „banánové křivky“ (Obr. 2) TWIP (Twinning-Induced Plasticity) oceli vykazují vyšší tažnost s kombinací vysoké pevnosti, odvozené z dvojčatění austenitické struktury při deformaci. Obvykle mají vysoký obsah manganu [1].

K překonání potíží s tvářením za studena se používají AHSS (Advanced High-Strength Steel) a UHSS (Ultra High-Strength Steel) za účelem výroby komplexních tvarů. Pro využití pevnostních hodnot až 1500 MPa, většina výrobců používá za tepla lisované oceli obsahující bor, např. Usibor 1500 [1].

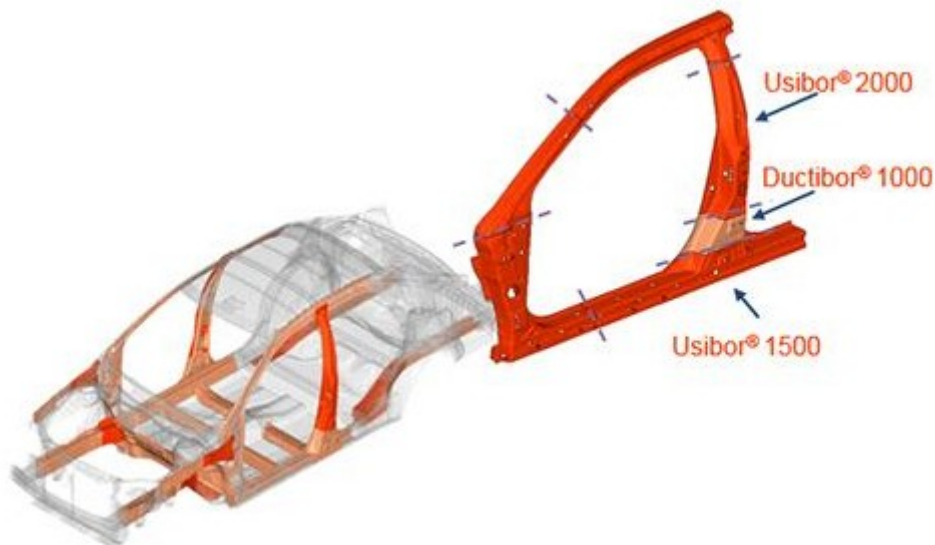
Oceli známé pod obchodním označením Usibor jsou zvláště vhodné pro konstrukční díly, které vyžadují odolnost proti vniknutí při nárazu [5].

Nejběžnější aplikace jsou:

- nosníky předního a zadního nárazníku;
- výztuhy dveří;
- výztuhy sloupků čelního skla;
- výztuhy B-sloupku;
- výztuhy podlah a střeš;
- příčníky střechy a přístrojové desky [5].

Oceli Ductibor mohou být nabízeny s Usibor ve formě laserem svařovaných polotovárů, které umožňují získat za tepla tvářené díly s lokálnějšími tažnými vlastnostmi než oceli

Usibor. Laserem svařované díly splňují potřebu přesně kontrolovat deformace jednotlivých zón automobilu při nárazu (např. zesílení B-sloupku) a rozšiřují využití ocelových dílů tvářených za tepla pro absorpci energie (např. přední nebo zadní kolejnice) [5].

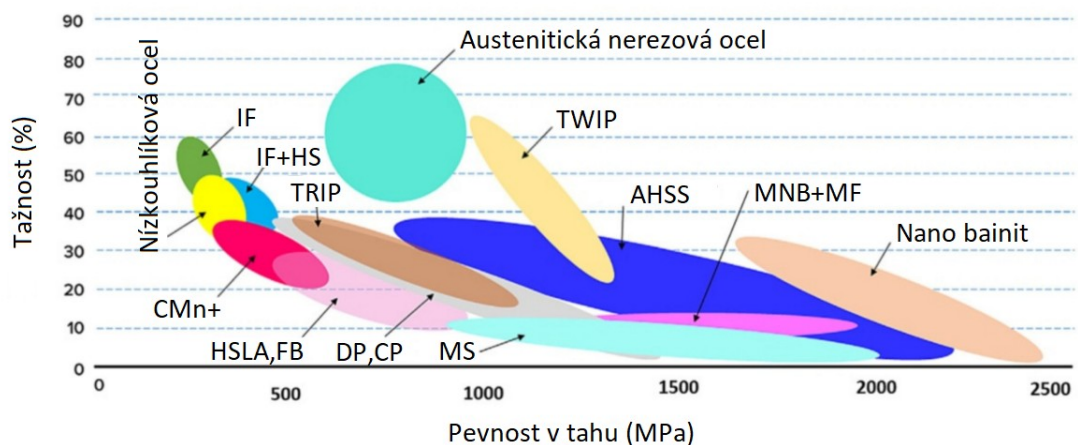


Obrázek 1 Přehled možných aplikací Usibor a Ductibor [5]

1.2.1 Pokročilé vysokopevnostní oceli

AHSS jsou především oceli s pevností v tahu větší než 500 MPa a komplexní mikrostruktury různých fází, jako je ferit, martenzit, bainit a austenit. Některé typy AHSS mají vyšší kapacitu deformačního zpevnění. Výsledkem je lepší rovnováha pevnosti a tažnosti než u konvenčních ocelí [3,6].

Mnoho AHSS bylo vyvinuto pro redukci hmotnosti, kde vyšší pevnost umožňuje zachování dostatečné tvarovatelnosti. Mezi typické aplikace AHSS patří panely, B-sloupky, A-sloupky a střešní ližiny. Většina z nich jsou konstrukční prvky absorbující energii, které se používají ke zvýšení úrovně nárazu vozidla, ochranu a snížení vniknutí do prostoru pro cestující [3,6].



Obrázek 2 Přehled ocelí v závislosti tažnosti na pevnosti v tahu [2]

Tento obrázek (Obr. 2) poskytuje přehled, který ukazuje, kde leží skupiny ocelí a jejich podskupiny v prostoru pevnosti a tažnosti. Některé třídy oceli se překrývají a poskytují stejnou kombinaci pevnosti a prodloužení. To poskytuje konstruktérovi několik možností pro výběr jakosti a typu oceli vhodné pro výrobu konkrétní součásti [2,5].

Nejlépe se používají AHSS pro silné konstrukční aplikace, kde nízká hmotnost zvyšuje výkon produktu. Kromě automobilového průmyslu, jsou další průmyslová odvětví a aplikace pro AHSS např. konstrukce lodě, letadla, civilní a vojenská struktura. Automobilový průmysl těží z jedinečných vlastností AHSS, protože tyto materiály umožňují výrobcům automobilů čelit náročným novým emisním normám, bezpečnostním předpisům, požadavkům na účinnost paliva a cenovou dostupnost pro zákazníky [6].

Aplikace AHSS v automobilovém průmyslu se používá pro čtyři hlavní oblasti:

- zlepšení odolnosti při nárazu (přední, zadní, boční);
- snížení hmotnosti vozidla;
- zlepšení spotřeby paliva, díky snížení hmotnosti vozidla;
- snížení emisí skleníkových plynů prostřednictvím snížení spotřeby paliva [6].

Mezi další důležitá kritéria použití patří zlepšení tuhosti, únavová životnost, odolnost proti korozi, tvarovatelnost, svařitelnost a cenová dostupnost. V současnosti používané AHSS snížily hmotnost konstrukce karoserie vozidla alespoň o 25 % [6].

Karosérie osobního automobilu je rozdělena na dvě skupiny komponentů:

- struktura těla je definována, jako sestavená kostra vozidla bez jeho pohyblivých částí, jako jsou výztuhy, sloupky a nosníky;
- ostatní součásti, jako jsou dveře, kapota, palubní víko a blatníky [6].

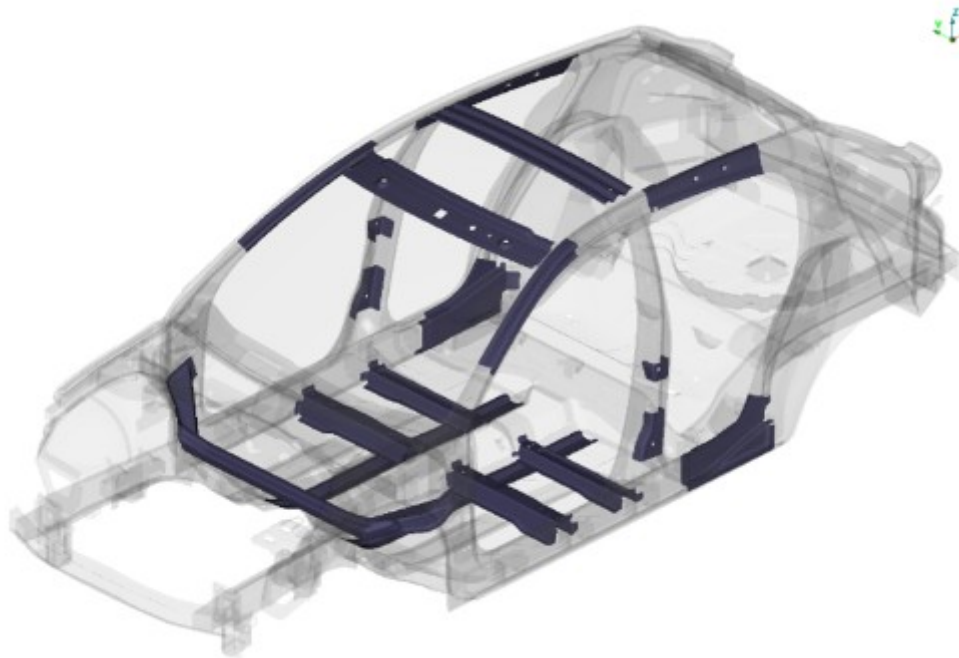
Materiálové požadavky pro každou skupinu jsou odlišné, protože jejich funkce se liší. Konstrukční součásti karoserie vyžadují materiály s vysokou pevností a vysokou houževnatostí pro pohlcování energie a aplikace proti vniknutí. Ostatní součásti tvoří viditelný vzhled stylu vozidla, a proto vyžadují dobrou tvarovatelnost, odolnost proti promáčknutí a vysoce kvalitní povrchovou úpravu pro aplikaci barvy [6].

1.2.2 Dvoufázové oceli

DP (Dual-Phase) oceli mají nejširší využití v automobilovém průmyslu, díky jejich vynikající kombinaci pevnosti a tažnosti. Mají vyšší pevnost v tahu než běžné oceli s podobnou výtěžností. Dvoufázové oceli mají také vyšší počáteční rychlost mechanického zpevnění a nižší poměr meze kluzu a mezi pevnosti v tahu než u vysokopevnostních nízkolegovaných ocelí podobné pevnosti [3,6,7].

K definování tvářitelnosti se běžně používají diagramy mezních deformací FLD (Forming Limit Diagram). Hodnoty tažnosti klesají se zvýšením pevnosti v tahu. Dvoufázové oceli mají vynikající kombinaci pevnosti, tažnosti a schopnost deformačního kalení ve srovnání s konvenčními vysokopevnostními oceli [6,7].

Dvoufázové oceli mají vysokou počáteční rychlost deformačního zpevnění. Tato charakteristika umožňuje rovnoměrnější distribuci napětí napříč většími objemy materiálu a oddaluje nástup lokalizovaného zúžení a místního ztenčení. V důsledku toho vykazují DP oceli vysoké hodnoty pevnosti v tahu. Díky své vysoké pevnosti mají DP oceli vysokou schopnost pohlcovat energii a únavovou pevnost, a proto jsou vhodné pro automobilové konstrukční a bezpečnostní díly, jako jsou příčníky, výztuhy, tlumiče a podélné kolejnice [6,7].



Obrázek 3 *Typické díly DP oceli* [8]

1.2.3 TRIP oceli

Vyznačují se vynikající pevností a vysokou tažností. Transformací vyvolaná plasticita se týká deformačního mechanismu, kdy se měkký austenit během přeměny na tvrdý martenzit, plasticky deformuje. Vynikající pevnost a vysoká tažnost TRIP oceli umožňují výrobu složitějších dílů pro lehké automobilové aplikace [6,9].

Oceli s plasticitou indukovanou transformací jsou slitiny železa a uhlíku, které obsahují 0,1 až 0,4 hmotn. % uhlíku a další legující prvky, jako je křemík, hliník, titan, nikl a vanad. Používá se křemík a hliník hlavně ke stabilizaci austenitové fáze při pokojové teplotě, zatímco titan, nikl a vanad se přidávají pro zlepšení pevnosti oceli. Oceli s plasticitou indukovanou transformací se skládají ze dvou fází ferito bainitová matrice a 5 až 20% objemový podíl metastabilního austenitu, který se během plastické deformace progresivně přeměňuje na martenzit. Transformace poskytuje výrazné disperzní zpevnění a odolnost proti lokální deformaci. Tato kombinace fází dává TRIP oceli vysokou tvařitelnost austenitu během počátečních fází výroby, následovaný vysokou pevností martenzitu na konci procesu. Oceli s plasticitou indukovanou transformací se vyznačují vysokou pevností v tahu a vysokou rychlostí deformačního zpevnění [3,6,9].

Hlavní rozdíly mezi DP a TRIP oceli jsou:

- přítomnost zbytkového austenitu v TRIP ocelích, který se přeměňuje na martenzit při deformaci;
- přítomnost bainitu v TRIP oceli [6,9].

Oceli s plasticitou indukovanou transformací obsahují vyšší množství uhlíku než DP oceli ke stabilizaci austenitu při pokojové teplotě. Křemík anebo hliník urychlují tvorbu bainitu [6,9].

Oceli s plasticitou indukovanou transformací vykazují lepší tažnost při dané pevnosti než ostatní AHSS oceli. Tato zlepšená tvarovatelnost přichází z přeměny zbytkového austenitu na martenzit během plastické deformace. Zvýšená tvářitelnost TRIP ocelí umožňuje výrobu složitějších dílů než u jiných vysokopevnostních ocelí. Tyto vlastnosti dávají automobilovým inženýrům větší volnost při navrhování dílů pro optimalizaci hmotnosti a konstrukčního výkonu. K posouzení tvářitelnosti se používají FLD. Definují maximální přípustná napětí pro různé deformační dráhy [6,9].

Aplikace pro TRIP oceli zahrnují konstrukční a bezpečnostní díly pro automobilový průmysl, jako jsou příčníky, nosníky, výztuhy B-sloupků a výztuhy nárazníků [6,9].

1.2.4 Komplexní fázové oceli

CP (Complex Phase) oceli se skládají z velmi jemné mikrostruktury ferito-bainitové matrice s malými objemovými podíly tvrdých fází martenzitu, zbytkového austenitu a perlitu. Obsahují menší než 0,15 hmot. % uhlíku a používá mnoho stejných slitinových prvků, jaké se nacházejí v DP a TRIP ocelích, ale navíc mají malé množství niobu, titanu anebo vanadu [3,6].

Komplexní fázové oceli jsou zpevněny pevným roztokem, zjemnění zrna a mechanismy fázové transformace. Poskytují maximální pevnost v tahu 800 MPa. Vyznačují se velmi vysokou hodnotou meze kluzu a pevnosti v tahu, a proto jsou vhodné pro rázovou houževnatost a aplikace s vysokou absorpcí energie, což z nich činí ideálními kandidáty pro automobilové nárazové aplikace, jako je nárazník a výztuhy B-sloupku. Také mají dobré únavové vlastnosti, díky kterým jsou vhodné pro pružné systémové komponenty. CP oceli se vyznačují nižší tažností než oceli DP a TRIP, ale přesto mají dobrý poměr tažnosti k pevnosti [3,6].



Obrázek 4 *Typické díly CP ocelí* [10]

1.2.5 TWIP oceli

TWIP oceli jsou austenitické oceli s vysokým obsahem manganu 22 až 30 % a dalšími legujícími prvky, jako je uhlík, křemík a hliník. Vysoký obsah manganu způsobuje, že ocel je plně austenitická. Hliník a křemík zpevňují ocel kalením v tuhém roztoku. TWIP oceli mají vynikající kombinaci vysoké pevnosti v tahu přesahující 1000 MPa, a velmi vysokou tažnost 60 až 90 % [3,6,12].

Oceli s plasticitou vyvolanou dvojčatením mají v porovnání s DP a TRIP vynikající tažnost. Tato tažnost je díky vysoké vytvrzovací kapacitě, která oddaluje plastickou nestabilitu a lokální zúžení. Vysoká rychlost vytvrzování je přičítána k nárůstu počtu deformačních dvojčat s tahovým přetvořením, což vytváří více překážek k dislokačnímu skluzu a tím zpevňuje ocel [6,12].

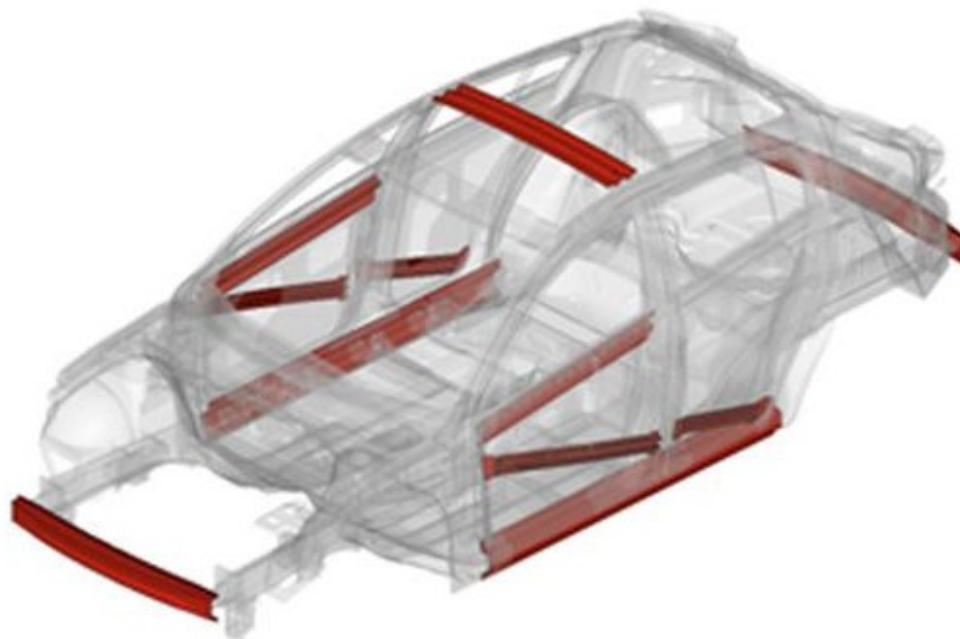
TWIP oceli mají pevnost větší než 700 MPa a velmi vysokou tažnost nad 50 %. Vysoký obsah slitin v TWIP ocelích je však činí drahými pro rozsáhlé nasazení [6,12].

1.2.6 Martenzitické oceli

Martenzit vzniká při rychlém ochlazení austenitu. Tato martenzitická přeměna začíná během ochlazování, když austenit dosáhne počáteční teploty martenzitu. Jak teplota klesá, více austenitu se přeměňuje na martenzit a nakonec, když je dosaženo konečné teploty martenzitu, je transformace dokončena. Martenzit může být produkován, také např.

transformací indukované plasticity u TRIP ocelí, kde plastická deformace vyvolává martenzitickou přeměnu. Martenzitická přeměna může být tepelně vyvolána kalením nebo napětím vyvolaným plastickou deformací. Difúzi uhlíku z martenzitu lze urychlit aplikací tepla při temperování. Popouštěním vznikají malé částice karbidu v mikrostruktuře temperovaného martenzitu. Temperovaný martenzit je často cílem tepelných úprav zaměřených na získání optimální kombinace pevnosti a tažnosti [3,6,13].

Martenzitické oceli mají nejvyšší hodnoty pevnosti v tahu, až 1700 MPa. Používají se pro takové díly, které vyžadují vysokou pevnost a dobrou odolnost proti únavě, s relativně jednoduchými tvary pro tradičně lisované díly. Typické aplikace zahrnují výztuhy nárazníků, dveřní výztuhy a výztuhy bočních prahů [6,13].



Obrázek 5 Typické díly martenzitických ocelí [14]

1.2.7 Nerezová ocel

Když se do oceli přidává chrom, zvyšuje se odolnost proti korozi vytvořením ochranného filmu oxidu chromitého. Nerezové oceli sice nejsou široce používané v současných osobních vozidlech, avšak našly uplatnění pro užitková vozidla, např. autobusy. Hlavní výhody nerezové oceli, jako materiál karoserie jsou:

- odolnost proti korozi;

- vynikající tvarovatelnost;
- podobné využití jako u měkkých ocelí [1].

Mezi jeho nevýhody patří:

- vysoké náklady;
- omezené zdroje dodávek pro automobilové aplikace [1].

Výrobní proces nerezové oceli je v mnoha ohledech podobný jako u měkkých ocelí [1].

Tabulka 1 *Mechanické vlastnosti vybraných ocelí* [2]

Oceli	Mez kluzu [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]
IF	130	300	46
BH210	227	345	37
BH280	280	380	31
HSLA 040XLK	300	390	29
HSLA 060XLF	440	530	25
HSLA 080XLF	580	640	21
DP290-450	290	450	30
DP310-500	310	500	27
DP350-600	350	600	23
DP370-600	370	600	22

1.3 Hliník

Obecně řečeno, využitelnost hliníku je založena na jeho nízké hustotě. Přestože je hustota hliníku třetinová oproti hustotě oceli, potenciální snížení hmotnosti nemůže být realizováno, protože modul pružnosti pro hliník je 69 GPa. Modul je podstatně nižší než pro oceli 210 GPa. Tuhost má primární vliv na konstrukci karoserií, a proto musí být provedena určitá kompenzace a zvětšení tloušťky. Hlavní výhody a nevýhody hliníku, jako materiálu karoserie jsou následující [3,1,15].

Výhody:

- nízká hustota;
- odolnost proti korozi;
- silná dodavatelská základna;
- recyklovatelnost [1,15].

Nevýhody:

- vysoké a kolísavé náklady;
- horší tvarovatelnost než ocel;
- obtížněji svařitelné než oceli [1,15].

1.4 Hořčík

Hořčík je nejlehčí ze všech technických kovů. Je o 35 % lehčí než hliník a více než čtyřikrát lehčí než ocel. Běžné hořčíkové slitiny jsou založeny na přísadách hliníku, manganu a zinku. Označení slitin jsou založena na následujících kritériích:

- první dvě písmena označují hlavní legující prvek;
- dvě čísla označují procenta těchto hlavních legujících prvků [1,15].

Mezi hlavní výhody hořčíku patří:

- nízká hustota;
- schopnost tenkostěnných odlitků [1,15].

Mezi jeho nevýhody patří:

- použitelné jsou pouze, jako lité komponenty;
- vysoké náklady při středních až vysokých objemech výroby [1,15].

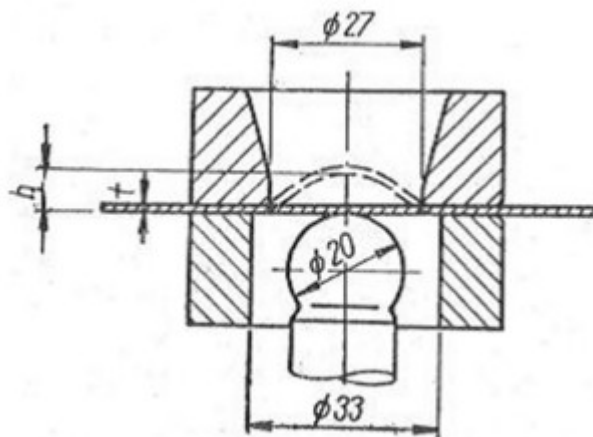
2 TESTOVÁNÍ TVAŘITELNOSTI

Zkoušky tahem, tvrdosti a znalost chemického složení neposkytují veškeré informace o vhodnosti materiálu k technologii tváření. Je potřeba vystavit materiál napěťově-deformačním stavům, jaké probíhají při reálném procesu tváření, např. při hlubokém tažení a ohýbání. Jelikož předem zmíněné zkoušky nevystaví materiál těmto stavům je potřeba využít zkoušek tažnosti [16].

2.1 Zkoušky tažnosti

2.1.1 Zkouška hloubením podle Erichsena

Zkouška hloubením podle Erichsena slouží k posouzení tažnosti materiálů o tenkých tloušťkách. Polotovaz o malé tloušťce je upnut mezi přídržovač a tažnici. Tažník má tvar koule o průměru 20 mm a rovnoměrně se posouvá hydraulicky do středu polotovazu (Obr. 6). Tím se vytváří prohloubení, které se změří. Kritériem tažnosti je velikost prohloubení h , při němž vznikne první trhlinka v celé tloušťce zkušebního polotovazu. Zkouška je normalizována podle norem ČSN 42 0406 a ČSN 42 0407. Mezi výhody zkoušky patří jednoduchost a rychlost provedení. Nenáročná příprava zkušebního polotovazu [16].



Obrázek 6 Princip Erichsenovy zkoušky [17]

K nevýhodám zkoušky patří velký rozptyl výsledků při zkoušení jedné jakosti polotovazu, kdy nezjistíme anizotropii mechanických vlastností zkoušeného polotovazu. Při zatěžování je hloubka t závislá na rychlosti a plynulosti posuvu tažníku [16].

2.1.2 Zkouška kalíškovací

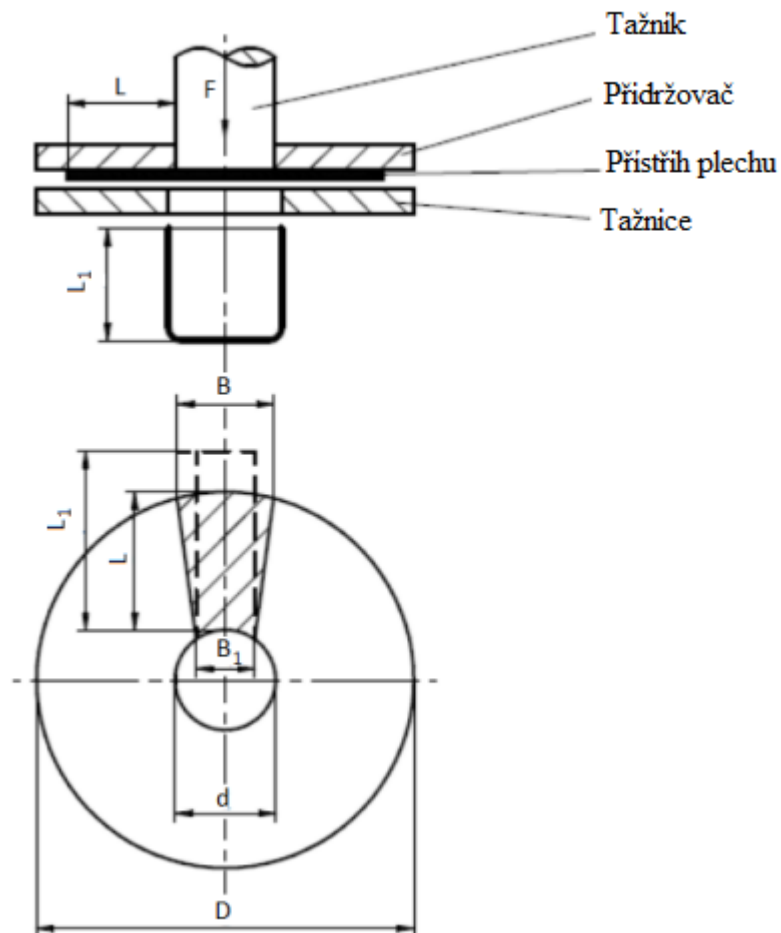
Další zkouškou pro určení tažnosti materiálů s malou tloušťkou polotovaru je zkouška kalíškovací. Kritériem tažnosti je součinitel tažení

$$m = \frac{d}{D} [-] \quad (1)$$

kde d je průměr tažníku a D je experimentálně zjištěný maximální průměr kruhového přístřihu, kdy nedojde k porušení válcového kalíšku [15].

$$D = d + (2 * L)[mm] \quad (2)$$

Zkouška je vhodná pro rotačně symetrické tvary výtažků. Zkouška je časově náročná, neboť se musí několikrát opakovat při postupném zvyšování průměru přístřihu D [16].



Obrázek 7 Princip kalíškovací zkoušky [16]

Zkušební přístřih o průměru D se tažníkem o průměru $d = 50$ mm táhne na kalíšek, jehož výška je $L_1 > L$. Výhodou kalíškovací zkoušky je, že možnost zjištění anizotropie mechanických vlastností zkoušeného polotovaru, která se projeví “cípavostí” výtažků

válcových tvarů. Zkouška není normalizovaná, i když jejího principu se využívá v ČSN 0409 ke zjišťování anizotropie u polotovarů o malé tloušťce z hliníkových slitin [16].

2.1.3 Zkouška tažením v kuželové tažnici (Fukuiho zkouška)

Zkouška tažením podle Fukuiho je normalizovaná v Japonsku podle normy JIS Z2249. Princip zkoušky (Obr. 8) spočívá v tažení kruhového přístřihu s vyvrtaným otvorem, nebo přístřihem bez otvoru, v kuželové tažnici do okamžiku vzniku trhliny v otvoru. Při tažení přístřihu není použit přidržovač, což odstraňuje vliv přidržovací síly na proces tažení. Jako kritérium tažnosti materiálu je součinitel tažení

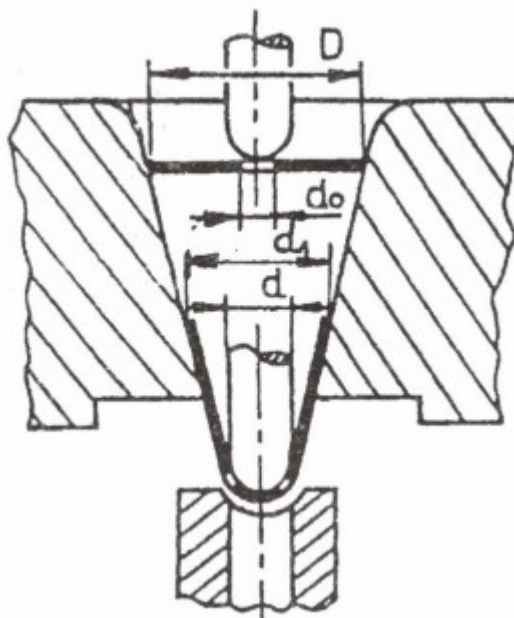
$$m_F = \frac{d_1}{D} [-] \quad (3)$$

kde D je průměr přístřihu a d_1 je největší průměr kuželového výtažku při vzniku první trhliny. Obvykle se volí parametry

$$D = 6 * d_0 [mm] \quad (4)$$

$$d = 2 * d_0 [mm] \quad (5)$$

kde d_0 je průměr otvoru [mm] v přístřihu [16].

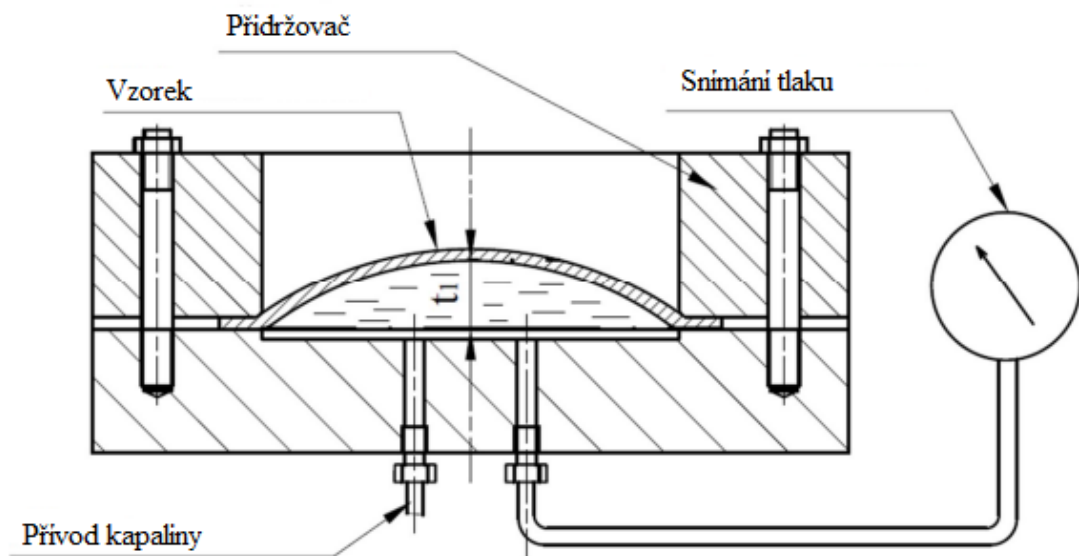


Obrázek 8 Princip Fukuiho zkoušky [16]

Z výsledku zkoušky tažením v kuželové tažnici vyplývá, že čím je hodnota součinitele tažení m_F nižší, tím je materiál vhodnější pro technologii hlubokého tažení [16].

2.1.4 Zkouška hydraulická (Tomlenova)

Hydraulická zkouška probíhá upnutím okraje polotovaru do přidržovače, který současně zajišťuje nepropustnost kapaliny. Zvyšováním tlaku dochází k vybulování polotovaru pomocí kapaliny. Tažnost materiálu je posuzována podle hodnoty prohloubení t , kdy dochází k porušení a vzniku první trhliny. Taktéž se posuzuje tvar trhliny i celkový vzhled povrchu polotovaru [16].



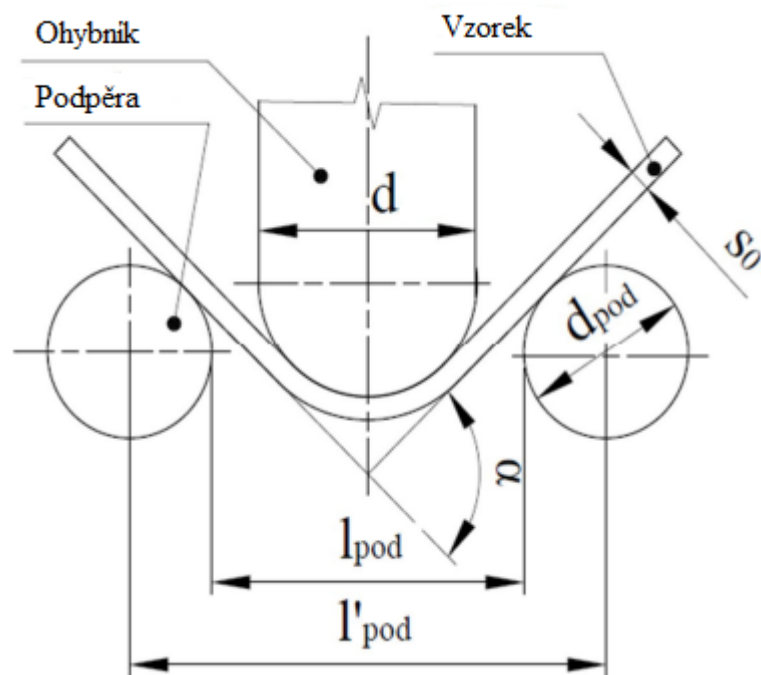
Obrázek 9 Princip hydraulické zkoušky [16]

Hydraulická zkouška, v porovnání s Erichsenovou zkouškou, je objektivnější a rychlejší. Nevýhodou hydraulické zkoušky je složitější zařízení [16].

2.2 Zkoušky ohybatelnosti

2.2.1 Zkouška lámavosti

Zkouška lámavosti je normalizovaná podle normy ČSN 42 0401. Zkoušku lámavosti lze provést na lisu nebo zkušebním stroji na tlak. A ještě je potřeba mít vhodný úhломěr k proměření úhlu α při zatížení polotovaru. Do zkušebního polotovaru působí síla kolmo na polotovar přes ohybník a způsobuje ohyb [16].



Obrázek 10 Princip zkoušky lámavosti [16]

Plochá polotovaru má délku od 200 do 400 mm a šířku s_0 v rozmezí 25 až 50 mm. Polotovar je vystřihnout z tabule plechu podle normy ČSN 42 0305. Pokud neutrální osa ohýbání je ve směru vláken polotovaru, bude se dosahovat větších úhlů α bez vzniku trhlin [16].

2.2.2 Zkouška střídavým ohybem

Zkušební zařízení obsahuje upínací část s plochými čelistmi a ohýbací válcové plochy o předepsaném poloměru R . Cílem zkoušky je určení odolnosti zkoušeného polotovaru proti vzniku trhlin střídavým ohýbáním o 90° kolem válcových ploch. Postup zkoušky je podle normy ČSN 42 0405. Zkušební polotovary jsou pásy plechu o šířce 20 mm a délce 100 mm. Pro ocelové plechy se používají pásy do tloušťky 3 mm a pro neželezné kovy a slitiny jsou pásy o tloušťce od 1 mm do 6 mm. Určuje se počet ohybů do úplného zlomení zkoušeného pásu [16].

2.2.3 Zkouška podle Gütha

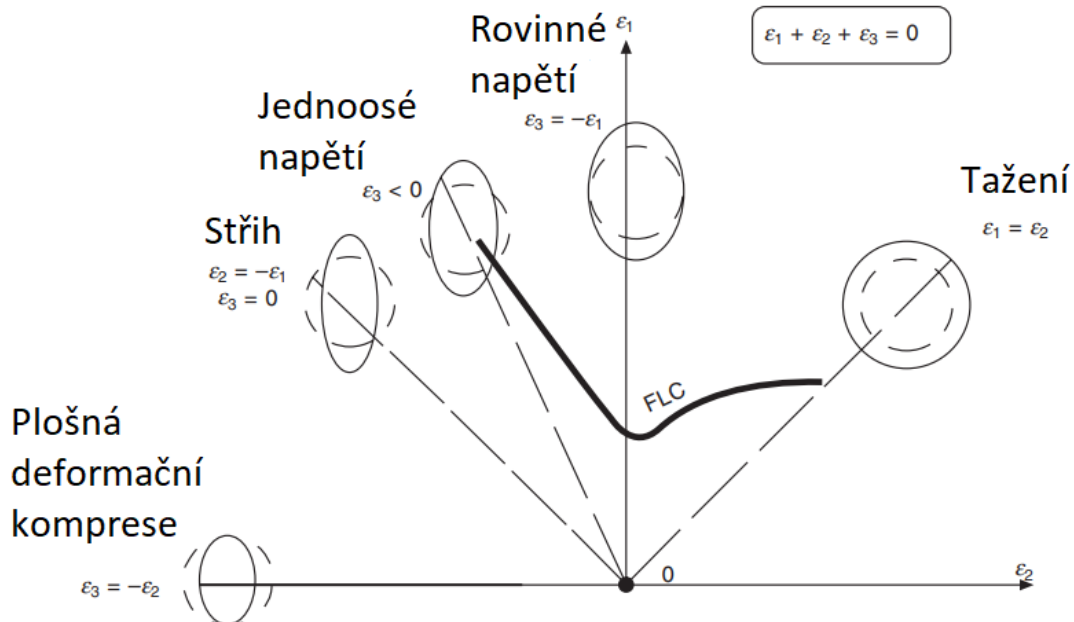
Zkouška podle Gütha slouží k určení minimálního poloměru ohybu. Princip zkoušky spočívá v ohýbání polotovaru ve zkušební stroji s proměnným poloměrem ohybu. Ohybník má poloměr ohybu R od nuly po určitý poloměr R_x . Vyhodnocením zkoušky je

určení minimálního poloměru ohybu, kdy nejmenší poloměr je ten, při kterém nevznikne trhlinka ve zkoušeném polotovaru [16].

2.3 Diagram mezních deformací

Primární požadavek na jakýkoli plechový polotovar je posouzení tvářitelnosti materiálu, získání potřebného tvaru bez porušení, zvlnění a ztenčení. Normálně je tloušťka plechu ve skutečnosti hodně menší než jiný rozměr plechu, který odpovídá výběru rovinného napětového stavu. Tvářitelnost materiálu se tedy posuzuje analýzou kruhové mřížky [18,19].

Při analýze kruhové mřížky jsou na plech vytištěny kruhy s malým průměrem a deformovány až do výskytu hrdla nebo porušení. Po deformaci se z kruhu stává elipsa. Hlavní osa elipsy udává napětí a vedlejší osa odpovídá deformacím plošného materiálu. Hlavní a vedlejší deformace v zóně zúžení jsou vyneseny do grafu, kde vykreslují křivku ve tvaru V. Tato mezní křivka tváření FLC (Fracture Limit Curve) definuje mezní stavy tvárnosti materiálu [18,19].



Obrázek 11 Typický FLD pro ocel [1]

Tvářitelnost je omezena v důsledku tvárného lomu a silně ovlivněna vazbami matrice materiálu. Pro posouzení tvářitelnosti materiálu je FLD nejlepší řešení. Hodnocení tvarovatelnosti je klasifikováno na základě kritérií zúžení nebo porušení [18,19].

Experimentální předpovědi všech typů FLD jsou časově náročné a nákladné. Tento teoretický přístup může být snadno implementovatelný v simulačním softwaru pro analýzu tvářitelnosti [18,19].

FLD se používá, když je v materiálu viditelné hrdlo při tváření. FLD je konstruován na základě napětí v zóně hrdla. V zpracování některých materiálů dochází k okamžitému lomu bez viditelného hrdla. V takových případech se tvářitelnost posuzuje měřením lomové deformace a konstrukcí FFLD (Fracture Forming Limit Diagram). Když je materiál předpjatý, přístup založený na namáhání není vhodný pro vykreslování FLD, protože povaha FLD se mění s ohledem na každou podmínku před přetvořením. Proto je potřeba zkontrolovat tvarovatelnost listového materiálu pro každou situaci před deformací [18,19].

2.3.1 Diagram mezních deformací při zatížení

Diagram mezních deformací při zatížení FLSD (Forming Limit Stress Diagram) poprvé představil Arrieux a následně rozšířil Stoughton. Používá se při analýze komplexního tvaru dílu pro vícestupňové tváření. Diagram je závislý na dráze deformace. Jelikož napětí nelze přímo měřit, postup zahrnutý v kreslení FLSD zahrnuje experimentální vyhodnocení FLD a výpočet odpovídající hodnoty napětí pomocí, buď pravidla plastického toku, nebo metody konečných prvků. Tato strategie zlepšila předpovědi tvářitelnosti ve vícestupňových tvářecích operacích prováděné po sobě jdoucími stupni žíhání pro zvýšení tvárnosti polotovaru [20,21].

2.3.2 Diagram mezních deformací při porušení

Samotný FLD nemusí nutně indikovat, zda porušení nastává místním zúžením nebo vznikem trhliny. Nicméně za určitých okolností (např. hluboké tažení a natažené díly se složitou geometrií, kde je vysoké napětí), je to trhlina, která pravděpodobně omezí dosažitelnost vyšší tvářitelnosti. FFLD se tvoří v místě lomu skrz celou tloušťku polotovaru v hlavním deformačním prostoru, kde hlavní deformace se vypočítá pomocí podmínky nestlačitelnosti z měření tloušťky polotovaru při lomu. Šikmá čára dolů zleva doprava představuje FFLD. Čára je pod úhlem 45° v hlavním deformačním prostoru a jeho průsečík s hlavní osou deformace je často vlastnost materiálu tzv. index zpracovatelnosti. Pokud je FFLD výrazně nad FLD, lze předpokládat, že lom neovlivňuje mez deformace. To je případ většiny tvárných kovů, zatímco pro složitější kovy s mikrostrukturou nebo pro

zvláštní podmínky procesu, kdy je zúžení potlačeno, je nutné implementovat FFLD [20,21].

2.3.3 Historické lineární metody

Metody založené na lineární analýze mohou poskytnout explicitní řešení předvídání mezních napětí a obecně se snadno používají. V počátku 50. let vyvinul Swift kritérium pro předpovídání kritického napětí pro difuzní zúžení, jako funkci napětí, exponentem zpevnění a poměrem deformace. Swiftova analýza může být aplikovaná na jakýkoli deformační stav, i když jsou předpokládány hodnoty v rozsahu negativních napětí. Jelikož zužování, které se typicky objevuje při tvarování plechu, je lokalizované, Swiftova analýza má omezenou použitelnost [20].

Jednu z prvních teoretických studií o lokalizovaném zúžení předložil Hill, který zavedl metodu rozdělení spojenou s teorií proudění. Tato metoda řeší vznik lokalizovaného zúžení a předpovídá kritické napětí pro lokalizované zúžení v doméně negativního napětí [20].

2.3.4 Experimentální stanovení FLC

Mezní křivka tváření FLC popisuje maximální tvářitelnost materiálů. FLC se většinou používá v automobilovém průmyslu jako materiálový parametr pro aplikace tváření plechů. Slouží jako důležitý vstupní parametr pro numerické simulace tváření prováděné např. pomocí AutoForm Forming [22].

FLC je typicky hodnoceno pro mimo rovinu pomocí testu Nakajima a pro v rovině Marciniakův test. Stanovení FLC předepisují metody hodnocení standardizované normami ISO 12 004-2 a ASTM E2218-15. U Marciniaka v rovině se používá válcový tažník s plochým dnem. Tyto dvě metody nejsou identické kvůli různým deformačním drahám generovaným tvarem tažníku. Tyto rozdíly nemusí být významné u mnoha ocelí s nižší pevností a konvenčních vysokopevnostních ocelí, ale mohou se od sebe lišit při vyšších pevnostech nebo s pokročilými mikrostrukturami [22].

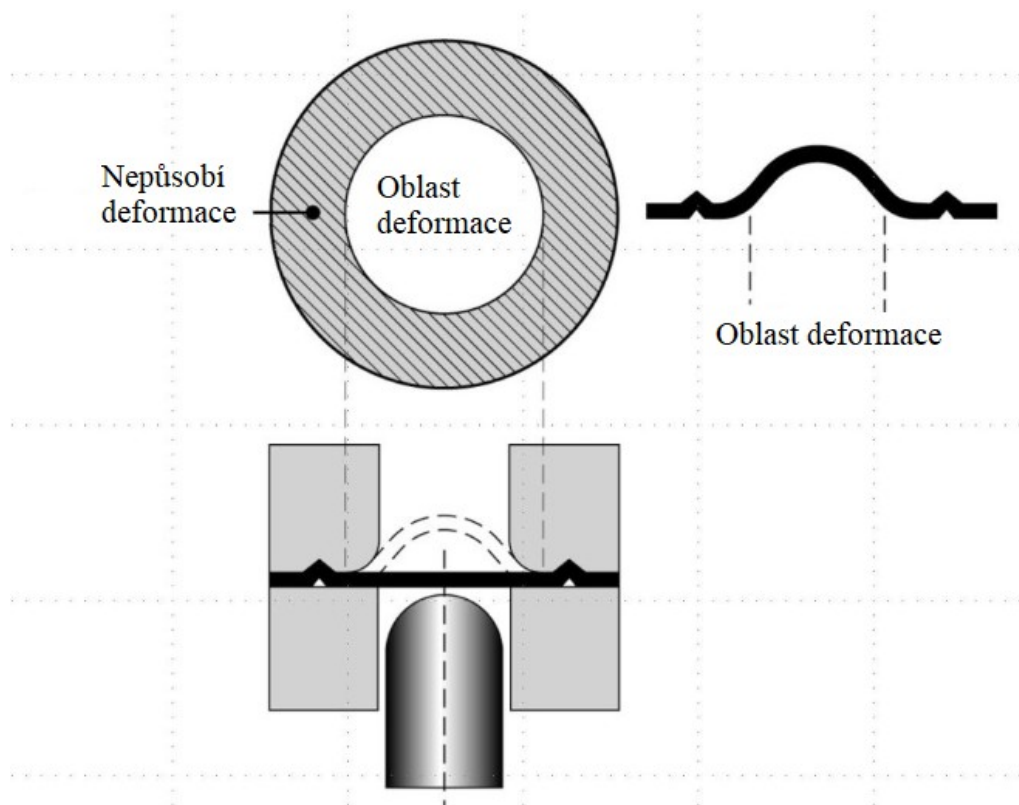
Je zřejmé, že technické výlisky jsou mnohem složitější. Ačkoli tahová zkouška charakterizuje jednu specifickou cestu deformace, je nezbytná mezní křivka tváření, aby bylo možné mít celkový přehled o deformacích naznačujících začátek kritického zúžení přes tloušťku pro různé dráhy lineární deformace. Výpočty bezpečnostních rezerv jsou založeny na FLC [22].

Často se termíny křivka mezního tváření (FLC) a diagram mezních deformací (FLD) používají zaměnitelně. FLC je materiálový parametr odrážející mezní deformace vedoucí k porušení hrdla, jako funkce dráhy deformace. Je funkcí jakosti kovu, tloušťky a stavu povrchu plechu a také metod použitých při jeho vytváření. Je použitelný pro jakýkoli tvar dílu [22,23].

FLD je kombinací FLC (vlastnost materiálu) a deformací (odrážející geometrii součásti a podmínky tváření). FLD ukazuje, které oblasti tvářeného dílu vyžadují pozornost, aby bylo dosaženo stabilních podmínek tažení [22,23].

2.3.5 Nakajima test

Test Nakajima mimo rovinu, běžně známý, jako test limitní výšky kopule (Obr. 12). Kromě standardního postupu používají různí výzkumníci jiné velikosti polotovarů v operacích protahování pro vykreslování FLD. Zkušební stroj nebo lis je vybaven polokulovým razníkem o průměru 100 mm, jak je popsáno v ISO 12004. Změna šířky polotovaru je důležitá pro simulaci stavů deformace materiálu od jednoosé po dvouosou. Test Nakajima zahrnuje pět až sedm různých geometrií a tři nebo více opakování každé geometrie [24,25].



Obrázek 12 Princip Nakajima testu [25]

2.4 Zkoušky tvrdosti

Tvrdot materiálu je definována jako odolnost proti proniknutí cizího tělesa do povrchu materiálu. Tvrdot není fyzikálně definovatelná vlastnost, jedná se o výsledný celek vlastností povrchu. Pro měření tvrdosti používáme velkou škálu tvrdoměrů pro různé metody a různá zatížení. Tato měření probíhají v souladu s normami ČSN EN ISO 6508-1 pro metodu Rockwell, ČSN EN ISO 6507-1 pro metodu Vickers a ČSN EN ISO 6506-1 pro metodu Brinell. Spolehlivost tvrdoměrů se ověřuje pomocí referenčních destiček v pravidelných intervalech [26].

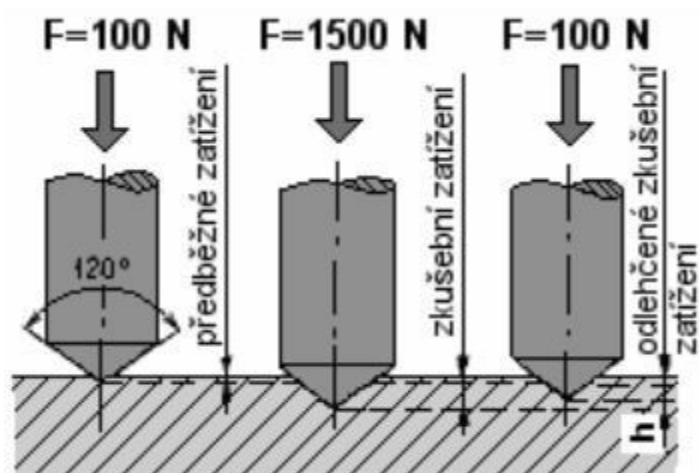
Podle zatížení dělíme zkoušky:

- statické – zatížení pozvolna roste (zkouška podle Brinella, Rockwella, Vickerse);
- dynamické – zatížení je rázové (Shore zkouška, Poldi kladívko) [27].

Pro plechy o malé tloušťce určené pro tažení se nejvíce využívá Vickersova metoda pro určení tvrdosti. Pro plechy o velké tloušťce se používá Brinellova metoda. Při měření musí být tloušťka plechu osmkrát větší než hloubka vpichu. Podle toho se volí velikost zatížení [26].

2.4.1 Zkouška podle Rockwella

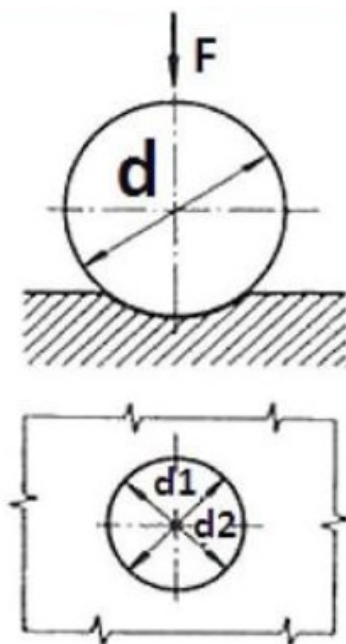
Vnikajícím tělesem je diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° (metoda HRC, HRA) nebo kulička z kompozitu karbidu wolframu pro metodu HRB. Měří se trvalá hloubka vtisku h pod předběžným zatížením. Zkouška se provádí na hladkém povrchu. Tloušťka zkoušeného polotovaru musí být desetkrát větší než trvalá hloubka vtisku kužele a pětkrát větší než trvalá hloubka vtisku kuličky. Na protilehlé straně nesmí vzniknout žádná deformace. Tvrdot se odečítá přímo na kruhové indikační stupnici tvrdoměru nebo se zobrazuje digitálně. Metoda je vhodná pro měření kalených a zušlechtěných materiálů. Tento způsob měření je velmi rychlý [26,27].



Obrázek 13 Schéma zkoušky podle Rockwella [27]

2.4.2 Zkouška podle Brinella

Vnikajícím tělesem je kulička o průměru D , která je vlačována do povrchu zkoušeného polotovaru. Následně se změří průměr vtisku ve dvou navzájem kolmých směrech. Pomocí převodních tabulek se aritmetický průměr obou naměřených hodnot převede na tvrdost podle Brinella. Pro tento způsob měření musí mít polotovar povrch dostatečně velký, hladký, rovný a vyleštěný, aby bylo možné přesné stanovení průměru vtisku. Metoda je vhodná pro zjištění tvrdosti zušlechťených materiálů. Hodnoty tvrdosti podle Brinella nelze převést na tvrdosti podle jiné metody nebo na pevnost v tahu [26,27].



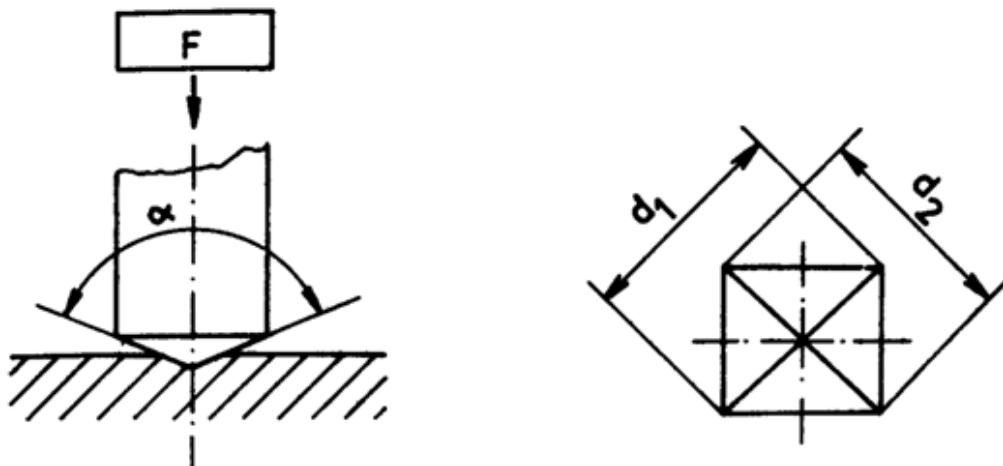
Obrázek 14 Schéma zkoušky podle Brinella [27]

2.4.3 Zkouška podle Vickerse

Vnikajícím tělesem je čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem stěn 136° , který je vtlačován do povrchu zkušebního tělesa. Následně jsou měřeny úhlopříčky vtisku a pomocí tabulky dané normou se průměrná délka úhlopříček převede na hodnotu tvrdosti podle Vickerse. Podle hodnoty zkušebního zatížení se zkoušky rozdělují na tři oblasti:

- zkouška tvrdosti podle Vickerse - zatížení 5 až 100 kg (HV5 – HV100);
- zkouška tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení - zatížení 0,2 až 5 kg (HV0,2 – HV5);
- zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse - zatížení 0,01 až 0,2 kg (HV0,01 – HV0,2) [26,27].

Zkouška je vhodná pro materiály měkké i tvrdé. Povrch polotovaru musí být hladký, rovný a vyleštěný, aby bylo možné přesné stanovení rozměrů délky úhlopříček vtisku [26,27].



Obrázek 15 Schéma zkoušky podle Vickerse [27]

3 PLOŠNÉ TVÁŘENÍ

Tato část pojednává o metodách, které se nejvíce používají pro tváření plechů.

Technologie tváření kovů patří mezi produktivní metody výroby polotovarů i hotových výrobků. Účelem tváření je trvale změnit tvar polotovaru, aniž by se porušila jeho soudržnost. Tažení je výhodné kvůli rychlým dobám lisovacích cyklů. Z funkčního hlediska proces hlubokého tažení kovu vytváří díly s vysokou pevností a nízkou hmotností a také geometrie nedosažitelné některými jinými výrobními procesy [28,29].

V procesu tváření se mění tvar zpracovávaného materiálu:

- působením vnějších klidných sil (lisování, válcování, tažení);
- rázy (kování) [28].

3.1 Hluboké tažení

Tažení je proces tváření kovu, při kterém je plochý plech tažen za studena či formován mechanickým nebo hydraulickým lisem do celistvého dílu. Plochý plech je deformován do válcového, kuželového nebo krabicového tvaru. Tímto procesem je možné vyrobit konečný výrobek s použitím minimálních operací a minimálního produkovaní odpadu. Plocha již vytvarovaného dílu je nerozvinutelná. Podle charakteru rozdělujeme operace do skupin:

- prosté tažení - tváření s konstantní tloušťkou materiálu. Takto lze vyrobit výtažky duté, obvodově uzavřené, rotačních i nerotačních, s přírubou i bez příruby;
- tažení se ztenčením stěny - díly mají menší tloušťkou stěny, než je tloušťka dna. Tloušťka stěny je redukována v mezeře mezi tažníkem a tažnicí na tloušťku stěny, přičemž tloušťka dna zůstává nezměněna. Tím se získá delší výtažek. Pro nízkouhlikové oceli je optimální úhel náběhové hrany tažnice 60° ;
- zpětné tažení - první tah je proveden prostým tažením. Následuje druhým tahem, kdy se provede tažení v obráceném směru. Materiál je méně namáhán než při prostém tažení. Okraje výtažku nemají tendenci se zvlítnit;
- žlábkování - vytlačování malých prohlubin do dílu za účelem zvýšení tuhosti;
- protahování - protahováním otvorů, nejčastěji kruhových, se vytváří lem kolem otvoru. Ostré hrany se zaoblují. Materiál je namáhán pouze tahem. Rozdělujeme protahování bez ztenčení stěny a se ztenčením stěny;

- zužování – používá se k vytvarování válcových a trubkovitých polotovarů, k zúžení konců trubek atd. Tvářecí síla působí tlakem na volné čelo polotovaru a zvolna jej zasouvá do dutiny matrice, která má potřebný tvar. Lze použít i přidržovač;
- rozšiřování - postup je stejný jako u zužování, avšak místo zužování dochází k rozšiřování konců trubek;
- přetahování - je přetváření přístřihu do jednoduchého výtažku přes šablonu. Přístřih je pevně upnut na okrajích. Nevýhodou je nízká produktivita způsobená dlouhými výrobními časy a velkou spotřebou materiálu (upnutá část se odstřihuje). Výhodou je nízká pořizovací cena nástrojů a možnost vyrábět výtažky s dvojitou křivostí [30,31].

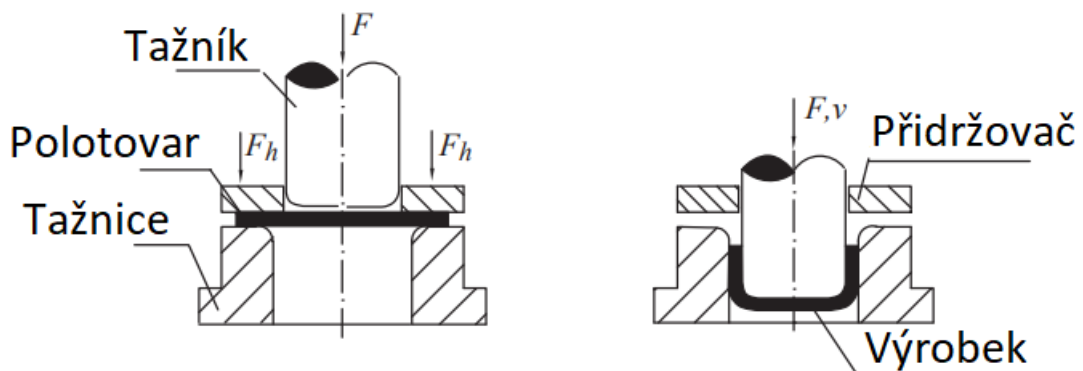
Výrobkem je výtažek. Výrobky vyrobené tažením se rozdělují na:

- rotační duté nádoby;
- nerotační duté nádoby;
- nesymetrická tělesa;
- tělesa s nestejnou tloušťkou stěn [30].

Principem tažení je deformace výstřižku kruhového tvaru o průměru D na požadovaný tvar. Získáme výtažek o průměru d a výšce H . Tažením se šířka mezikruží H' vytáhne na válcovou stěnu nádoby o výšce H , podle vztahu

$$H' = \frac{D-d}{2} [mm] \quad (6)$$

Při tažení se objem materiálu nezmění. Výška H bude větší než šířka mezikruží H' [30].



Obrázek 16 Schéma tažení polotovaru [29]

Pro proces tažení rozlišujeme několik důležitých proměnných, které jsou klasifikovány jako:

- materiál polotovaru;
- koeficient tření;
- parametry nástroje a lisu [30].

Tření polotovaru a správné použití maziva na nástroji jsou velmi důležité proměnné k dosažení úspěšného procesu tažení [30].

Na rozdíl od operací ohýbání, při kterých se kov plasticky deformuje na relativně malé ploše, operace tažení vyvolává plastickou deformaci na velkých plochách. Při větším stupni deformace (při přemísťování většího objemu materiálu) dochází ke zvlnění tvářeného plechu na jeho okrajích. Za určitých okolností, při tažení vysokých nádob a tenkého plechu, dochází k přeložení záhybů přes sebe. Při vtažení trojnásobné tloušťky plechu mezi tažnici a tažník se vygeneruje velký odpor a dojde k utržení dna. Aby se zvlnění plechu zabránilo, používá se tzv. přidržovač. Ke zvlnění plechu nedochází při malém stupni deformace a při větší tloušťce materiálu [30].

3.1.1 Tažná síla

Tažná síla musí při procesu tažení překonat vnitřní odpor materiálu. Na vnitřní odpor materiálu působí deformace ve všech směrech a třecí síly mezi polotovarem a tažnicí s přidržovačem. Tažná síla je závislá na:

- poměru rozměru výtažku d a výstřižku D ($d:D$);
- tloušťce t taženého polotovaru;
- poloměru zaoblení tažné hrany R ;
- mezi pevnosti R_m tažného materiálu [30].

Celková síla potřebná k procesu tažení je součtem tažné síly F a síly přidržovače F_p . Pro kruhové výtažky je tažná síla

$$F = \pi * d_s * t * R_m * K_t [N] \quad (7)$$

kde d_s je střední průměr výtažku [mm]; t je tloušťka taženého materiálu [mm]; R_m je napětí na mezi pevnosti taženého materiálu [MPa]; K_t je součinitel tažné síly ($K_t < 1$) [-]. Podle velikosti tažné síly se určuje lis, který se použije na proces tažení [30,33].

3.1.2 Síla působící na přidržovač

Aby se při tažení zabránilo zvlnění taženého polotovaru, přitlačuje se polotovar k tažnici přidržovačem. Velikost tlaku přidržovače je rozhodující pro správný průběh procesu tažení. Malý tlak nezabrání zvlnění polotovaru a naopak velký tlak vytváří nutnost použití příliš velké tažné síly, která může být příčinou vzniku trhlin na výtažku. Pokud dochází k jednostrannému vytažení okraje, nepůsobí tlak přidržovače rovnoměrně po celé ploše polotovaru. Síla potřebná k vyvození požadovaného tlaku F_p se určí za vztahu

$$F_p = p * S [N] \quad (8)$$

kde p je tlak přidržovače [MPa]; S je obsah plochy, na který přidržovač působí [mm²]. Tlak přidržovače p závisí na materiálu [30].

3.1.3 Defekty

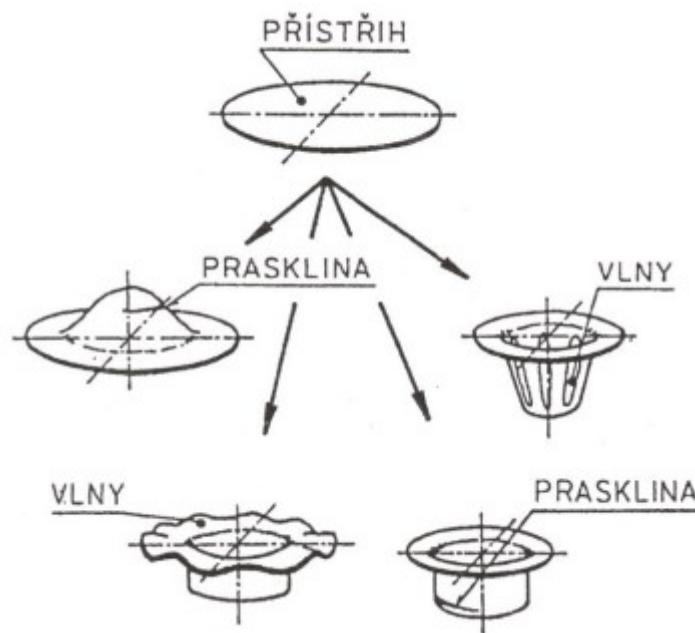
Pokud se polotovar během operace tažení poruší, problém může být ve vůli mezi tažníkem a tažnicí, který je nesprávný. Tento problém může být přímým důsledkem toho, že byly tažník a tažnice navrženy nebo vyrobeny s nesprávnou vůlí. K lomům může také dojít, pokud je tloušťka polotovaru mimo toleranci nebo není stejnoměrná, nebo pokud tažník a tažnice nejsou správně vyrovnány [16].

Pokud na polotovar působíme příliš velkou silou, zvýší se tím zatížení tažníku, protože se zvýší tření. To má za následek porušení polotovaru. Může být způsobeno vysokým přitlakem přidržovače na polotovar [16].

Poloměry rohu tažníku a tažnice jsou důležité pro úspěšnou operaci tažení. Pokud jsou poloměry příliš malé, roh se může porušit, kvůli zvýšené síle potřebné k vytažení polotovaru [16].

Škrábance, nečistoty nebo jakékoliv povrchové vady nástroje zvyšují potřebnou tažnou sílu a mohou vést k porušení [16].

Pokud přidržovač polotovaru vyvíjí příliš malý tlak nebo pokud je poloměr tažnice příliš velký, projeví se to na výrobku zvlněním [16].



Obrázek 17 Vady výtažků [16]

3.1.4 Mazání

Během tažení existují různé podmínky mazání, od hydrodynamického mazání v přídržovači polotovaru k meznímu mazání na poloměru tažnice, kde velmi často dochází k porušení polotovaru. Mazání je důležité pro snížení sil, zvýšení tažnosti, snížení opotřebení nástroje a snížení výskytu vad na výrobku. Výběr maziva je založen na obtížnosti operace, typu operace a materiálu [29,33,34].

Polotovar se pokryje mazivem před vstupem do lisu. Nejlepší metoda je použití mlhy, aby se mazivem pokryla celá plocha. Pro proces tažení lze použít odpadní strojní olej pro nenáročné tvary výtažků. Pro komplexní tvary výtažku se používají živočišné tuky nebo rostlinné a minerální oleje. Samotné oleje nemusí stačit pro rovnoměrné pokrytí povrchu, a proto je potřeba vytvářet směsi maziva a plniva pro zvýšení viskozity [34].

3.2 Ohyb

Jedním z nejpoužívanějších procesů plošného tváření je ohýbání. Využívá se pro tváření dílů, jako jsou L, U nebo V profily. Také lze dosáhnout zlepšení tuhosti dílů zvýšením jejich momentů setrvačnosti. Ohýbání probíhá rovnoměrným napínáním plochých plechů nebo pásů kolem lineární osy. Kromě plošných dílů lze proces ohýbání uplatnit na kruhové profily, tyče a dráty. Proces ohýbání má největší využití pro aplikace v automobilovém a leteckém průmyslu [30,32].

Pro tváření materiálu ohybem se rozděluje proces podle normy ČSN 22 6001 na:

- prosté ohýbání - trvalá deformace materiálu;
- ohraňování - pro tváření pásů a plechů do tvaru profilů. Většinou se jedná o profil s ostrým ohybem. Různé profily se tvoří kombinací geometrie V a U. Ohraňovací lis, který má pracovní délku několik metrů, má pohyblivý ohybník a pevnou ohybnici. Ohybník tvarově zapadá do výřezu ohybnice. Pro správný průběh ohybu se nastaví vzdálenost a poloha dorazů podle potřeby;
- rovnání – narovnání zdeformovaného plechu;
- zakružování – jedná se o volný ohyb. Vytváří se díly mající v příčných řezech kruhový či nekruhový tvar o velkých poloměrech. Díly se vytváří z dlouhého pásu. Provádí se na zakružovačkách;
- lemování - rovinné okraje se ohýbají, za účelem zaoblení ostrých hran, zpevnění okrajů nebo vytvoření okrasného vzhledu. Lemování rozdělujeme na přímý lem, vydutý lem a vypuklý lem. Často se vytváří lem na okraji dílu, aby se zabránilo zranění obsluhy při manipulaci;
- obrubování - vyztužování okraje;
- osazování (prosazování) - ohnutí promáčknutím v okraji;
- drápkování - pevné spojení předešnutých okrajů;
- zkrucování - natáčení plochého nebo profilového polotovaru vzhledem k vedlejší části polotovaru kolem společné osy o určitý úhel [30,31].

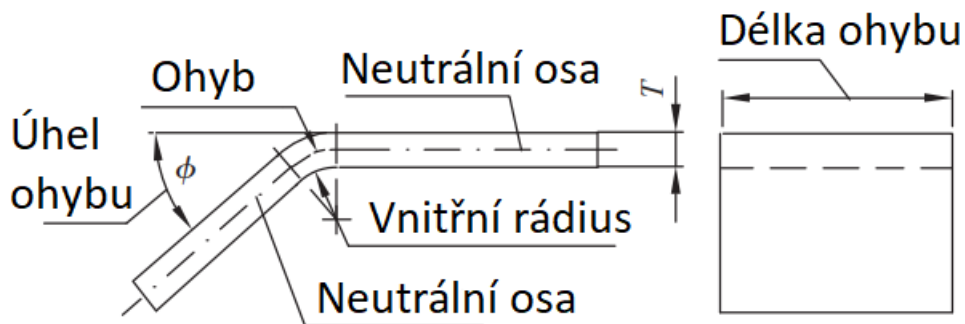
Jednotlivé polohy v průběhu ohýbání:

1. Pohyblivá část nástroje, ohybník, začne působit tlakem na polotovar, který je položen na ohybnici. Poloha polotovaru je určena dorazy.
2. Ohybník deformuje polotovar do chvíle, kdy napětí dosáhne mez pružnosti. Kdyby ohybníku přestal působit tlakem na polotovar, vrátil by se polotovar do původního stavu.
3. Pokračuje se zvyšováním tlaku, pokud není překročena mez pružnosti a kluzu. Proces ohýbání pokračuje v oblasti trvalých deformací. Poloměr zaoblení ohýbaného dílu je po celou dobu průběhu ohybu větší, než je poloměr ohybníku.

Poloměr zaoblení ohybu se postupně zmenšuje. Na konci procesu polotovar zcela kopíruje tvar ohýbníku.

4. Ohýbání je dokončeno dalším působením tlaku na ohýbaný díl v celém průřezu plochy, aby se co nejvíce zamezilo odpružení materiálu [30].

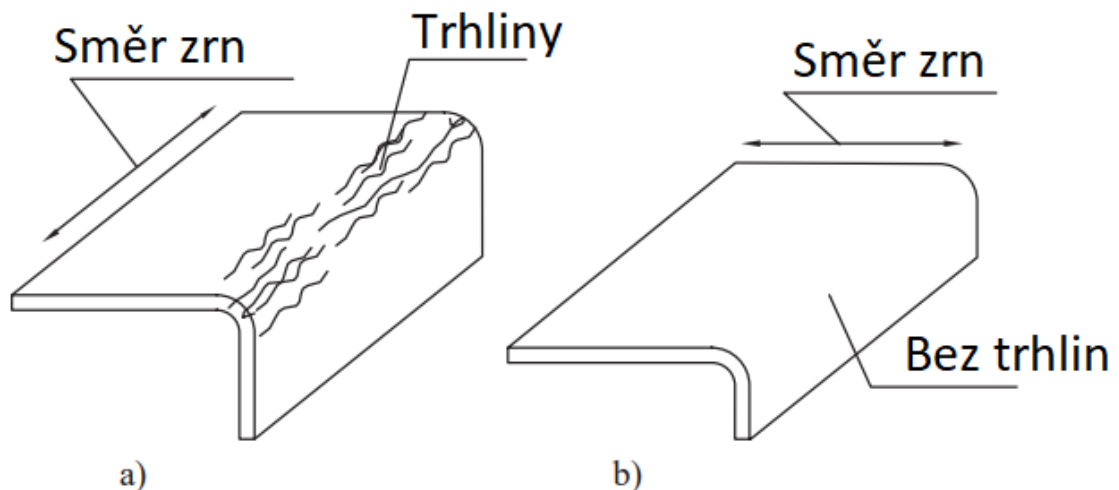
Plastická deformace materiálu v ohýbaném průřezu má v jednotlivých místech různý průběh. Vlákná na vnější straně ohybu jsou v podélném směru prodlužována a v příčném zkracována. Naopak vlákna na vnitřní straně jsou v podélném směru zkracována a v příčném prodlužována. Při ohýbání úzkých profilů je změna vlákna viditelná na profilu, u širokých profilů se změna vláken viditelně neprojeví. V oblasti ohybu však dochází ke ztenčení materiálu pro úzké i široké profily. Vlákná, která se nedeformují, se nacházejí na neutrální ose. V řezu se neutrální osa jeví jako čára, která neprochází středem průřezu, ale je blíže k vnitřnímu poloměru zaoblení [30].



Obrázek 18 Schematické znázornění terminologie používané v procesu ohýbání [29]

Ohýbání probíhá v oblasti pružně plastických deformací. Pokud přestane ohýbací síla působit, dochází k odpružení. Velikost odpružení závisí na druhu a tloušťce materiálu, na tvaru ohýbaného dílu, poloměru ohybu a na ohýbací síle na konci procesu. Menšího odpružení lze také docílit rázem. Ohyb ve tvaru V má často odpružení menší než ohyb ve tvaru U. Již při konstrukci ohýbacího nástroje je nutné počítat s odpružením materiálu. Úhel odpružení je:

- u měkkých materiálů 0° až 4° ;
- u středně tvrdých materiálů bývá 2° až 5° ;
- u tvrdých materiálů až 15° [30].



Obrázek 19 Vztah mezi směrem válcování zrna a vznikem trhlin na ohýbaných dílech [29]

- a) trhliny vznikají při ohýbání kolmo k směru válcování;
- b) ohýbání ve směru válcování zrn minimalizuje vznikání trhlin.

3.2.1 Ohýbací síly

Když se při ohybu materiál nachází v oblasti plastických deformací, nelze použít vztahy z pevnosti a pružnosti pro výpočet nosníku. Pro každý případ, podle způsobu ohybu, tvaru profilu a působení ohýbací síly, se vyžaduje úprava vztahu [30].

Podle normy se doporučuje pro výpočet ohýbací síly F , při ohybu do tvaru V použít vztah

$$F = R_e * \left(\frac{b * t^2}{2 * R} \right) * \tan \left(\frac{\alpha}{2} \right) [N] \quad (9)$$

kde R je poloměr neutrální vrstvy [mm]; R_e je mez kluzu [MPa]; b je šířka ohýbaného materiálu [mm]; t je tloušťka materiálu [mm]; α je úhel sevření [°][30].

Při ohybu do tvaru U platí vztah

$$F = R_e * (1 + 7 * f) * \left(\frac{b * t^2}{r + t} \right) [N] \quad (10)$$

kde f je součinitel tření [-]; r je vnitřní poloměr ohybu [mm] [30].

3.2.2 Minimální poloměr ohybu

Nejmenší možný poloměr je závislý na použitém materiálu a na jeho tepelném zpracování. Při volbě poloměru ohybu se na vnější straně ohybu nesmí tvořit trhlinky. Musí se věnovat pozornost nejvíce namáhaným vláknům na vnějších stranách polotovaru. Deformaci vnějších vláken lze charakterizovat poměrným zúžením Z ohýbaného materiálu [30].

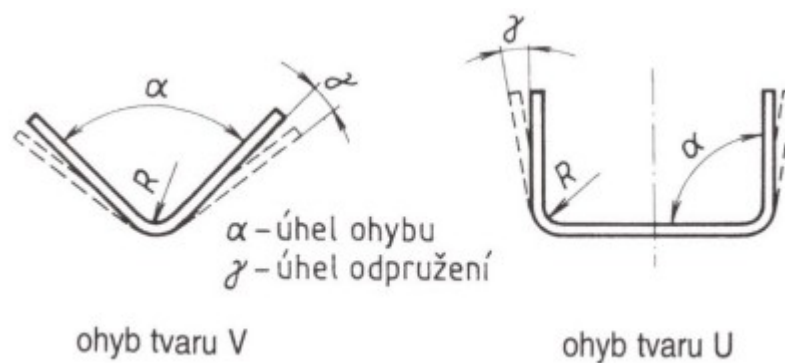
Pro malé deformace, při ohybu napříč vlákny, platí pro minimální poloměr ohybu vztah

$$r_{min} = \frac{1-2*Z}{2*Z} * t [mm] \quad (11)$$

kde Z je zúžení ohýbaného materiálu [%]; b je šířka ohýbaného materiálu [mm]; t je tloušťka ohýbaného materiálu [mm]. Ve výrobě je výhodné volit poloměry ohybu co největší, pokud to konstrukce dílu dovolí [30].

3.2.3 Odpružení

Zpětné odpružení je důležité pro ohýbání. Jedná se o částečný posun materiálu směrem k výchozímu tvaru. Tento děj působí v pružné (vratné) deformaci materiálu kolem neutrální osy. Úhel odpružení od požadovaného úhlu se značí jako úhel γ . Toto odpružení je závislé na materiálu, způsobu ohýbání a poloměru ohybu [35].



Obrázek 20 Odpružení ohybu tvaru V a U [35]

Proti zpětnému odpružení se snažíme předejít různými metodami. Nejčastěji korekcí nástroje, kdy se nástroj vyrobí tak, aby výsledný úhel α byl zvětšen o úhel odpružení. Tento úhel se určuje, buď pomocí empirických vzorců, nebo z tabulek. Další metoda je pomocí kalibrace, kdy se vytvoří místní plastická deformace, čímž lze dosáhnout snížení odpružení. Deformace při metodě kalibrace se dosáhne zvýšením ohýbací síly na konci procesu. Zpětné odpružení lze zcela odstranit i pomocí prolisů na díle [35].

3.2.4 Rovnání

Pro odstranění nežádoucí deformací se používá proces rovnání. Tyto nežádoucí deformace mohou být způsobeny manipulací s polotovarem nebo vzniknou už při technologické výrobě polotovaru. Rozlišujeme proces rovnání na ruční a strojní. Ruční rovnání pomocí kladiva se používá na plechy a tyče. Strojní rovnání pro tabule a pásy plechů se provádí na rovnačkách. Jedná se o střídavé ohýbání polotovaru sestavou 7 až 17 válců, které v případě

tenkých plechů mají průměr přibližně 60 mm. Největší zakřivení je způsobené na prvním válci, protože ohybové napětí je větší než mez kluzu. Výstupní válce mají vzdálenost takovou, že se dosahuje již jen pružných ohybových napětí [31].

3.3 Střih

Do průběhu procesu stříhání patří dělení plechu, nejčastěji na tabulových nůžkách. Střih nastává, když horní a spodní břit nože zajíždějí do stříhaného materiálu. Kvalita střížné plochy závisí na velikosti střížné mezery, kvalitě střížného nástroje, způsobu průběhu stříhání a tvrdosti stříhaného materiálu. Tyto parametry mají přímý vliv na hloubku vniknutí břitu do materiálu. Stříhání může být prováděno různými typy nožů nebo ve speciálních strojích poháněných mechanicky, hydraulicky nebo pneumaticky. Střížné operace lze rozdělit do dvou hlavních skupin:

- stříhání po vnějším otevřeném obryse;
- stříhání po uzavřeném obryse [30,32].

Podle provedení operace rozlišuje norma ČSN 22 6001:

- prosté stříhání - dělení materiálu;
- děrování - nástroje (děrovač) pracují na stejném principu jako stříhadla. Děrovač se vytvářejí otvory do výtažků a výstřížků. Jde o otvory kruhové nebo profilové. Na střížné ploše zůstávají mikrotrhliny (otřepy);
- vystřihování - stříh materiálu po uzavřeném obrysu a taky oddělování částí v okraji materiálu;
- ostřihování - oddělování přebytečného materiálu stříhadlem;
- přistřihování – používá se k dosažení přesných tvarů, rozměrů nebo hladkých ploch;
- nastřihování - nastřihnoutí v okraji;
- prostřihování - nastřihnoutí uvnitř výstřížku;
- protrhávání - pro vytváření hrotů, děr a výstupků [30,31].

Vlastní konstrukce střížného nástroje je ovlivněna:

- množstvím výrobků;
- druhem zpracovávaného materiálu;
- následnými operacemi;
- strojem [30].

Stříháním lze získat výrobky ve stupních přesnosti IT 12 až IT 14 při použití běžných nástrojů. Při využití nástrojů s vodícími sloupky dosáhneme stupně přesnosti IT 9 až IT 11 [30,36].

Drsnost povrchu střížných ploch, kterých lze dosáhnout se liší tloušťkou materiálu:

- u materiálů tloušťky do 1 mm je $R_a = 10 \mu\text{m}$;
- u materiálů tloušťky do 3 mm je $R_a = 20 \mu\text{m}$;
- u materiálů tloušťky nad 3 mm je $R_a = 63 \mu\text{m}$ [30].

Nástříhový plán slouží k vhodnému rozmístění výstřížků na výchozím polotovaru (pásky, pruhy nebo tabule plechu). Uspořádání a orientace výstřížků na polotovaru jsou určeny:

- tvarem a rozměry výstřížku;
- směrem vláken materiálu;
- způsobem podávání;
- tloušťkou a kvalitou materiálu [30].

3.3.1 Vystříhování

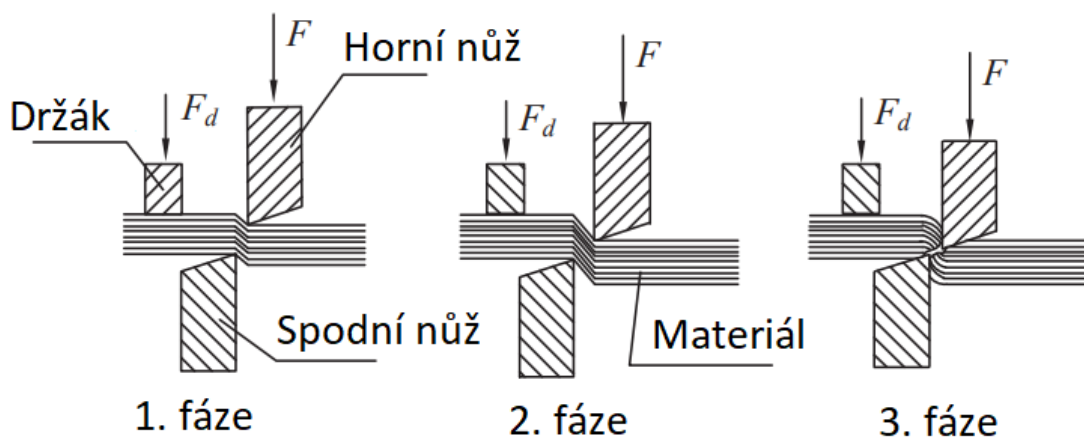
Procesem vystříhování získáváme výstřížky, přístříhy a díly k přímému použití. Hlavní částí nástrojů (stříhadel) je pohyblivý střížník a nepohyblivá střížnice. Obrysový tvar dutiny střížnice a střížníku souhlasí s obrysem výstřížku. Střížník zajíždí až do hrdla střížnice, která je opatřena břitem, jelikož se přes její dutinu musí protlačit výstřížek. Mezi střížníkem a střížnicí musí být vůle, která se volí podle druhu stříhaného materiálu. Střížná vůle ovlivňuje kvalitu střížné plochy, stupeň přesnost dílu, velikost střížné síly a životnost nástroje. Větší vůle, u měkkého materiálu, má za následek snížení kvality střížné plochy, ale také zmenší tření a otěr polotovaru na střížnici [31].

3.3.2 Střížná síla

Při stříhání kovových materiálů probíhá proces stříhu ve třech fázích (Obr. 21):

1. Nástroj generuje tlak na stříhaný materiál a způsobuje růst napětí v oblasti pružné deformace až do dosažení meze kluzu.
2. Po překročení meze kluzu se napětí pohybuje v oblasti plastické deformace. Břit střížníku vniká do materiálu.
3. Napětí ve stříhaném materiálu dosáhlo meze pevnosti ve stříhu. Od břítu střížníku a střížnice se vytvářejí trhliny, které se spojují. Po dosažení střížníku do hloubky jedné třetiny tloušťky materiálu dochází k oddělení zbytku materiálu. Následuje vytlačení výstřížku [30,36].

Stříhaná hrana je hladká tam, kde břit byl vtlačen do materiálu. Značně hrubší textura stříhané hrany je v roztržené části. Velikost střížné síly lze zmenšit různým úhlem zkosení břítu střížníku nebo střížnice. Při volbě lisu nebo při výpočtu pevnosti nástroje se zvolí střížná síla o 20 až 25% větší, protože může dojít k změně střížných podmínek. Při procesu stříhání se nesmí překročit jmenovitá síla lisu, aby nedošlo k poškození [30].



Obrázek 21 Schéma procesu stříhu [29]

Teoretická střížná síla F_t , potřebná k oddělení materiálu stříháním, je úměrná stříhané ploše a pevnosti ve stříhu zvoleného materiálu:

$$F_t = R_{ms} * l * t [N] \quad (12)$$

$$R_{ms} = 0,8 * R_m [MPa] \quad (13)$$

kde R_{ms} je mez pevnosti ve stříhu [MPa]; R_m je mez pevnosti [MPa]; l je délka střížné čáry [mm]; t je tloušťka stříhaného materiálu [mm] [30].

Protože se střížné hrany postupně otupují, volíme lis s větší silou, než je vypočítaná hodnota střížné síly. Skutečná střížná síla F (síla lisu)

$$F = F_t * k [N] \quad (14)$$

kde koeficient $k = 1,3$ až $1,6$ [-] [30].

Síla potřebná k protlačení výstřížku F_{pr} střížnicí se určuje jako poměrná část střížné síly F .

$$F_{pr} = (0,02 \text{ až } 0,05) * F [N] \quad (15)$$

Přičemž nižší hodnoty se volí pro slitiny neželezných kovů [30].

3.3.3 Střížná vůle

Rozdíl mezi jmenovitými rozměry střížnice a střížníku ovlivňuje:

- průběh stříhu a kvalitu střížné plochy;
- velikost střížné síly;
- trvanlivost břitů střížníku a střížnice [30,36].

Velká vůle mezi střížníkem a střížnicí vyvolává boční síly, které mohou střížníky vychýlit. To může mít za následek poškození nástroje. Malé střížné vůle jsou příčinou neúměrného zvýšení střížných sil. Přibližnou střížnou vůli lze určit pomocí vztahu

$$v = k_v * t [mm] \quad (16)$$

kde k_v je součinitel [-], závislý na stříhaném materiálu:

- $k_v = 1/20$ pro měkkou ocel a slitiny mědi;
- $k_v = 1/16$ pro středně tvrdou ocel;
- $k_v = 1/14$ pro tvrdou ocel;
- $k_v = 1/10$ pro slitiny hliníku [30,36].

4 SIMULACE TVÁŘENÍ

Zpracování plechu tvářením se skládá z mnoha operací. Díly mohou být velké, jako karosérie automobilu anebo mikronové součásti, které se nacházejí v lékařských přístrojích [37,38].

Dochází k uplatňování vědeckých principů založených na pevných základech mechaniky, teorie plasticity a tváření kovů, analýzy konečných prvků atd. Velká část současného přístupu je založena na zkušenostech [37,38].

4.1 Počítačová podpora

Počítačová podpora v oblasti technologické přípravy výroby (TPV) je zaměřena především na snižování časového rozmezí od návrhu konstrukce lisovaného dílu po jeho fyzickou realizaci. Virtuální příprava technologického procesu nám pomáhá v odstranění potenciálních chyb v počátečních fázích přípravy technologického procesu, zjednodušuje práci konstruktéra a urychluje ji [38].

V oblastech plošného tváření se v rámci TPV uplatňují softwary, které napomáhají k rychlé konstrukci nástroje, definicím technologických parametrů, jako je rozvin součásti, definování tvaru přístřihu, výpočet střížných, tažných a ohybových sil, stanovení součinitele využití materiálu a mnoho dalších parametrů [38].

Důležitou oblastí, kde se prosazují softwary pro podporu TPV, je zejména problematika stanovení rozvinutého tvaru součásti. Softwary v tomto případě pracují na základě analytických a konečně prvkových metod, v rámci nichž lze posuzovat technologičnost rozvinu. Softwary umožňují sledovat možné defekty v oblastech výlisku již v době, kdy není známa konstrukce nástroje, a konstrukci nástroje lze podřídít technologickým podmínkám výroby [38].

Nedílnou součástí TPV je i konstrukční návrh výrobních nástrojů. V této oblasti se setkáváme se softwary s parametrickým modelováním a rozsáhlými databázemi normálií. Primární informací pro konstrukci nástroje je rozvinutý tvar součásti a požadovaný finální tvar [38].

4.1.1 Autoform Forming

AutoForm Forming je software konečných prvků s různými funkcemi, které lze použít k usnadnění návrhu plechového dílu. AutoForm Forming lze použít k importu 3D a 2D modelů a jejich simulace lisovacích operací v realistickém prostředí. Pro provedení výpočtů software generuje uzly spojené do mřížky, které představují polotovar a tvarovací plochy. Tyto sítě se používají ve výpočtech metody konečných prvků ke sledování sil a posunů ovlivňující polotovar. Hodnoty jsou uloženy a použity v řídicích rovnicích simulovaného systému, které jsou iterativně řešeny, dokud není nalezeno konvergující řešení [39].

Největší vliv na simulaci má velikost deformovaného plechového dílu, protože větší komponent bude potřebovat větší síť prvků, což má za následek větší soustavy rovnic, které je třeba řešit v průběhu simulace [39].

4.2 Modelování prvků

Modelování plechových součástí obvykle začíná metodologií založenou na prvcích. Přiřazujeme geometrické i negeometrické informace k usnadnění automatizace návrhu. Přestože definice funkce závisí na aplikaci, vlastnosti lze považovat za stavební kameny pro definici produktu a geometrii uvažování. Charakteristiky prvků lze popsat jako:

- prvek je fyzickou složkou části;
- prvek lze převést na obecný tvar;
- prvek má technický význam;
- prvek má předvídatelné vlastnosti [37].

Model výrobku lze vytvořit samostatně nebo společně pomocí tří hlavních klasických přístupů:

- vytváření interaktivních prvků;
- automatické rozpoznávání prvků;
- návrh podle prvků [37].

Metoda interaktivního vytváření je snadno implementovatelná, protože stačí pouze funkce pro aplikaci. Může být použita k doplnění přes automatické rozpoznávání, když nelze nalézt spolehlivý algoritmus nebo funkce nemohou být plně formalizované [37].

Přístup rozpoznávání prvků byl vyvinut pro automatizaci tvorby prvků z geometrických modelů. Jednou z výhod je udržení standardizace designu vedoucí ke zlepšení proveditelnosti procesu a kvality produktu [37].

4.2.1 Sít'ování prvků

Aby simulační programy mohly pracovat a počítat s objekty v simulačním prostředí, objekt je třeba rozdělit na konečný počet prvků, aby se zjednodušil proces výpočtu. Cílem je rozdělit problémovou doménu na menší části a řešit je jednotlivě [40].

V simulacích je potřeba vygenerovat síť povrchu, která slouží ke sledování proměnných a výpočtu rovnic. Síť je vytvořena pomocí spojení uzlů čarami do mřížky. Strukturovaná síť je jednoduchá forma sítě, kde všechny části mřížky sledují stejný vzor. Nevýhodou strukturované sítě je, že je obtížné ji použít pro povrchy, které mají složitou geometrii. Protože je mřížka omezena na vzor, nebude moci sledovat geometrii povrchu přesným způsobem. Z tohoto důvodu se strukturovaná síť již příliš nepoužívá, a místo toho se v simulačních programech standardně používá nestruturovaná síť [40].

Nestruturovaná síť je ve 2D síti často složena z trojúhelníků a nesleduje konkrétní vzor. Síť je generována automaticky na základě nastavení vstupu. Síť se liší pro povrch nástroje a plechu. Sítě jsou tvořeny 2D nestruturovanými trojúhelníky, které představují povrchy, které se mohou během simulace dostat do kontaktu nebo se zdeformovat [40].

Generování sítě v AutoForm Forming funguje tak, že zpočátku vytváří síť z trojúhelníkových prvků nastavené velikosti. V závislosti na složitosti povrchu mohou být prvky kombinované podél plochých povrchů k vytvoření větších prvků v oblastech, kde je přesnost méně důležitá pro zlepšení rychlosti řešení simulace. Podobně podél zakřivených ploch budou zjemněny trojúhelníkové prvky rozdělené na menší prvky, kde jsou vyžadovány podrobné výpočty [40].

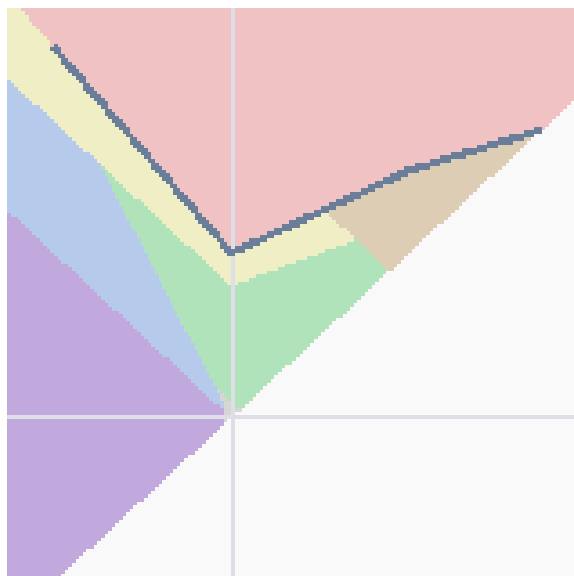
4.3 Popis výsledků

4.3.1 Tvářitelnost

Tvářitelnost poskytuje rychlý přehled o tvářitelnosti dílu. Výsledky simulace v programu AutoForm popisují proces tváření pomocí diagramu mezních deformací. Výsledky jsou vykresleny v FLD do několika oblastí (Obr. 22):

- porušení (červená);
- nadměrné ztenčení (oranžová);
- riziko porušení (žlutá);
- bezpečný (zelený);
- nevyužitý (šedá);
- zvlnění (modrá);
- stlačení (fialové) [39].

Tyto výsledky se použijí pro optimalizaci výroby. Snažíme se docílit co nejvíce optimálnějšího řešení s výsledky z velké části v zelené oblasti. Pro každý proces tažení je potřeba znát mezní hodnoty, abychom vyhodnotili kritická místa na díle, ve kterých dojde k porušení v červené oblasti. Maximální hodnoty, které překračují FLC znázorňují vznik trhlin v materiálu a naopak minimální hodnoty znázorňují nevyužití materiálu při procesu tažení [39].



Obrázek 22 Vyznačené oblasti FLD [39]

4.3.2 Porušení

Výsledky zobrazují oblasti potenciálního porušení. Pro kvalifikované posouzení porušení se použijte funkce „Max. Failure“. U viditelných povrchů vnějších dílů se doporučuje další podrobná kontrola viditelných oblastí. Pro podrobnější analýzu se použije funkce „Skid lines“. Kromě trhlin a vrásek je zvláštní pozornost věnována i kvalitě povrchu [39].

Výsledná proměnná maximálního porušení, je definována, jako poměr mezi maximálním hlavním přetvořením vypočítaným u prvku a hlavním přetvořením z křivky mezního tváření pro stejně malé přetvoření. To znamená, že trhliny lze očekávat při hodnotě 1,0 nebo více, a že úspěšnou plastickou deformaci lze očekávat při hodnotách menších než 1,0. FLC je určeno předpokladem lineárních deformací. Proto v oblastech nelineárních deformacích může být výsledná proměnná použita pouze pro získání kvalitativní indikace potenciálu porušení [39].

Výsledná proměnná maximálního porušení, může být použita k hrubému odhadu, jak pravděpodobné je selhání materiálu, nebo jak bezpečné jsou oblasti za předpokladu, že díl prošel zcela lineární deformací [39].

K dispozici jsou i následující další proměnné výsledků:

- Maximální porušení (nelineární);
- Tvářitelnost (nelineární);
- Aktuální porušení;
- Povrchové trhliny;
- Trhliny na hranách;
- Střížné lomy [39].

4.3.3 Zvlnění

Zvlnění je vada v procesu tváření plechu, která vzniká tlakovým napětím. Existuje několik faktorů, které ovlivňují zvlnění, jako je tloušťka, materiál, tření, tvar nástroje, síla přidržovače, umístění brzd atd. Proto je velmi obtížné předpovědět zvlnění. Vyhodnocení zvlnění je nejdůležitější pro viditelné oblasti dílu a rovné dosedací plochy dílu, proto lze vnitřní a vnější oblasti hodnocení definovat [39].

Pro vyhodnocení zvlnění jsou k dispozici dvě výsledné proměnné. Funkce „Wrinkles“ je založena na geometrickém hodnocení zvlnění. Funkce „Potential Wrinkles“ je založena na hodnocení stavu napětí pro detekci zvlnění [39].

Pokud se zvlnění vyskytuje geometricky, prvky na díle se zbarví podle barevné škály. Barva maximálních vrásek je zachována, i když zvlnění zmizí, díky vyhlazení při úplném uzavření nástroje na konci tvářecího procesu. Pro výpočet maximálního zvlnění se kontroluje zakřivení plechu v konkávních oblastech vzhledem k nástroji (Obr. 23). Pokud dojde ke kontaktu nástroje po celé konkávní oblasti, předpokládá se, že se jedná o geometrický prvek. Pokud nedojde ke kontaktu v konkávních oblastech, předpokládá se, že se jedná o zvlnění. Hodnota této výsledné proměnné je bezrozměrná [39].



Obrázek 23 Princip zvlnění [39]

AutoForm doporučuje kontrolovat geometrické zvlnění během procesu tvarování [39].

4.3.4 Odpružení

Referenční geometrii lze definovat pro volné i omezené odpružení v konečné fázi procesu tažení. Tato možnost je nezbytná pro kompenzaci odpružení a pro porovnání aktuálního výsledku odpružení s požadovanou geometrií součásti. Kvůli odlišným okrajovým podmínkám lze kontrolovat díl pouze pro volné nebo omezené odpružení. Omezené odpružení se používá pro vyhodnocení podmínek upnutí dílu. Vyhodnocovaná oblast se používá ke zvýraznění důležitých odchylek finální geometrie od referenční geometrie [39].

K dispozici je i výsledná proměnná posunutí materiálu při chlazení dílu tvářeného za tepla. Používá se pro vyhodnocení zkreslení dílu při posledním časovém kroku operace [39].

Funkce „Displacement from Reference in Normal Direction“ zobrazuje posun uzlů sítě v odpružené geometrii a porovnává je s polohou uzlů sítě vytvořené referenční geometrií [39].

4.3.5 Síly nástroje

Síly jsou důležitým procesním parametrem pro posouzení, zda je lis vhodný pro proces tváření. Takže tvářecí a řezné síly mohou být vyhodnoceny v programu AutoForm. Avšak počítají se pouze reakční síly plechu. To znamená, že se nebere v úvahu vliv skutečných nástrojů a skutečného lisu, jako je pružná deformace nebo tření v ložiskách [39].

Kromě síly nástroje jsou k dispozici také momenty a posunutí (důležité pro nástroje s pružinou). Součet všech sil každé operace je vždy roven nule. Pouze u řezných procesů nemá řezná síla žádnou protisílu, takže součet se nebude rovnat nule [39].

Pro vyhodnocení existují čtyři pohledy. Přehled ukazuje síly všech nástrojů v každé operaci. Operační pohled je zaměřen na síly jediné operace. Diagram celkových sil ukazuje sečtené síly pro každý držák nástroje. Síla nástroje musí být zvýšena, aby unesla reakční sílu plechu. V tomto případě se barva síly nástroje v diagramu sil změní na světle červenou. Tímto způsobem bude snadno patrné, zda předem definovaná síla nástroje nebyla dostatečná. Maximum uvedené pod diagramem je součtem sil všech nástrojů namontovaných na držáku nástroje. Přehled celkových sil neobsahuje hmotnost nástrojů [39].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je vytvoření simulace zadaného dílu s nejlepšími možnými výsledky. K dosažení těchto nejlepších výsledků je potřeba provádět optimalizaci nastavení simulace. Při výrobním procesu musí být vyroben i zrcadlový díl.

Zvolené kritické hodnoty na stupnici jsou pro max. porušení 77 % a pro nadměrné ztenčení a stlačení 25 %.

Cíle diplomové práce:

1. Vypracovat literární studii na dané téma.
2. Provést 3D konstrukci modelu plechové součásti.
3. Vytvořit simulace procesu tváření v software AutoForm.
4. Navrhnout optimalizace tvaru součásti a technologie.
5. Vyhodnocení jednotlivých variant.

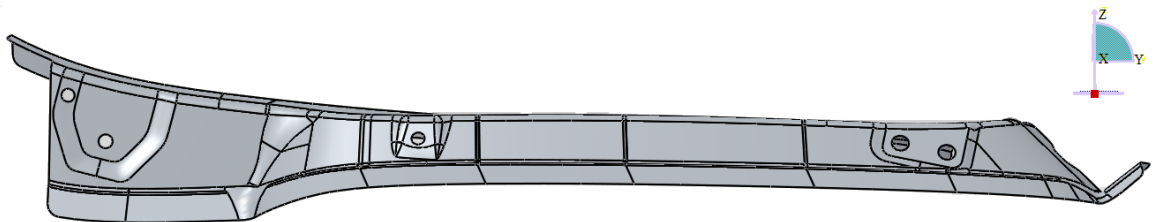
6 3D KONSTRUKCE PLECHOVÉHO DÍLU

Pro nastavení celého procesu se předem v programu CATIA V5 připraví plochy pro technologii tažení, ohýbání a křivky pro technologii stříhání.

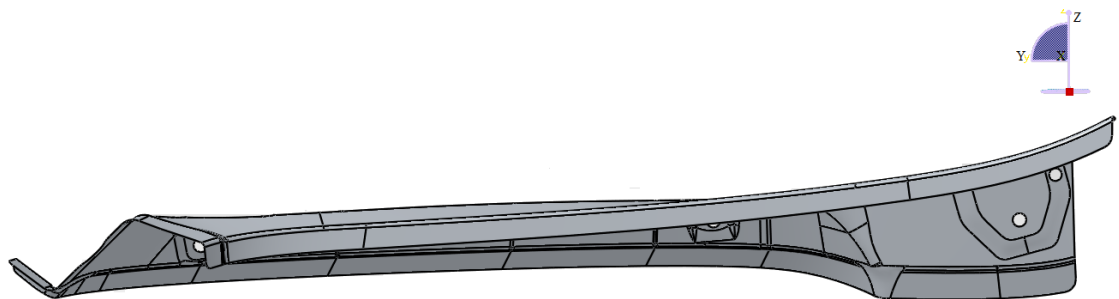
6.1 Popis dílu

Jedná se o návrh části sestavy spojené technologií LWB (Laser Welded Blanks) použité pro přední podélník v karosérii automobilu.

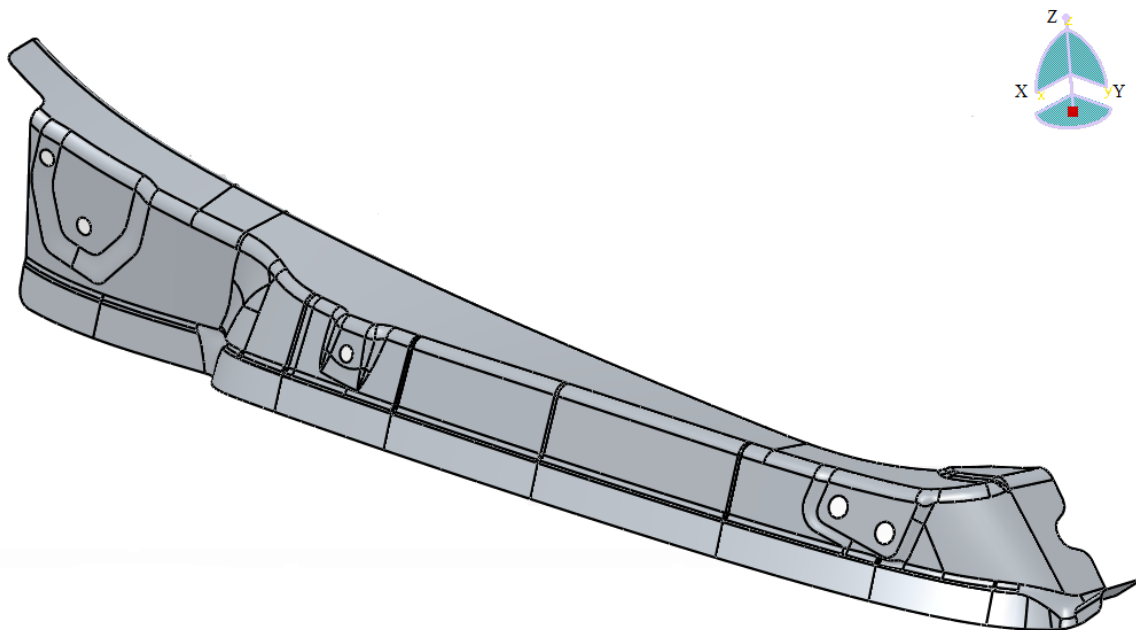
Díl byl navržen z materiálu DX 54D o tloušťce 1,5 mm a jeho rozměry jsou délka 677 mm, šířka 118 mm a výška 113 mm. Na dílu se nachází pět kruhových otvorů.



Obrázek 24 *Pravý pohled na zadaný díl*



Obrázek 25 *Levý pohled na zadaný díl*



Obrázek 26 Izometrický pohled na zadaný díl

6.2 Volba materiálu

DX 54D je druh žárově zinkované oceli pro technologii hlubokého tažení podle normy DIN EN10142. Pro tento materiál je určená pevnost v tahu 260 až 360 MPa [41].

Vysvětlivky znaků v označení materiálu:

D – ocel pro tváření;

X – válcované za studena nebo válcované za tepla;

54 – třída lisování (čím vyšší číslo, tím lepší tvářitelnost);

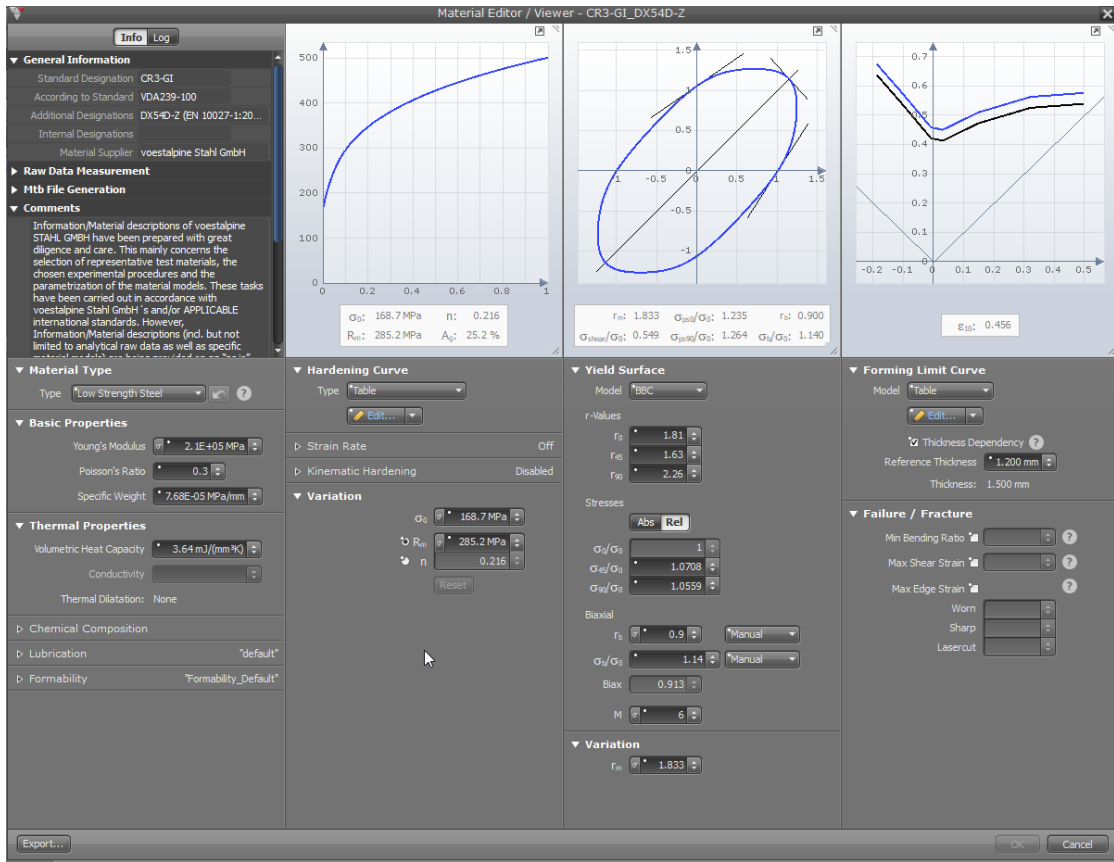
D – žárově potažený plech [41].

Tento materiál je používán pro výrobu tvarovacích dílů technologií hlubokého tažení, jako je přední podlaha, zadní podlaha, levé a pravé boční police, vnitřní panely podběhů kol, levý a pravý vnitřní panel blatníků, levý a pravý blatník, vnější panel kapoty atd. [41]

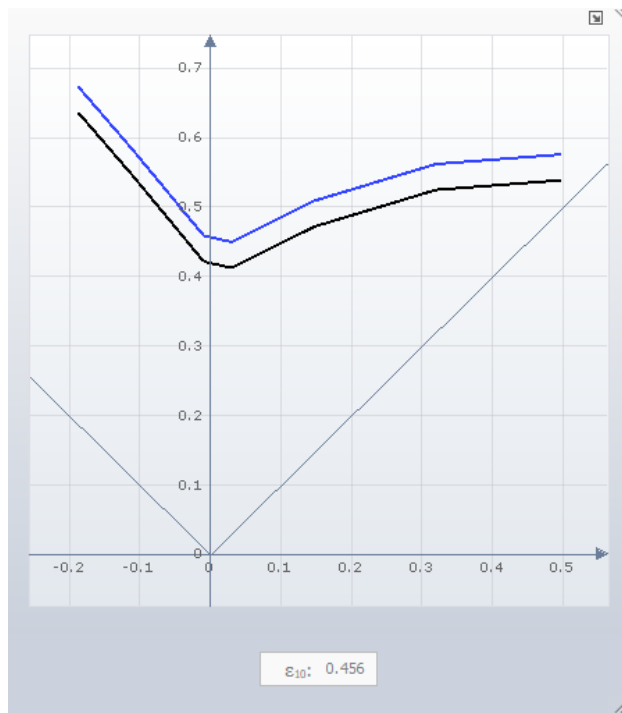
Tabulka 2 Chemické složení DX 54D válcované za studena [8]

Název	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Al	%Ti	%Cu
DX 54D	0,08	0,5	0,5	0,025	0,02	≥ 0,01	0,3	0,2

Materiál uvedený v knihovně programu Autoform je navíc galvanizovaný. Povrch je pokoven vrstvou zinku.



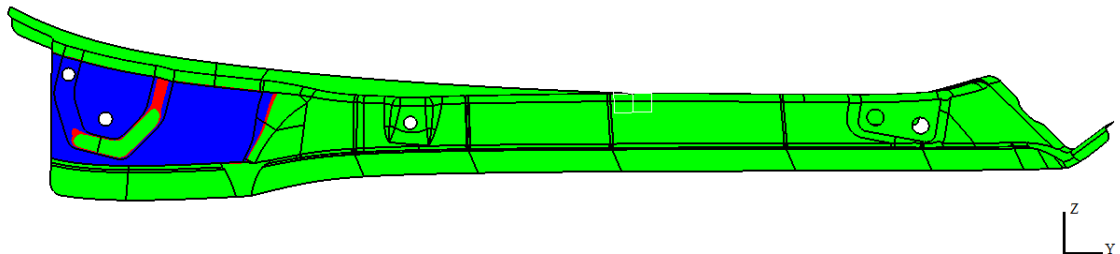
Obrázek 27 Popisek materiálu podle knihovny programu AutoForm [39]



Obrázek 28 FLD materiálu DX 54D pro tloušťku 1,5 mm (FLC je vyznačena modře) [39]

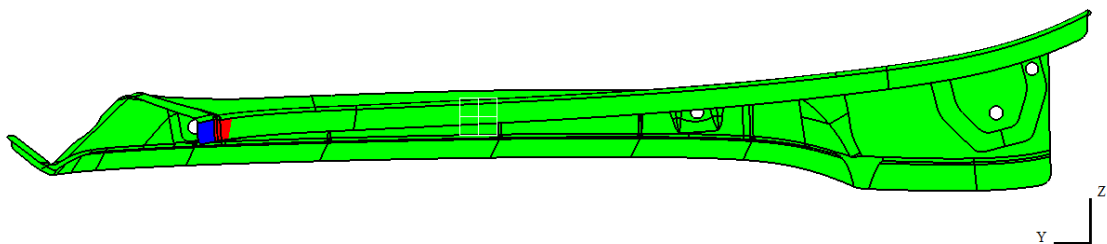
6.3 Kontrola odformování

Byla provedena kontrola odformování v CATII, aby nedošlo k vytvoření klenby dílu. Tažník by narazil do tažnice a došlo by k poškození nástroje.



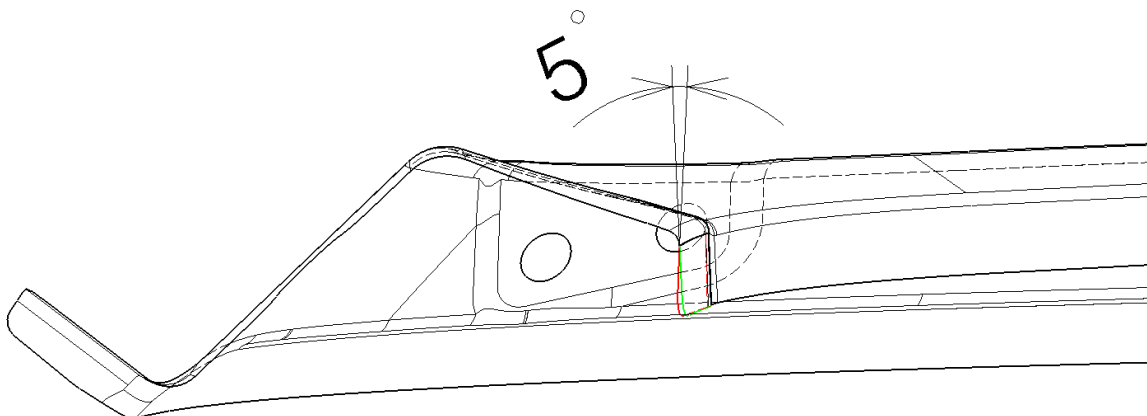
Obrázek 29 Vyznačení klenby v oblasti stěny dílu

Díl se vytočí kolem osy y, aby nedošlo k vytvoření klenby. Po vytočení se opakuje kontrola. Vytočením kolem osy y vznikne nová oblast klenby.



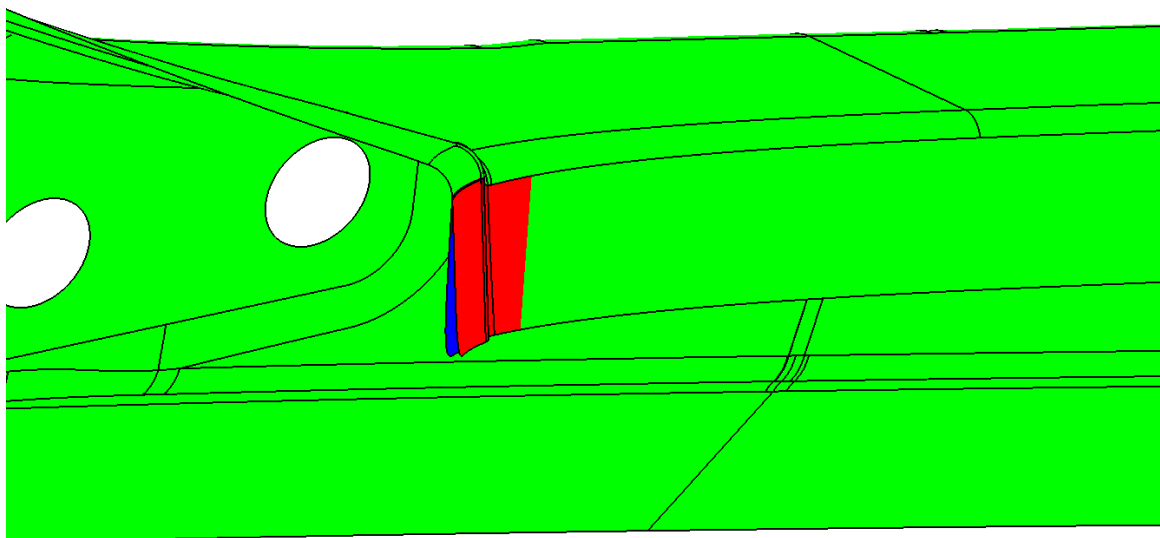
Obrázek 30 Vyznačení klenby v oblasti lemu

Vytočení kolem osy y nemůže být použito. Je zapotřebí upravit lem dílu. Lem musí být po úpravě rovnoběžný s osou z.



Obrázek 31 Úprava lemu na díle

Plocha lemu se otevře o 5°.



Obrázek 32 Srovnání lemu před a po úpravě

7 NASTAVENÍ SIMULACE

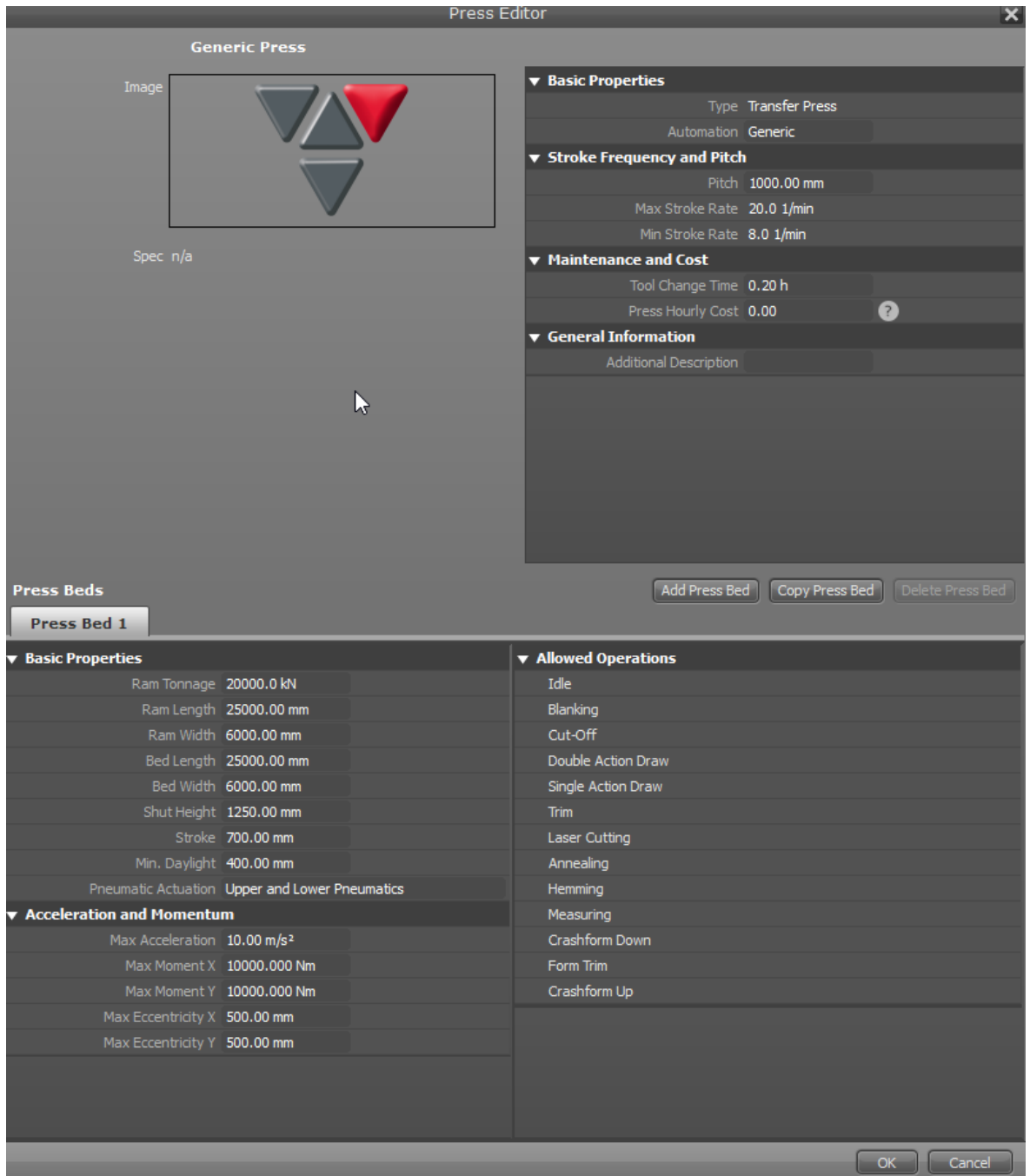
Do programu byly nahrány předem připravené plochy a křivky. Z knihovny materiálů byla vybrána ocel DX 54D a nastavíme tloušťku materiálu 1,5 mm.

Nastavíme operace výrobního procesu. První operace (D-20) je tažení podle plochy tažníku a přidržovače. Druhá operace (F-30) je částečné vystřihnutí okraje dílů. Třetí operace (F-40) je ohnutí výstřižků pro vytvoření lemu. Poslední operace (F-50) vystřihne zbytek okraje dílů a pomocí klínu se vystřihnou kruhové otvory. Vystřihnutí kruhových otvorů bylo provedeno v poslední operaci, protože v předchozích operacích by mohlo dojít k deformaci tvaru otvorů.



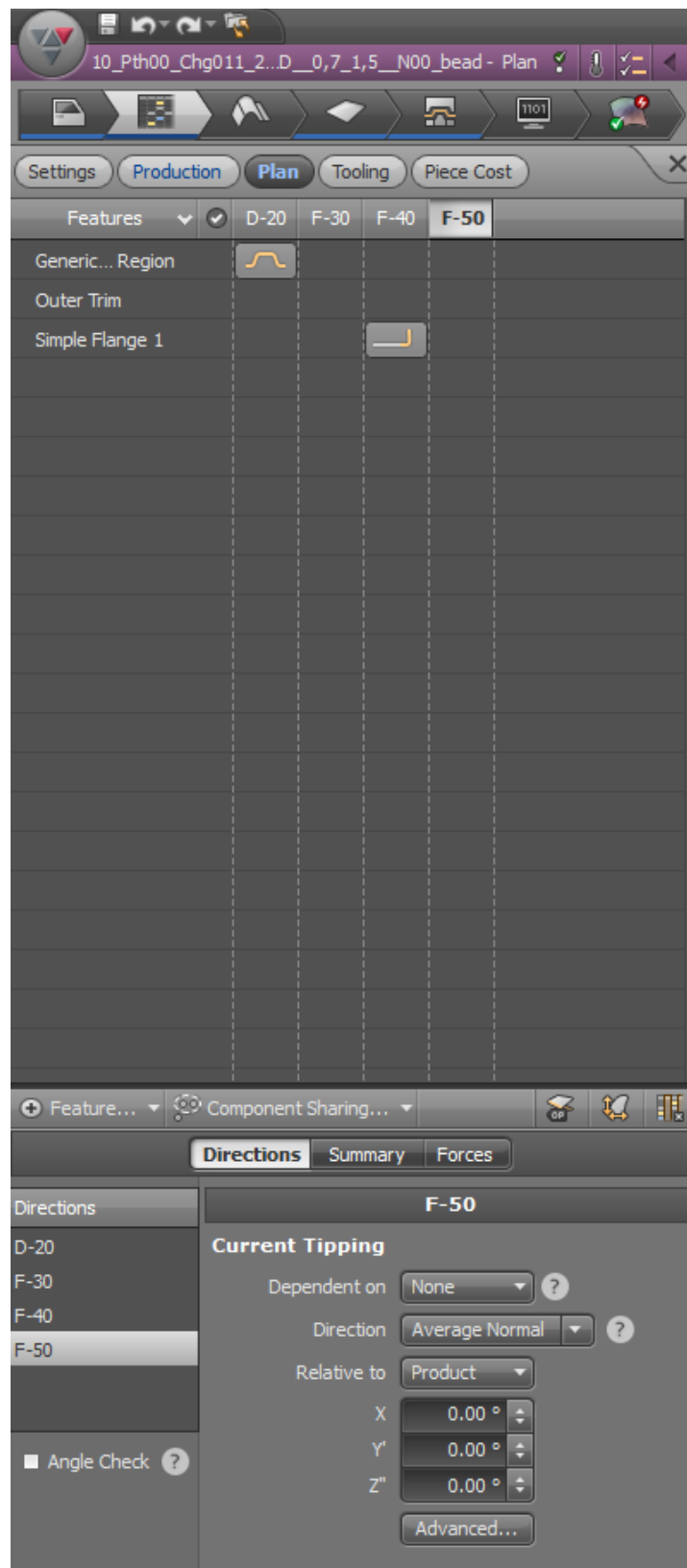
Obrázek 33 Nastavení operací výrobního procesu

Pro nastavení simulace se použije programem nastavený výchozí lis. Beran lisu má k dispozici tažnou sílu o velikosti 2000 tun. Pro uložení nástroje do lisu musí základna pro uložení a beran mít šířku 6000 mm a délku 25000 mm.



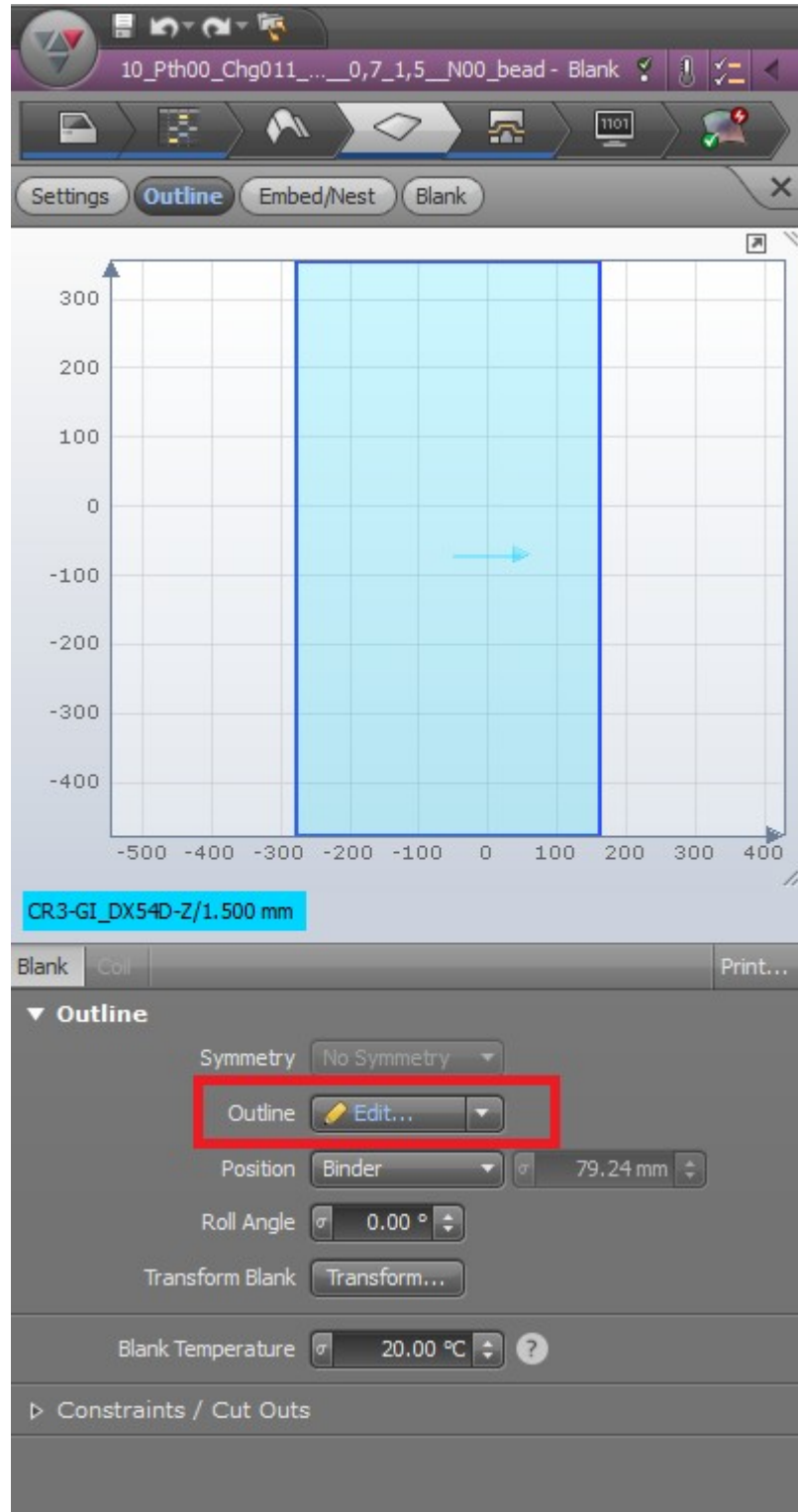
Obrázek 34 Parametry lisu [39]

V nastavení plánu operací byly vybrány použité technologie. Pro první operaci hluboké tažení a pro třetí operaci ohyb nahoru.

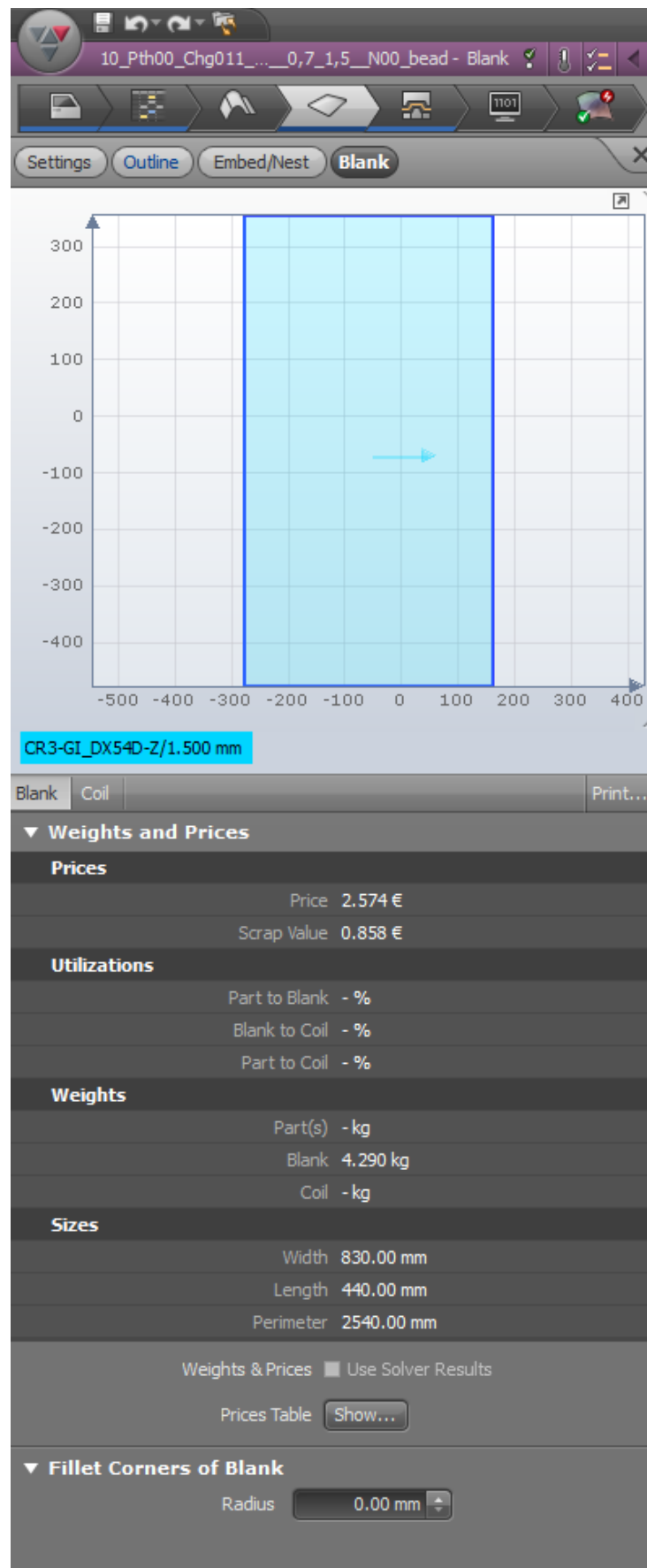


Obrázek 35 Nastavení technologií výrobních operací

Dále se nastavuje velikost platiny (polotovaru). Obrys platiny byl nahrán, jako křivka, vytvořená v CATII. Platina má na šířku 830 mm a na délku 440 mm. Šířka samotného svitku bude 830 mm.

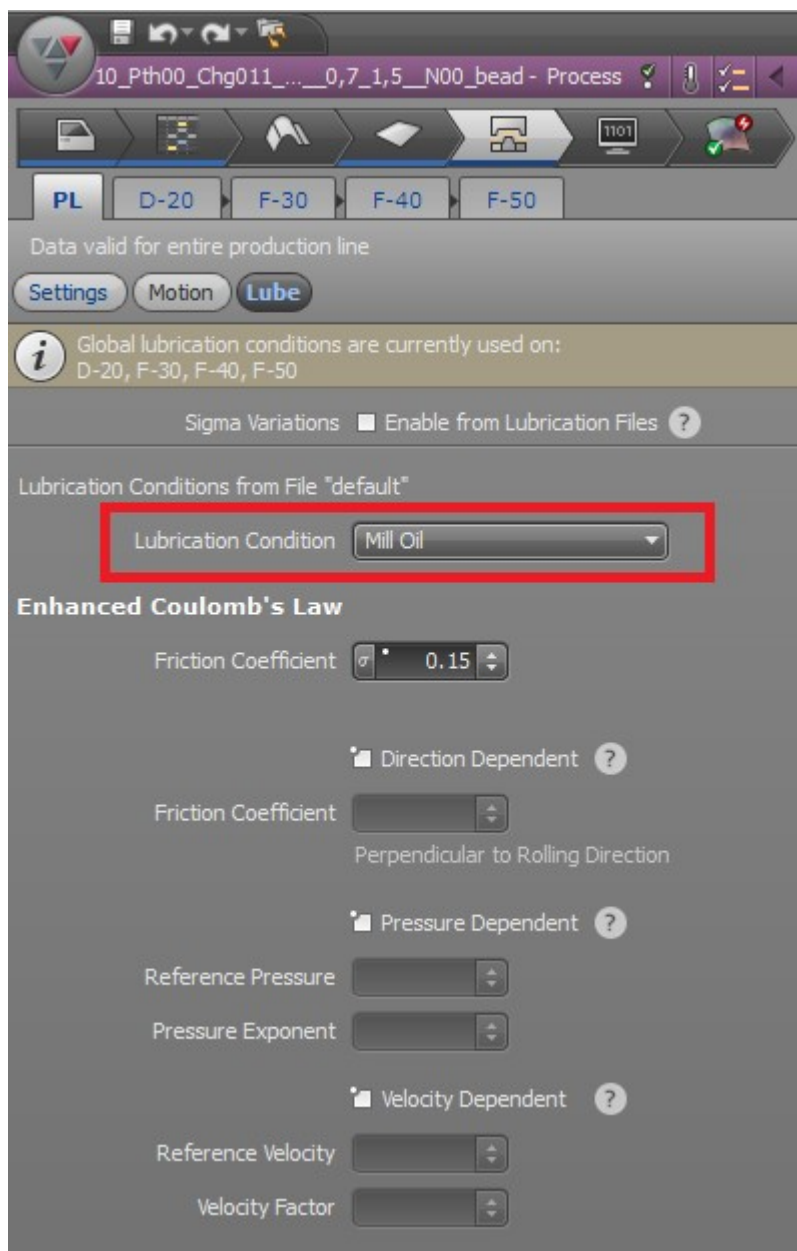


Obrázek 36 Nastavení obrysu platiny



Obrázek 37 Velikost platiny

Mazivo se bude před první operací nanášet na platinu. Jako mazivo se vybere řezný olej.



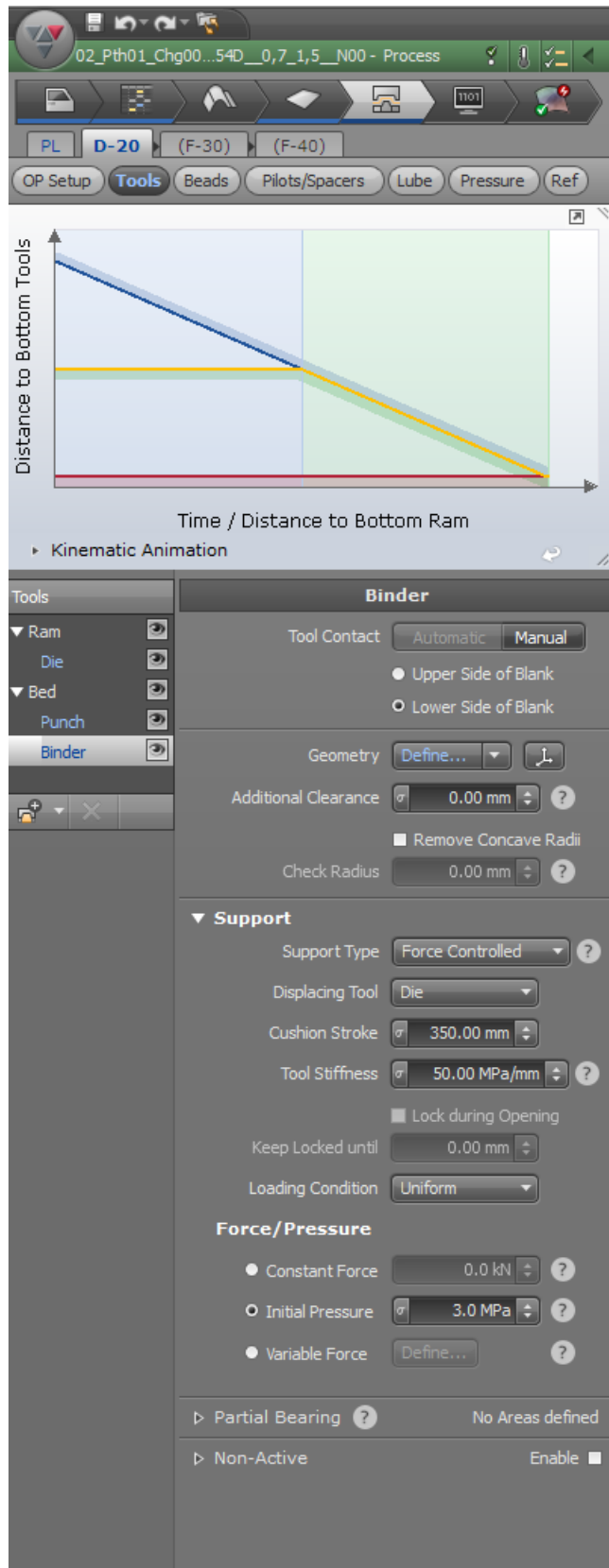
Obrázek 38 Nastavení maziva

Dalším krokem je nastavení ploch tažníku, tažnice a přidržovače. Síla přidržovače na první simulaci byla ponechána výchozí. Pokud nastavená síla není dostatečná na odlisování, protože reakční síla je větší, je potřeba postupně přidávat sílu.

Typ kontroly použité síly přidržovače:

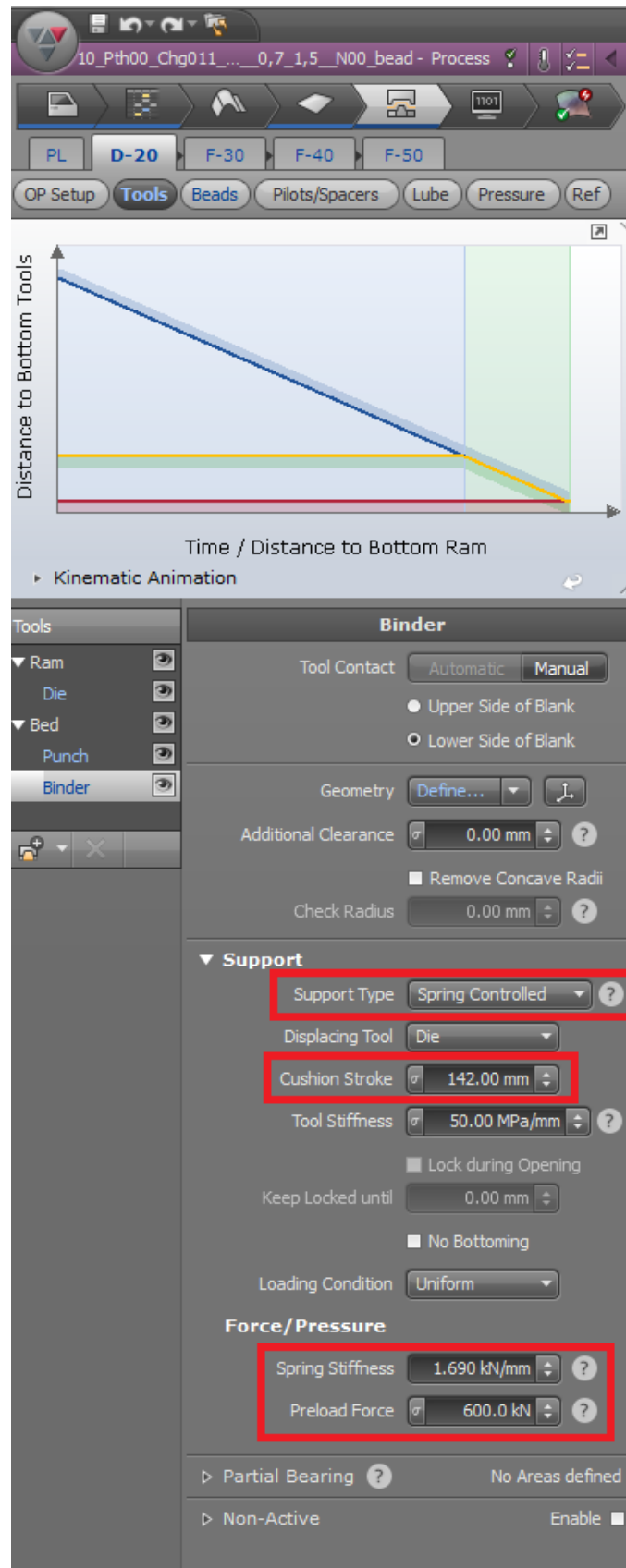
- Kontrola síly - specifikovaná síla je aplikována po uzavření nástroje opačným nástrojem;

- Kontrola pružinou - síla nástroje je specifikována jako síla předpětí. Pokud je definována tuhost pružiny, síla nástroje se mění lineárně s posunutím nástroje.



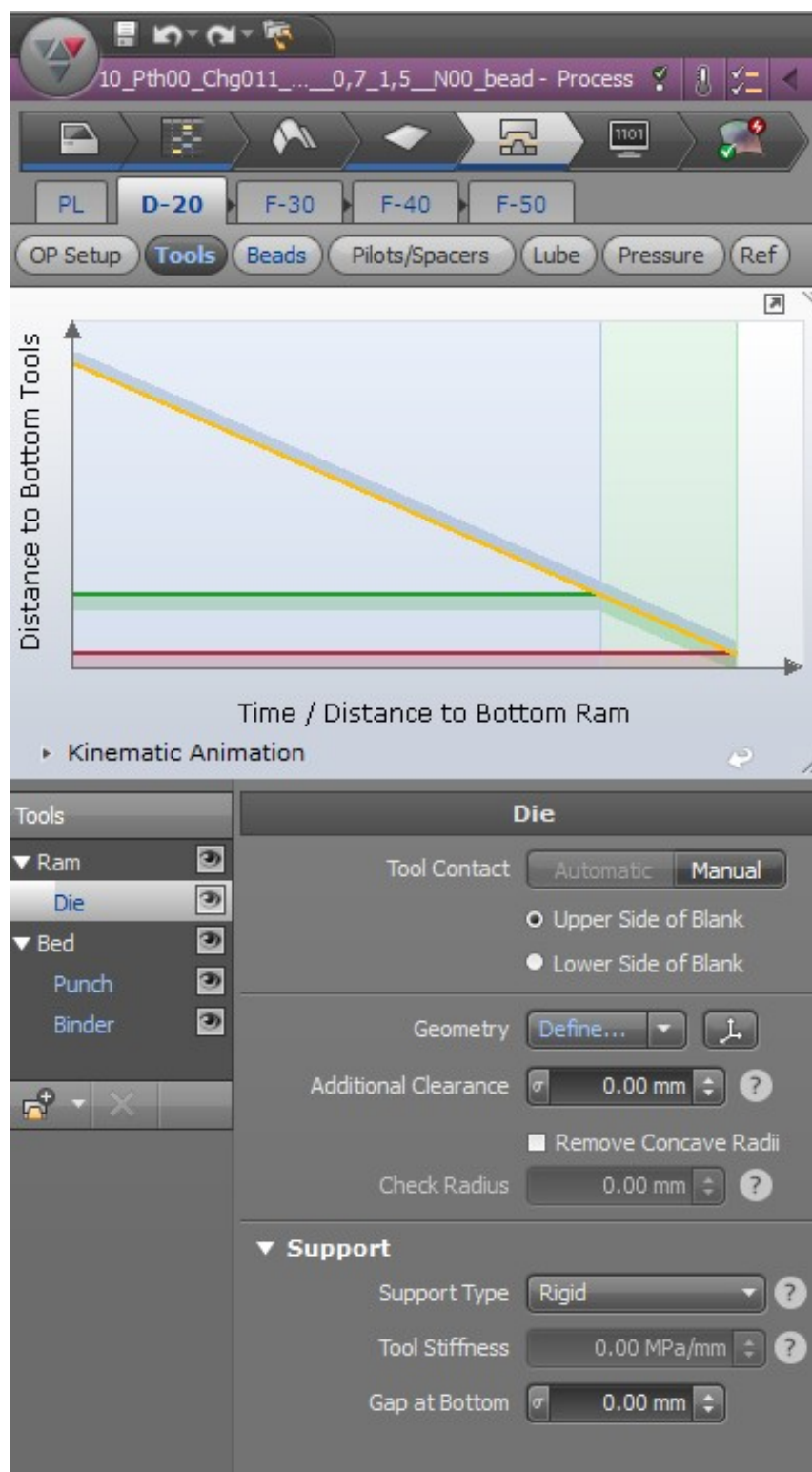
Obrázek 39 Výchozí nastavení přidržovače

Typ kontroly přes pružinu byla použita, protože se v reálném procesu používá.

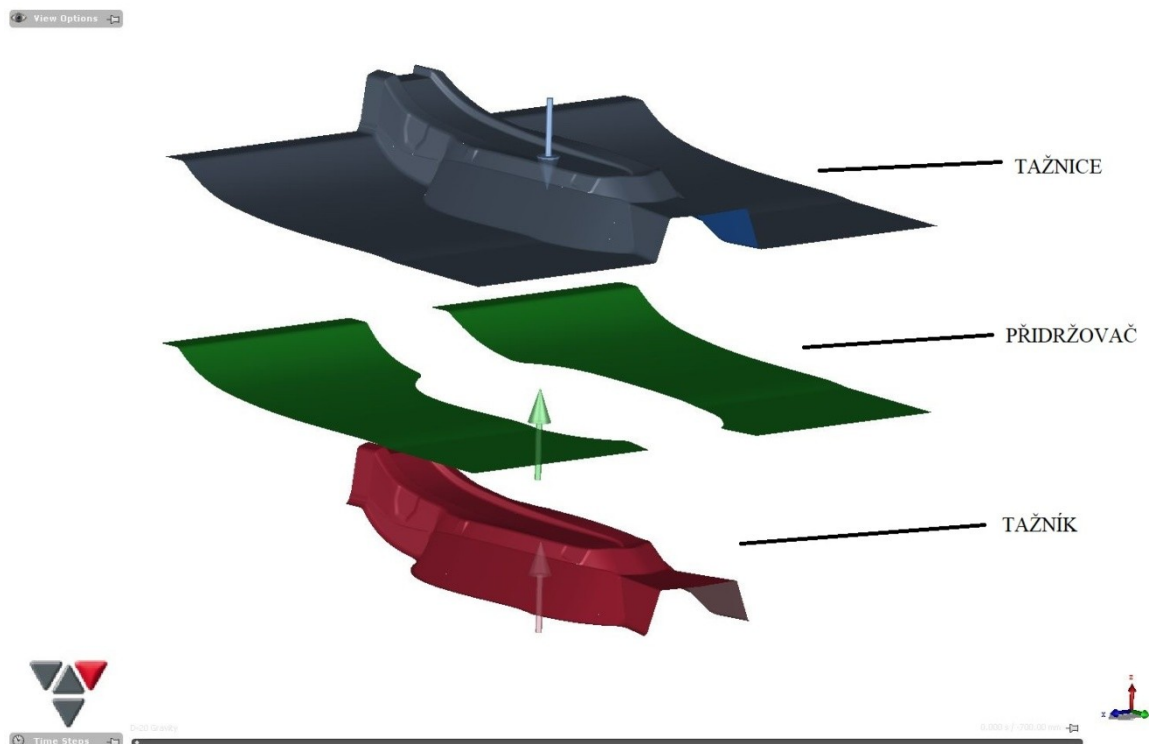


Obrázek 40 Nastavení přidržovače

Nastavení tažnice a tažníku bylo ponecháno výchozí.

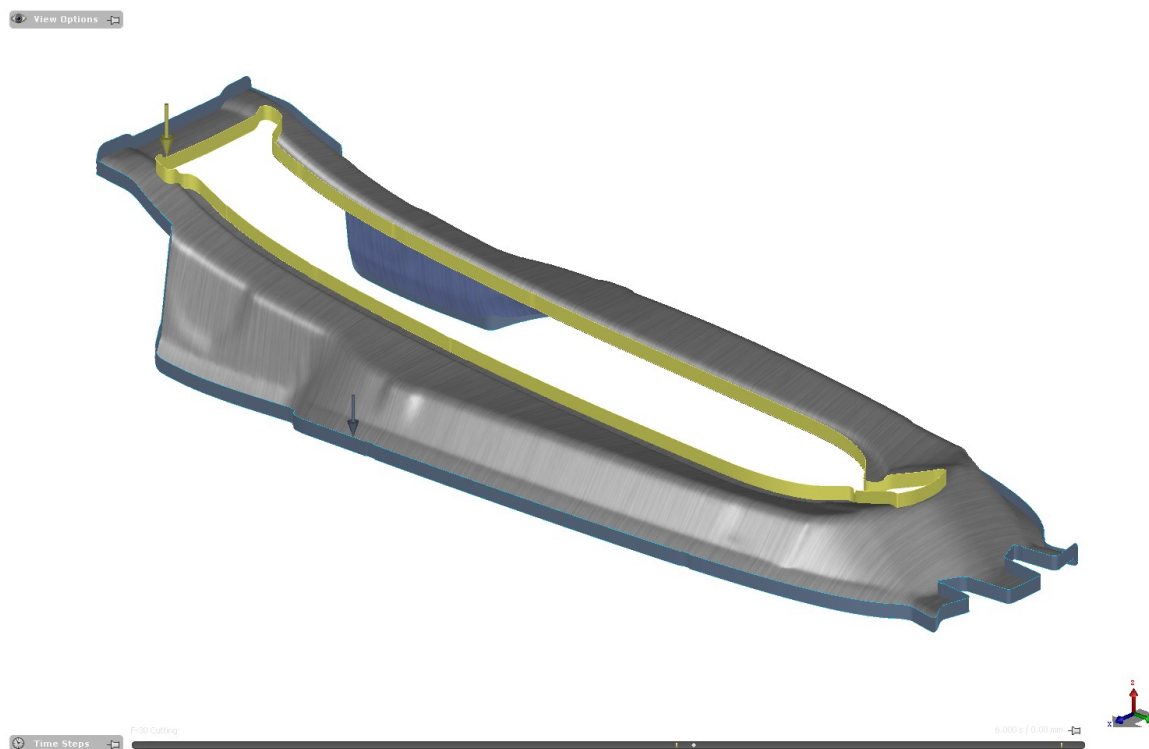


Obrázek 41 Nastavení tažnice a tažníku



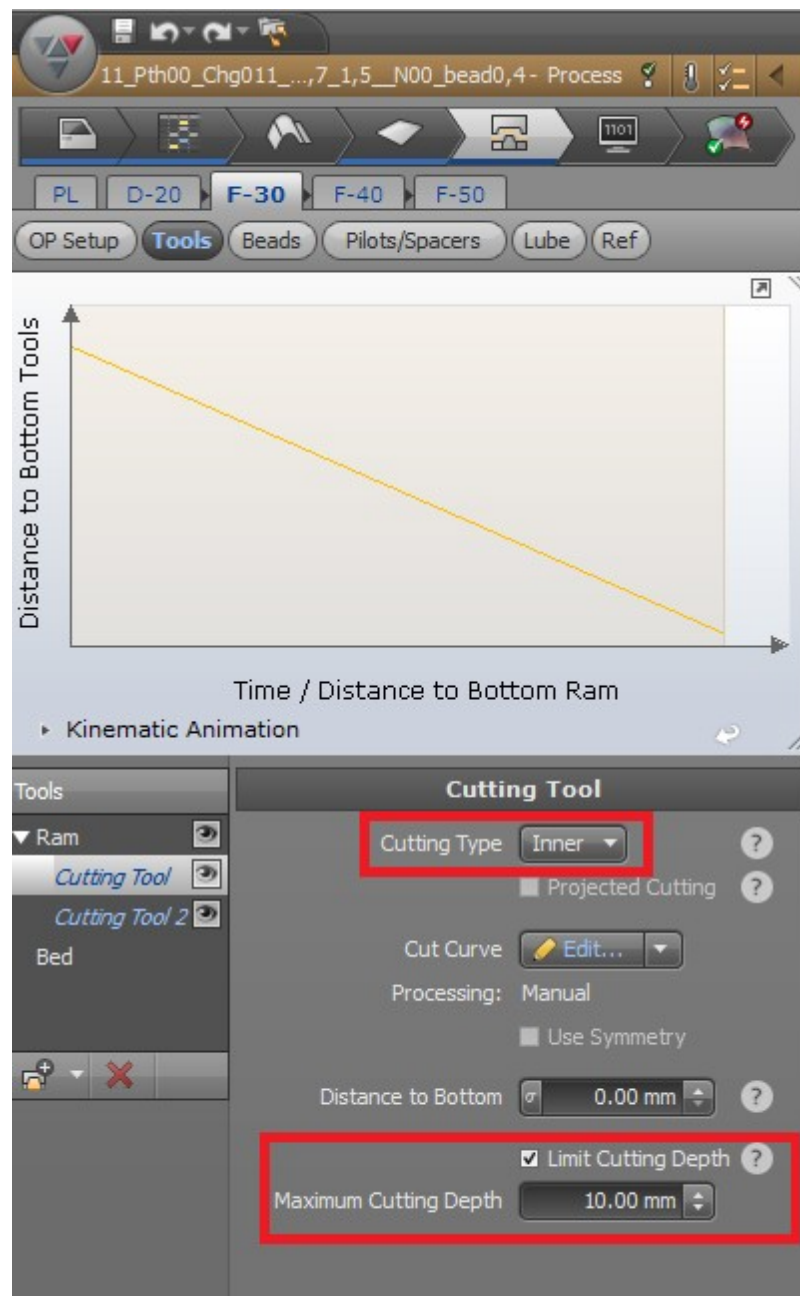
Obrázek 42 *Nastavení ploch pro první operaci*

V druhé operaci byl nastaven střížník pro vystříhnutí částečného okraje.

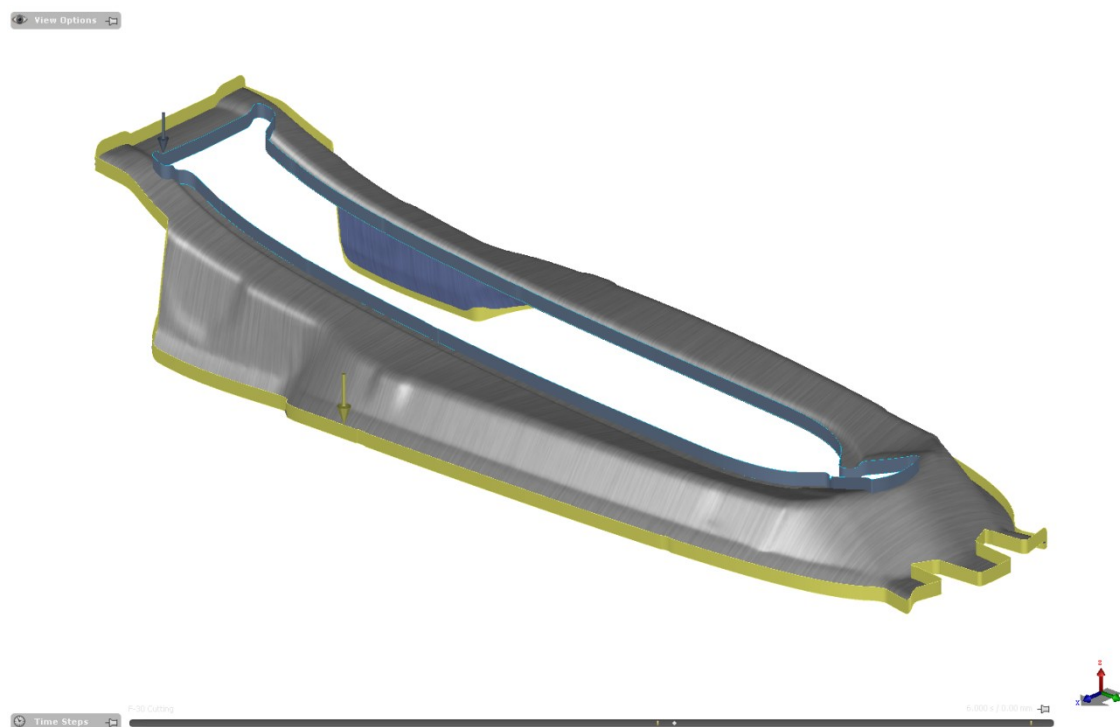


Obrázek 43 *Nastavení křivky stříhu uzavřeného obrysu*

Byly použity dvě křivky, pro které se nastavuje typ stříhu. První křivka stříhu po uzavření obryse má nastavené omezení hloubky stříhu na max. 10 mm.

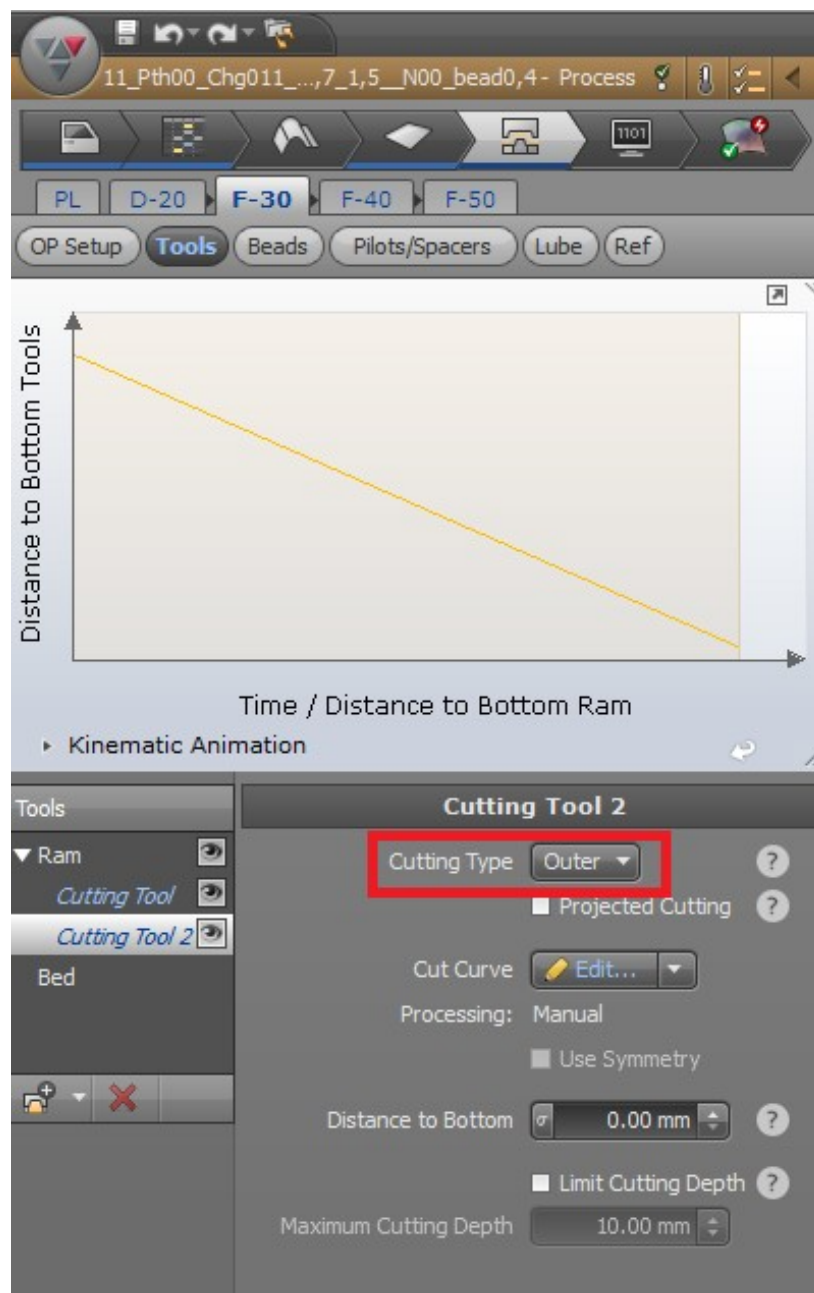


Obrázek 44 Nastavení střížníku druhé operace

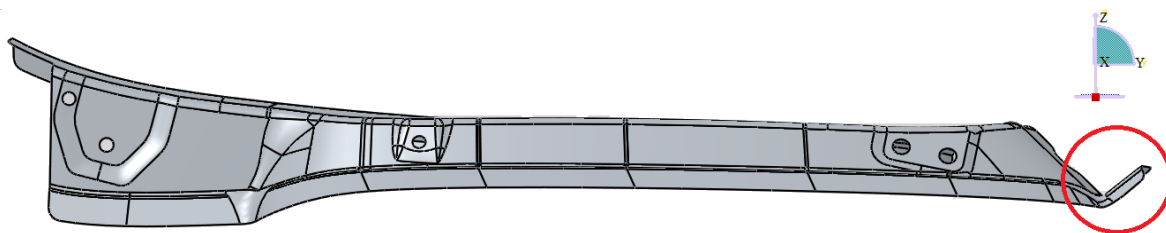


Obrázek 45 *Nastavení křivky stříhu otevřeného obrysu*

Nastavení stříhu po vnějším otevřeném obryse.

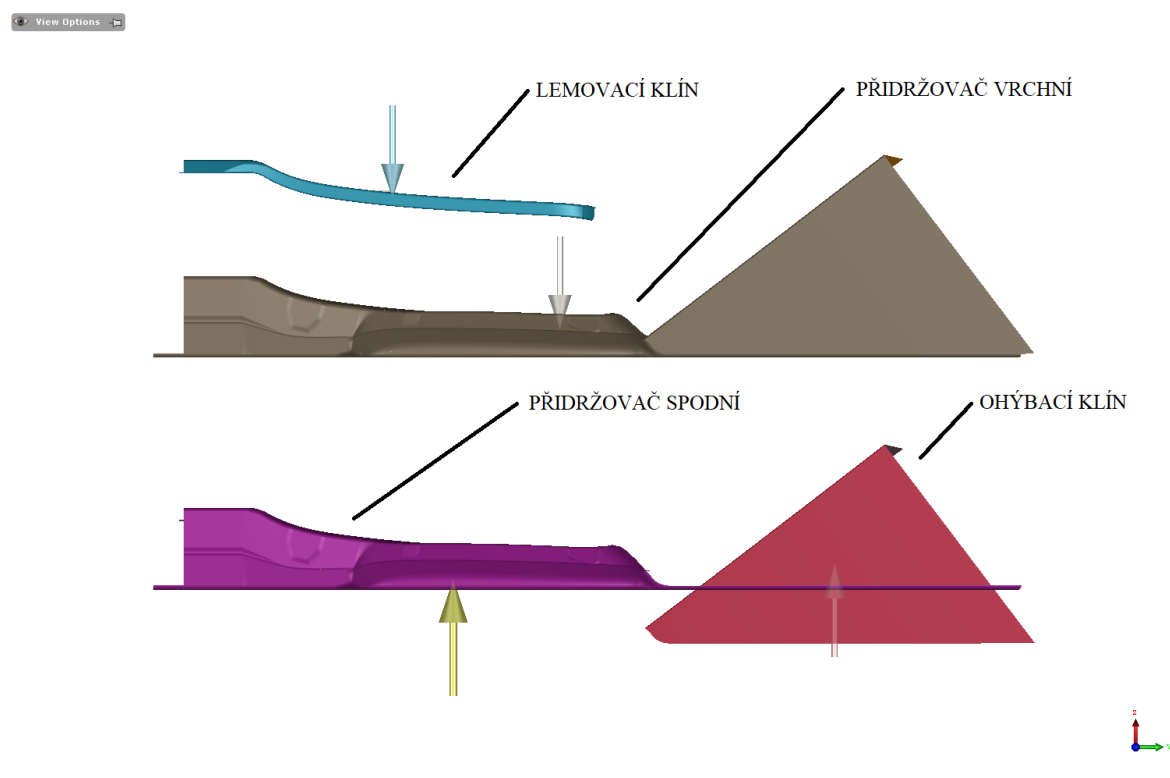


Obrázek 46 Nastavení střížníku druhé operace



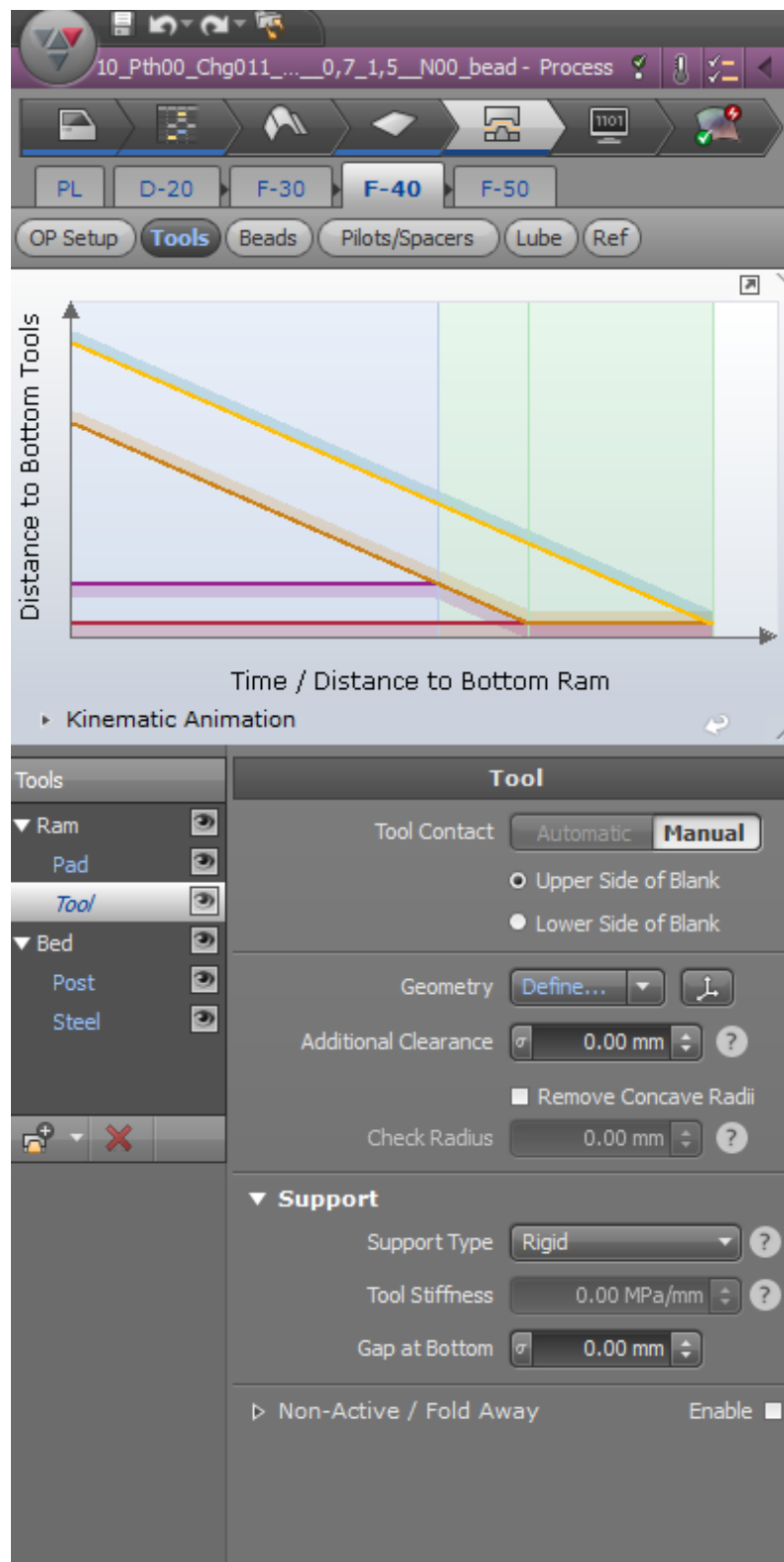
Obrázek 47 Vyznačení přední packy

Následuje nastavení třetí operace, kdy byl vytvořen lem směrem dolů a zároveň ohýbáme přední packu směrem nahoru (Obr. 48).



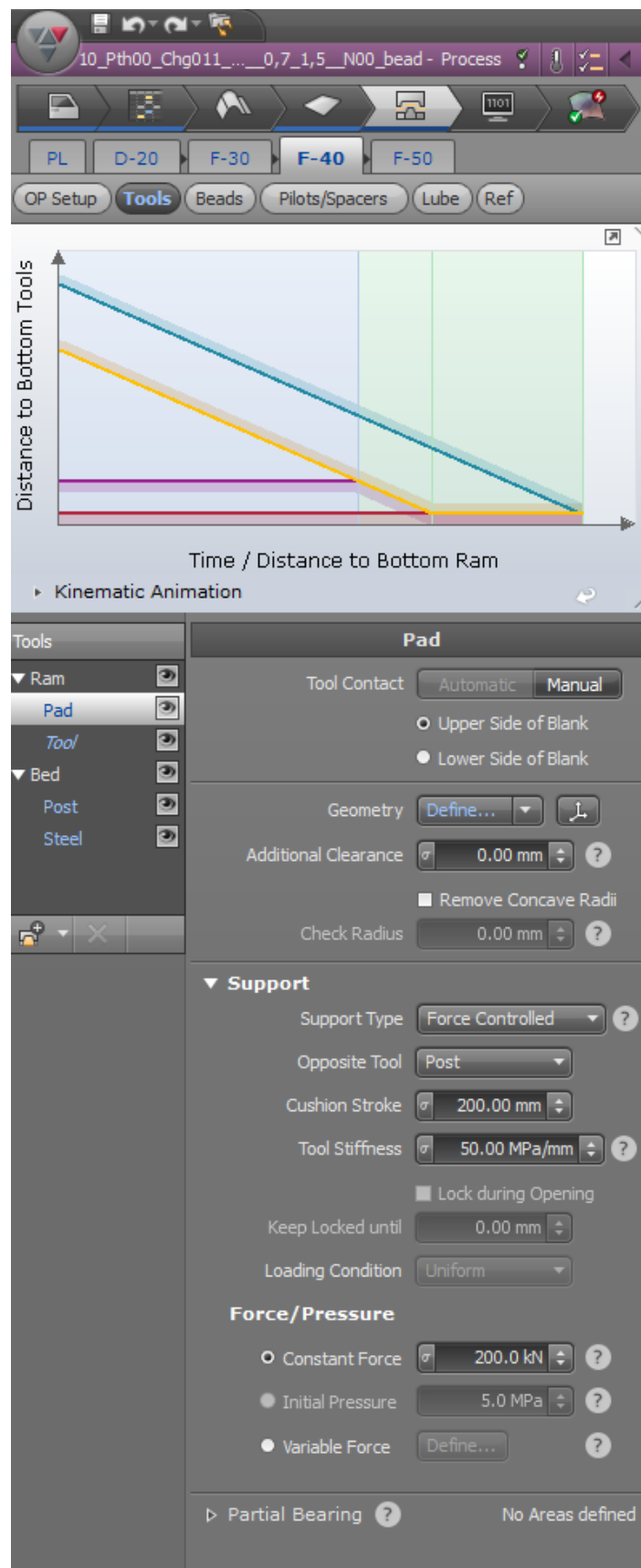
Obrázek 48 Nastavení ploch třetí operace

Nastavení lemovacího a ohýbacího klínu bylo ponecháno výchozí.



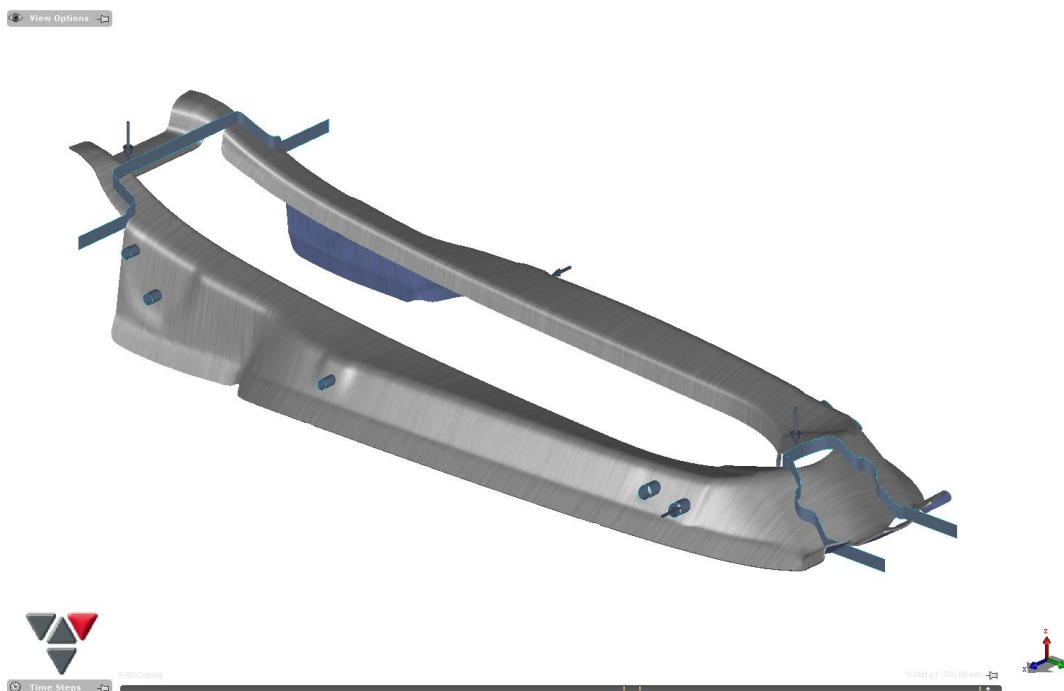
Obrázek 49 Nastavení lemovacího a ohýbacího klínu

Nastavení vrchního a spodního přidržovače bylo ponecháno výchozí.

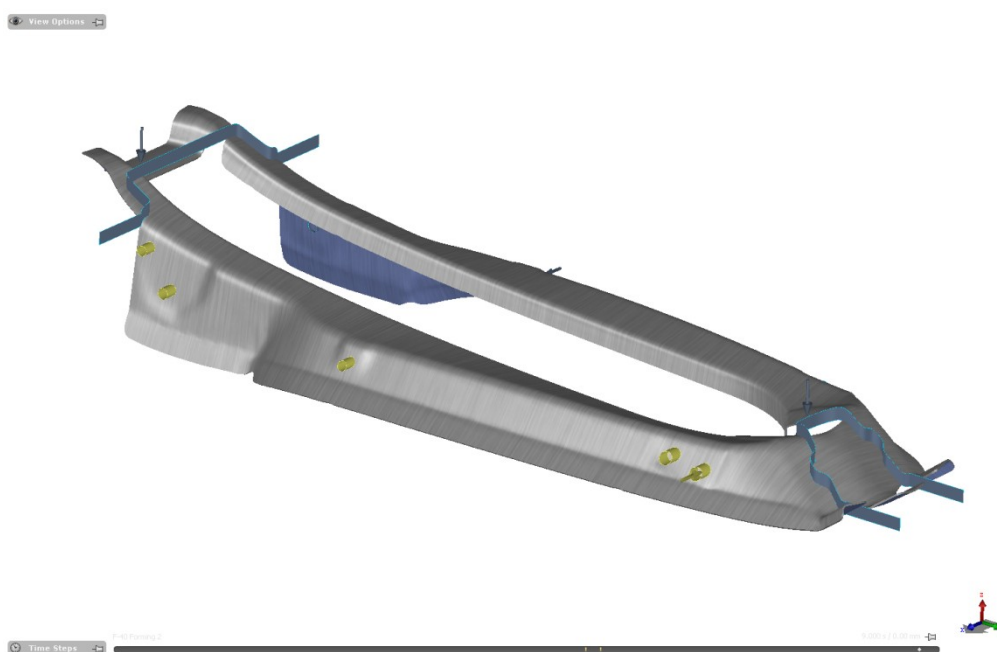


Obrázek 50 Nastavení vrchního a spodního přidržovače

V poslední operaci došlo k oddělení dílů od sebe a vytvoření kruhových otvorů.

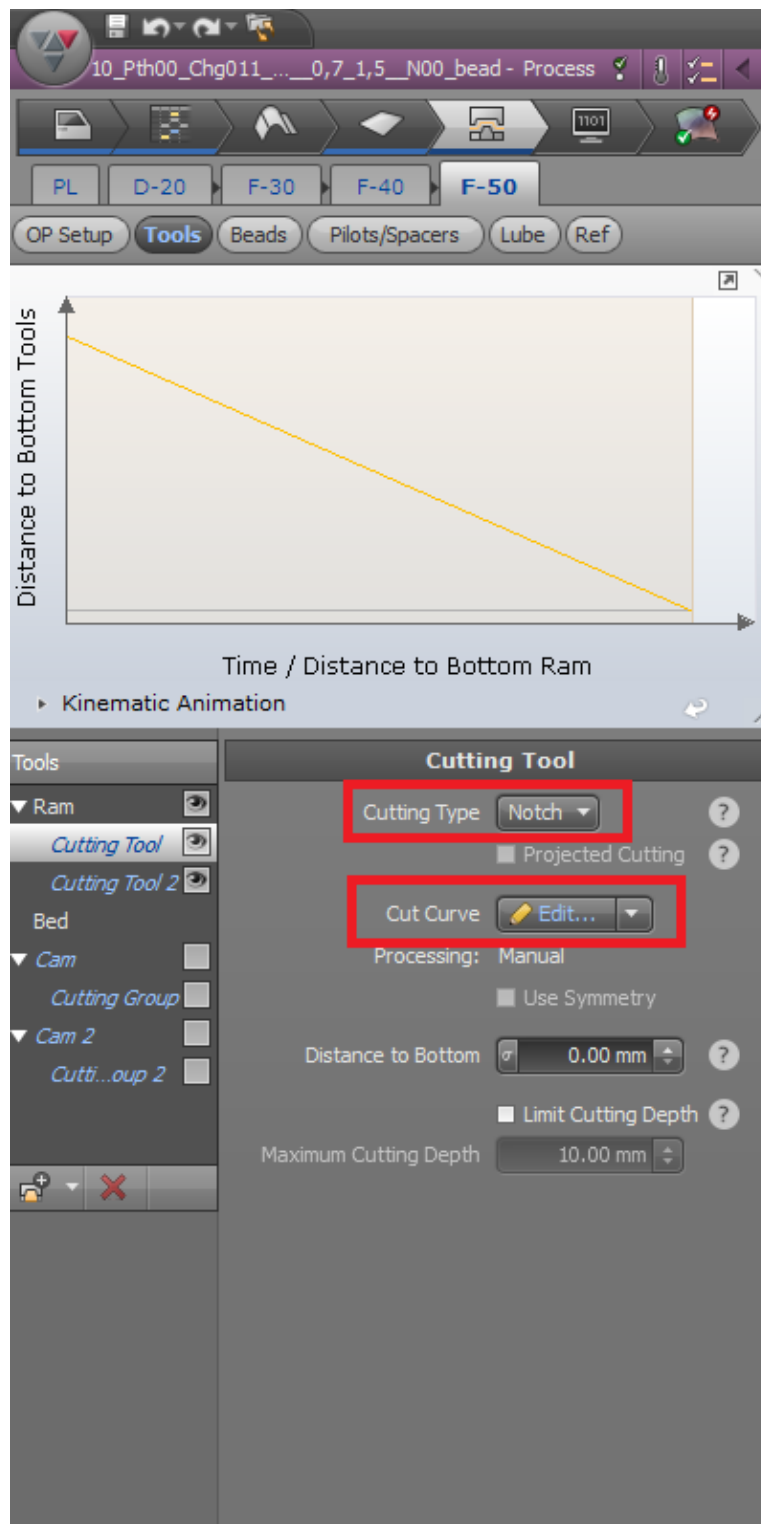


Obrázek 51 *Nastavení křivek pro poslední operaci*



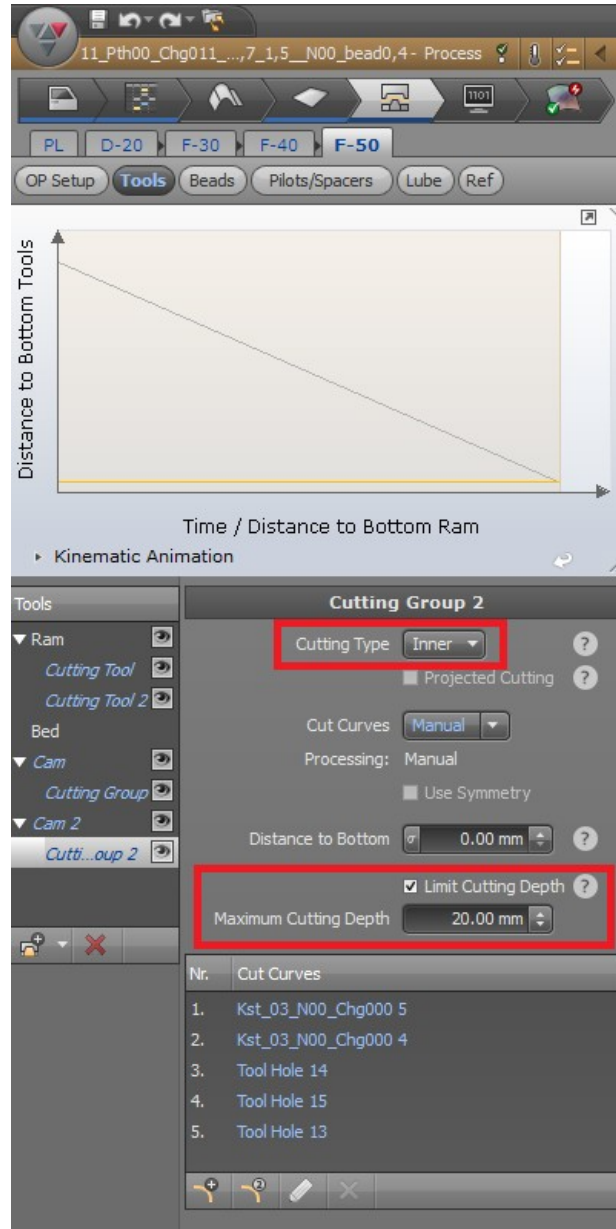
Obrázek 52 *Nastavení křivek pro vystřihnutí otvorů*

V poslední operaci byly nastaveny dvě křivky střížníku pro vystřihnutí okrajů. Typ stříhu je nastavený, jako otevřený.



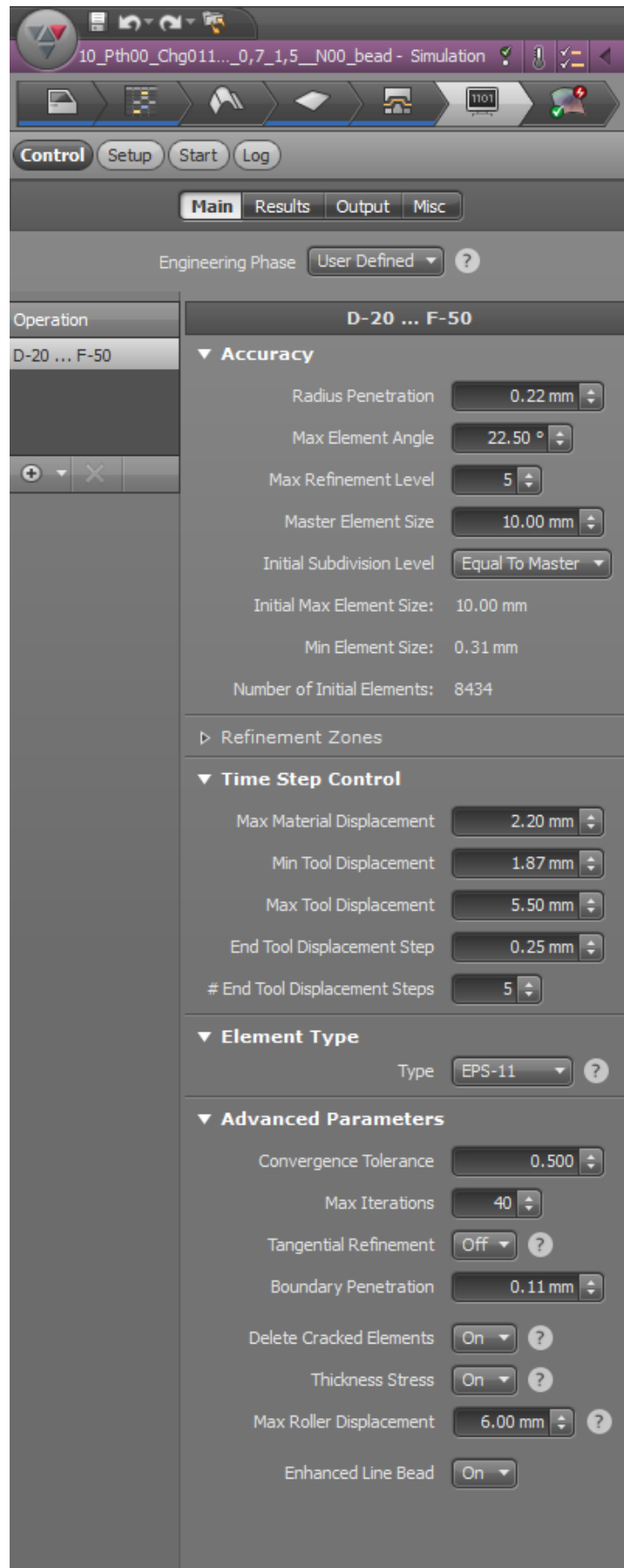
Obrázek 53 Nastavení střížníku poslední operace

Pro vytvoření kruhových otvorů na boku dílu byly použity dva boční klíny. Křivky byly nastaveny stříhem po uzavření obryse s nastavením omezení hloubky stříhu na max. 20 mm.



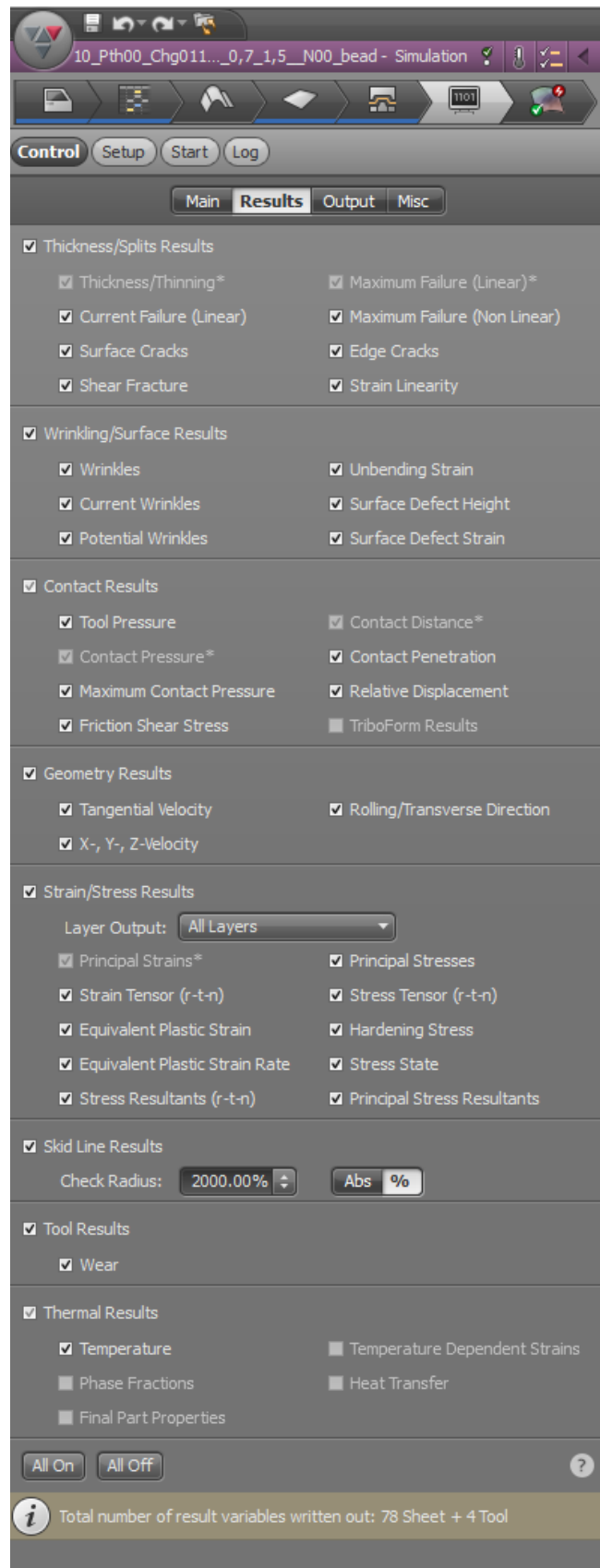
Obrázek 54 Nastavení střížníku poslední operace

V posledním kroku byla nastavena výpočtová simulace. Typ elementu byl zadáný základní EPS (Elastic Plastic Shell), používaný pro většinu procesů.



Obrázek 55 Nastavení simulace

Před spuštěním simulace se zkontroluje zapnutí požadovaných výsledků.



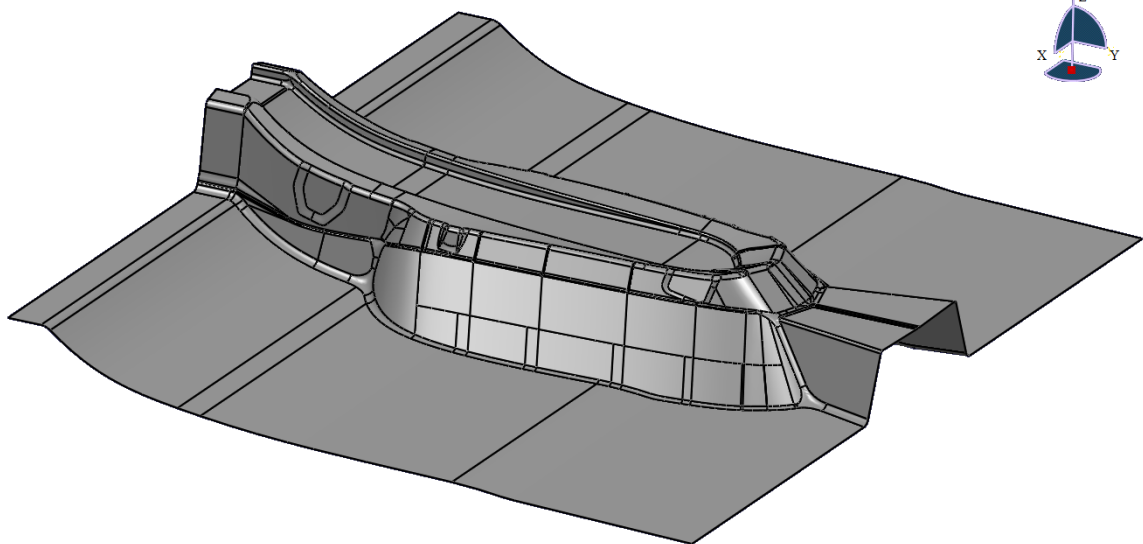
Obrázek 56 Nastavení výsledků simulace

8 OPTIMALIZACE TVARU SOUČÁSTÍ A VÝROBNÍ TECHNOLOGIE

V první operaci chceme dosáhnout nejlepších výsledků. Výsledky procesu tažení ovlivňuje tvar tažníku, tvar a vzdálenost přídržovače od dílu a velikost a umístění brzd. Pro optimalizaci první operace byly vytvořeny verze s různým nastavením předem zmíněných parametrů.

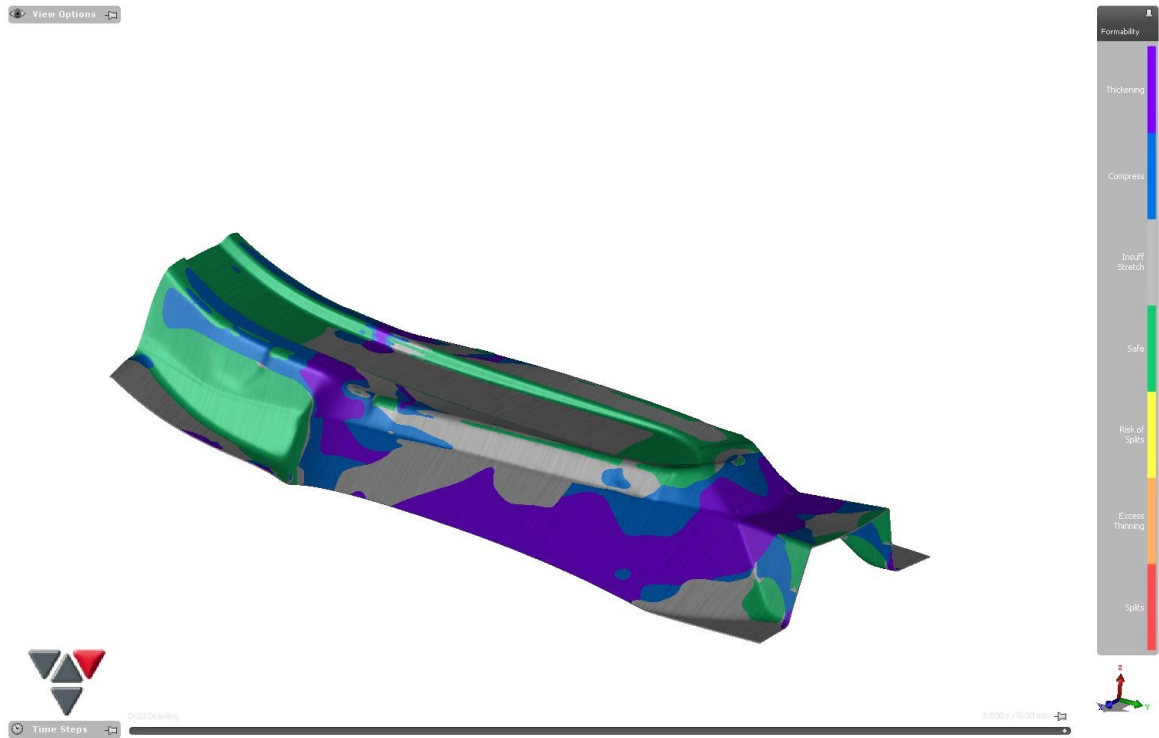
8.1 Plocha tažníku a přídržovače verze A

Pro vytvarování zadaného dílu je potřeba vymodelovat plochy tažníku a přídržovače (Obr. 57). Tyto plochy mají velký vliv na vyhodnocení tvářitelnosti.

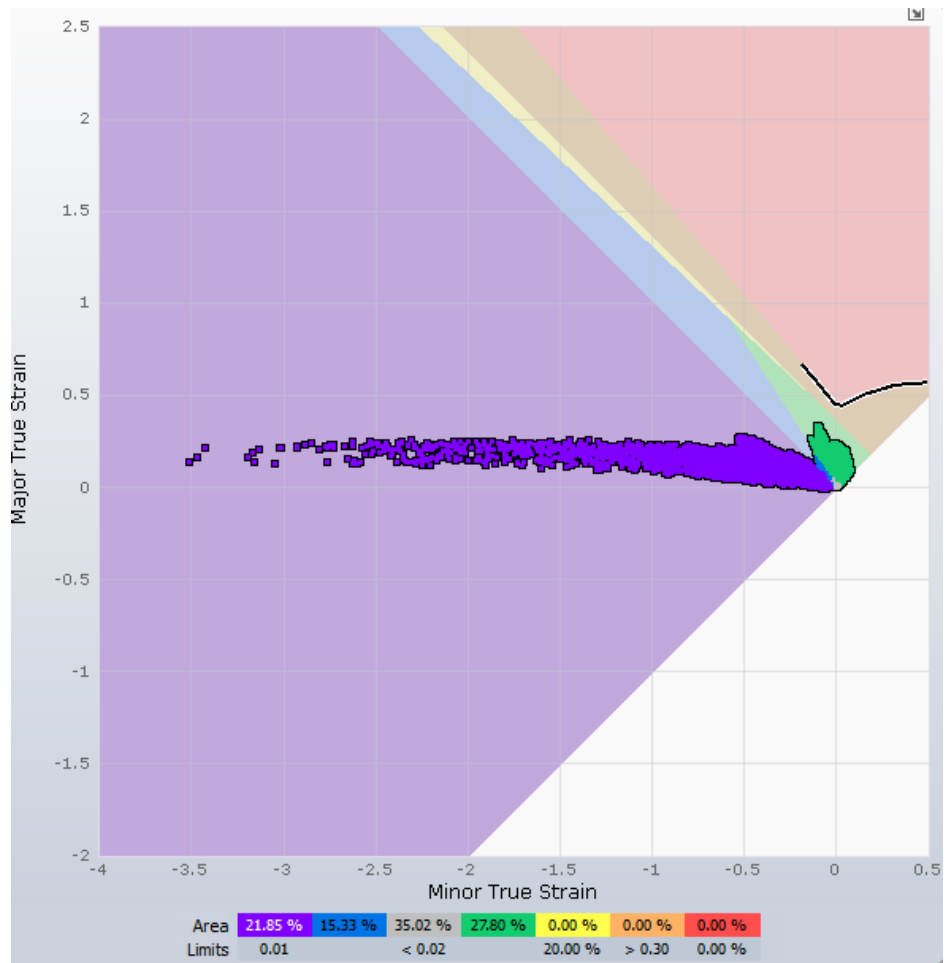


Obrázek 57 Plocha tažníku a přídržovače verze A

Verze A má přídržovač kopírující konturu vrchní plochy tažníku. Poloměr zaoblení mezi tažníkem a přídržovačem je 10 mm.

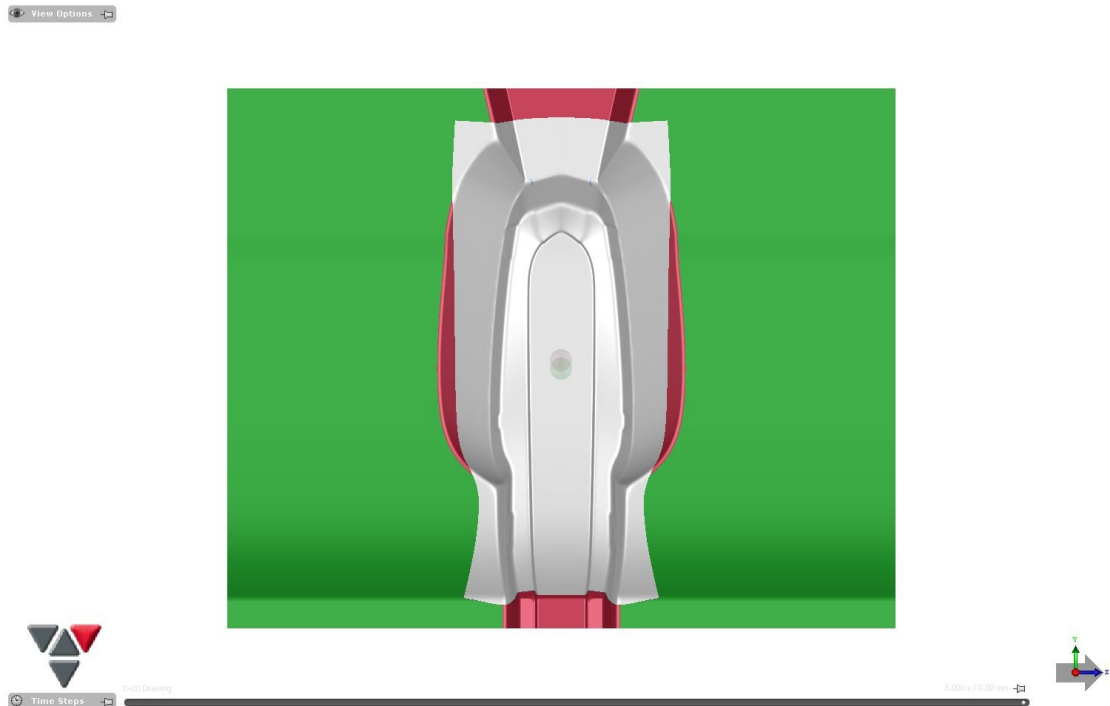


Obrázek 58 Výsledek tvářitelnosti verze A



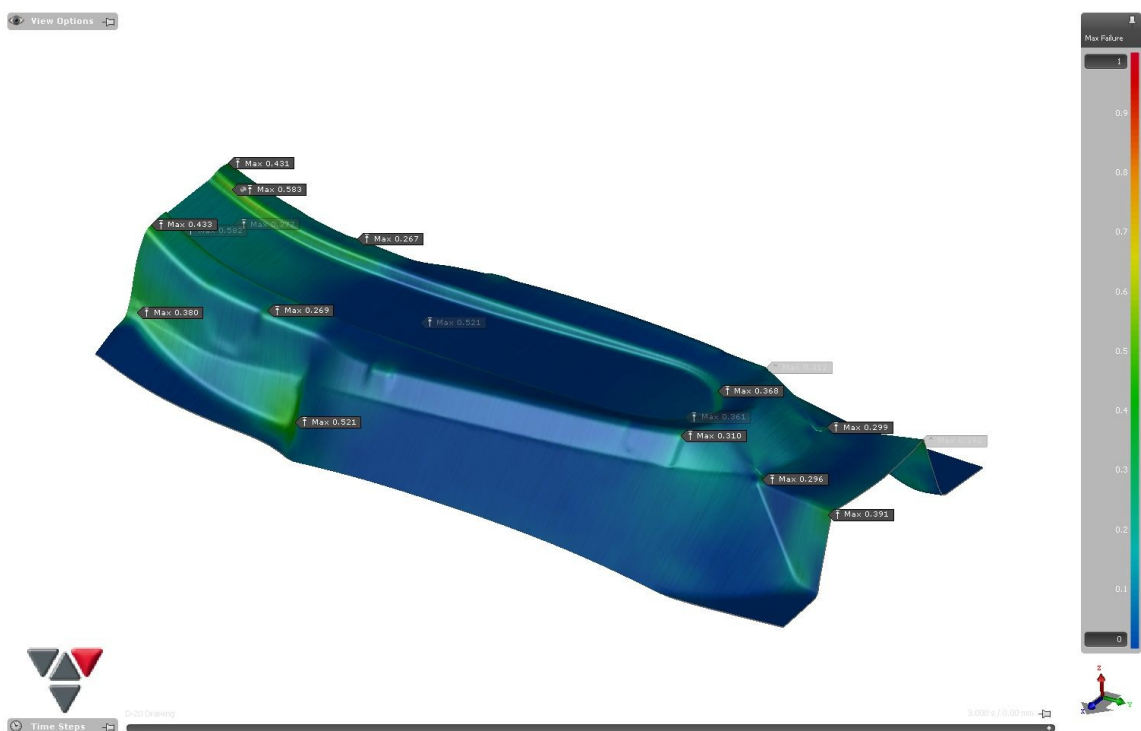
Obrázek 59 FLD verze A

Pro verzi A je oblast bezpečná 27,8 %, oblast zvlnění 15,33 % a oblast nevyužitá 35,02 %. Verze A má velkou oblast stlačení 21,85 %. Tato oblast je vytvořena únikem platiny z přidržovače (Obr. 60).



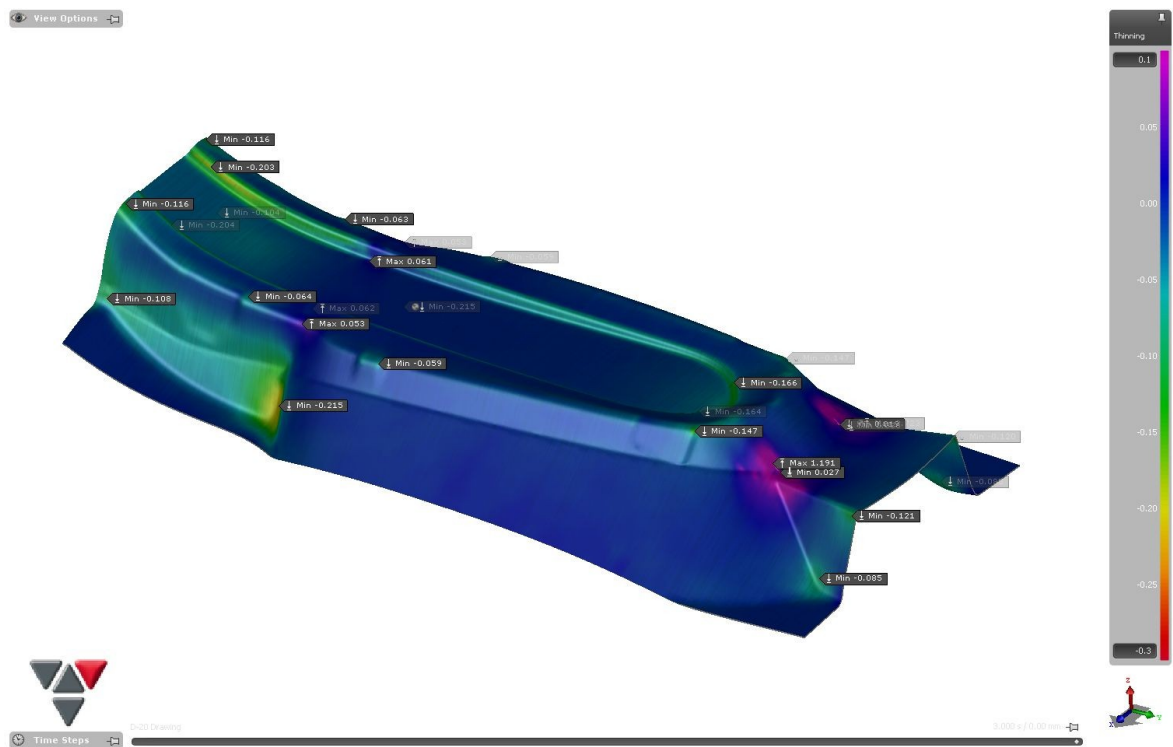
Obrázek 60 Vytvarování platiny verze A

Kritická hodnota 77 % pro max. porušení nebyla překročena. Max. hodnota je 58,3 %.

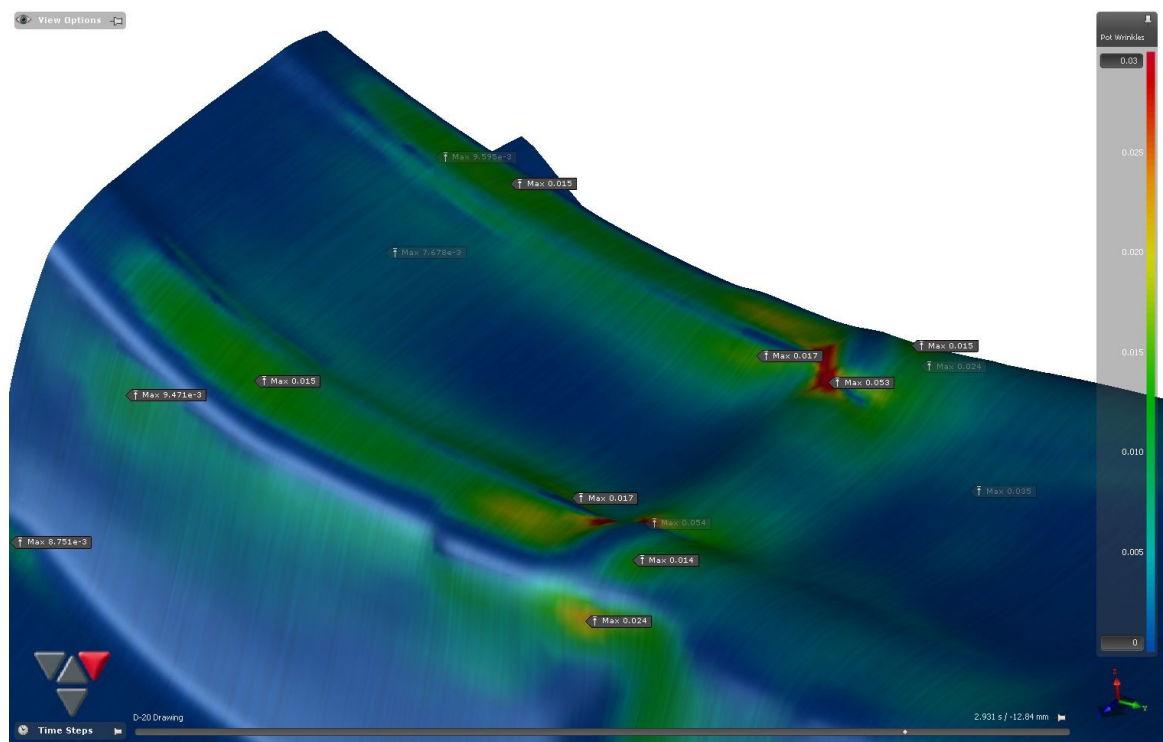


Obrázek 61 Max. porušení verze A

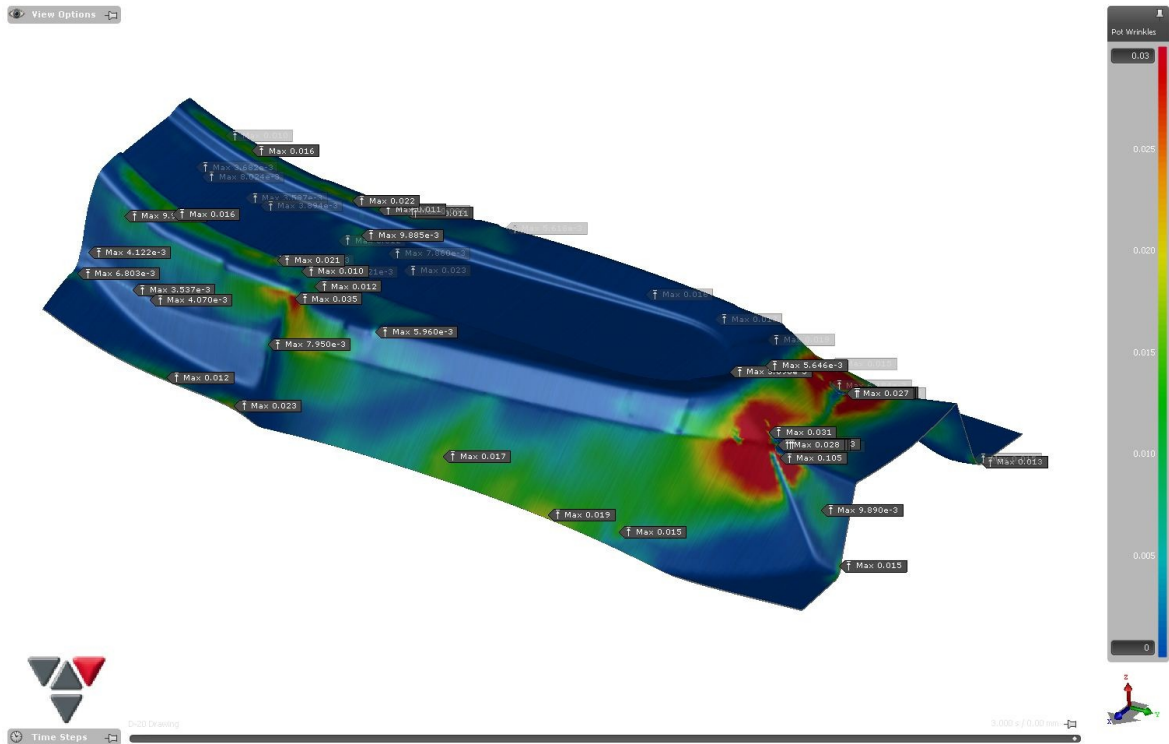
V oblasti ohybu přední packy dochází k stlačení materiálu max. 119,1 %. Kritická hodnota 25 % překročena.



Obrázek 62 Nadměrné ztenčení verze A



Obrázek 63 Zvlnění v průběhu operace verze A

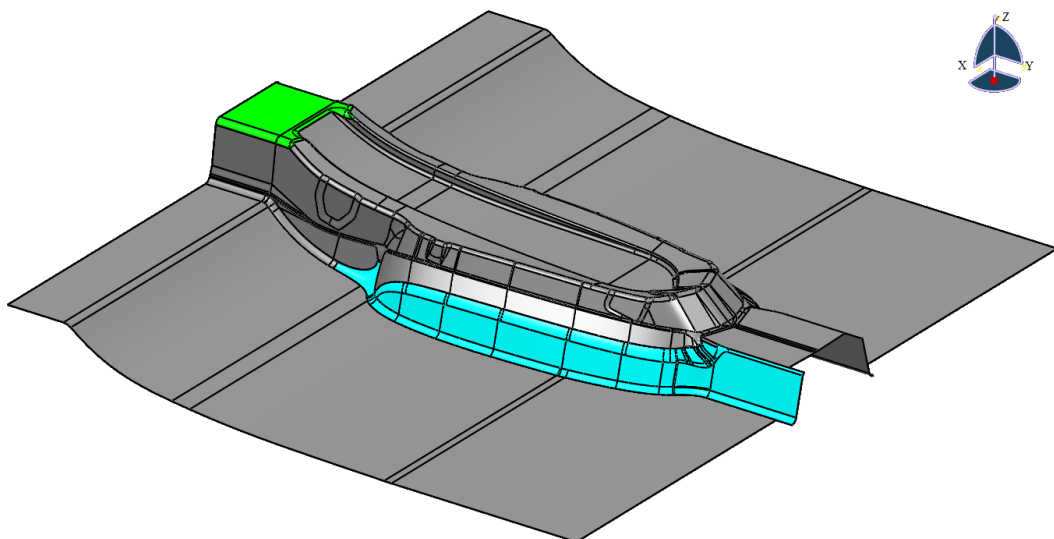


Obrázek 64 Zvlnění verze A

V procesu dochází k velkému zvlnění platiny v několika oblastech dílu. Plocha tažníku a přidržovače verze A je nevyhovující.

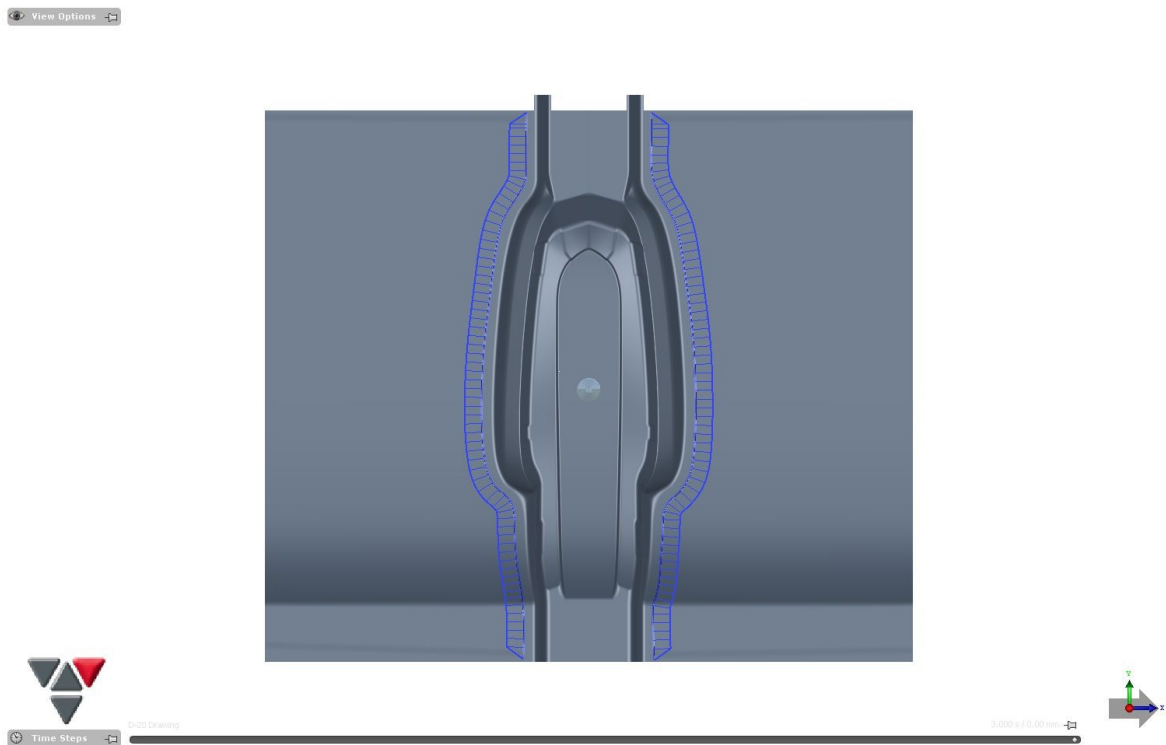
8.2 Plocha tažníku a přidržovače verze B

Pro verzi B došlo k úpravě tažníku změnou sklopení stěny pod dílem, aby nedocházelo k úniku platiny (Obr. 65 – světle modře). Taky došlo k úpravě náběhu platiny do prolisu (Obr. 65 - zeleně).



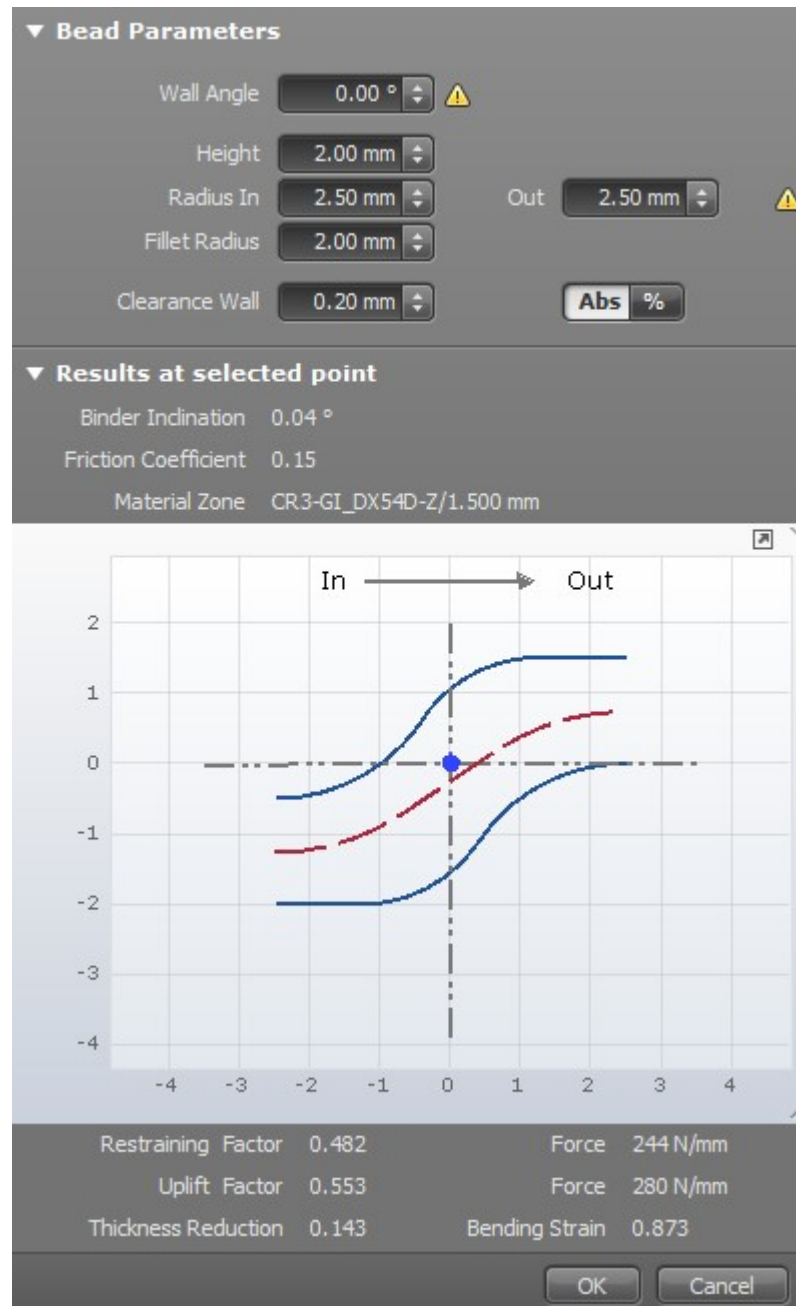
Obrázek 65 Plocha tažníku a přidržovače verze B

Další změnou je přidání brzd. Byly vytvořeny dvě křivky ležící na přídržovači. Po celé délce mají stejný rozměr.

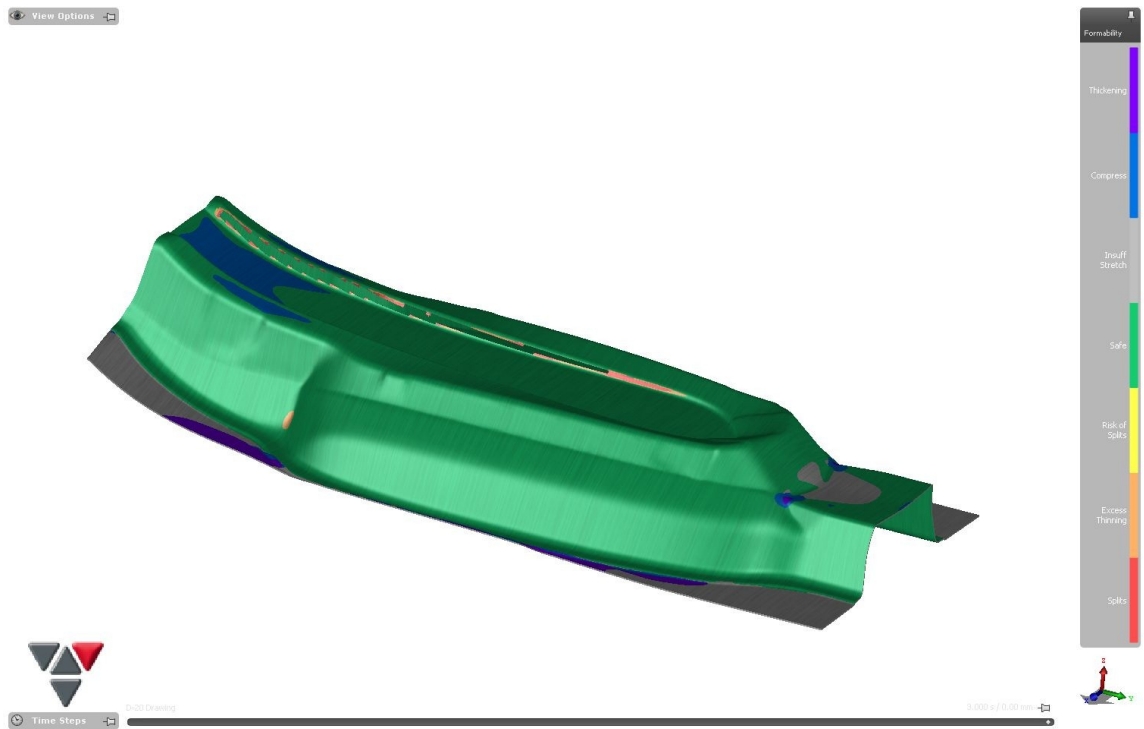


Obrázek 66 *Umístění brzd*

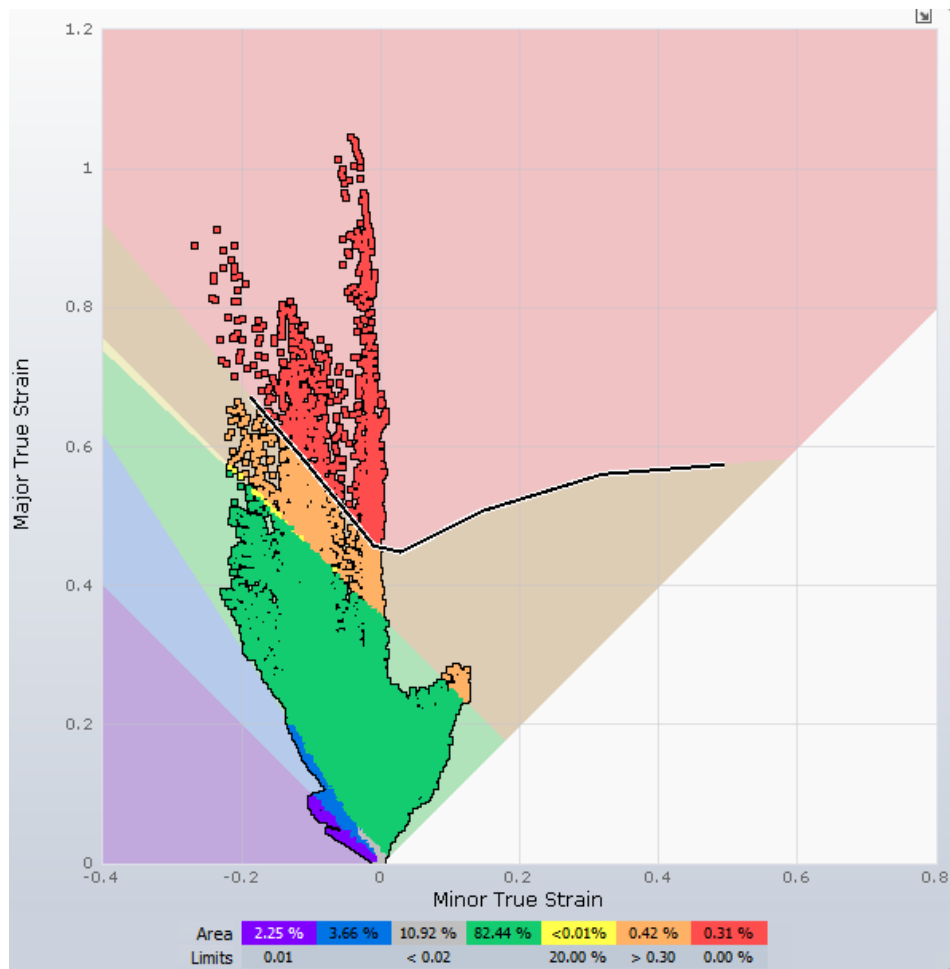
Vytvořené brzdy mají výšku 2 mm, nabíhající a vybíhající poloměr zaoblení 2,5 mm.



Obrázek 67 Velikost brzd verze B



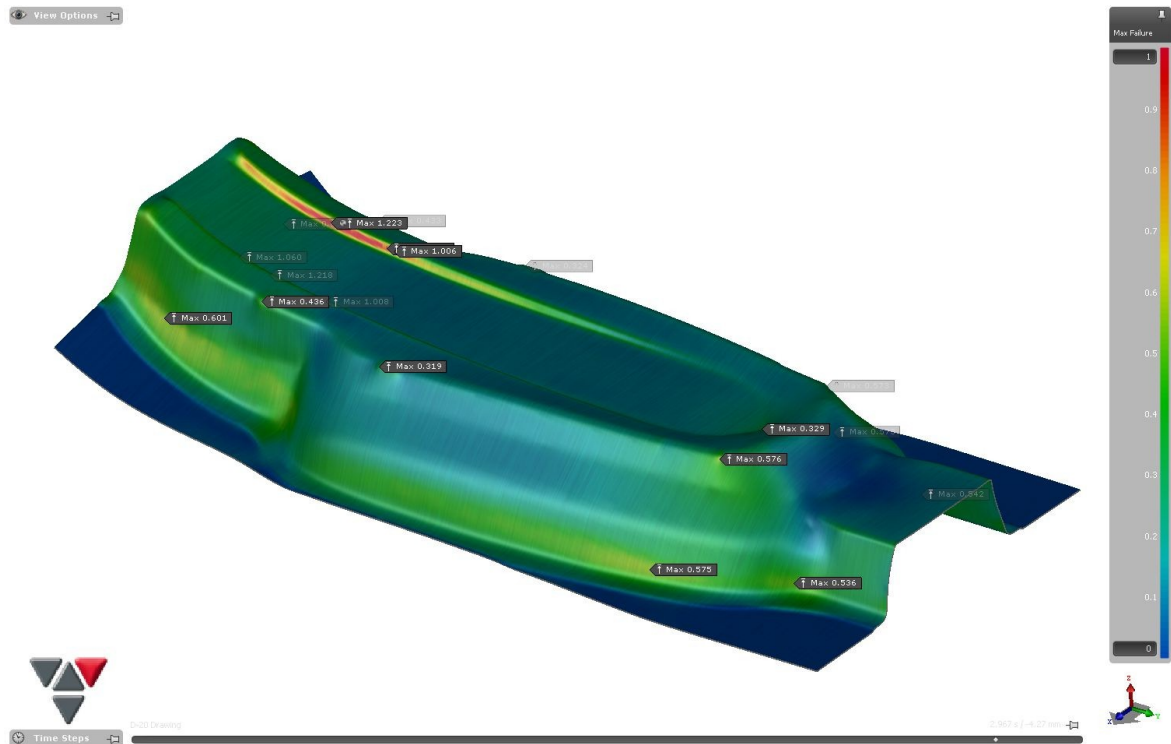
Obrázek 68 Tvářitelnost verze B



Obrázek 69 FLD verze B

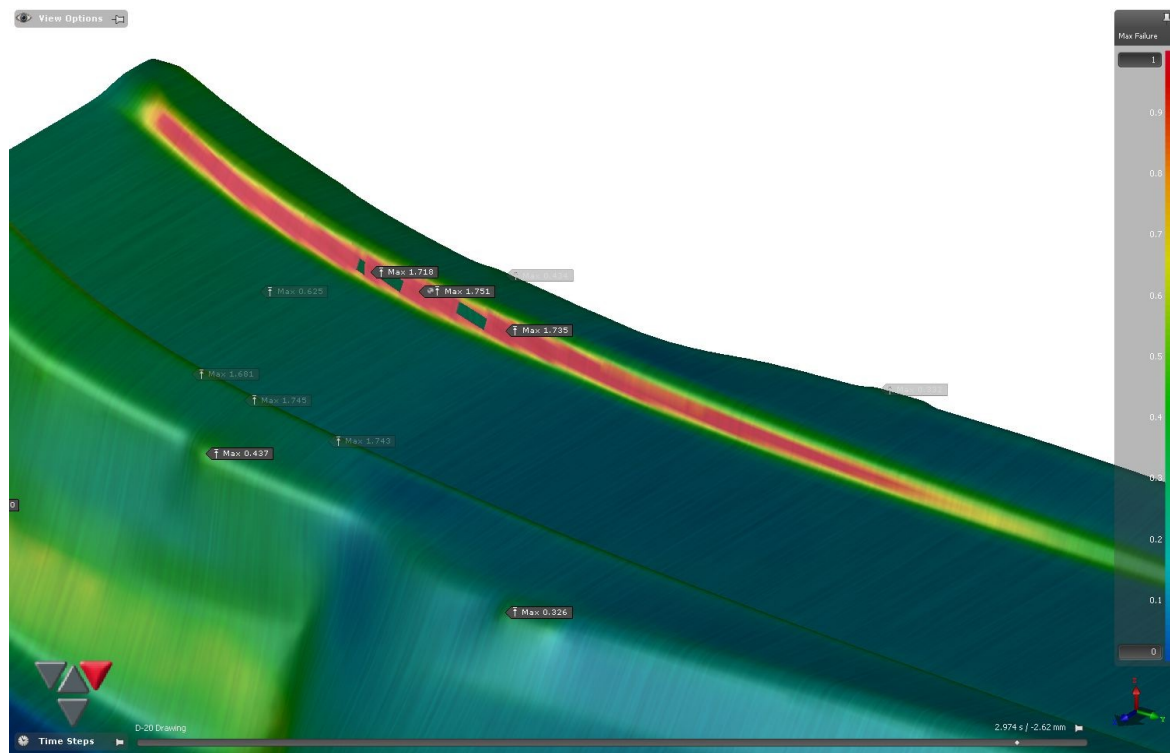
Při lisování nebylo dosaženo úniku platiny z přídržovače. Nyní vzniká oblast porušení 0,31 %. Pro verzi B je oblast bezpečná na 82,44 %. Oblast zvlnění na 3,66 %. Oblast nevyužitá 10,92 %. Oblast stlačení 2,25 %. Oblast nadměrného ztenčení 0,42 %.

Kritická hodnota 77 % pro max. porušení byla překročena.



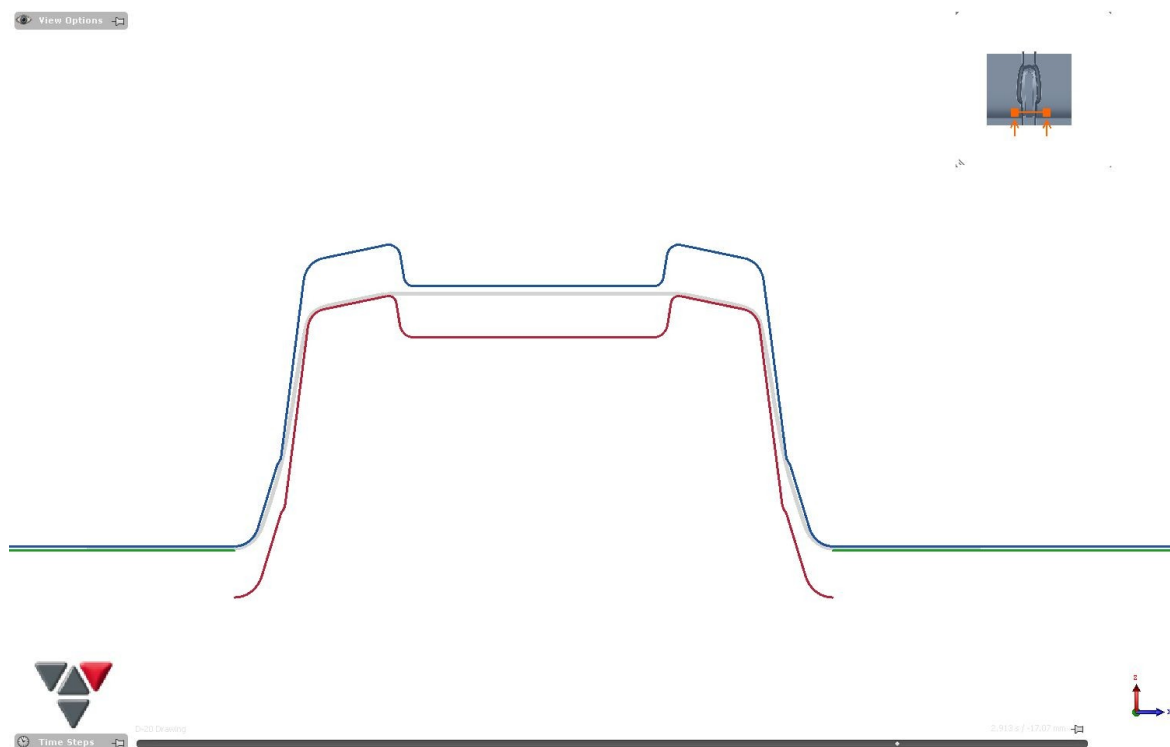
Obrázek 70 Max. porušení verze B

Na obrázku 71 lze vidět porušení platiny na stěně vnitřního prolisu. Max. hodnota je 175,1 %.

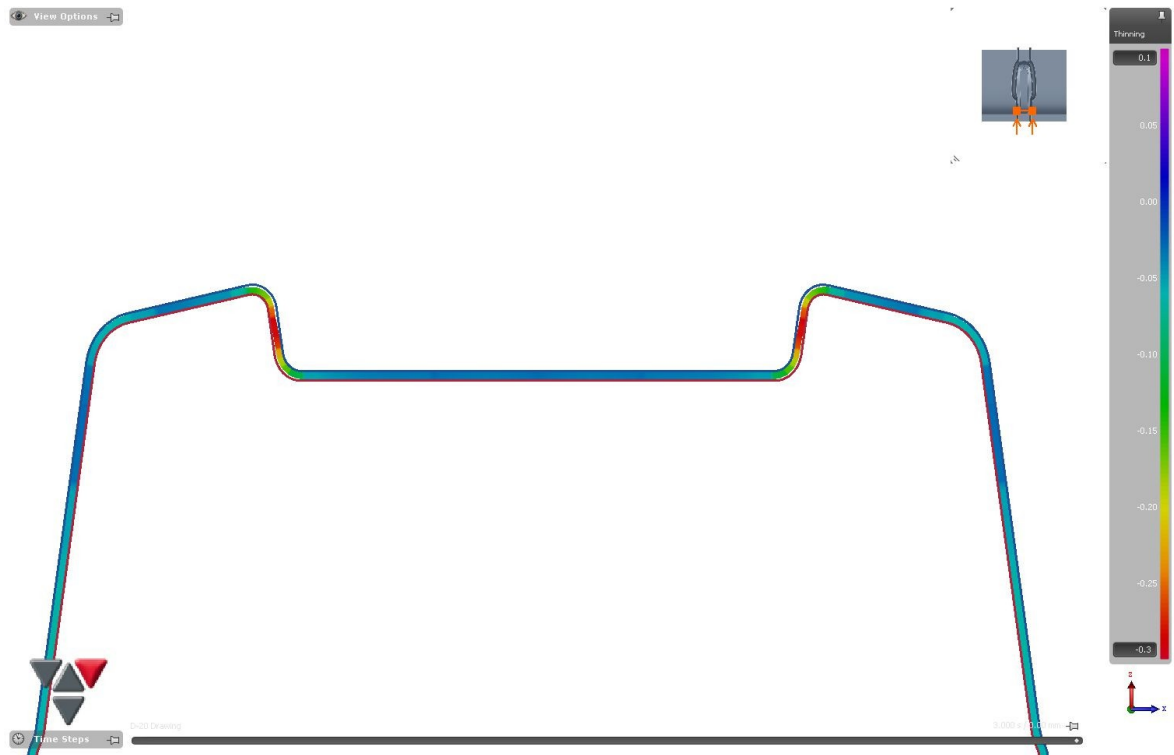


Obrázek 71 Oblast porušení verze B

Důvodem porušení v oblasti prolisu je nedostatek platiny na vrchní ploše tažníku pro vytváření vysoké stěny.



Obrázek 72 Průřez ploch při procesu tažení

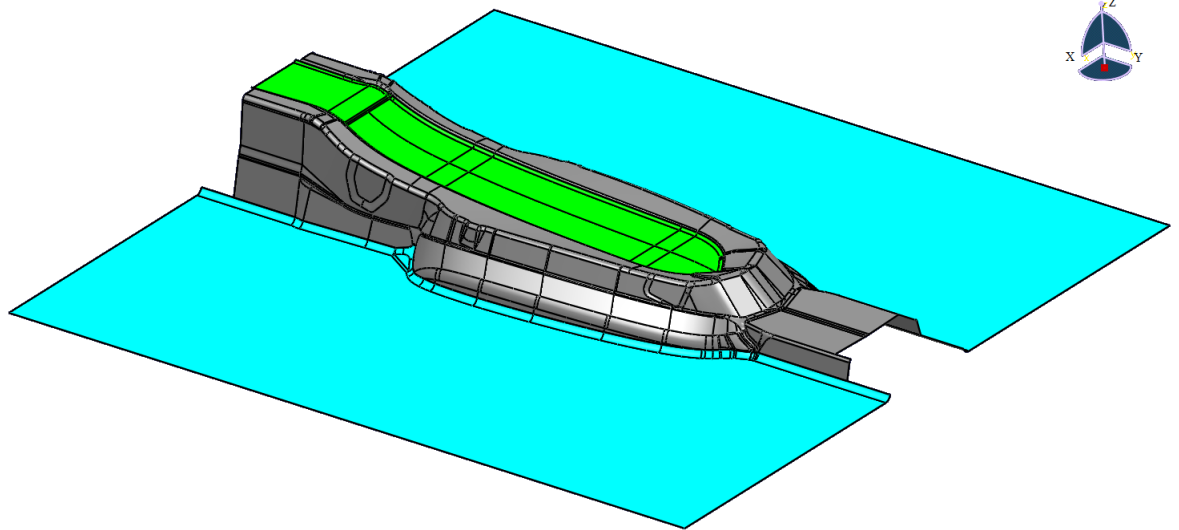


Obrázek 73 Ztenčení v průřezu ploch při procesu tažení

Při procesu tažení je překročena kritická hodnota pro max. porušení. Plocha tažníku a přidržovače verze B je nevyhovující.

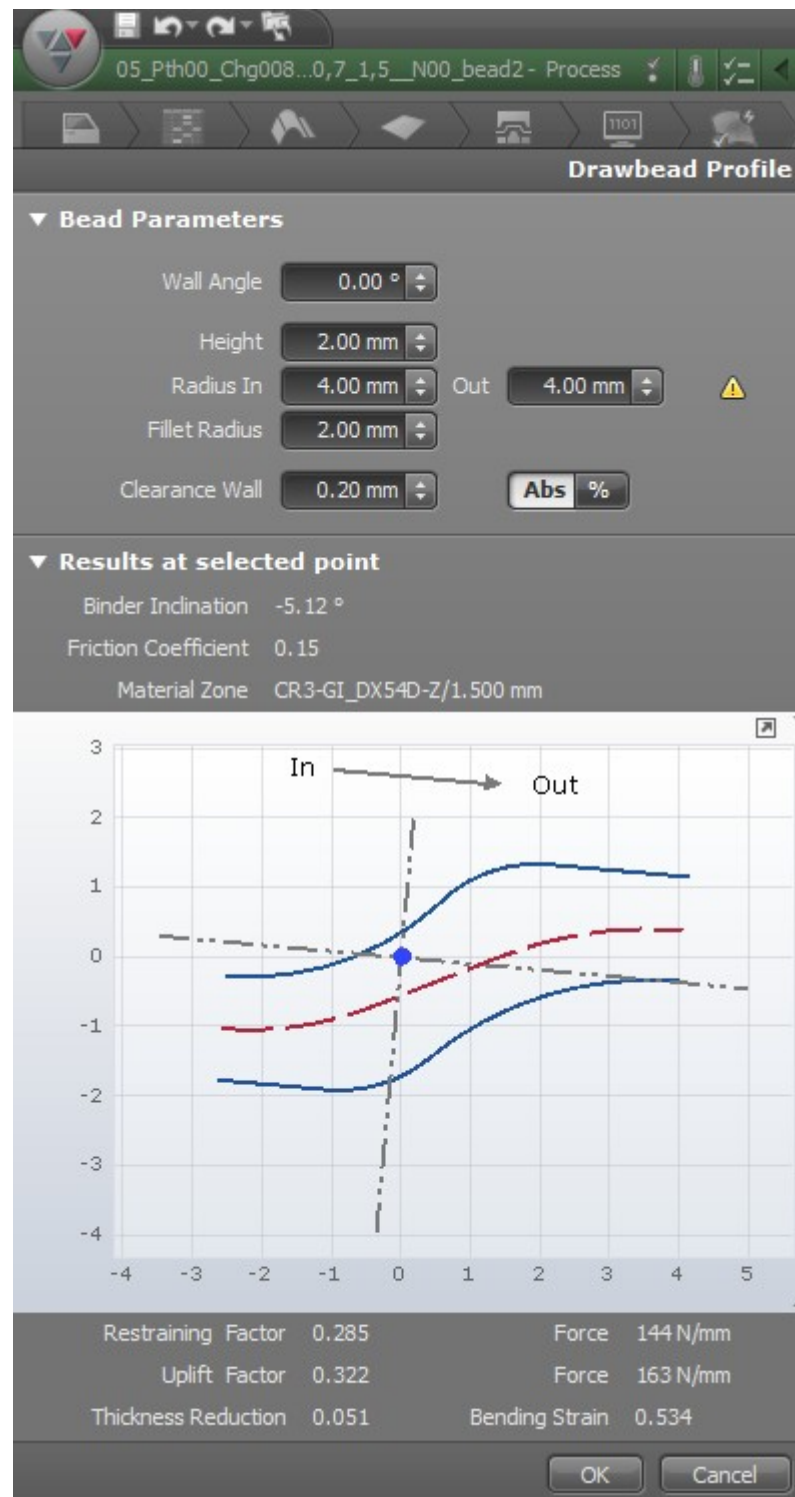
8.3 Plocha tažníku a přídržovače verze C

Pro verzi C byla změna plochy přídržovače na rovnou plochu (Obr. 74 – světle modře). Také se plocha přídržovače přiblížila k samotnému dílu. Další úpravou je vrchní prolis, kde se odstranila vysoká stěna (Obr. 74 – zeleně).

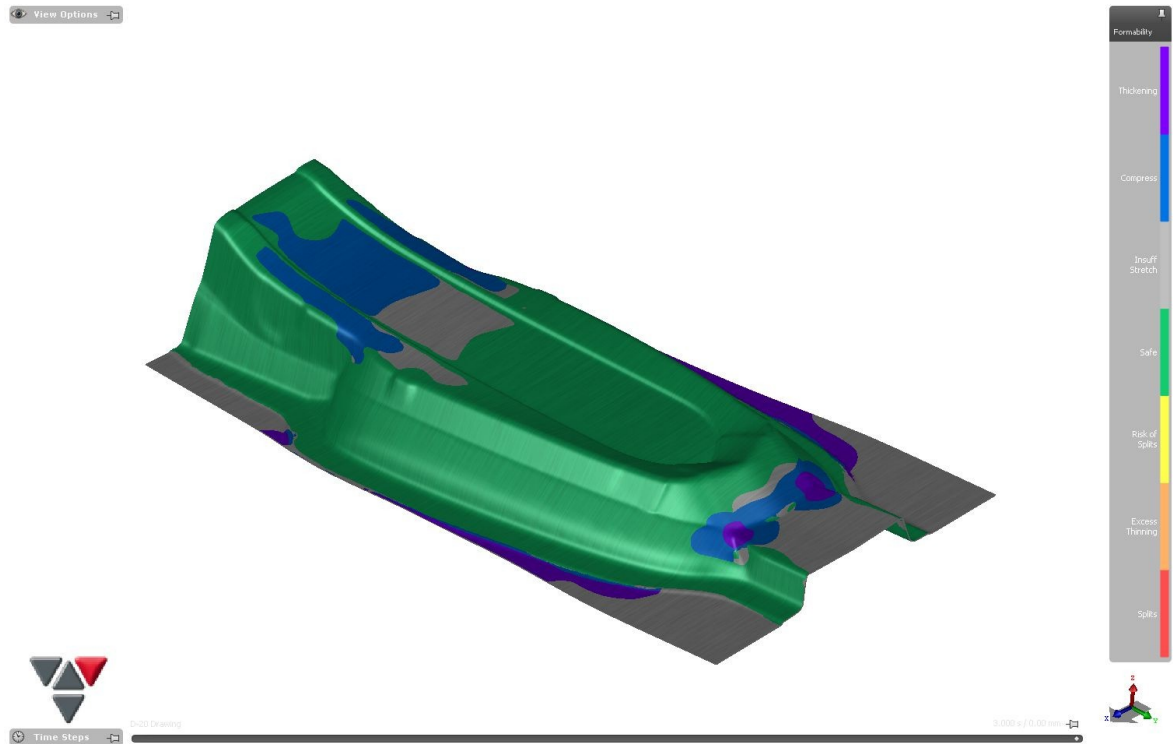


Obrázek 74 Plocha tažníku a přídržovače verze C

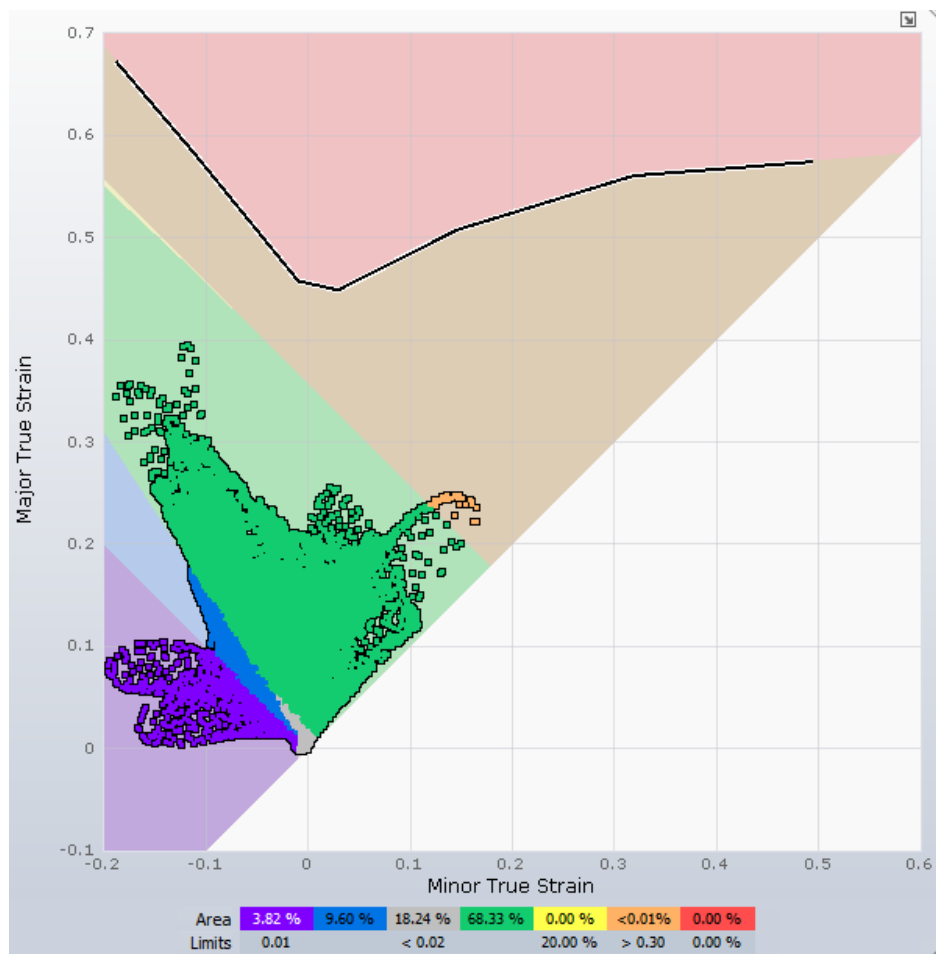
Pro tuto variantu bylo změněno nastavení brzd, kde nabíhající a vybíhající poloměr zaoblení se změnil na 4 mm.



Obrázek 75 Parametry brzd verze C



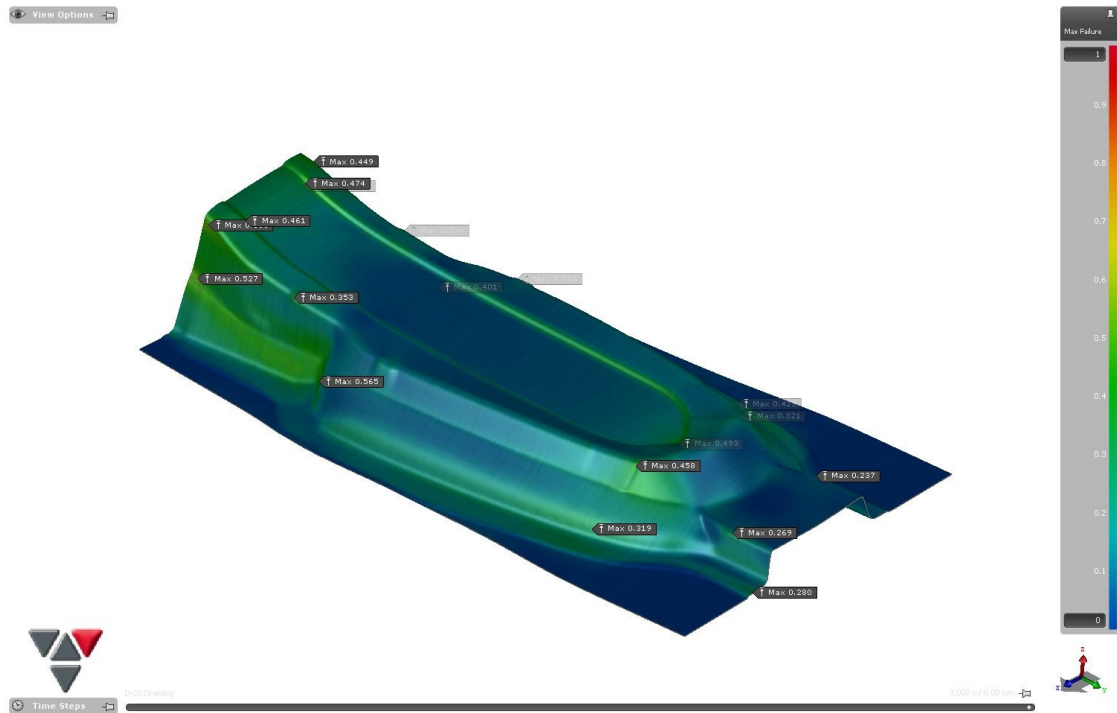
Obrázek 76 Tvářitelnost verze C



Obrázek 77 FLD verze C

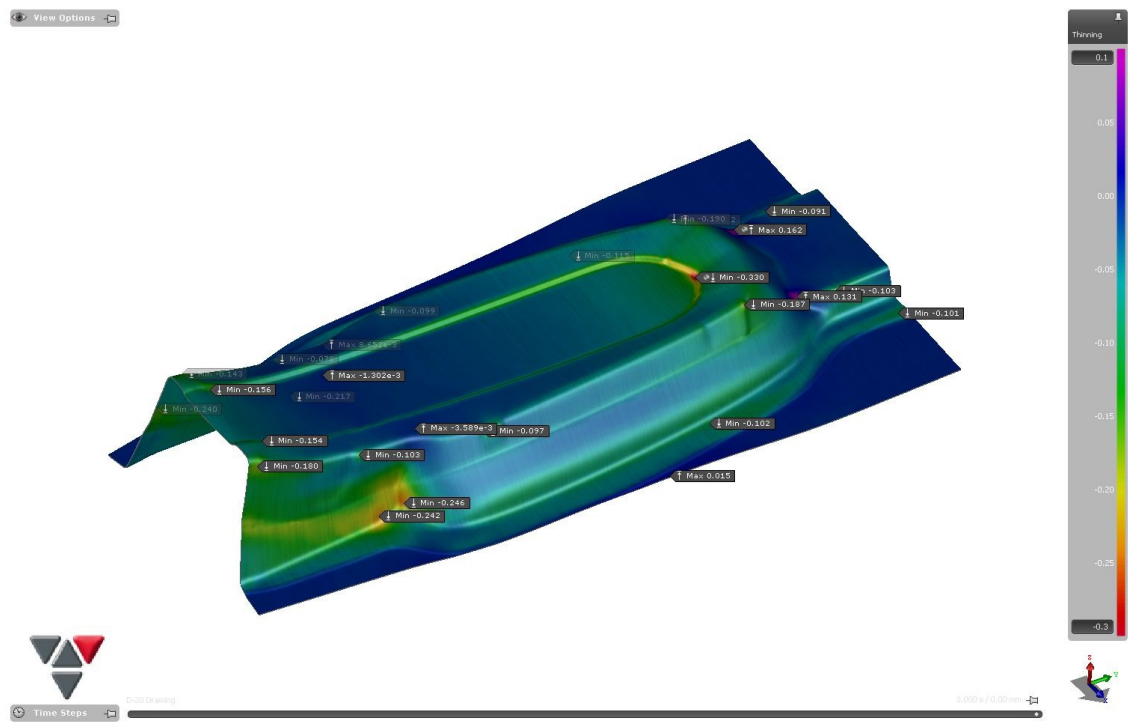
Pro verzi C je oblast bezpečná na 68,33 %. Oblast zvlnění na 9,6 %. Oblast nevyužitá 18,24 %. Oblast stlačení 3,82 %.

Podle FLD nedochází k porušení. To potvrzuje i výsledek max. porušení, kde max. hodnota je 56,5 %. Není překročena kritická hodnota 77 %.



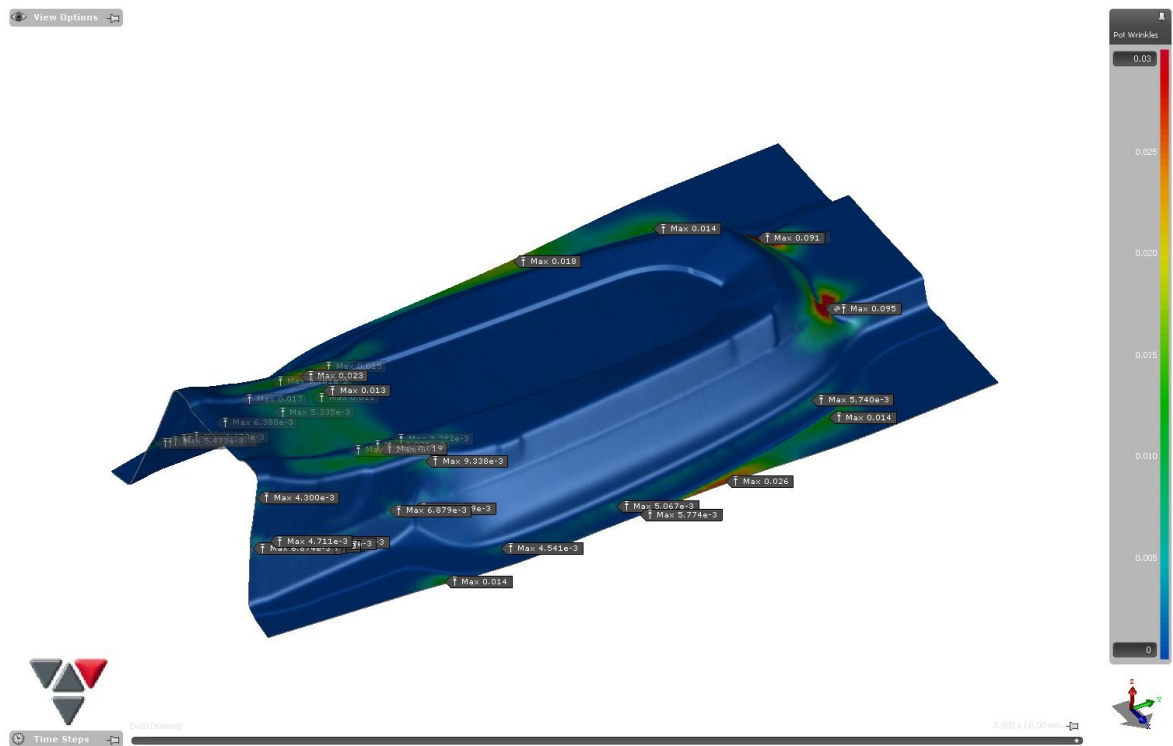
Obrázek 78 Max. porušení verze C

U výsledku nadměrného ztenčení bylo zjištěno překročení kritické hodnoty 25 %. Dochází k ztenčení 33 %.



Obrázek 79 Nadměrné ztenčení verze C

V oblasti přední packy je velký potenciál k vytvoření zvlnění.

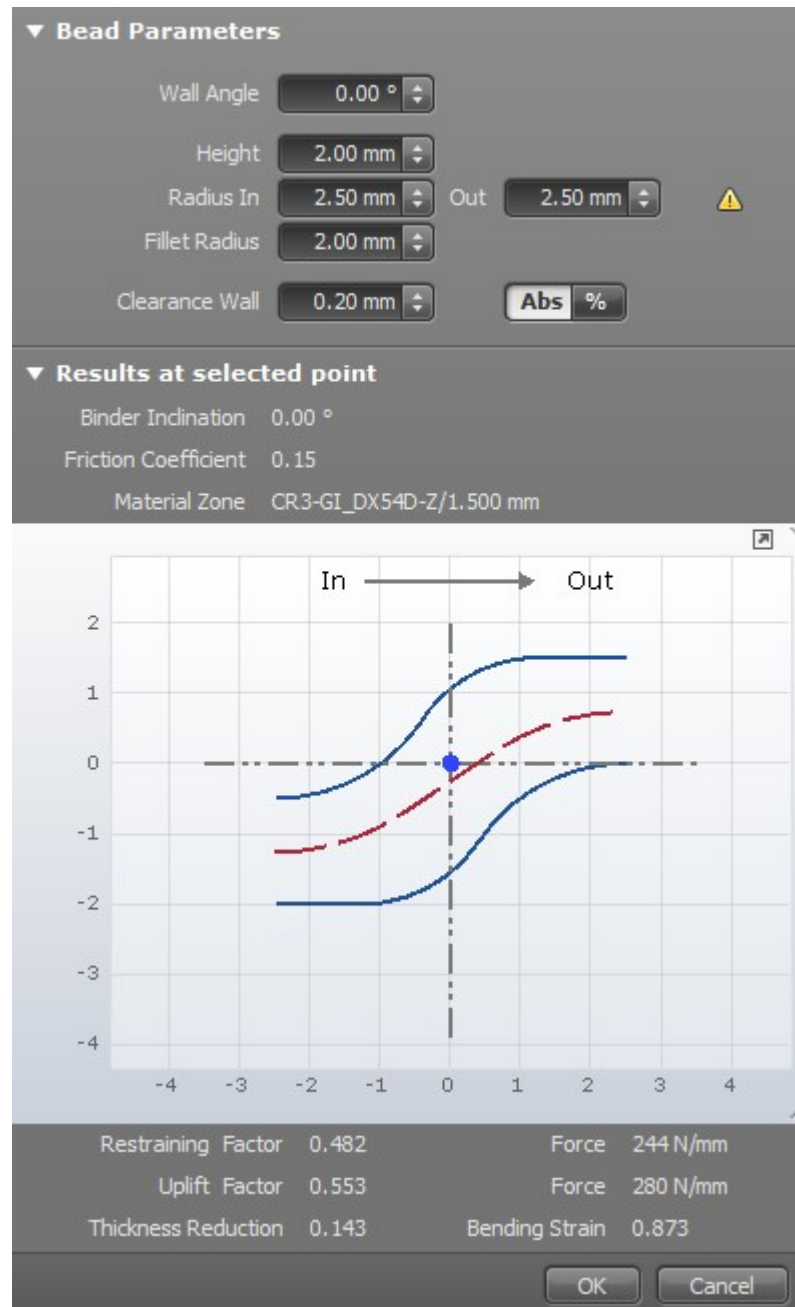


Obrázek 80 Pot. zvlnění verze C

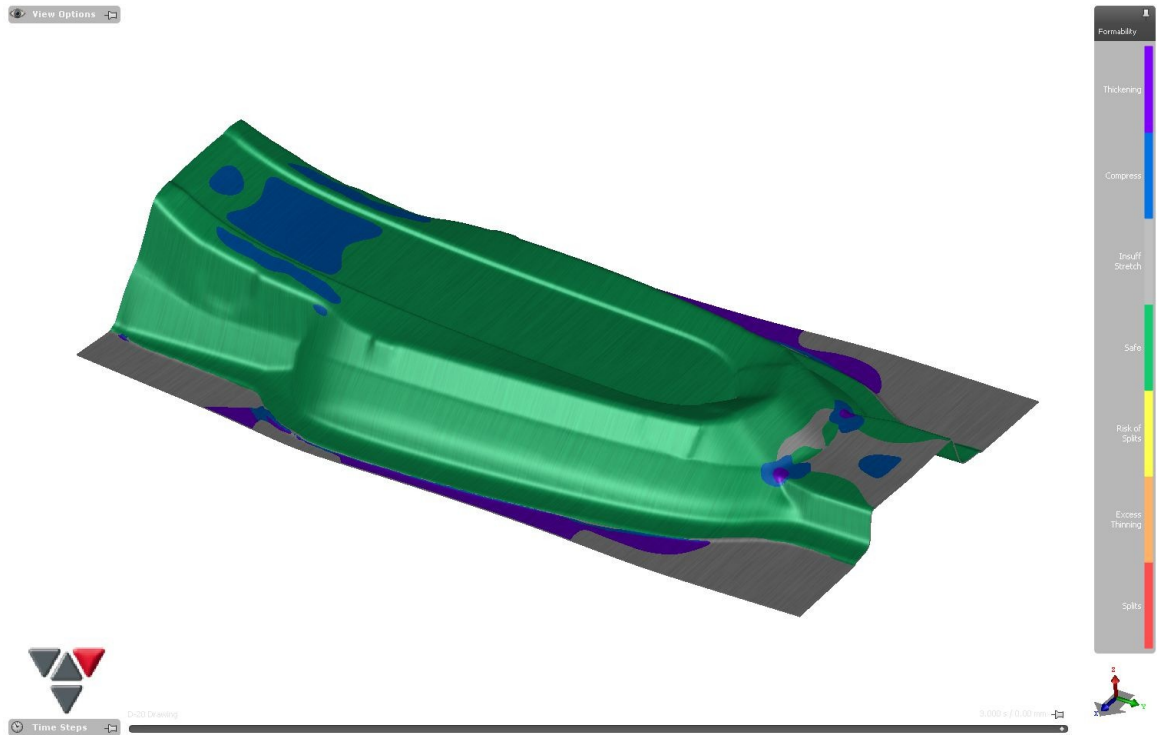
V procesu tažení první operace je překročena kritická hodnota pro nadměrné ztenčení. Plocha tažníku a přidržovače verze C je nevyhovující.

8.4 Plocha tažníku a přidržovače verze D

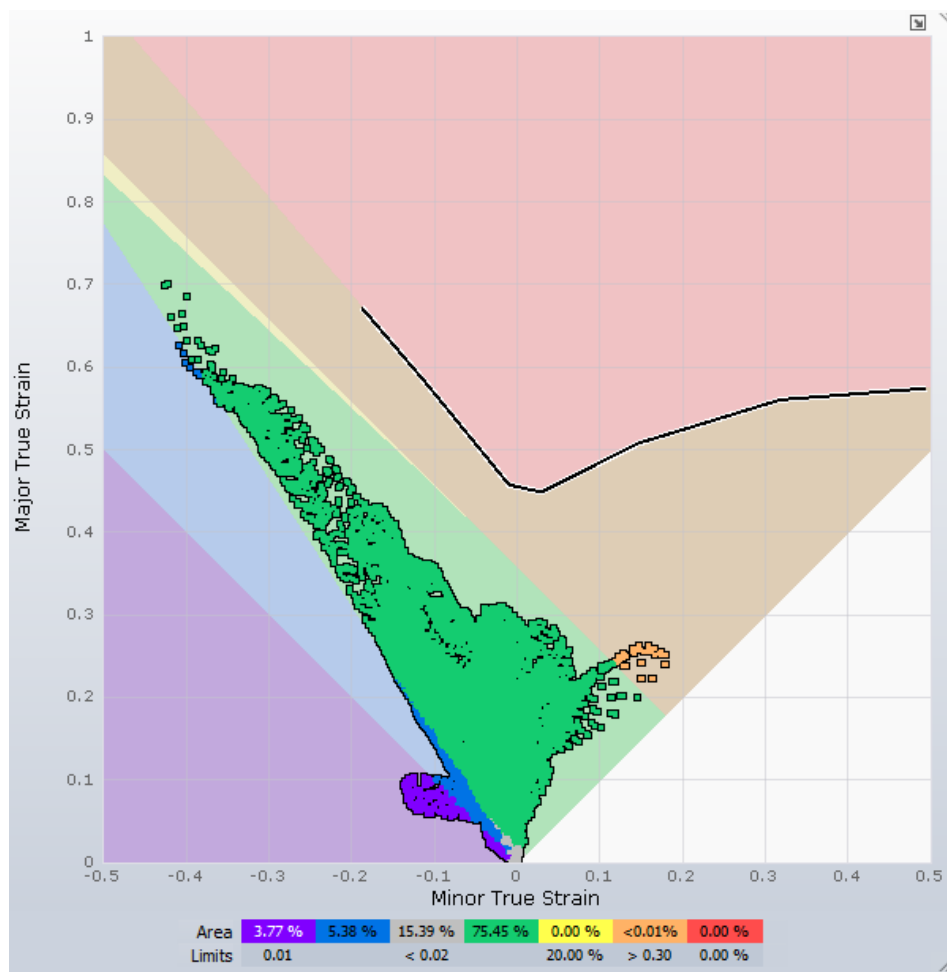
Plocha tažníku a přidržovače je stejná, jako u verze C. Změní se parametry brzd. Brzdy mají výšku 2 mm, nabíhající a vybíhající poloměr zaoblění je 2,5 mm.



Obrázek 81 Velikost brzd verze D



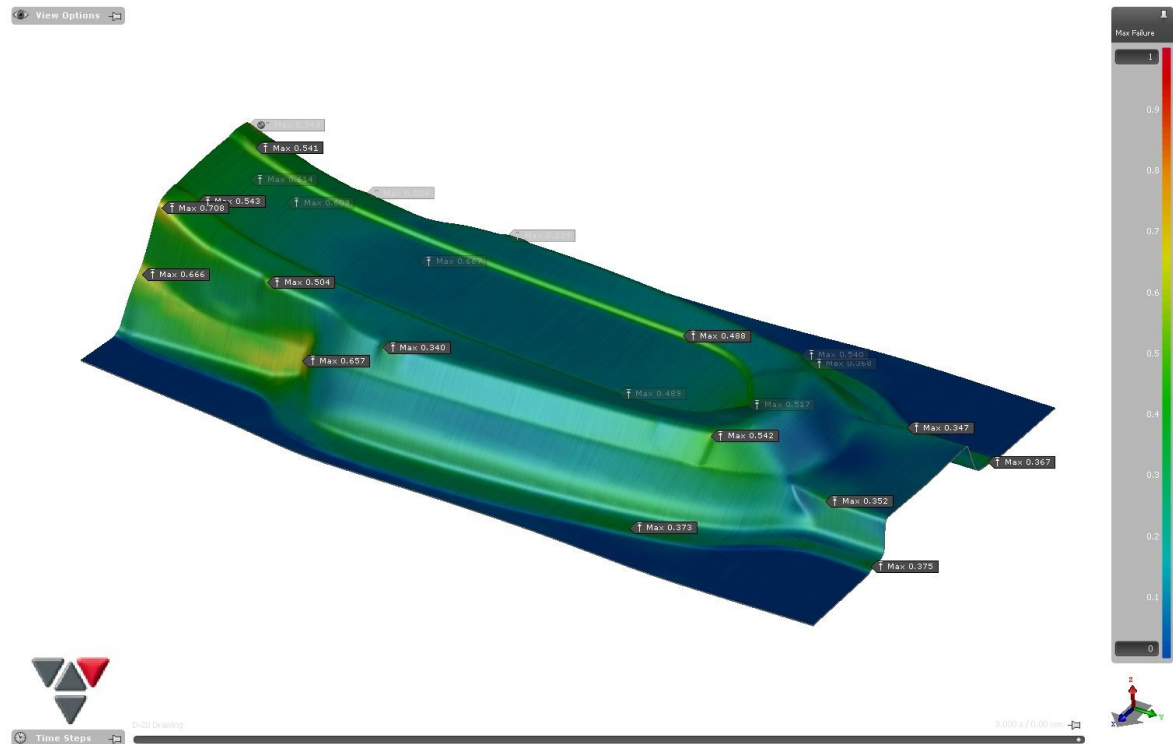
Obrázek 82 Tvářitelnost verze D



Obrázek 83 FLD verze D

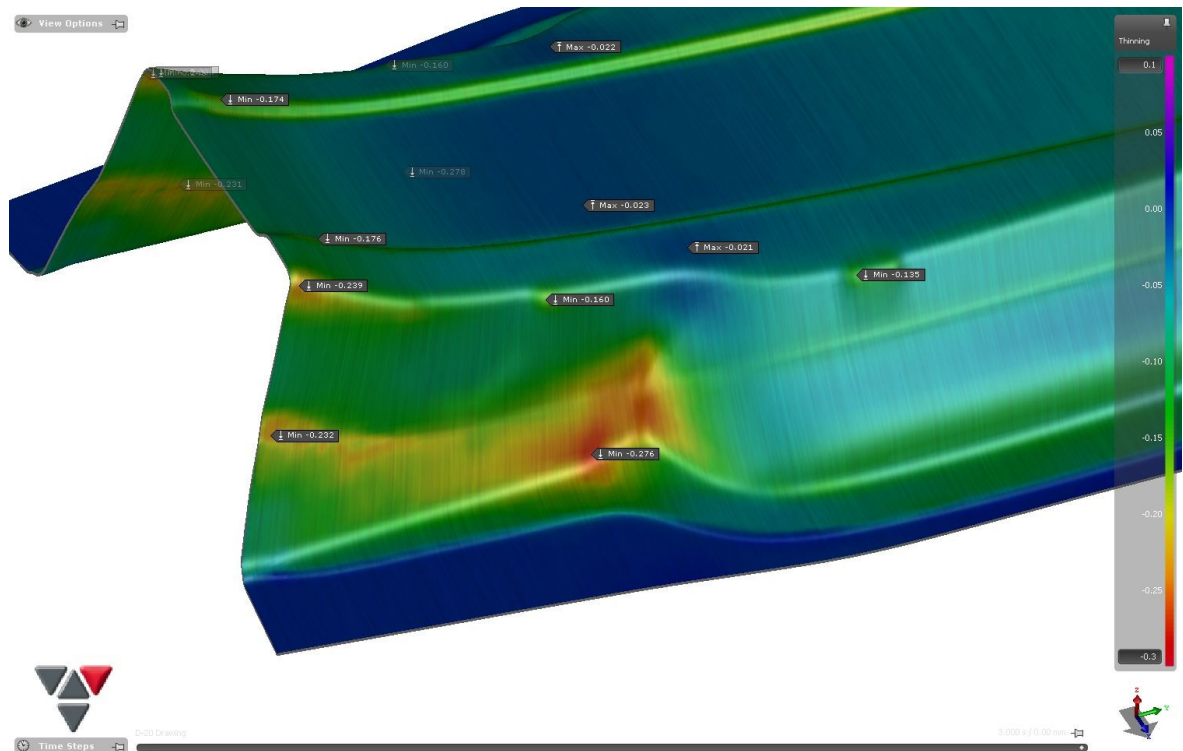
Oproti verzi C se zvýší oblast bezpečná na 75,45 %. Oblast zvlnění se sníží na 5,38 % a oblast nevyužitá na 15,39 %. Oblast stlačení 3,77 % se nezmění výrazně.

Kritická hodnota max. porušení 77 % nebyla překročena. Max. hodnota porušení je 70,8 %.



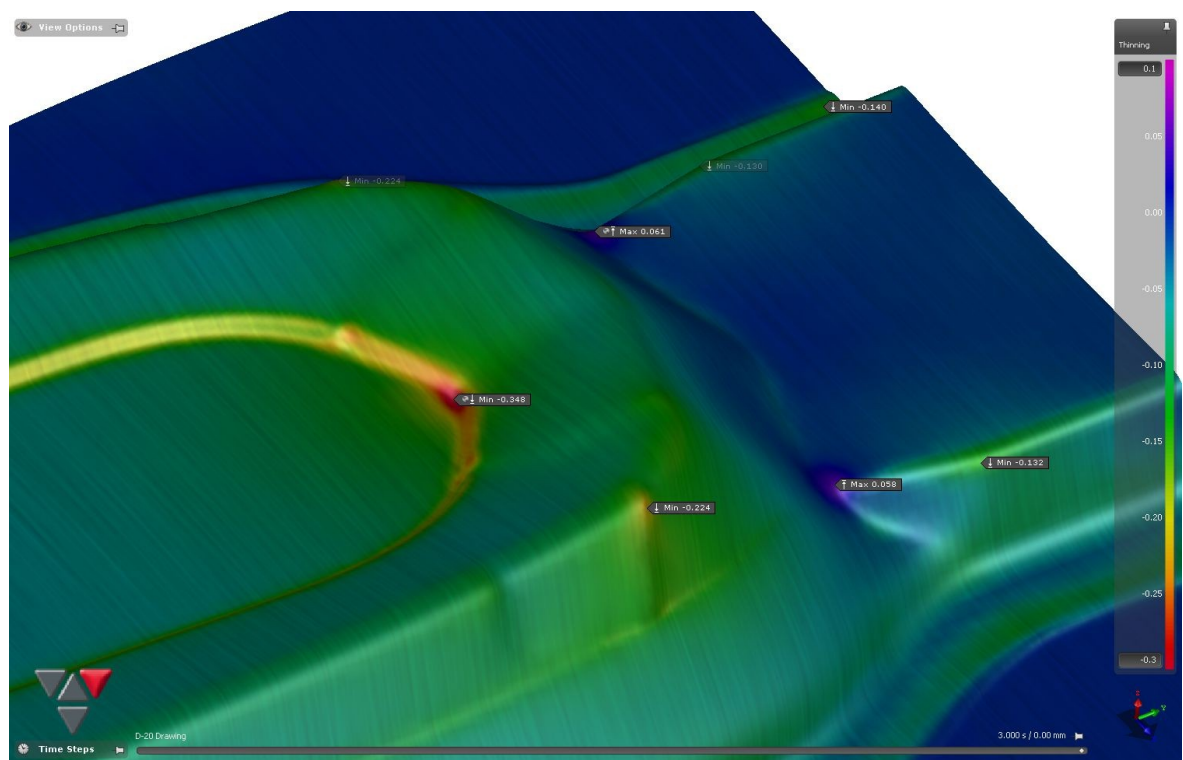
Obrázek 84 Max. porušení verze D

V oblasti zaoblení na dílu (Obr. 85) je hodnota ztenčení 27,6 %. Dochází k překročení kritické hodnoty 25 %.



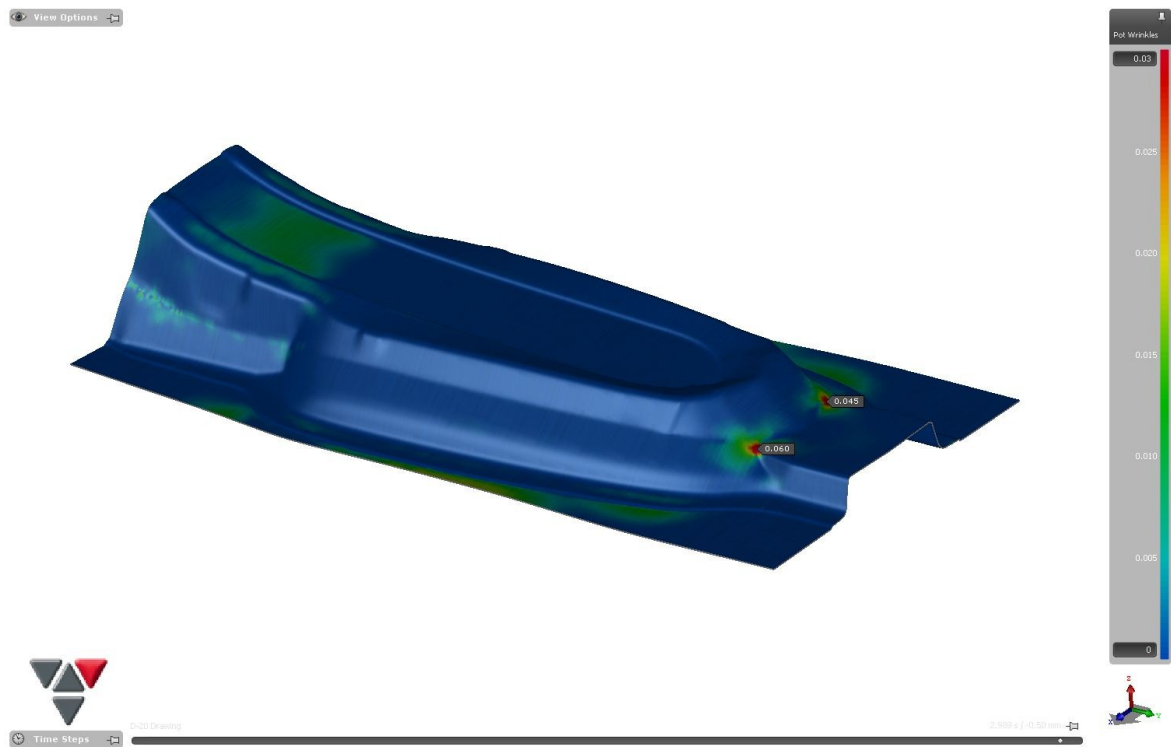
Obrázek 85 Nadměrné ztenčení verze D

Další oblast, kde bylo zaznamenáno překročení kritické hodnoty nadměrného ztenčení 25 % (Obr. 86) se nachází ve vrchním prolisu. Hodnota ztenčení je 34,8 %.



Obrázek 86 Nadměrné ztenčení verze D

V oblasti přední packy je stále velký potenciál vzniku zvlnění.

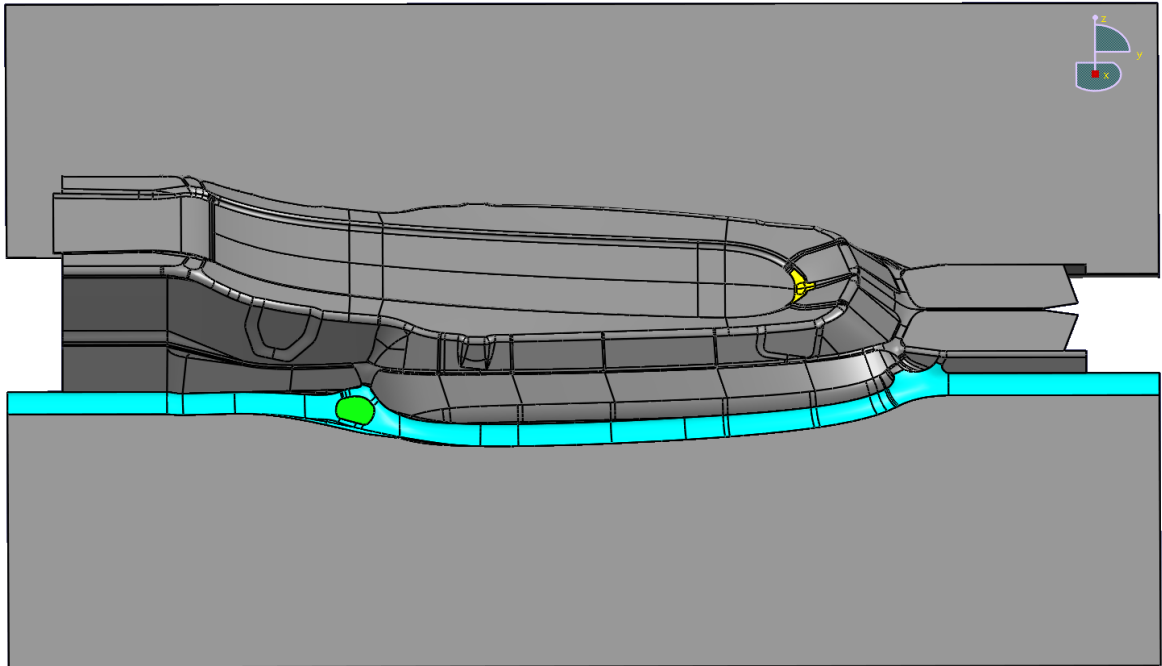


Obrázek 87 Pot. zvlnění verze D

Při procesu tažení je překročena kritická hodnota pro nadměrné ztenčení. Plocha tažníku a přidržovače verze D je nevyhovující.

8.5 Plocha tažníku a přídržovače verze E

Verze E se liší od verze D zvětšením poloměru zaoblění mezi tažníkem a přídržovačem (Obr. 88 – světle modře). Vytvoření oploštění (Obr. 88 – zeleně) zaoblění oblasti ztenčení vyznačené v obrázku 85. Další změnou bylo zvětšení zaoblění přechodu mezi dnem prolisu a plochou dílu (Obr. 88 - žlutá). Poslední úpravou je změna velikosti brzd.

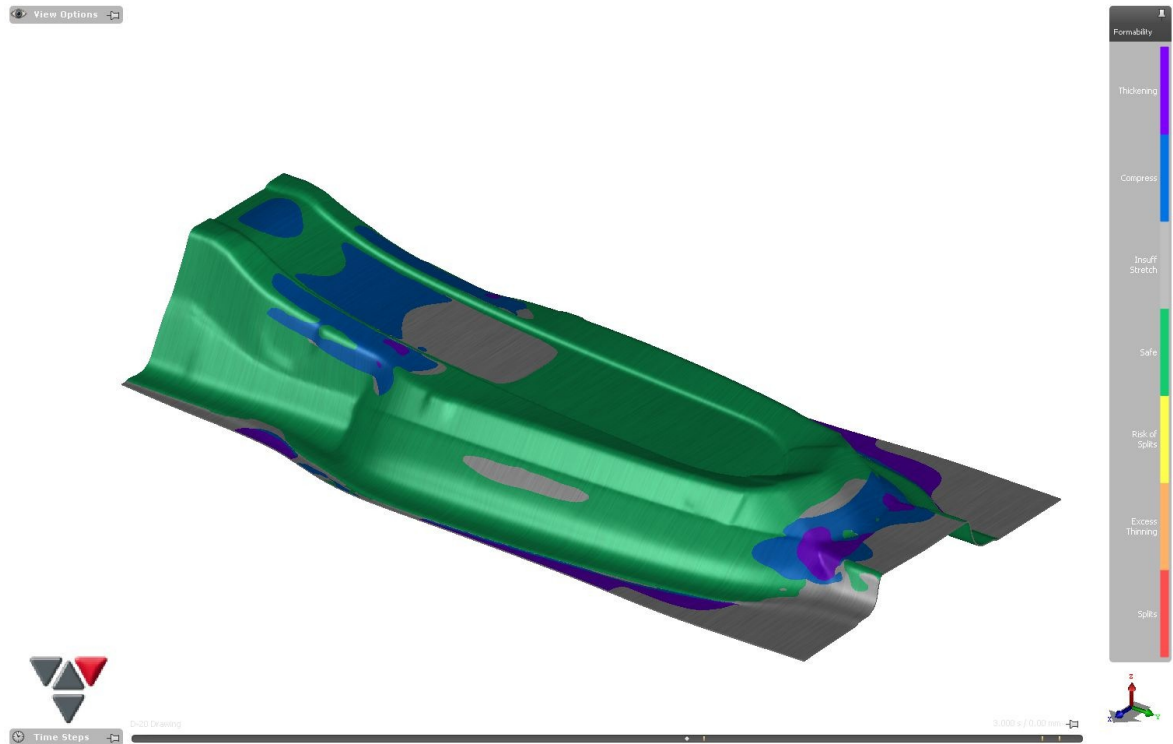


Obrázek 88 *Plocha tažníku a přídržovače verze E*

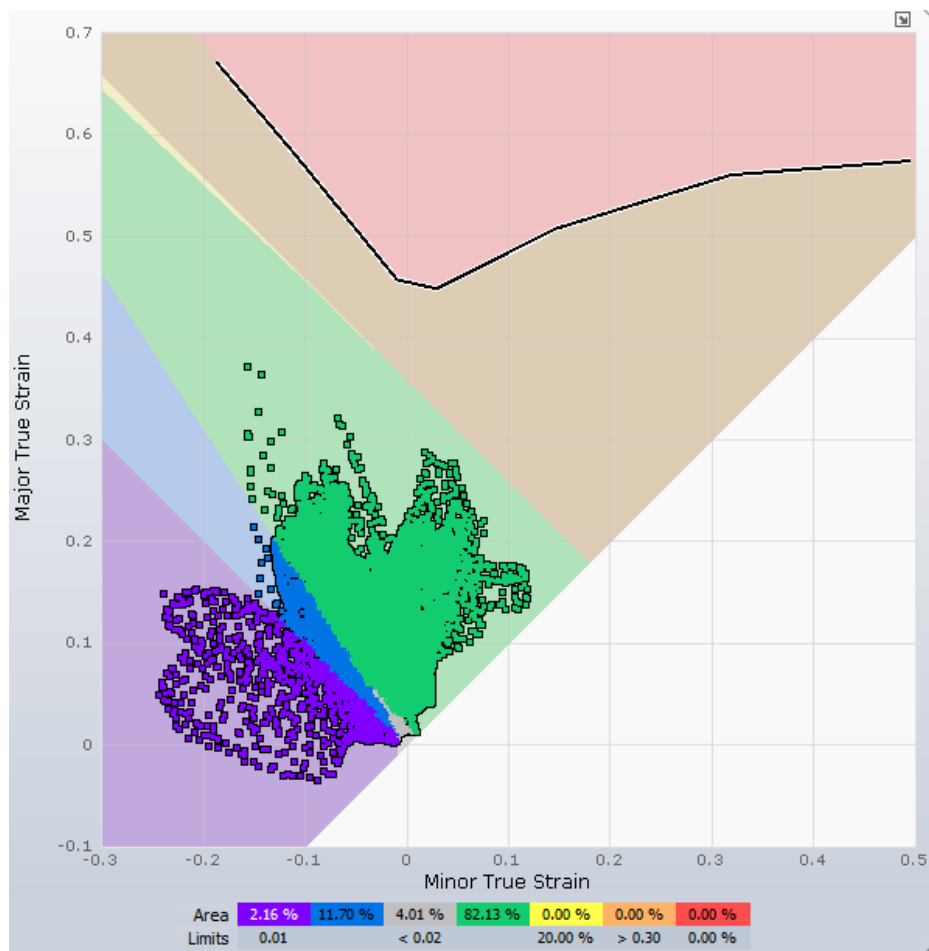
Vytvořené brzdy mají výšku 2 mm, nabíhající a vybíhající poloměr zaoblení 3 mm.



Obrázek 89 Velikost brzd verze E



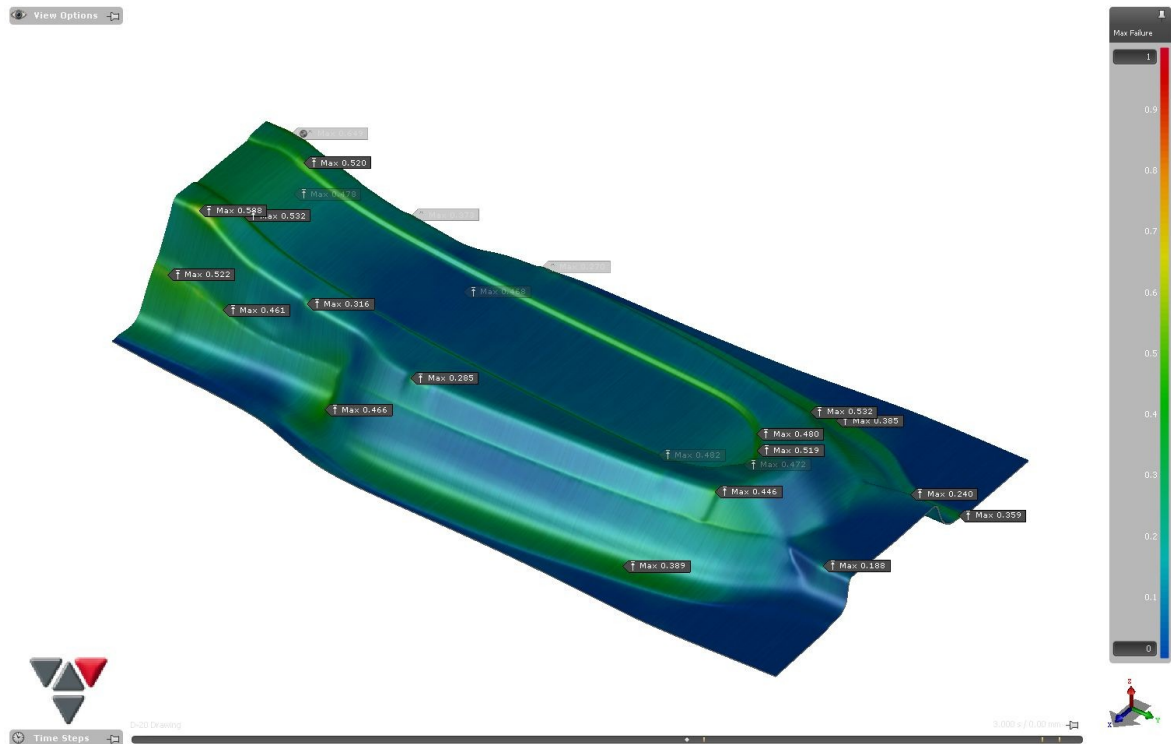
Obrázek 90 Tvářitelnost verze E



Obrázek 91 FLD verze E

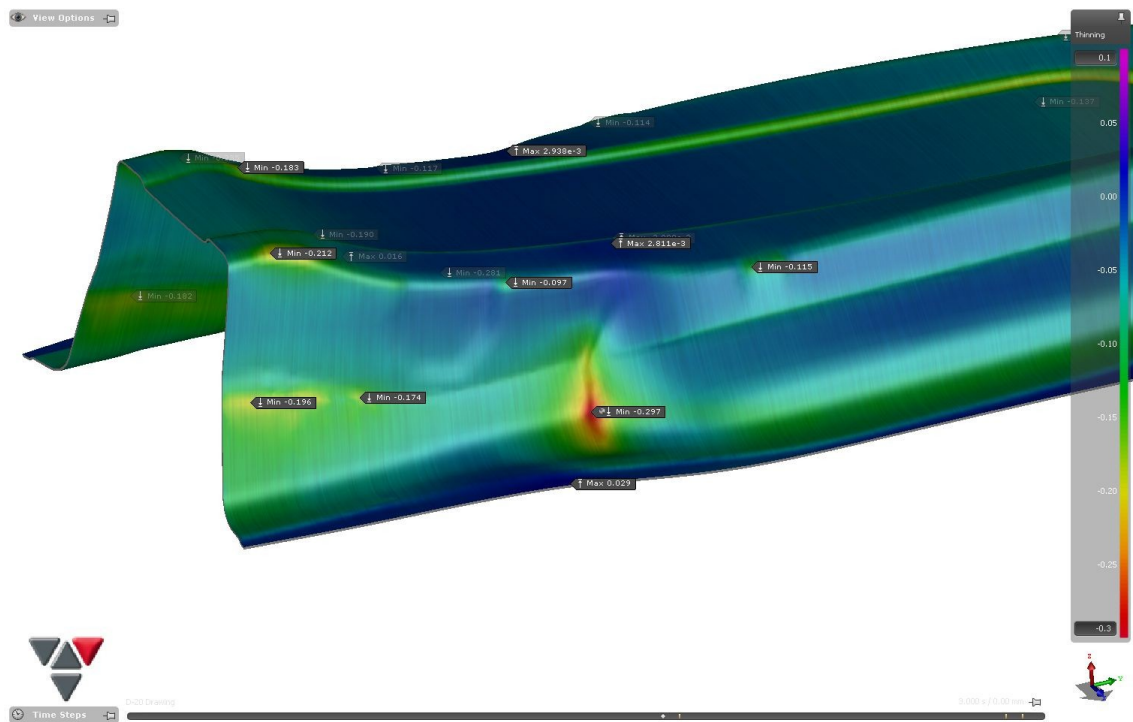
Oproti verzi D se zvýší oblast bezpečná na 82,13 %. Oblast zvlnění se zvýší na 11,7 %. Oblast nevyužitá se sníží na 4,01 %. Oblast stlačení se zmenší na 2,16 %.

Kritická hodnota max. porušení 77 % nebyla překročena. Max. hodnota porušení je 58,8 %.



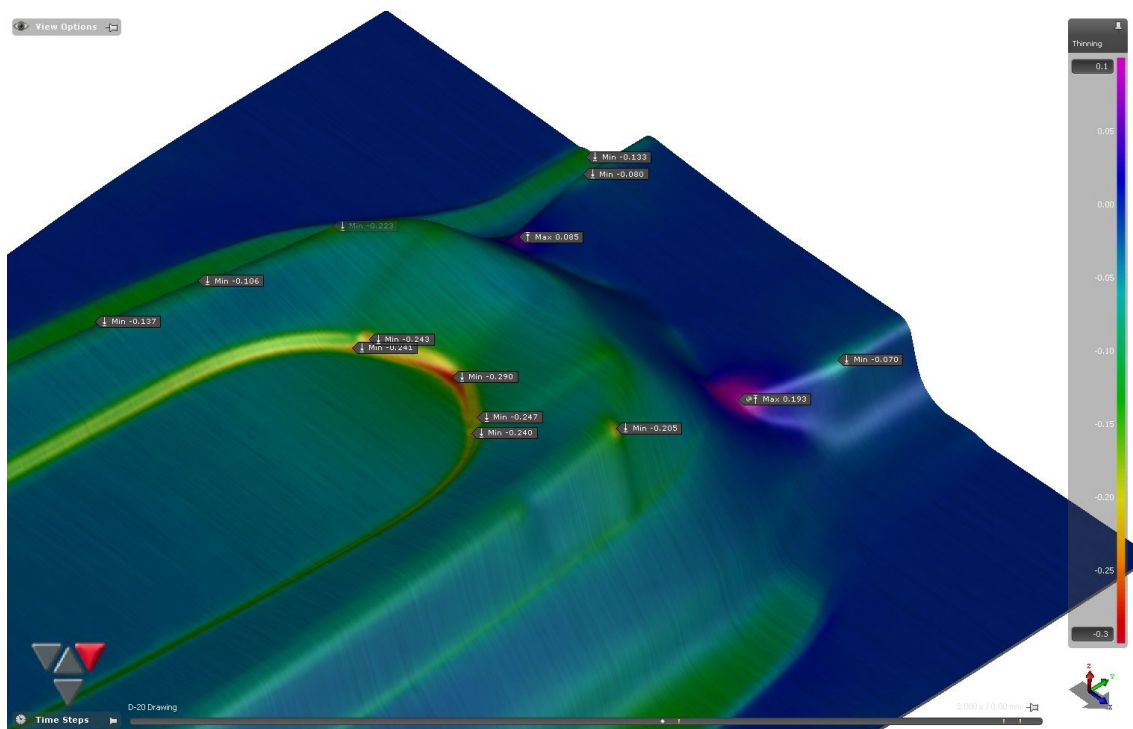
Obrázek 92 Max. porušení verze E

V upravené oblasti stále dochází k překročení kritické hodnoty nadměrného ztenčení 25 %. Hodnota dosahovaného ztenčení je 29,7 %.



Obrázek 93 Nadměrné ztenčení verze E

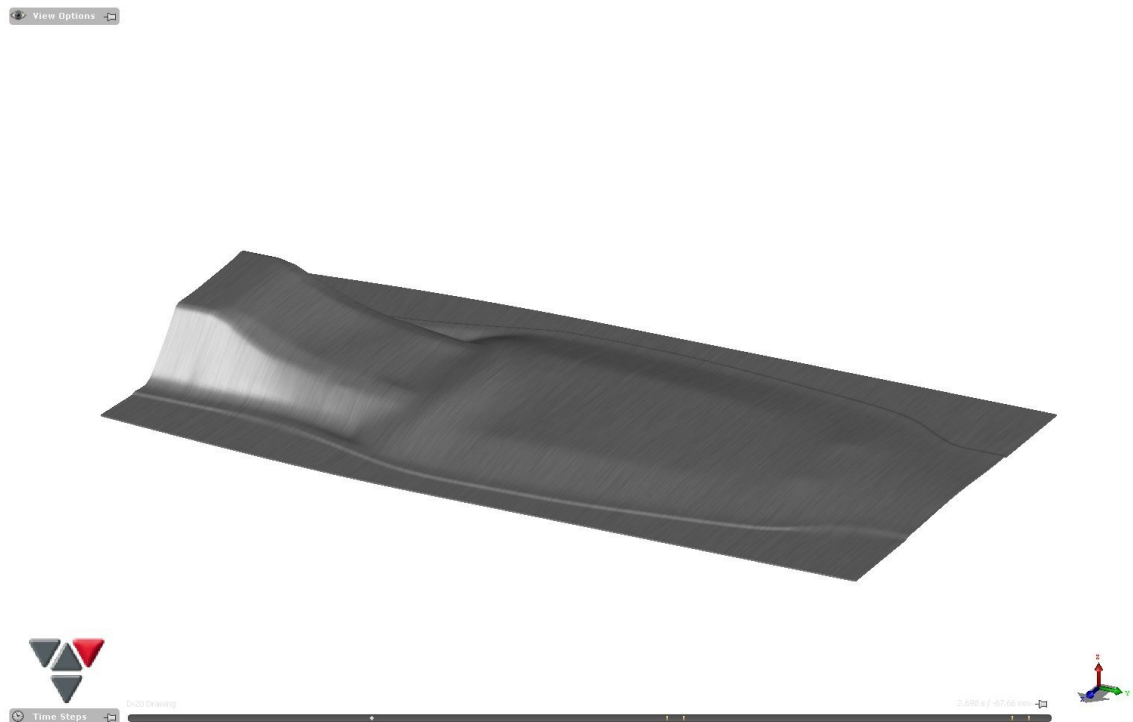
V této oblasti se hodnota ztenčení snížila na 29 %, oproti verzi D. Hodnota stále překračuje kritickou hodnotu 25 %.



Obrázek 94 Nadměrné ztenčení verze E

8.5.1 Proces tvarování platiny

Na začátku tváření v první operaci dochází k zvlnění platiny (Obr. 95).



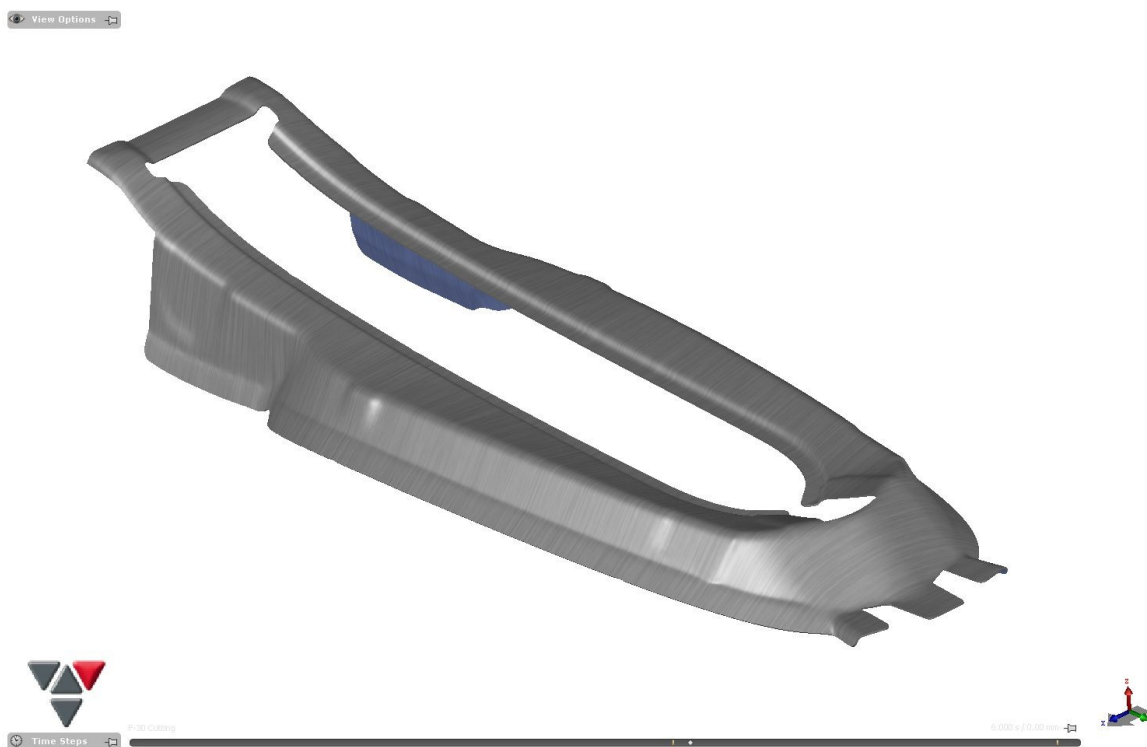
Obrázek 95 *Platina na začátku tváření*

Veškeré zvlnění platiny se vyrovná při dokončení první operace (Obr. 96).



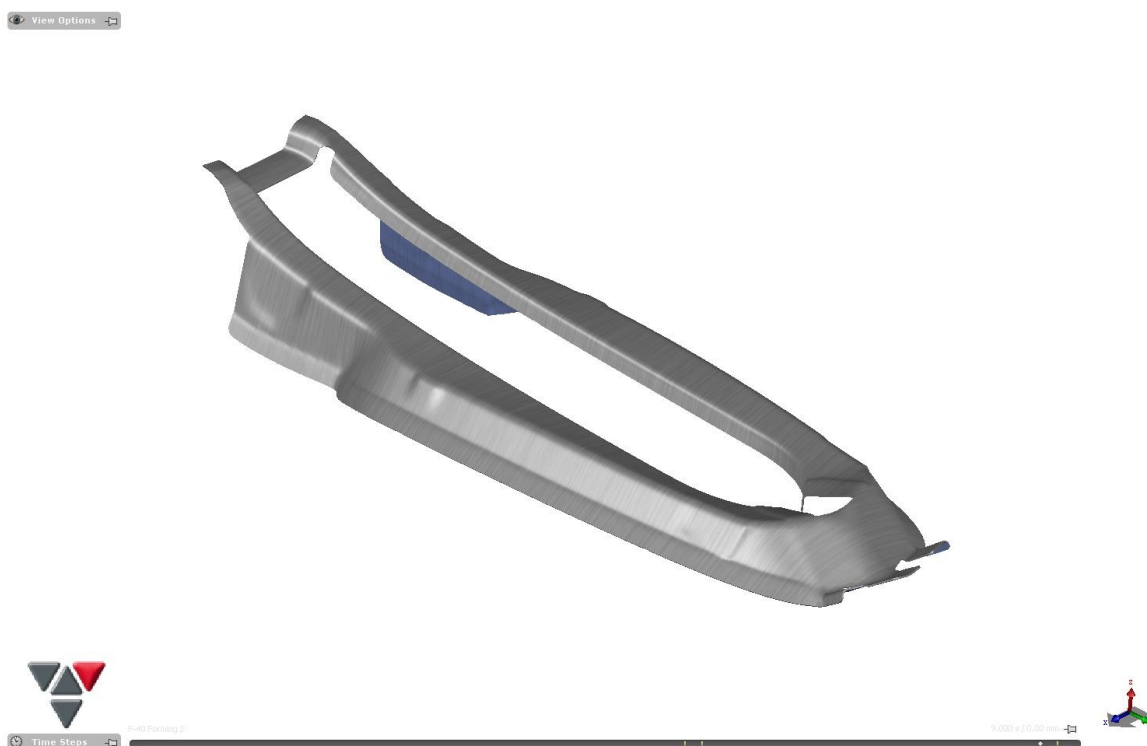
Obrázek 96 *Platina po první operaci*

Následuje vystřížení okrajů vytvarované platiny (Obr. 97).



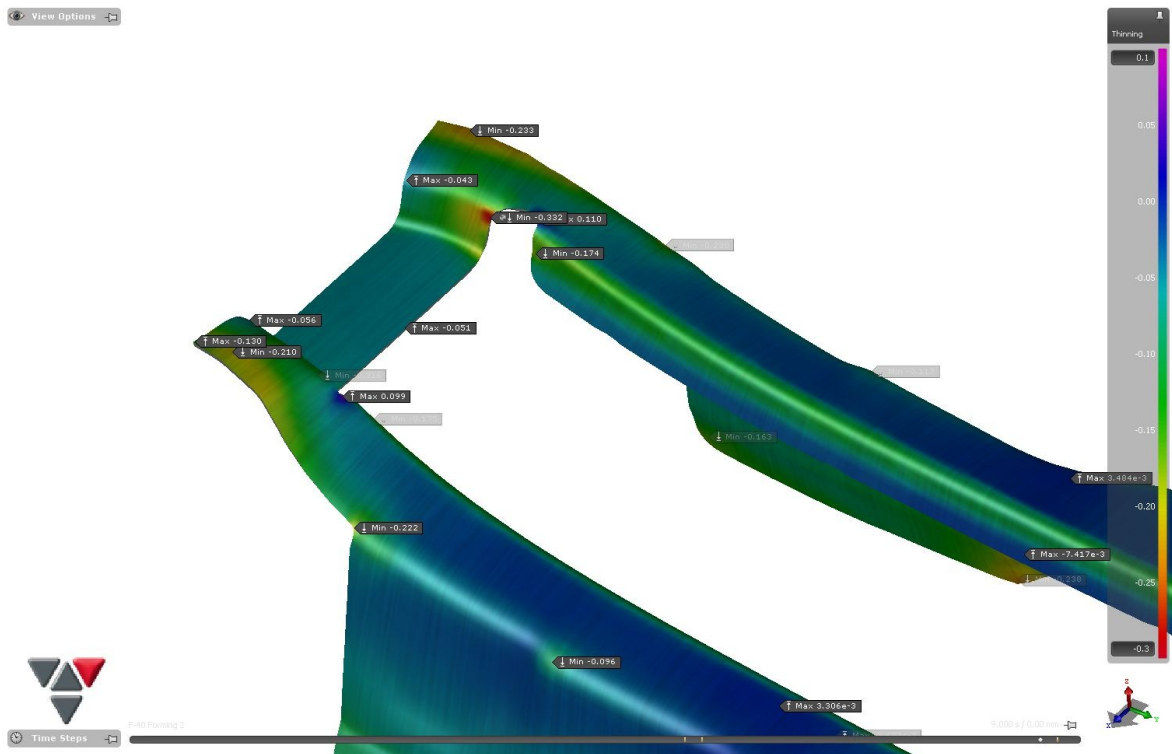
Obrázek 97 *Platina po druhé operaci*

V třetí operaci se vytvoří lem a ohyb packy pomocí klínů (Obr. 98).



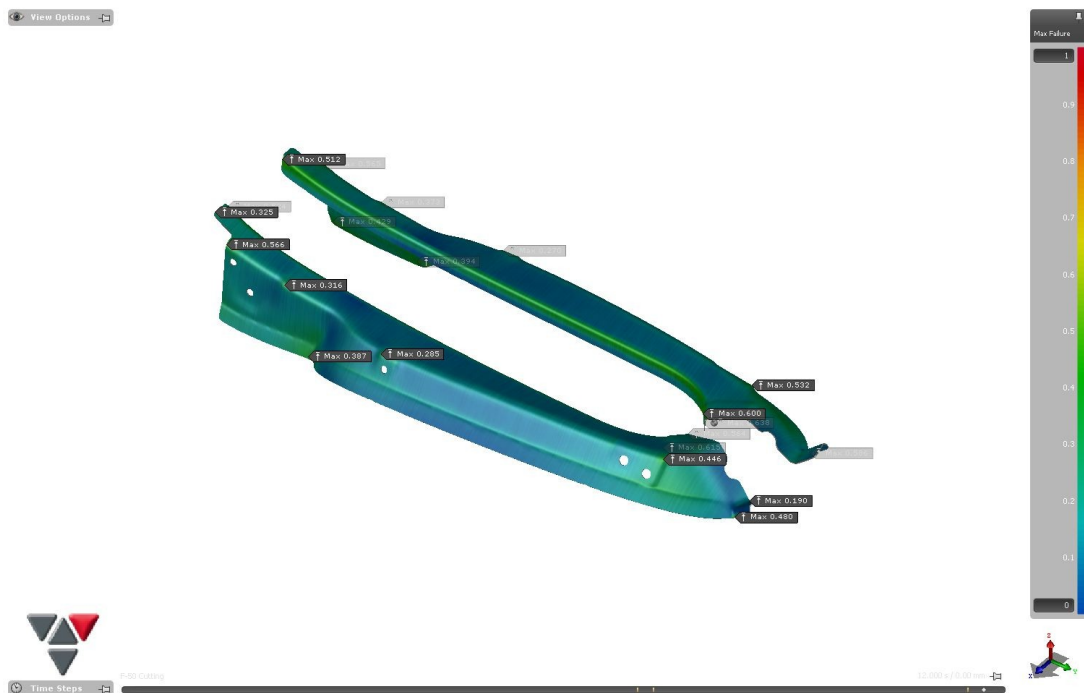
Obrázek 98 *Platina po třetí operaci*

Při třetí operaci dochází k překročení kritické hodnoty nadměrného ztenčení 25 %. Hodnota ztenčení je 33,2 %. Dochází k tomu v oblasti, která se v další operaci vystříhne.



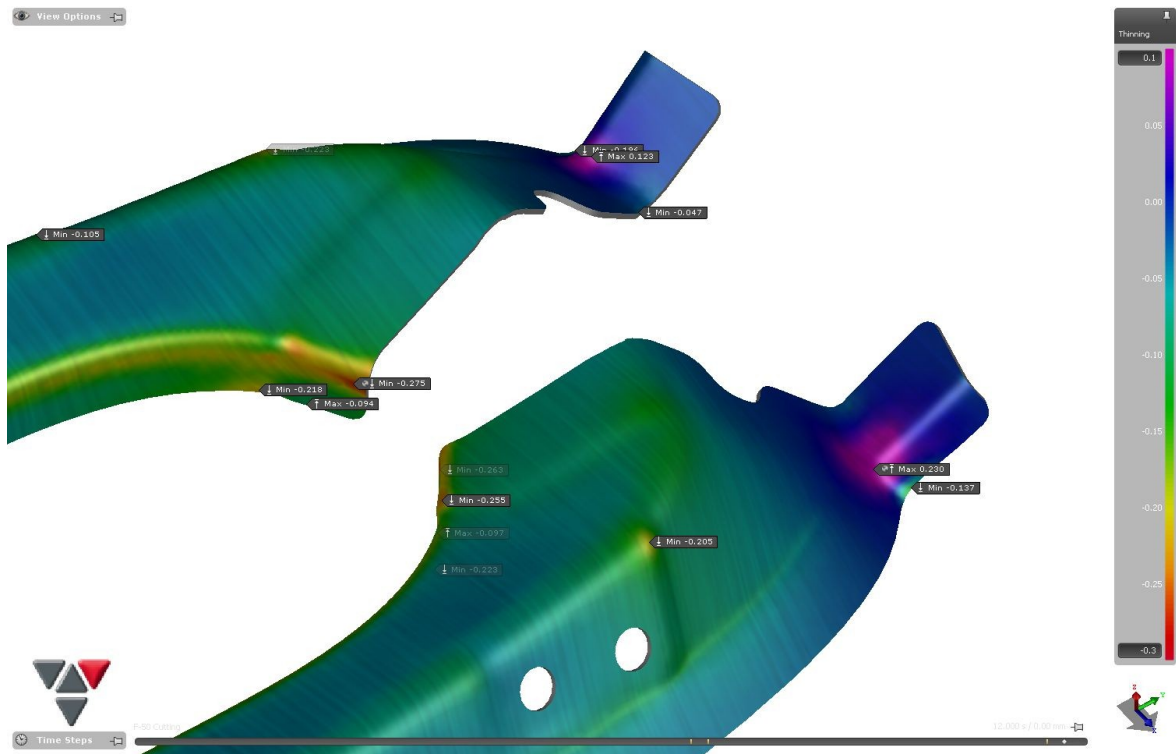
Obrázek 99 Nadměrné ztenčení v třetí operaci

V poslední operaci dojde k vystřížení finálního dílu. Kritická hodnota max. porušení 77 % nebyla překročena. Max. hodnota porušení je 56,6 %.



Obrázek 100 Max. porušení finálního dílu

V oblasti lemu nastává ztenčení o hodnotě 27,5 %. V oblasti ohybu přední packy dochází k stlačení 123 %.

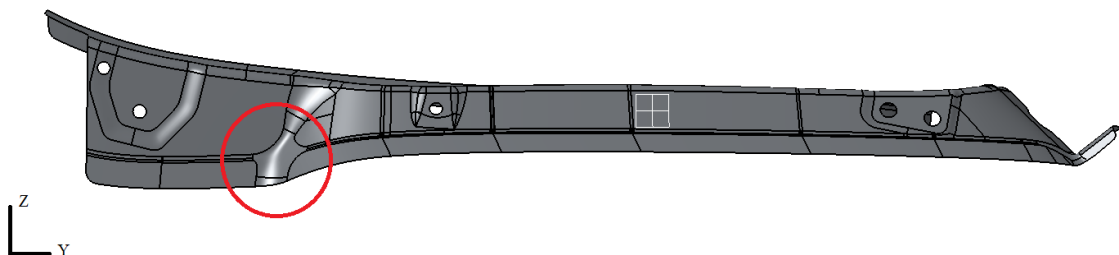


Obrázek 101 Nadměrné ztenčení finálního dílu

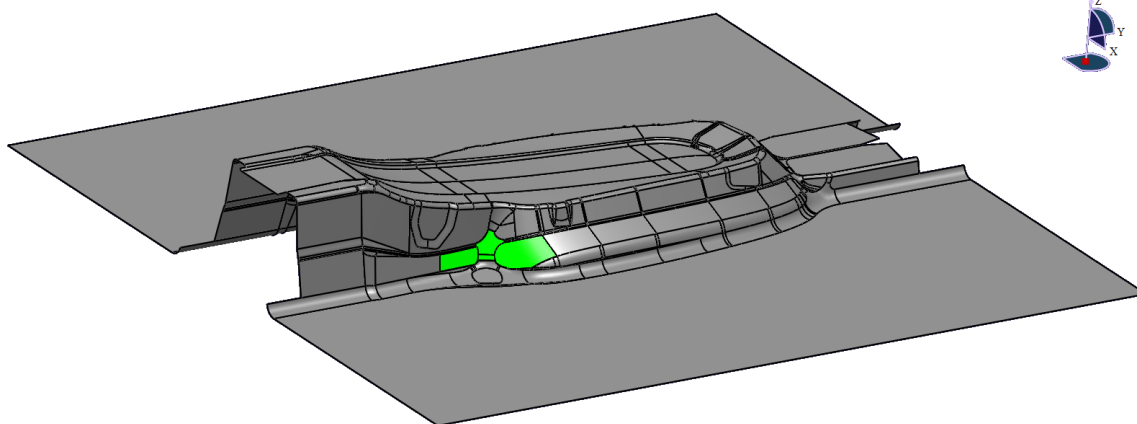
Při výrobním procesu je překročena kritická hodnota pro nadměrné ztenčení 25 %, ale v oblastech, které se vystřihují. Až na oblast v lemu, která přesahuje kritickou hodnotu o 2,5 %. Kritická hodnota stlačení bude vždy překročena, z důvodu ohybu packy. Plocha tažníku a přídržovače verze E je nevyhovující.

8.6 Plocha tažníku a přídržovače verze F

Při první operaci verze E je překročena kritická hodnota nadměrného ztenčení. Je potřeba upravit díl ve vyznačené oblasti zvětšením zaoblení (Obr. 103 - zeleně).

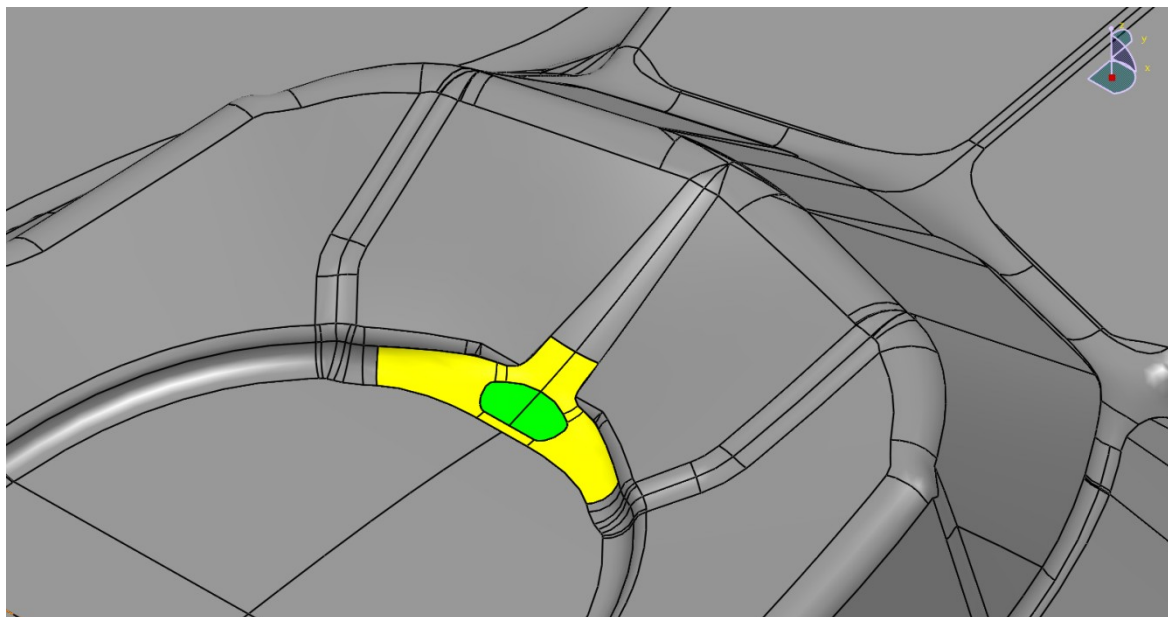


Obrázek 102 Úprava zadaného dílu



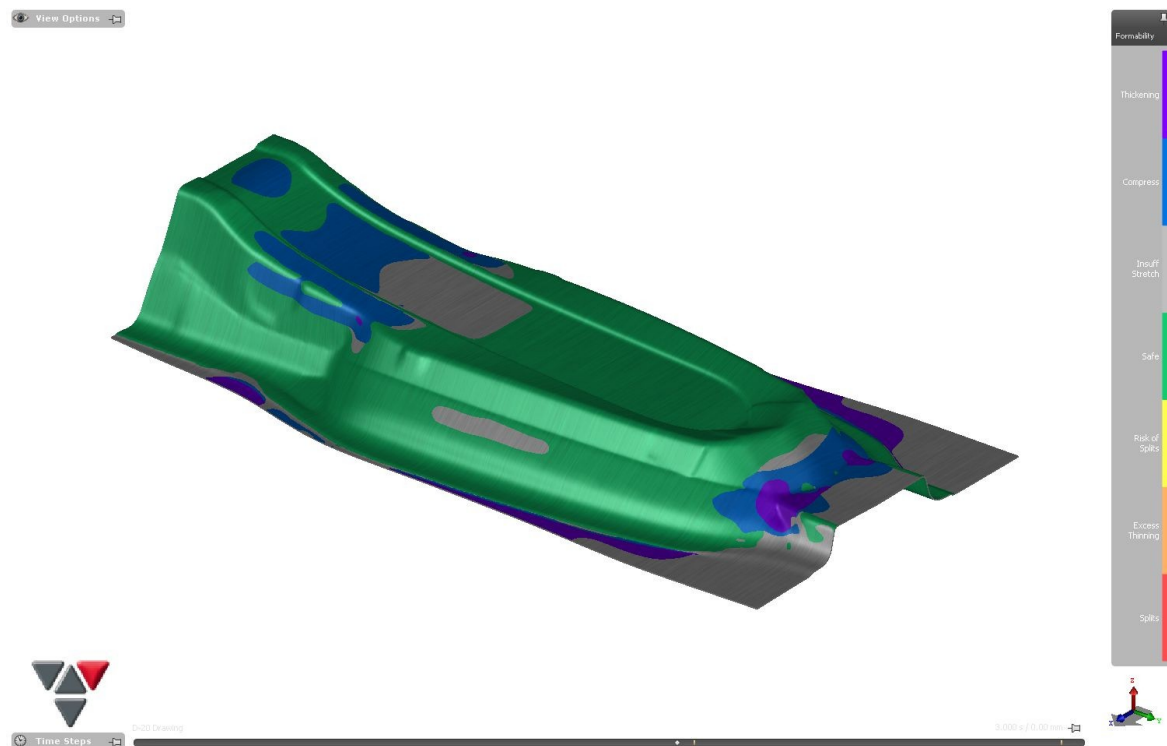
Obrázek 103 *Plocha tažníku a přidržovače verze F*

Další úpravou je zvětšení zaoblení (Obr. 104 – žlutě) a vytvoření oploštění v oblasti vrchního prolisu (Obr. 104 – zeleně).

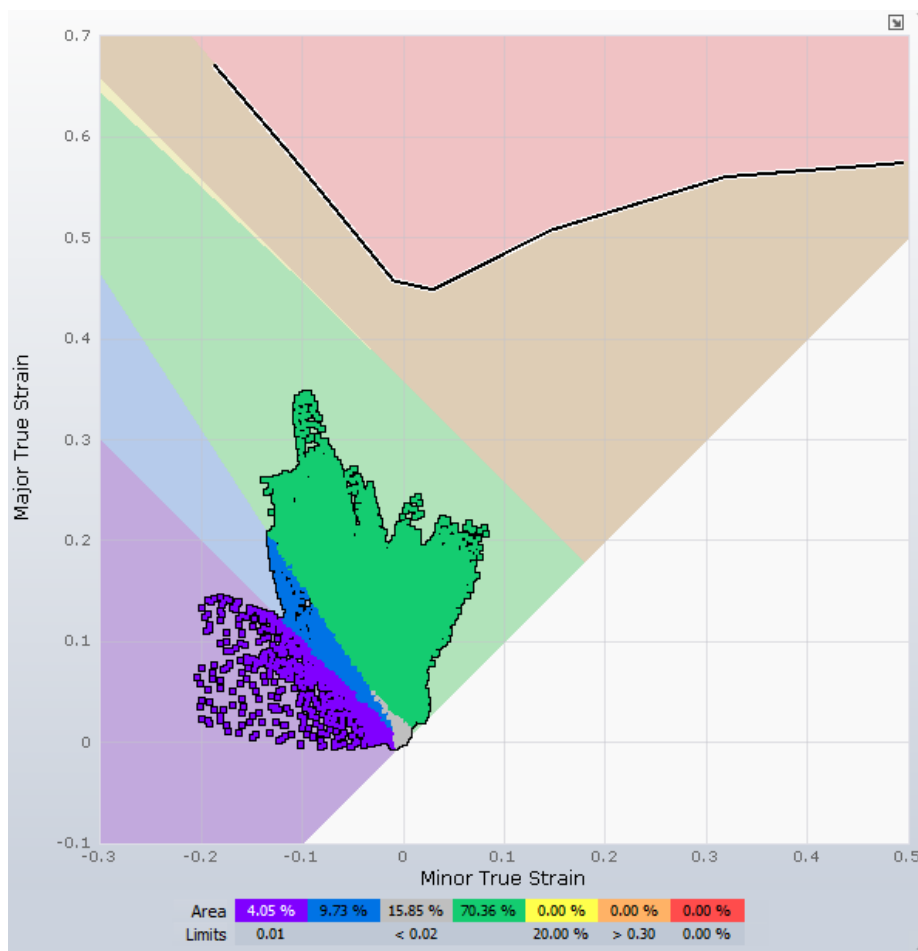


Obrázek 104 *Oploštění kritické oblasti prolisu*

Velikost brzd se od verze E nezměnily.



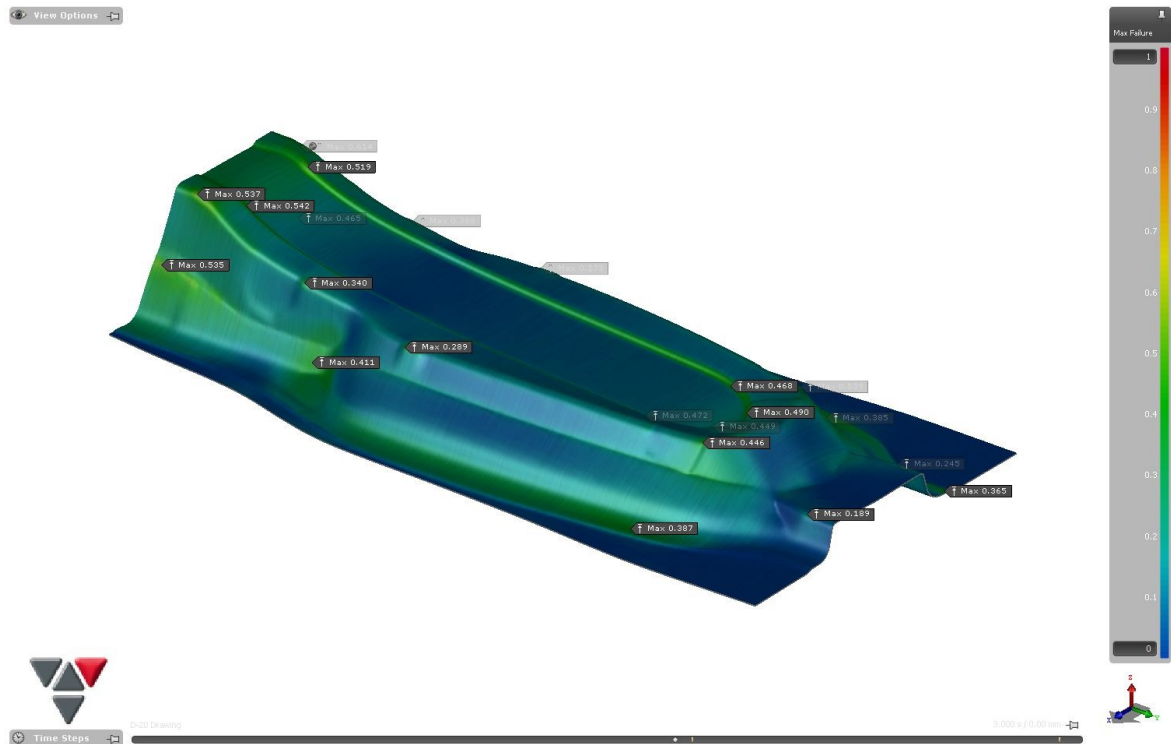
Obrázek 105 Tváritelnost verze F



Obrázek 106 FLD verze F

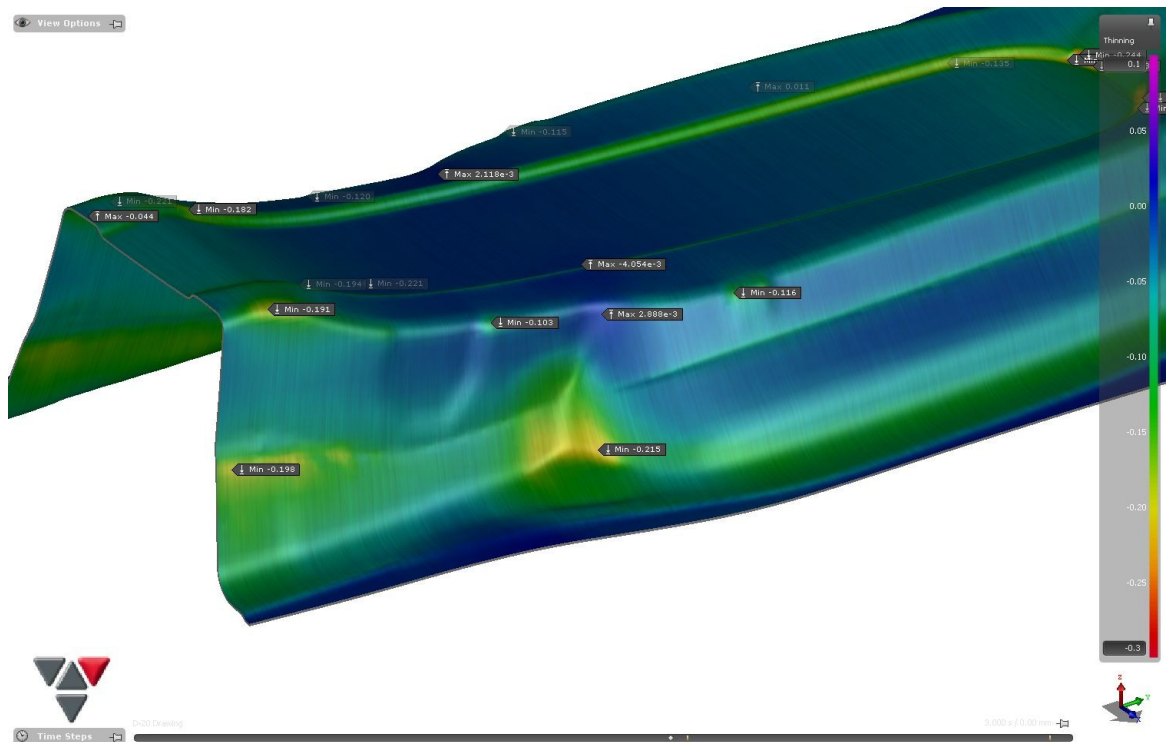
Oproti verzi E se sníží oblast bezpečná na 70,36 %. Oblast zvlnění se sníží na 9,73 %. Oblast nevyužitá se zvýší na 15,85 %. Oblast stlačení se zvětší na 4,05 %.

Kritická hodnota pro max. porušení 77 % není překročena. Max. hodnota porušení je 54,2 %.



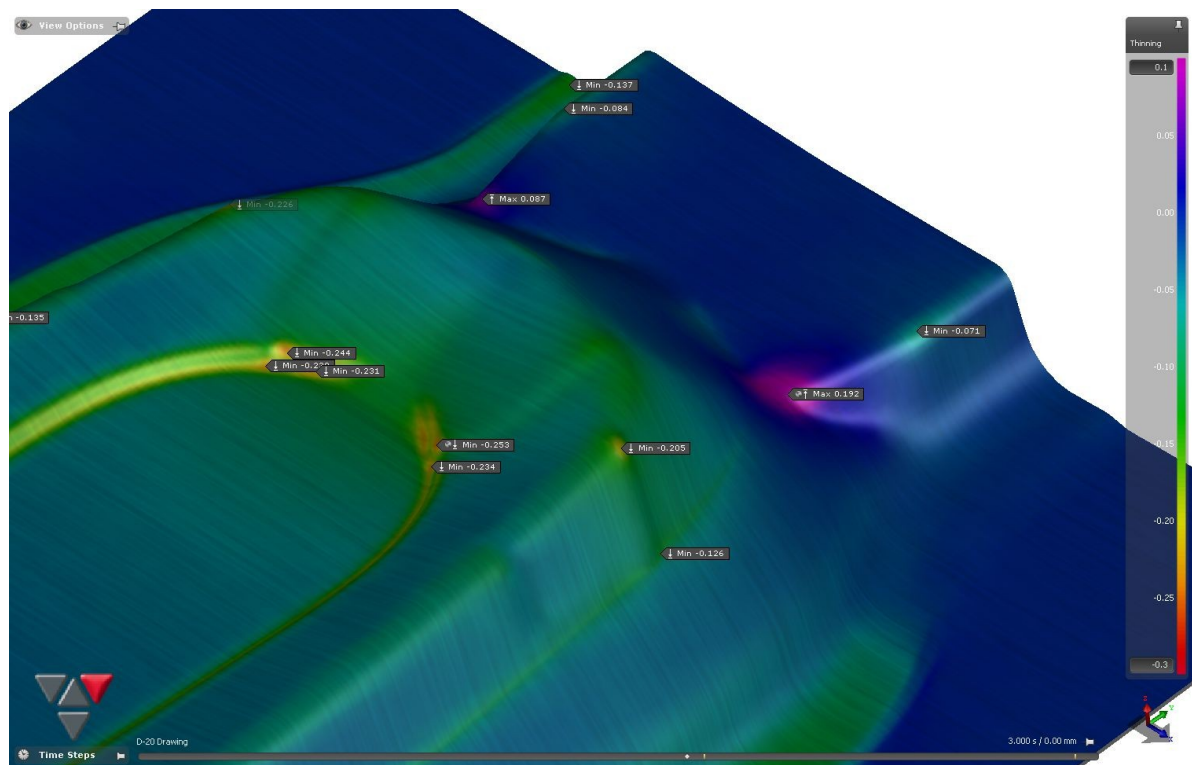
Obrázek 107 Max. porušení verze F

Kritická hodnota pro nadměrné ztenčení 25 % není překročena. Hodnota ztenčení 21,5 %.



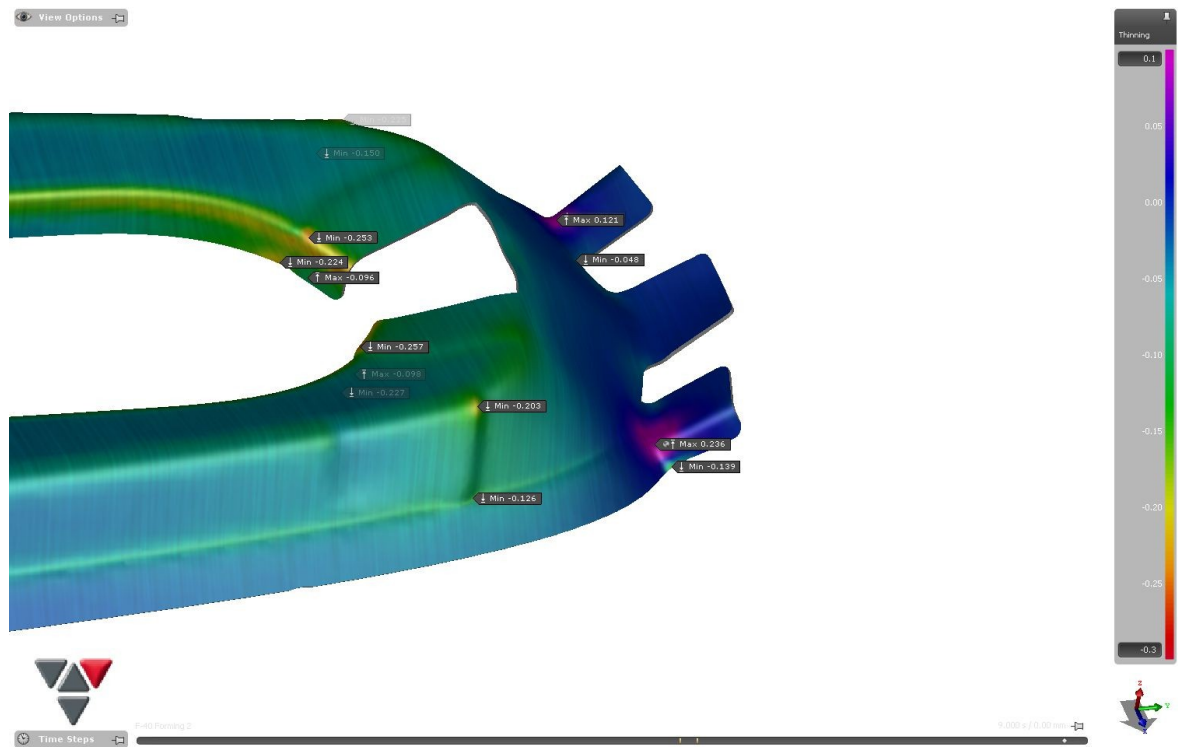
Obrázek 108 Nadměrné ztenčení verze F

Kritická hodnota pro nadměrné ztenčení 25 % v oblasti prolisu je překročena. Hodnota ztenčení 25,3 %. Dochází k stlačení materiálu v oblasti přední packy max. 192 %.



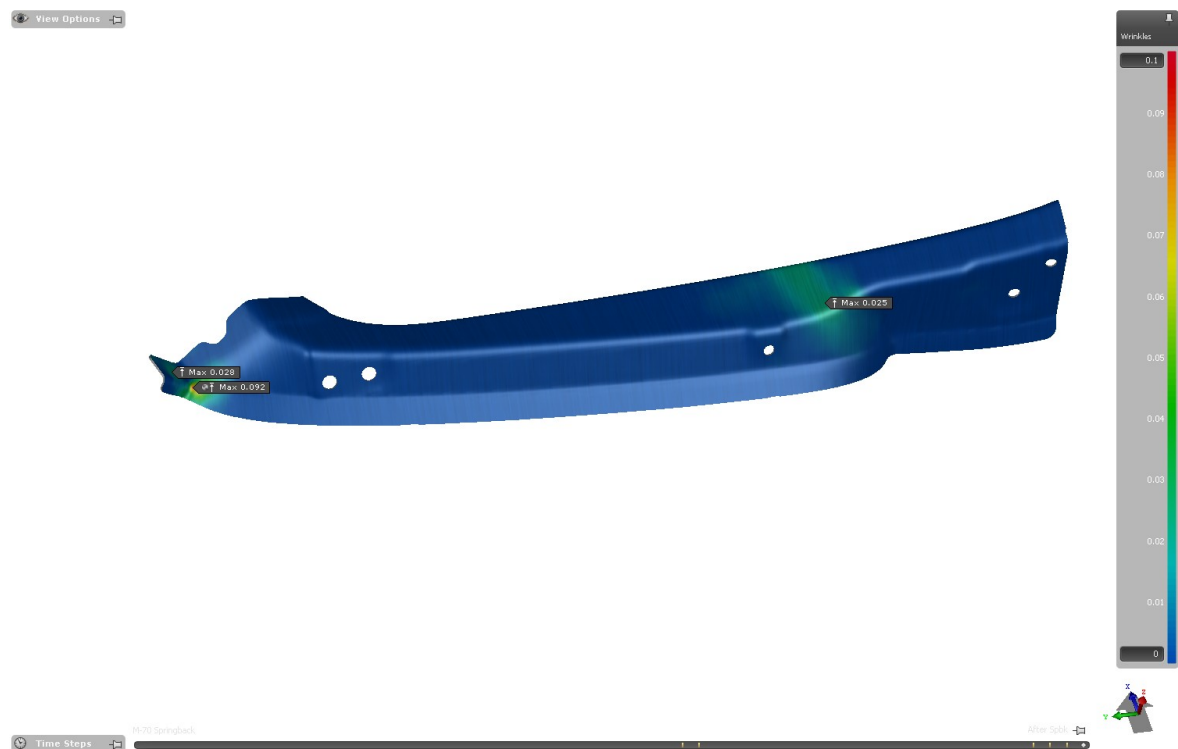
Obrázek 109 Nadměrné ztenčení verze F

Kritická hodnota pro nadměrné ztenčení 25 % ve třetí operaci je překročena o 0,7 %.



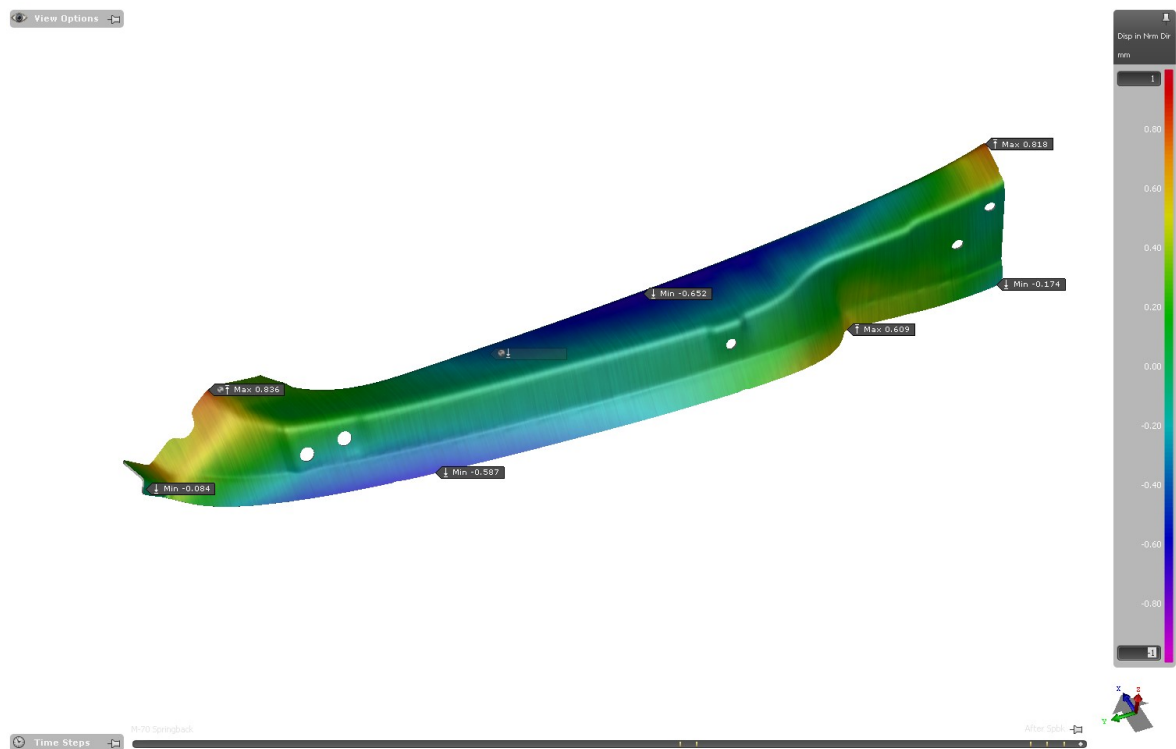
Obrázek 110 *Nadměrné ztenčení třetí operace*

Na finálním dílu bude viditelné zvlnění v oblasti přední packy (Obr. 111).



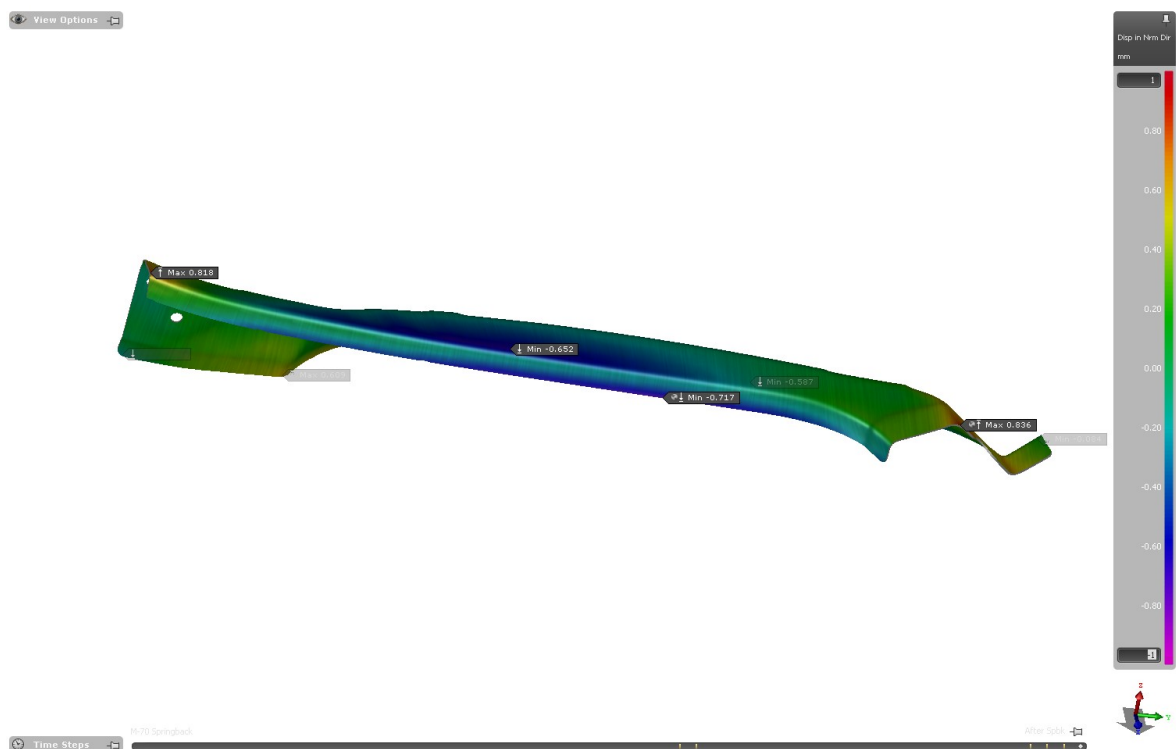
Obrázek 111 *Zvlnění finálního dílu*

Na finálním dílu se bude vytvářet odpružení od referenčního zadaného dílu o velikost max. 0,8 mm.



Obrázek 112 *Odpružení finálního dílu*

Pro kompenzaci odpružení by měla být dále upravena plocha tažníku.



Obrázek 113 *Odpružení finálního dílu*



Obrázek 114 Síly v jednotlivých operacích

Velikost tažné síly v první operaci je 2365 kN.

9 DISKUZE VÝSLEDKŮ A VYHODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH VARIANT

Podle Tab. 3 má prvotní verze A malou oblast bezpečného tváření. Proto bylo potřeba optimalizovat technologii.

Tabulka 3 Srovnání tvářitelnosti jednotlivých verzí pro první operaci

Verze	Oblast stlačení [%]	Oblast zvlnění [%]	Oblast nevyužitá [%]	Oblast bezpečná [%]	Oblast riziková [%]	Oblast ztenčení [%]	Oblast porušení [%]
A	21,85	15,33	35,02	27,8	0	0	0
B	2,25	3,66	10,92	82,44	0,01	0,42	0,31
C	3,82	9,60	18,24	68,33	0	0,01	0
D	3,77	5,38	15,39	75,45	0	0,01	0
E	2,16	11,70	4,01	82,13	0	0	0
F	4,05	9,73	15,85	70,36	0	0	0

Výsledky verze B se nesrovnávají, protože dochází k vytvoření oblasti porušení v první operaci. Nejlepších výsledků tvářitelnosti dosáhla verze E, až na oblast zvlnění, kde bylo dosaženo lepšího výsledků zvlnění ve verzi D.

Avšak verze E nelze použít, protože dochází k překročení kritické hodnoty nadměrného ztenčení 25 % (Tab. 4). Po optimalizaci na verzi F bylo dosaženo překročení kritické hodnoty nadměrného ztenčení o 0,3 %. Tím se verze F stává nejlepším optimalizovaným výsledkem výrobní technologie první operace. Zároveň verze F dosahuje nejmenšího max. porušení 54,2 %. Verze F je nejbezpečnější a nejstabilnější verze pro proces tažení.

Tabulka 4 Srovnání max. porušení a nadměrného ztenčení jednotlivých verzí po první operaci

Verze	Max. porušení [%]	Max. ztenčení [%]	Max. stlačení [%]
A	58,3	21,5	119,1
B	175,1	-	-
C	56,5	33,0	162,0
D	70,8	34,8	6,0
E	58,8	29,7	193,0
F	54,2	25,3	192,0

ZÁVĚR

V zadání práce je vypracování úspěšné simulace celého procesu podle zadaných parametrů. Hlavní parametry, které byly použité k ovlivnění výsledků, jsou plocha tažníku a přídržovače, velikost a umístění brzd.

Bylo řešeno šest variant optimalizace a nejlepších výsledků se docílilo ve verzi F. Byly dosaženy nejlepší výsledky za podmínky nepřekročení kritické hodnoty pro max. porušení a nadměrné ztenčení v první operaci. Ve třetí operaci se překročí kritická hodnota pro nadměrné ztenčení o max. 0,7 %. Tato hodnota by se mohla vyřešit vytvořením výstupku na ploše tažníku v první operaci. Výstupek vytvoří rezervu materiálu, která by se použila k lemování. Verze F zajišťuje vytvarování zadaných dílů bez vad, jako jsou trhliny a ztenčení stěny. Avšak v oblasti přední packy vzniká zvlnění způsobené stlačením materiálu a jejím pozdějším deformováním technologií ohybu.

Vzhledem ke konstrukci ploch tažníku a přídržovače je zásadní postupovat podle těchto rad. Vždy se snažit mít plochu přídržovače rovinou. Zajistit, aby platina byla ve všech místech zajištěna přídržovačem. Vzdálenost přídržovače by měla být 5 až 10 mm od vytvarování samotného dílu. Přídržovač by neměl být na díle, jelikož by způsobil nevytvarování celého dílu a při dotvarování by vznikla viditelná stopa na díle. Poloměr zaoblení mezi tažníkem a přídržovačem zvolit min. 10 mm. Na tažníku by měly být plynule přechody. Ostré hrany způsobují trhliny nebo ztenčení.

Problém, který tato práce neřeší je odpružení finálního dílu. Pro automobilový průmysl jsou tolerance rozměrů přísné. Podle výsledků odpružení, které by překročily tyto přísné tolerance, je potřeba vytvoření kompenzace odpružení.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DAVIES, G. *Materials for Automobile Bodies*. Elsevier, 2012. ISBN 978-0-08-096979-4.
- [2] MORTENSEN, A. *Concise Encyclopedia of Composite Materials (2nd Edition)*. Elsevier, 2007. ISBN 978-0-08-045126-8.
- [3] T. Trzepieciński, S. M. Najm. Current Trends in Metallic Materials for Body Panels and Structural Members Used in the Automotive Industry, *Materials* 2024, 17, 590, DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17030590>
- [4] MICHNA, Š., NOVÁ, I. *Technologie a zpracování kovových materiálů*. Prešov: Adin, 2008. ISBN 978-80-89244-38-6.
- [5] *ArcelorMittal* [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/PHS/usibor_ductibor
- [6] DEMERI, M. Y. *Advanced High-Strength Steels - Science, Technology, and Applications*. ASM International, 2013. ISBN 978-1-62708-005-7.
- [7] N. K. Sever. Material characterisation for strength and formability limits of DP 1180 sheet, *Canadian Metallurgical Quarterly* 2022, 61:3, 282-291, DOI: <https://doi.org/10.1080/00084433.2022.2044687>
- [8] *ArcelorMittal* [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/third_gen_AHSS/DH
- [9] D. Koreček, P. Solfronk, J. Sobotka. Analysis of TRIP Steel HCT690 Deformation Behaviour for Prediction of the Deformation Process and Spring-Back of the Material via Numerical Simulation, *Materials* 2024, 17, 535, DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17030535>
- [10] *ArcelorMittal* [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/third_gen_AHSS/CH
- [11] S. E. Kang, M. H. Kang, B. Mintz. Influence of vanadium, boron and titanium on hot ductility of high Al, TWIP steels, *Materials Science and Technology* 2021, 37:1, 42-58, DOI: <https://doi.org/10.1080/02670836.2020.1861736>
- [12] G. Fojt-Dymara, M. Opiela, W. Borek. Susceptibility of High-Manganese Steel to High-Temperature Cracking, *Materials* 2022, 15, 8198, DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15228198>
- [13] A. Cunha, A. Marques, M. Gasik, B. Trindade. Influence of temperature processing on the microstructure and hardness of the 420 stainless steel produced by hot pressing, *Materials and Manufacturing Processes* 2023, 38:3, 333-340, DOI: <https://doi.org/10.1080/10426914.2022.2072885>

- [14] *ArcelorMittal* [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/martensitic_steels/martinsite
- [15] MALLICK, P. K. *Materials, Design, and Manufacturing for Lightweight Vehicles (2nd Edition)*. Elsevier, 2021. ISBN 978-0-12-818712-8.
- [16] DVOŘÁK, M., GAJDOŠ, F., NOVOTNÝ, K. *Technologie tváření - Plošné a objemové tváření*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 3. vydání 2013. ISBN 978-80-214-4747-9.
- [17] *ELUC* [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1568>
- [18] P. Wankhede, K. Suresh. A review on the evaluation of formability in sheet metal forming, *Advances in Materials and Processing Technologies* 2020, 6:2, 458-485, DOI: <https://doi.org/10.1080/2374068X.2020.1731229>
- [19] Q. T. Pham, T. B. Mac, Young-Suk Kim, D. T. Nguyen. A comparative investigation on theoretical models for forming limit diagram prediction of automotive sheet metals, *Mechanics Based Design of Structures and Machines* 2023, 51:7, 3890-3904, DOI: <https://doi.org/10.1080/15397734.2021.1945461>
- [20] S. Bruschi, T. Altan, D. Banabic, P.F. Bariani, A. Brosius, J. Cao, A. Ghiotti, M. Khraisheh, M. Merklein, A. E. Tekkaya. Testing and modelling of material behaviour and formability in sheet metal forming, *CIRP Annals* 2014, 63:2, 727-749, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.005>.
- [21] J. P. Magrinho, M. B. Silva, L. Reis, P. A. F. Martins. Formability Limits, Fractography and Fracture Toughness in Sheet Metal Forming, *Materials* 2019, 12, 1493, DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12091493>
- [22] G. Patel, K. Ganesh, M. Kulkarni, O. Kulkarni. Experimental and numerical investigations on forming limit curves in micro forming, *Advances in Materials and Processing Technologies* 2022, 8:1, 33-44, DOI: <https://doi.org/10.1080/2374068X.2020.1793268>
- [23] *GOM Metrology* [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://www.gom.com/en/topics/forming-limit-curve>
- [24] N. Ayachi, N. Guerhazi, C. H. Pham, Pierre-Yves Manach. Development of a Nakazima Test Suitable for Determining the Formability of Ultra-Thin Copper Sheets, *Metals* 2020, 10, 1163, DOI: <https://doi.org/10.3390/met10091163>
- [25] *WorldAutoSteel* [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://ahssinsights.org/forming/formability/forming-limit-curves-flc/>
- [26] *ELUC* [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1569>

- [27] MEDUNA [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://www.kalirna.cz/mereni-tvrdosti>
- [28] ALTAN, T., TEKKAYA, A. E. *Sheet Metal Forming - Fundamentals*. ASM International, 2012. ISBN 978-1-61503-842-8.
- [29] BOLJANOVIC, V. *Sheet Metal Forming Processes and Die Design (2nd Edition)*. Industrial Press, 2014. ISBN 978-0-8311-3492-1.
- [30] ŘASA, J., HANĚK, V., KAFKA, J. *Strojírenská technologie 4 - Návrhy nástrojů, přípravků a měřidel. Zásady montáže*. Scientia, 2003. ISBN 80-7183-284-7.
- [31] DVOŘÁK, M., CÍSAŘOVÁ, M. *Technologie tváření* [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: [https://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/ctt technologie tvareni syllabus dvorak cisarova.pdf](https://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/ctt%20technologie%20tvareni%20syllabus%20dvorak%20cisarova.pdf)
- [32] ALTAN, T., TEKKAYA, A. E. *Sheet Metal Forming - Processes and Applications*. ASM International, 2012. ISBN 978-1-61503-844-2.
- [33] *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-hlubokey-tazeni>
- [34] R. Lachmayer, Bernd-Arno Behrens, T. Ehlers, P. Müller, P. Althaus, M. Oel, E. Farahmand, P. C. Gembarski, H. Wester, S. Hübner. Process-Integrated Lubrication in Sheet Metal Forming, *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 2022, 6, 121, DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp6050121>
- [35] HLUCHÝ, M., KOLOUCH, J., PAŇÁK, R. *Strojírenská technologie 2 - Polotovary a jejich technologičnost, 1. Díl*. Scientia, 2001. ISBN 80-7183-117-4.
- [36] *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-strihani>
- [37] S. Kumar, H. M. A. Hussein. *AI Applications in Sheet Metal Forming*. Springer, 2017. ISBN 978-981-10-2250-0.
- [38] *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-pocitacova-podpora-v-technologickych-procesech>
- [39] *AutoForm Forming R8* [Počítačový program]. [cit. 2024-05-08].
- [40] E. Lee, H. T. Ahn. *A reconstruction-based cell-centered high-order finite volume method for incompressible viscous flow simulation on unstructured meshes*, *Comput. Fluids* 2018, 170, 187-196, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2018.04.014>.
- [41] *COSASTEEL* [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://cs.cosasteel.com/dx54d/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

DP	Dual Phase
CP	Complex Phase
TRIP	Transformation Induced Plasticity
TWIP	Twinning-Induced Plasticity
AHSS	Advanced High-Strength Steel
UHSS	Ultra High-Strength Steel
HLSA	High-Strength Low Alloy
MS	Martenzit Steel
BH	Bake Hardening
IF	Interstitial Free
FLD	Forming Limit Diagram
FLC	Fracture Limit Curve
FFLD	Fracture Forming Limit Diagram
FLSD	Forming Limit Stress Diagram
NCAP	New Car Assessment Programme
ČSN	Československá státní norma
DIN	Deutsches Institut für Normung
JIS	Japanese Industrial Standard
EN	Evropská norma
ISO	International Organization for Standardization
ASTM	American Society for Testing Materials
TPV	Technologická příprava výroby
Např.	Například
Atd.	A tak dále
Obr.	Obrázek

Tab.	Tabulka
Pot.	Potenciál
Max.	Maximum
Min.	Minimum
C	Uhlík
Si	Křemík
Mn	Mangan
P	Fosfor
S	Síra
Al	Hliník
Ti	Titan
Cu	Měď
2D	Dvourozměrný
3D	Trojrozměrný
EPS	Elastic Plastic Shell
LWB	Laser Welded Blanks

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Přehled možných aplikací Usibor a Ductibor [5]	15
Obrázek 2 Přehled ocelí v závislosti tažnosti na pevnosti v tahu [2]	16
Obrázek 3 Typické díly DP ocelí [8]	18
Obrázek 4 Typické díly CP ocelí [10]	20
Obrázek 5 Typické díly martenzitických ocelí [14]	21
Obrázek 6 Princip Erichsenovy zkoušky [17]	24
Obrázek 7 Princip kalíškovací zkoušky [16]	25
Obrázek 8 Princip Fukuiho zkoušky [16]	26
Obrázek 9 Princip hydraulické zkoušky [16]	27
Obrázek 10 Princip zkoušky lámavosti [16]	28
Obrázek 11 Typický FLD pro ocel [1]	29
Obrázek 12 Princip Nakajima testu [25]	32
Obrázek 13 Schéma zkoušky podle Rockwella [27]	34
Obrázek 14 Schéma zkoušky podle Brinella [27]	34
Obrázek 15 Schéma zkoušky podle Vickerse [27]	35
Obrázek 16 Schéma tažení polotovaru [29]	37
Obrázek 17 Vady výtažků [16]	40
Obrázek 18 Schematické znázornění terminologie používané v procesu ohýbání [29]	42
Obrázek 19 Vztah mezi směrem válcování zrna a vznikem trhlin na ohýbaných dílech [29]	43
Obrázek 20 Odpružení ohybu tvaru V a U [35]	44
Obrázek 21 Schéma procesu stříhu [29]	47
Obrázek 22 Vyznačené oblasti FLD [39]	52
Obrázek 23 Princip zvlnění [39]	54
Obrázek 24 Pravý pohled na zadaný díl	58
Obrázek 25 Levý pohled na zadaný díl	58
Obrázek 26 Izometrický pohled na zadaný díl	59
Obrázek 27 Popisek materiálu podle knihovny programu AutoForm [39]	60
Obrázek 28 FLD materiálu DX 54D pro tloušťku 1,5 mm (FLC je vyznačena modře) [39]	60
Obrázek 29 Vyznačení klenby v oblasti stěny dílu	61
Obrázek 30 Vyznačení klenby v oblasti lemu	61
Obrázek 31 Úprava lemu na díle	62
Obrázek 32 Srovnání lemu před a po úpravě	62

Obrázek 33 <i>Nastavení operací výrobního procesu</i>	63
Obrázek 34 <i>Parametry lisu [39]</i>	64
Obrázek 35 <i>Nastavení technologií výrobních operací</i>	65
Obrázek 36 <i>Nastavení obrysu platiny</i>	66
Obrázek 37 <i>Velikost platiny</i>	67
Obrázek 38 <i>Nastavení maziva</i>	68
Obrázek 39 <i>Výchozí nastavení přidržovače</i>	69
Obrázek 40 <i>Nastavení přidržovače</i>	70
Obrázek 41 <i>Nastavení tažnice a tažníku</i>	71
Obrázek 42 <i>Nastavení ploch pro první operaci</i>	72
Obrázek 43 <i>Nastavení křivky stříhu uzavřeného obrysu</i>	72
Obrázek 44 <i>Nastavení střižníku druhé operace</i>	73
Obrázek 45 <i>Nastavení křivky stříhu otevřeného obrysu</i>	74
Obrázek 46 <i>Nastavení střižníku druhé operace</i>	75
Obrázek 47 <i>Vyznačení přední packy</i>	76
Obrázek 48 <i>Nastavení ploch třetí operace</i>	76
Obrázek 49 <i>Nastavení lemovacího a ohýbacího klínu</i>	77
Obrázek 50 <i>Nastavení vrchního a spodního přidržovače</i>	78
Obrázek 51 <i>Nastavení křivek pro poslední operaci</i>	79
Obrázek 52 <i>Nastavení křivek pro vystřihnutí otvorů</i>	79
Obrázek 53 <i>Nastavení střižníku poslední operace</i>	80
Obrázek 54 <i>Nastavení střižníku poslední operace</i>	81
Obrázek 55 <i>Nastavení simulace</i>	82
Obrázek 56 <i>Nastavení výsledků simulace</i>	83
Obrázek 57 <i>Plocha tažníku a přidržovače verze A</i>	84
Obrázek 58 <i>Výsledek tvářitelnosti verze A</i>	85
Obrázek 59 <i>FLD verze A</i>	85
Obrázek 60 <i>Vytvarování platiny verze A</i>	86
Obrázek 61 <i>Max. porušení verze A</i>	86
Obrázek 62 <i>Nadměrné ztenčení verze A</i>	87
Obrázek 63 <i>Zvlnění v průběhu operace verze A</i>	87
Obrázek 64 <i>Zvlnění verze A</i>	88
Obrázek 65 <i>Plocha tažníku a přidržovače verze B</i>	88
Obrázek 66 <i>Umístění brzd</i>	89
Obrázek 67 <i>Velikost brzd verze B</i>	90

Obrázek 68 Tvářitelnost verze B.....	91
Obrázek 69 FLD verze B	91
Obrázek 70 Max. porušení verze B	92
Obrázek 71 Oblast porušení verze B	93
Obrázek 72 Průřez ploch při procesu tažení	93
Obrázek 73 Ztenčení v průřezu ploch při procesu tažení.....	94
Obrázek 74 Plocha tažníku a přídržovače verze C.....	95
Obrázek 75 Parametry brzd verze C.....	96
Obrázek 76 Tvářitelnost verze C	97
Obrázek 77 FLD verze C	97
Obrázek 78 Max. porušení verze C.....	98
Obrázek 79 Nadměrné ztenčení verze C	99
Obrázek 80 Pot. zvlnění verze C	99
Obrázek 81 Velikost brzd verze D.....	100
Obrázek 82 Tvářitelnost verze D	101
Obrázek 83 FLD verze D	101
Obrázek 84 Max. porušení verze D	102
Obrázek 85 Nadměrné ztenčení verze D.....	103
Obrázek 86 Nadměrné ztenčení verze D.....	103
Obrázek 87 Pot. zvlnění verze D.....	104
Obrázek 88 Plocha tažníku a přídržovače verze E	105
Obrázek 89 Velikost brzd verze E	106
Obrázek 90 Tvářitelnost verze E.....	107
Obrázek 91 FLD verze E	107
Obrázek 92 Max. porušení verze E	108
Obrázek 93 Nadměrné ztenčení verze E	109
Obrázek 94 Nadměrné ztenčení verze E	109
Obrázek 95 Platina na začátku tváření.....	110
Obrázek 96 Platina po první operaci	110
Obrázek 97 Platina po druhé operaci.....	111
Obrázek 98 Platina po třetí operaci	111
Obrázek 99 Nadměrné ztenčení v třetí operaci	112
Obrázek 100 Max. porušení finálního dílu	112
Obrázek 101 Nadměrné ztenčení finálního dílu	113
Obrázek 102 Úprava zadaného dílu	113

Obrázek 103 <i>Plocha tažníku a přídržovače verze F</i>	114
Obrázek 104 <i>Oploštění kritické oblasti prolisu</i>	114
Obrázek 105 <i>Tvářitelnost verze F</i>	115
Obrázek 106 <i>FLD verze F</i>	115
Obrázek 107 <i>Max. porušení verze F</i>	116
Obrázek 108 <i>Nadměrné ztenčení verze F</i>	117
Obrázek 109 <i>Nadměrné ztenčení verze F</i>	117
Obrázek 110 <i>Nadměrné ztenčení třetí operace</i>	118
Obrázek 111 <i>Zvlnění finálního dílu</i>	118
Obrázek 112 <i>Odpružení finálního dílu</i>	119
Obrázek 113 <i>Odpružení finálního dílu</i>	119
Obrázek 114 <i>Síly v jednotlivých operacích</i>	120

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 <i>Mechanické vlastnosti vybraných ocelí [2]</i>	22
Tabulka 2 <i>Chemické složení DX 54D válcované za studena [8]</i>	59
Tabulka 3 <i>Srovnání tvářitelnosti jednotlivých verzí pro první operaci</i>	121
Tabulka 4 <i>Srovnání max. porušení a nadměrného ztenčení jednotlivých verzí po první operaci</i>	122

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha PI: DVD obsahující simulace (.afd), plochy (.step) a křivky (.igs)

Příloha PII: Výkres spodní plochy zadaného dílu

