

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**TEZE
DISERTAČNÍ
PRÁCE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

Vliv rychlosti deformace na polohu FLC křivek

Ing. Vít Novák

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Strojírenská technologie

Školitel: doc. Ing. Jan Šanovec, CSc.

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha

Březen, 2024

Název anglicky:

Effect of strain rate on the position of FLC curves

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na Ústavu strojírenské technologie Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: Ing. Vít Novák

Ústav Strojírenské technologie, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, 166 07, Praha 6

Školitel: doc. Ing. Jan Šanovec, CSc.

Ústav Strojírenské technologie, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, 166 07, Praha 6

Školitel-specialista: Ing. František Tatíček, Ph.D.

Ústav Strojírenské technologie, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, 166 07, Praha 6

Oponenti:

prof. Ing. Emil Evin, CSc. (TUKE)

prof. Ing. Čada Radek, CSc. (VŠB-TUO)

prof. Ing. Františka Pešlová, Ph.D.

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod.

v zasedací místnosti č. 17 (v přízemí) Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6

před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Strojírenská technologie.

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

prof. Ing. Jan Suchánek, CSc.

předseda oborové rady oboru Strojírenská technologie

Fakulta strojní ČVUT v Praze

Obsah

| | | |
|------|--|----|
| 1 | Současný stav problematiky..... | 1 |
| 1.1 | Zásoba plasticity materiálu..... | 2 |
| 1.2 | Optické systémy pro analýzu deformace..... | 3 |
| 2 | Cíle disertační práce..... | 4 |
| 3 | Metodika vyhodnocování zkoušky tahem pomocí systému ARAMIS pro různé rychlosti deformace..... | 5 |
| 4 | Metodika přípravy měrné sítě pro sledování deformací na povrchu plechu..... | 7 |
| 4.1 | Zkouška dle Erichsena – volba barvy..... | 7 |
| 4.2 | Metodika přípravy povrchu..... | 8 |
| 5 | Studium vlivu jednotlivých parametrů na zkoušku tahem..... | 9 |
| 5.1 | Vliv rychlosti deformace a dalších parametrů na zásobu plasticity materiálu CR4..... | 10 |
| 6 | Studium polohy FLC křivek..... | 13 |
| 6.1 | Metodika přípravy správného tribologického systému zkouška dle Nakajimy..... | 13 |
| 6.2 | Srovnání levé strany FLC křivky pro zkoušku Nakajima a zkoušku tahem s vrubem pro materiál DX57 (CR5)..... | 14 |
| 6.3 | Srovnání vlivu jednotlivých parametrů pro materiál CR4..... | 15 |
| 7 | Testování problematiky na prototypovém výlisku..... | 19 |
| 7.1 | Vyhodnocení a porovnání dosažených výsledků ARGUS, ARAMIS | 20 |
| 8 | Sestavení materiálové karty..... | 22 |
| 9 | Numerická simulace, verifikace naměřených dat..... | 25 |
| 10 | Diskuze dosažených výsledků..... | 28 |
| 11 | Závěr..... | 29 |
| 11.1 | Splnění cílů disertační práce..... | 29 |
| 11.2 | Teoretický přínos disertační práce..... | 34 |
| 11.3 | Praktický přínos disertační práce..... | 34 |

| | | |
|------|--|----|
| 11.4 | Možnosti dalšího rozvoje disertační práce | 34 |
| | Seznam použité literatury v tezích | 35 |
| | Publikace autora vztahující se k disertační práci..... | 40 |
| | Anotace | 44 |
| | Summary | 44 |

1 Současný stav problematiky

V automobilovém průmyslu je kladen stále větší důraz na rychlejší, produktivnější, efektivnější výrobu karosářských výlisků. Roste produktivita práce a počet vyráběných komponent automobilů. Z hlediska emisních limitů roste požadavek na snižování hmotnosti karoserie, požadavky emisních limitů se nařízením Evropské komise (EK) postupně zpřísňují. Dříve (od roku 2015) platil limit 130 g CO₂/100 km, což u spalovacích (zážehových) motorů odpovídá spotřebě 5,56 l/100 km a u vznětových motorů spotřebě 4,85 l/100 km, ale po roce 2020 musí evropští výrobci vyrábět automobily s průměrnou spotřebou 95 g CO₂/ km, což u benzinových motorů odpovídá spotřebě 4,06 l/100 km a u dieselových motorů spotřebě 3,54 l/100 km. Automobilky nastavením těchto emisních limitů musí snížit spotřebu svých aut bezmála o 30 %. Limitní hodnota 95 g CO₂/100 km od roku 2020 je stanovena pro průměrně těžký automobil o hmotnosti 1400 kg.[1], [2], [3]

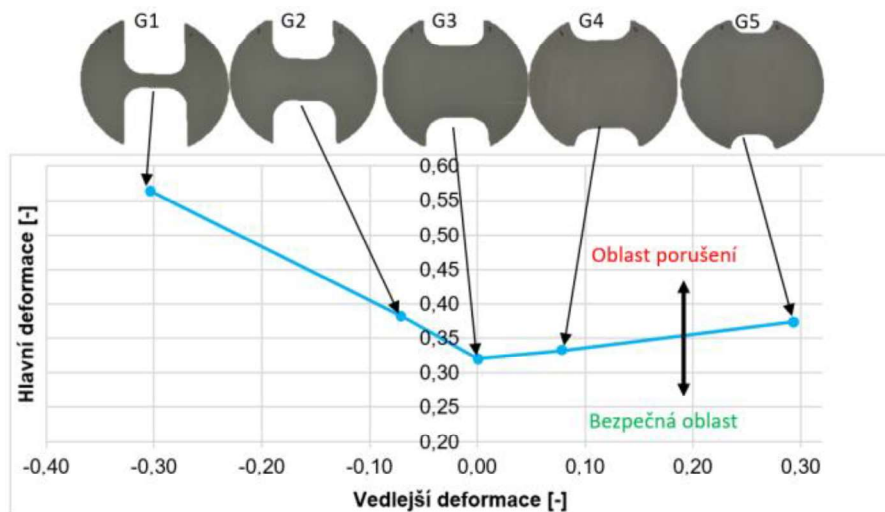
Snižování hmotnosti vozu je možné docílit několika způsoby, např. zmenšením velikosti celé karosérie, snížením hmotnosti interiéru a motorového prostoru nebo snížením hmotnosti karosářských výlisků, což lze realizovat zmenšením tloušťky plechů pro stavbu karoserie. Zatímco první 3 možnosti jsou pro zákazníka neatraktivní nebo to není možné z hlediska požadavků na pasivní bezpečnost, snížení hmotnosti karoserie lze dosáhnout použitím materiálů o vyšší pevnosti a menší tloušťce (při zachování stejné tuhosti/pevnosti karoserie), případně je možné použití materiálů s nižší hustotou (např. slitiny hliníku, použití polymerních a kompozitních materiálů apod.). Pro výrobu velkoplošných dílů karoserie se dnes používají nejčastěji plechy ocelové pozinkované nebo hliníkové, nejčastěji v rozmezí tlouštěk 0,6 ÷ 0,8 mm. [3], [4]

Každá z těchto uvedených možností má však nějaká svá omezení, která ovlivňují možné nasazení do sériové produkce. Obecně dalším problémem je vlastní výrobní proces velkoplošných dílů karoserie, který je ovlivňován tvarovou složitostí, požadavkem na snižování hmotnosti výsledného dílu, ale také vyšší produktivitou práce, která vyžaduje vyšší výrobní takt. S rostoucím výrobním taktém se pojí problém vyššího počtu neshodných výlisků, což jde proti požadavku na zvyšování produktivity práce.

Hlavní motivací vzniku disertační práce je zvýšit úroveň znalostí chování materiálu používaného pro výrobu velkoplošných výlisků při procesech tváření, které odpovídají vyšším taktům výrobního procesu.

1.1 Zásoba plasticity materiálu

Základní vlastností materiálu z pohledu procesu tváření je jeho zásoba plasticity. Je to vlastnost, která ukazuje míru možné deformace materiálu, aniž by došlo k porušení materiálu (ztrátě stability). Tvářitelnost vychází ze zásoby plasticity, je však ovlivňována řadou okrajových podmínek působících na materiál v průběhu procesu tváření. Mezi tyto okrajové podmínky řadíme fyzikálně metalurgické faktory (chemické složení, struktura, tepelně aktivované děje apod.), termomechanické činitele (teplota tváření, deformační rychlost, velikost deformace a historie tváření), napěťový stav (stav napjatosti, přídavná napětí, tření) a technologické podmínky procesu tváření (tvar a drsnost tvářecích nástrojů). [5], [6] Jedním z nejpoužívanějších způsobů vyjadřování zásoby plasticity materiálu je pomocí FLD diagramu (Forming Limit Diagram, viz Obrázek 1.1).



Obrázek 1.1 Poloha jednotlivých geometrií na FLD diagramu

Diagram ukazuje při různých stavech deformace okamžik vyčerpání zásoby plasticity, který se projevuje ztrátou stability porušením [6]. V diagramu je FLC (Forming Limit Curves) křivkou rozdělena oblast bezpečného tváření bez rizika porušení materiálu (pod křivkou), oblast nad křivkou prezentuje deformaci, při kterých dochází k porušení materiálu (je vyčerpána zásoba plasticity). FLC křivka tedy prezentuje oblast, kdy dochází obvykle k porušení materiálu. Pro většinu materiálů je průběh FLC křivky tvarově podobný, rozdíl je však v místě položení křivky ve vztahu k velikostem deformace a tzv. její rozevření. Podle literatury platí, že čím větší je tloušťka materiálu, čím vyšší jsou hodnoty exponentu deformačního zpevnění a tím větší je i zásoba plasticity, křivka FLC postavená výš. S rostoucí hodnotou meze kluzu se poloha FLC posouvá směrem níž, zásoba plasticity je menší. FLD diagram je možné sestavit na základě technologických a mechanických zkoušek [5], [6], [7], [8] a také na základě matematických modelů (eMMFC, GFLC a PEPS) [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16]

1.2 Optické systémy pro analýzu deformace

Pro vyhodnocení velikosti deformace analyzovaného dílu jsou používány optické systémy. Principem je použití optického prvku, kterým je pozorován povrch analyzovaného dílu, který byl před deformací opatřen měrnou sítí. Při snímání je třeba dodržovat podmínky definované pro používaný optický systém. Ze zachycených a zpracovaných snímků jsou získány 3D souřadnice bodů ležící na povrchu objektu. Ze souřadnic konkrétních elementů je možné určit jejich vzájemný posuv, tudíž i velikost deformace. Na základě získaných hodnot deformace lze následně vyhodnotit míru vyčerpání zásoby plasticity. [17], [18], [19], [20], [21], [22] Významnými systémy pro optické vyhodnocení velikosti deformace jednotlivých dílů jsou systémy ARGUS a ARAMIS. Oba systémy jsou vyvíjeny společností GOM a na českém trhu distribuovány společností MCAE Systems, s.r.o. Mezi společné přednosti zmíněných systémů patří jejich mobilita a rozsah měřené deformace. Systémy lze využívat pro zkoušení materiálu, ověřování a optimalizaci simulace tažení a optimalizaci lisovacích nástrojů. [23], [24], [25], [26]

ARGUS je bezkontaktní optický systém pro měření 3D deformací výlisků pracující na principu fotogrammetrické metody. Systém pro analýzu deformace využívá snímky deformovaného povrchu s vysokým rozlišením, používá se pro určení velikosti deformace na výliscích po procesu tváření. Před tvářením je na povrch plechu třeba nanést deformační síť měřících bodů (průměr a hustotu sítě volíme dle potřeby). Měrná síť musí splňovat poměrně přísná kritéria rozlišitelnosti, aby ji bylo možné následně vyhodnotit. Systém ARGUS se používá pro verifikaci či porovnání deformace reálného výlisku s výsledky numerických simulací. Práce se systémem ARGUS je popsána podrobně v literatuře. [23], [24]

Systém ARAMIS pracuje na principu metody DIC. Metoda spočívá ve sledování chování nástřiku při deformaci zkušební tělesa. Nástřík je tvořen systémem dvou kontrastních barev nanášených postupně. Nejprve se provede nástřík pro eliminaci možných odlesků matovou barvou. Další nástřík provede vytvoření nepravidelné, stochastické sítě. Pro vytvoření nástřiku se používají barvy na opačných stranách barevného spektra pro dosažení vysokého kontrastu (obvykle bílá a černá). Pozorovaný objekt je v průběhu deformace snímán kamerovým systémem (DIC metoda). Výhodou tohoto systému je pozorovat probíhající proces od začátku do konce. Což ale také znamená, že pozorovaný objekt musí být po celou dobu probíhající deformace pozorovatelný (např. zkouška tahem viz Obrázek 8.4). Systém je možné použít pro široké spektrum velikosti pozorovaného objektu i pro značné deformace (či vzájemné pohyby) objektu. [25], [26]

2 Cíle disertační práce

Cíle vycházejí z provedené literární rešerše, která byla obsažena v předchozích kapitolách. Cílem práce je vytvořit metodiku, měření a vyhodnocování zkoušky dle Nakajima, dále vytvoření metodiky, která popíše, jak rychlost deformace ovlivňuje polohu křivek FLC a jak s tímto parametrem pracovat, aby simulace procesu odpovídala reálnému procesu. Dalším cílem práce je testování dané problematiky na reálném výlisku a posledním cílem je vytvoření metodiky práce se simulačním softwarem s ohledem na polohu křivek FLC při různých rychlostech deformace.

Návrh metodiky pro vyhodnocování FLC křivek při vyšších rychlostech deformace.

Řešení hlavního cíle práce lze rozdělit na řešení jednotlivých dílčích cílů:

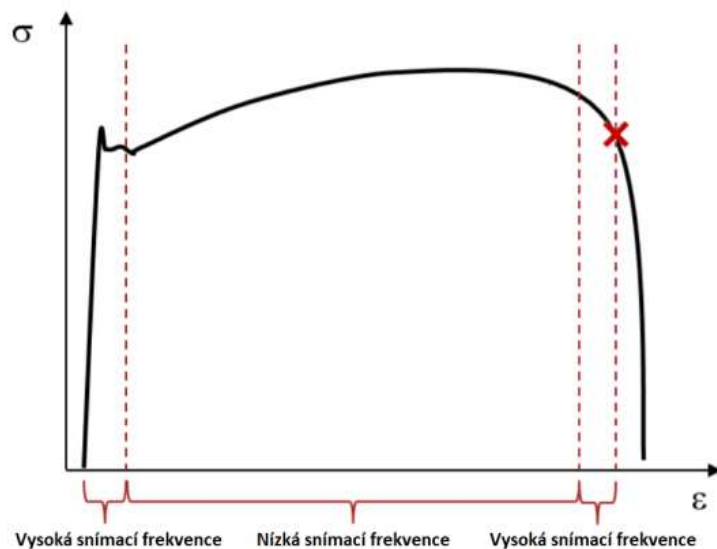
- 1) Metodika vyhodnocování zkoušky tahem pomocí systému ARAMIS pro různé rychlosti deformace
- 2) Metodika přípravy měrné sítě pro sledování deformací na povrchu plechu
- 3) Studium vlivu jednotlivých parametrů na zkoušku tahem
- 4) Studium polohy FLC křivek v závislosti na rychlosti deformace
- 5) Testování problematiky na prototypovém výlisku
- 6) Metodika sestavení materiálové karty
- 7) Verifikace naměřených výsledků pomocí numerické simulace

Pochopení vlivu rychlosti deformace na lisovací proces přinese zpřesnění materiálových modelů používaných v numerických simulacích a možnost lépe a přesněji navrhnout technologii tvářecího procesu. V současné době, je kladen velký důraz na stabilní lisovací proces, proces bez vzniku vad, co možná největší využití materiálu z hlediska dosažitelných deformací. Převážně u vysoko pevnostních ocelí, které mají menší tvářitelnost (zásobu plasticity) se mnohem hůře dosahuje požadovaného tvaru. V dnešní době je tendence vyrábět velké výlisky v rychlejší taktu i 15÷20 zdvihů za min. (dříve 4÷10 zdvihů za min.). Moderní lisy to sice dnes umožňují, ale objevuje se nestabilita lisovacího procesu, která se projevuje např. vyšším podílem neshodných výlisků. Snížení taktu výroby (počet zdvihů za min.) vede ke snížení počtu neshodných výlisků (vyřeší se nestabilita lisovacího procesu). To, ale neřeší problém požadované produktivity práce, protože se snížením taktu výroby vznikají vícenáklady (delší čas pro dosažení požadované výrobní dávky). Proto vytvoření metodiky vlivu rychlosti deformace na polohu FLC křivky umožní lépe navrhovat výrobní proces s využitím simulačních softwarů pro technologie plošného tváření, docílí se přesnějšího návrhu lisovacího procesu a umožní využívat vysokopevnostní oceli na hranici dosažitelných deformací.

3 Metodika vyhodnocování zkoušky tahem pomocí systému ARAMIS pro různé rychlosti deformace

Součástí moderních materiálových modelů je popis křivky zpevnění pro různé rychlosti deformace. Jedním z dílčích úkolů disertační práce je vyřešení propojení systému ARAMIS s trhacím zařízením (LabTest Model 5.100SP1) a zajistit získání dat z obou zařízení zároveň. Dále je třeba porovnat výsledky získané kamerovým systémem ARAMIS s extenzometry, kterými je osazen zkušební stroj pro zkoušku tahem. Zkouška tahem byla provedena na mechanickém zkušebním stroji LabTest 5.100SP1 od firmy LABORTECH s.r.o. Toto zkušební zařízení poskytuje naměřené hodnoty síly pouze v digitální podobě. Systém ARAMIS je však schopen přijímání dat pouze v analogové podobě, takže nastal problém vzájemné komunikace mezi měřicím systémem a zkušebním strojem. Po ověření funkčnosti systému bylo řešeno propojení systému ARAMIS se zkušebním zařízením pomocí analogového kabelu. [1A]

Během zkoušky tahem je podstatné zaměřit se na data naměřená před přechodem na plastickou deformaci a pak na data získaná těsně před lomem zkušebního tělesa. Aby byl získán dostatek dat během těchto částí testu, zaznamenávají se tyto dva úseky zkoušky tahem s vysokou frekvencí. Ve zbylých částech testu není nutné získat tak vysoké množství naměřených obrazů a měření se tedy provádí s nižší frekvencí – viz Obrázek 3.1.

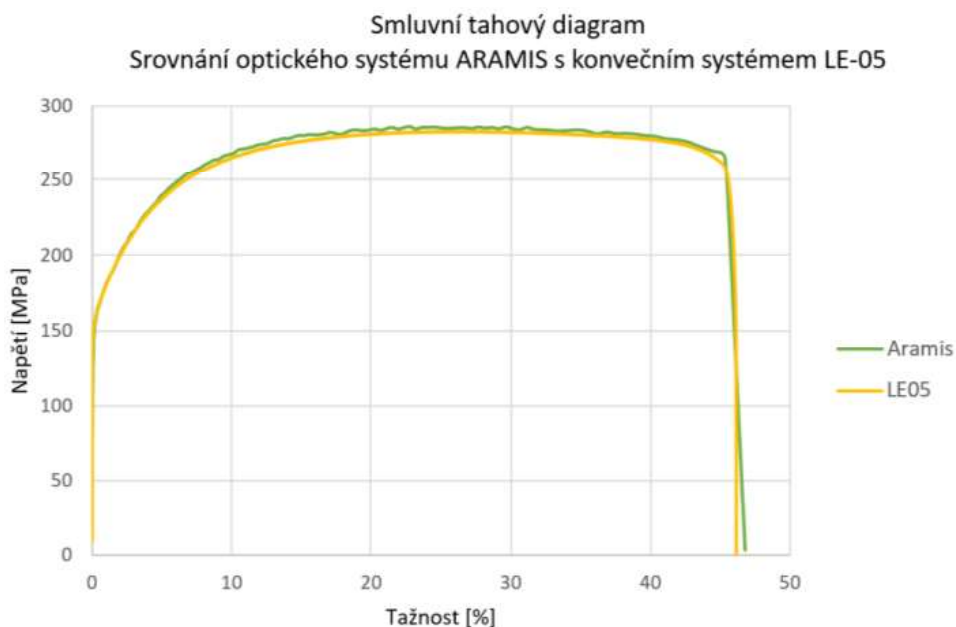


Obrázek 3.1 Schématické vyznačení snímacích frekvencí během zkoušky tahem [1A]

Měřicí sekvence obsahuje tři jednoduché prvky, přičemž každý definuje jednu část měření. Klepnutím na OK v dialogovém okně se spouští měření. Pro zkoušku tahem lze použít nejprve vyšší frekvenci 25 Hz. V tuto dobu se sleduje oblast elastických deformací. Prostřední část diagramu zkoušky tahem se může snímat frekvencí nižší a naopak závěrečná oblast těsně před lomem zkušebního tělesa je opět nahrávána vyšší snímkovací frekvencí.

Po provedení zkoušky tahem vyexportuje systém ARAMIS protokol měření, který informuje o naměřených hodnotách. K dispozici je mimo jiné možnost získat kterýkoliv snímek z celého průběhu deformace. Takový snímek je pro přehlednost opatřen barevnou škálou dle stupně deformace, díky čemuž je možné pozorovat např. vznik krčku na měřeném vzorku. Protokol zobrazuje výsledky mechanických vlastností zkoušeného materiálu. Kromě hodnoty celkového prodloužení byla získána také hodnota homogenní tažnosti, exponentu deformačního zpevnění, součinitele plastické anizotropie, Poissonovy konstanty, meze pevnosti a meze kluzu.

Dalším z cílů bylo ověření správné kalibrace a správného propojení optického systému ARAMIS s trhačím zařízením LabTest S5.100SP1. Důvod pro použití tohoto optického systému místo běžných konvenčních systémů bylo rychlejší a přesnější vyhodnocování naměřených dat (především hodnot n a r). Srovnání těchto systémů je vidět na Graf 3.1.



Graf 3.1 Smluvní tahový diagram [2A]

Propojením zkušebního zařízení LabTest Model 5.100SP1 s optickým systémem ARAMIS bylo docíleno automatické vygenerování měřícího protokolu s hodnotami mechanických vlastností. Hlavním pozitivem oproti běžnému konvenčnímu měření mechanických vlastností např. pomocí příčného extenzometru a průtahoměru je vyloučení výpočtu součinitele plastické anizotropie a exponentu deformačního zpevnění z procesu vyhodnocování.

4 Metodika přípravy měrné sítě pro sledování deformací na povrchu plechu

Z důvodu častého porušování měrné sítě (patternu) v průběhu zkoušky tahem bylo zapotřebí se zabývat správnou povrchovou předúpravou před nanesením měrného měřicího patternu. Bylo nutné předejít poškození (nečitelnosti) patternu před ukončením zkoušky, jinak by nebylo možné výsledky zkoušky vyhodnotit. Soudržnost patternu je závislá na povrchu analyzovaného materiálu, ale především rychlostí deformace, která výrazně zhoršuje čitelnost sítě. Z tohoto důvodu bylo nejprve nutné určit vhodný způsob předúpravy povrchu, správný druh a způsob nanášení barvy pomocí zkoušky dle Erichsena.

4.1 Zkouška dle Erichsena – volba barvy

Souběžně s testováním předúprav povrchu bylo nutné vybrat vhodnou kombinaci podkladové a kontrastní barvy pro její dobrou čitelnost kamerovým systémem ARAMIS. Barvy, které byly testovány, jsou uvedeny v Tabulka 4.1 a na Obrázek 4.1.

Tabulka 4.1 - Testované barvy [4A]

| Typ barvy | Název | Popis |
|------------------------------|-------------------------------|---|
| Podkladová bílá barva | Belton PU Wasserlack RAL 9010 | PU barva na vodní bázi |
| | Motip Matt White RAL 9010 | Akrylová barva |
| | Belton Universal Primer White | Univerzální základová barva |
| Patternová černá barva | Motip Matt Black RAL 9005 | Akrylová barva |
| | Montana GRANIT | Barva na vodní bázi se speciálními efektem s jemnými plastovými částicemi |
| | BeltonSpecial-GRANIT EFFECT | Barva tvořící tzv. „žulový“ efekt |



a) Akrylové matné barvy b) Akrylová barva a PU barva c) PU barva
s granitovým efektem

Obrázek 4.1 Použité kombinace barev ve spreji [4A]

Na základě této zkoušky byla vyhodnocena nejlepší kombinace barev (Belton Universal Primer + Montana GRANIT). Nástřík jako jediný nejevil známky odlupování v čase do 5 minut, tedy ihned po nanesení nástřiku. Jelikož nebyla nalezena žádná podkladová barva, která by se s odstupem 24 hodin, respektive 48 hodin nevykazovala poškození, bylo nutné provádět nástřík bezprostředně před zkouškou.

4.2 Metodika přípravy povrchu

Další oblastí, kterou bylo nutné vyřešit, je předúprava povrchu měřeného vzorku před nanesením patternu. Předúprava nesmí provést na vzorku jakékoli poškození, kterým by mohlo dojít k ovlivnění výsledku zkoušky.

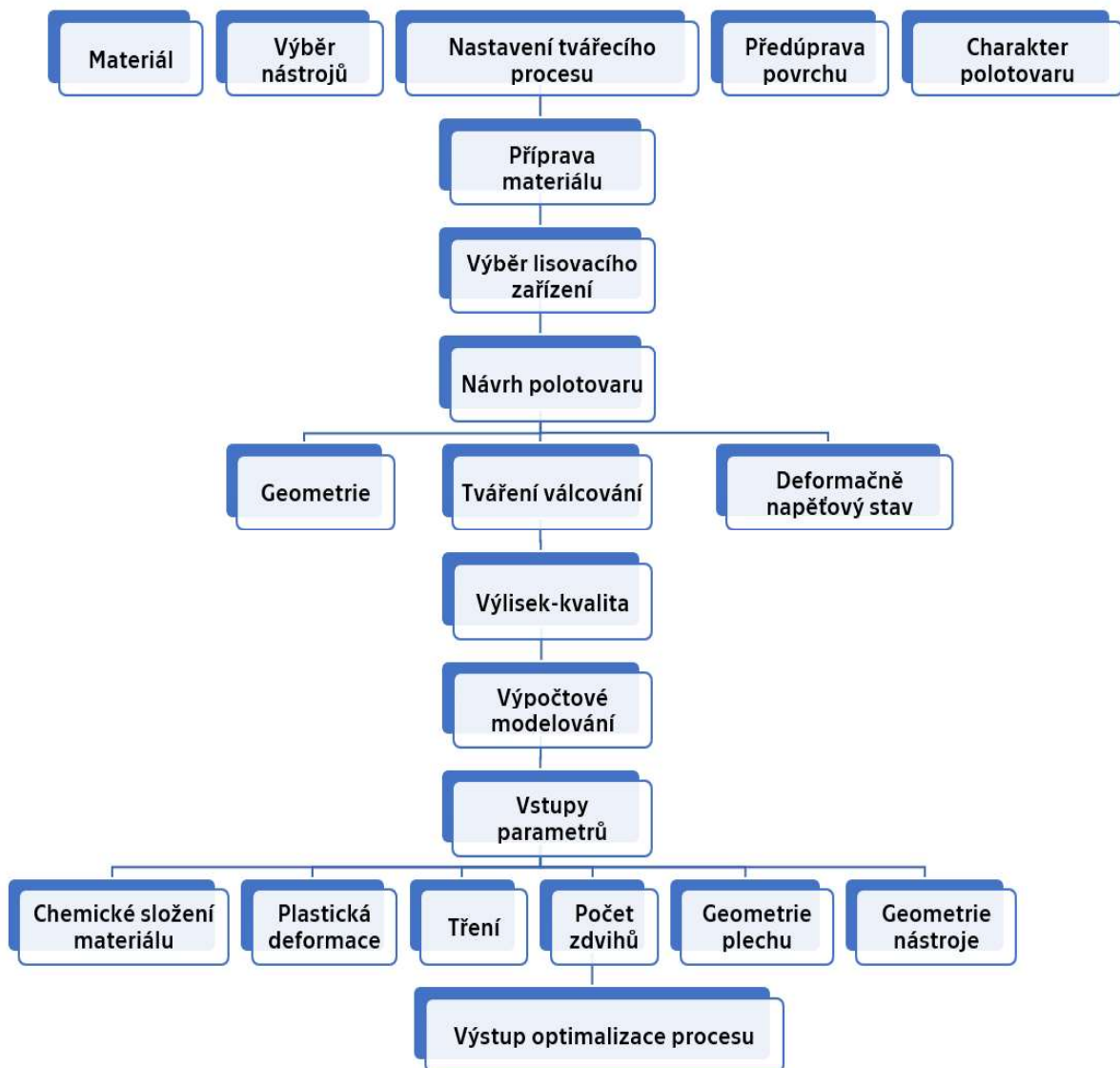
Vzhledem k nutnosti aplikace nástřikového systému je potřeba docílit kvalitně odmaštěného povrchu. Takový povrch není náchylný k defektům při deformaci a absenci nečistot zajišťuje kvalitní přilnutí nástřikového systému. Pro získání odmaštěného povrchu byl po provedených experimentech použit následující postup, který vykazoval nejlepší vlastností následné přilnavosti patternu: 1) Oplach v horké vodě s Jarem, 2) Oplach + Vysušení, 3) Aplikace odmašťovače Eternal, 4) Oplach horkou vodou a vysušení a za 5) Aplikace Izopropylalkoholu

Pro správné vyhodnocení pomocí optického měřicího systému ARAMIS, je třeba vytvořit dostatečně kontrastní vzor, který bude obsahovat dostatečné množství bodů o správné velikosti. Při přípravě experimentu bylo hledáno nejvhodnější řešení, které nakonec sestává z podkladového základového nástřiku z polyuretanové barvy a následné aplikace speciální dvousložkové barvy vytvářející granitový efekt. . Předchozí kombinace barev různých autolaků vykazovali nedostatečnou soudržnost a nevytvářeli konzistentní nebo nebyl dostatečně kontrastní povrch. Zvolený nátěrový systém je aplikován pomocí následujícího postupu: 1) Odmaštění izopropylalkoholem, 2) Aplikace základové barvy, 3) Vysušení do zaschnutí vrchních vrstvy barvy, 4) Aplikace granitové barvy a za 5) Vysušení do zaschnutí bílé složky

Velmi důležitá je dobrá předúprava povrchu a dále správně zvolený typ barvy pro vytvoření kvalitního patternu. Zmíněný postup se ukázal jako nejvíce odolný při vysokých rychlostech tažení, kdy bylo zapotřebí disponovat nevytvrzeným nátěrovým systémem. V tomto případě to znamenalo komplikaci v podobě nemožnosti předpřípravy nátěru a každý vzorek byl opatřen nátěrem v určité, časové krátké době před vlastním měřením

5 Studium vlivu jednotlivých parametrů na zkoušku tahem

Dalším cílem bylo naměření mechanických vlastností ($R_{p0,2}$, R_m , A , A_g , r , n) a křivek zpevnění pro jednotlivé šarže materiálu CR4 pomocí kamerového systému ARAMIS. Dalšími proměnnými parametry byly rychlost zatěžování, orientace válcování a poloha zkušebních vzorků na svitku. Všechny parametry byly vyhodnoceny a výsledky vloženy do materiálové karty SW Autoform. Nejdříve, ale bylo ověřeno chemické složení materiálu CR4. Na Obrázek 5.1 jsou znázorněny jednotlivé parametry, které vstupují do procesu plošného tváření. [17A] a [18A]



Obrázek 5.1 Optimalizace procesu plošného tváření [17A] a [18A]

5.1 Vliv rychlosti deformace a dalších parametrů na zásobu plasticity materiálu CR4

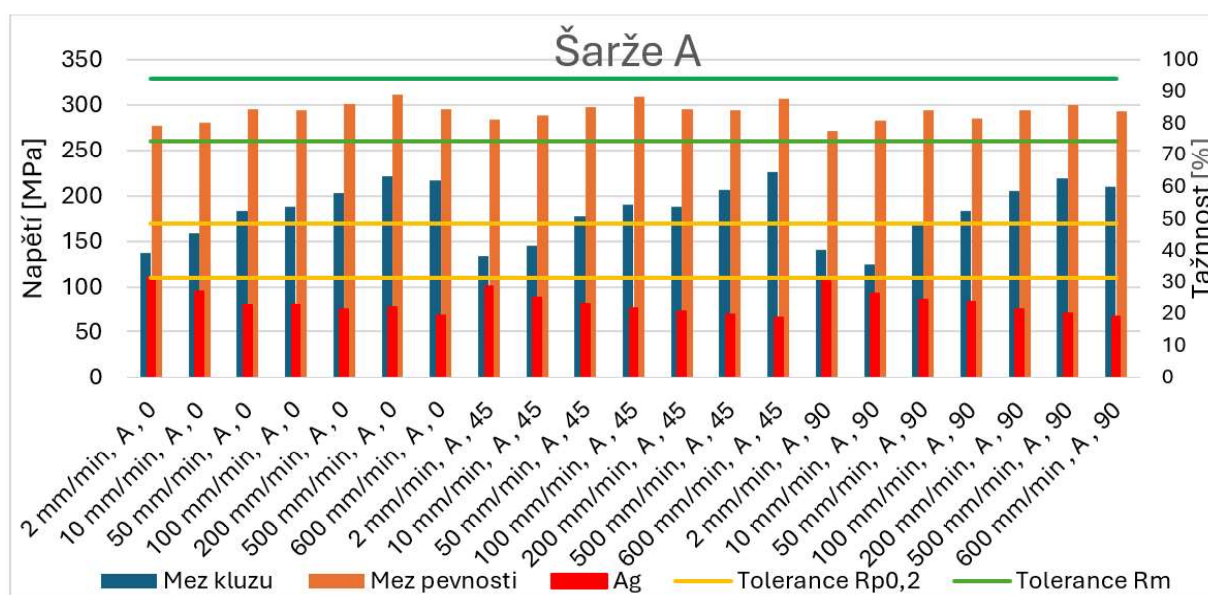
Z naměřených hodnot byly vytvořeny grafy, které lépe ukazují vliv jednotlivých parametrů na mechanické vlastnosti materiálu CR4 viz Tabulka 5.1. Proměnné, které ovlivňují zadání pro zkoušku tahem viz Obrázek 5.2.

| Rychlost zatěžování, rychlost deformace | Šarže materiálu CR4 | Poloha zkušebního vzorku na svitku | Orientace válcování |
|---|---|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • 2 mm/min 0,00238 [s⁻¹] • 10 mm/min 0,0019 [s⁻¹] • 50 mm/min 0,0059 [s⁻¹] • 100 mm/min 0,0119 [s⁻¹] • 200 mm/min 0,0238 [s⁻¹] • 500 mm/min 0,0595 [s⁻¹] • 600 mm/min 0,0714 [s⁻¹] | <ul style="list-style-type: none"> • A • B • C • D • E • F • G • H • CH • I • J • K | <ul style="list-style-type: none"> • Začátek svitku • Střed svitku • Konec svitku | <ul style="list-style-type: none"> • 0° • 45° • 90° |

Obrázek 5.2 Parametry vstupující do zkoušky tahem [5A]

Tabulka 5.1 Mechanické vlastnosti pro materiál CR 4 dle VDA 239-100

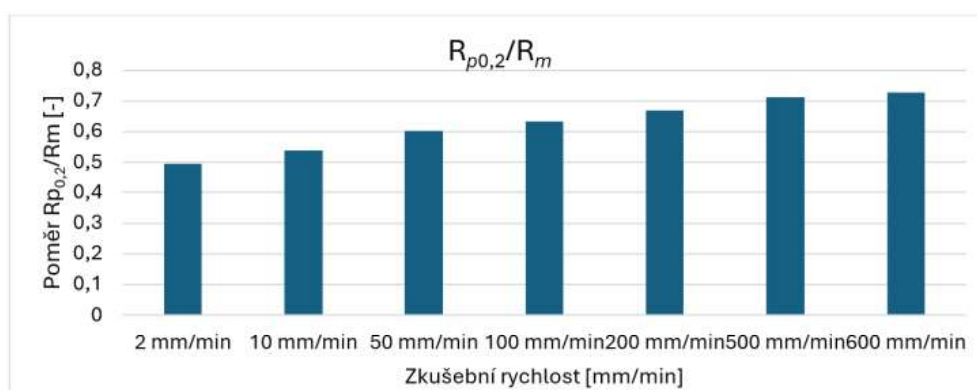
| Materiál | $R_{p0,2}$ [MPa] | R_m [MPa] | A [%] | A_{50mm} [%] | A_{80mm} [%] | $r_{90/20}$ [-] | $r_{m/20}$ [-] | $n_{10-20/Ag}$ [-] |
|----------|---------------------|------------------|------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-----------------------|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



Graf 5.1 naměřená data šarže A [5A]

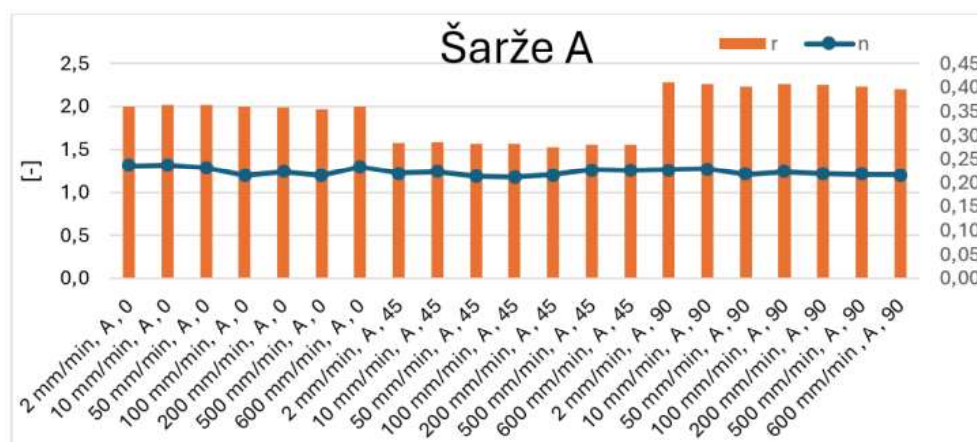
Na Graf 5.1 jsou vidět zaznamenané hodnoty meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti v závislosti na změně podmínek zkoušky. Dále je v grafu zeleně vyznačena oblast intervalu meze pevnosti a žlutě oblast meze kluzu, která je předepsána normou. Tímto způsobem je možné lépe analyzovat jednotlivé hodnoty mechanických vlastností a popsat jejich vztah s ohledem na změnu podmínek zkoušky. Všechny hodnoty meze pevnosti se nachází v oblasti intervalu a zvětšuje se jejich velikost s rychlostí zatěžování. K nárůstu meze pevnosti dochází kvůli postupnému zvýšení rychlosti deformace. Hodnoty meze kluzu jsou při normované rychlosti 2 mm/min také v oblasti intervalu daného předpisem normy, čímž materiál splňuje dodací podmínky. Je však vidět, že při zvyšující se rychlosti se hodnoty meze kluzu zvyšují a dochází ke zvětšení poměru meze kluzu vůči mezi pevnosti, čímž dochází ke zmenšení oblasti umožňující tváření materiálu.

Na následujícím Graf 5.2 je vidět postupné zvětšení poměru meze kluzu k mezi pevnosti. Hodnoty byly pro lepší přehlednost zprůměrovány ze všech orientací.



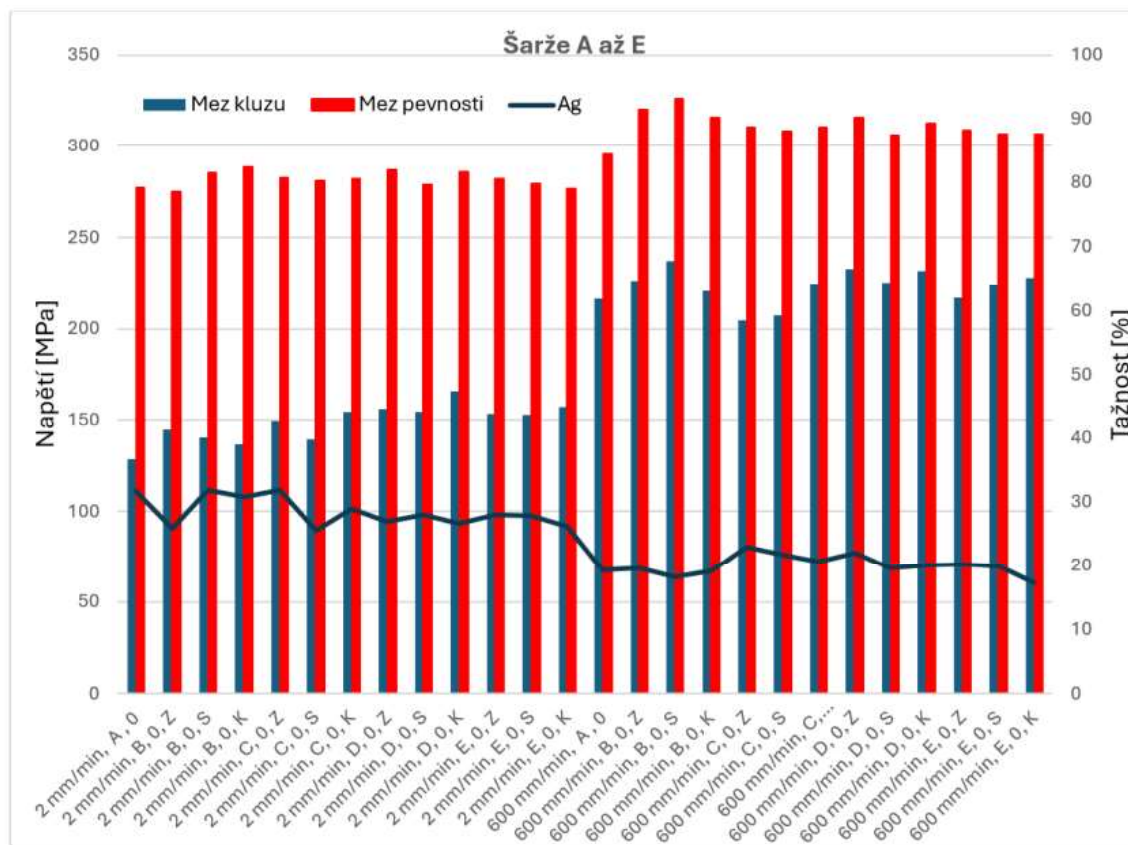
Graf 5.2 Poměr meze kluzu vůči mezi pevnosti šarže A, orientace 0° [5A]

Další měřenou hodnotou byl koeficient plastické deformace a exponent deformačního zpevnění.



Graf 5.3 Hodnoty exponentu deformačního zpevnění a součinitele plošné anizotropie šarže A [5A]

Rychlost zatěžování nemá zásadní vliv na exponent deformačního zpevnění ani na součinitel plastické anizotropie. Zatímco u „ n “ exponentu deformačního zpevnění je hodnota téměř neměnná, u „ r “ součinitele plastické anizotropie dochází k mírným odchýlkám, avšak stále je směrodatná odchylka přijatelná, jak při porovnání mezi jednotlivými vzorky, tak při porovnání mezi různými rychlostmi zatěžování. Na hodnotu součinitele plastické anizotropie má vliv orientace válcování, kde jsou patrné rozdílné hodnoty v závislosti na orientaci vzorku v pásu plechu.



Graf 5.4 Srovnání naměřených dat pro šarže A až E při rychlostech zatěžování 2 a 600 mm/min [5A]

U zkoušky tahem bylo celkem pro materiál CR4 provedeno přes 680 zkoušek tahem při různých rychlostech zatěžování, orientaci vůči směru válcování a poloze na svitku. V kapitole je ukázáno vyhodnocení jedné šarže materiálu a následně porovnání výsledků jednotlivých šarží viz Graf 5.4 . Pro detailní popis chování byla vybrána šarže A s ohledem na největší rozsah provedených zkoušek. U zkoušky tahem byl vytvořen soubor dat obsahující třídění dle jednotlivých šarží a dalších parametrů. Dále bylo provedeno porovnání mezi jednotlivými šaržemi a parametry. Získáním jednotlivých hodnot ze zkoušky tahem byly získány vstupní data do materiálové karty pro křivky zpevnění a materiálový model plasticity.

6 Studium polohy FLC křivek

Pro zkoušení a vyhodnocení materiálů byl zvolen zkušební stroj BUP600 a optický systém ARAMIS 4M. Obě zařízení jsou k dispozici a dostupné v laboratoři Ústavu strojírenské technologie v Dejvicích na Fakultě strojní ČVUT v Praze.

6.1 Metodika přípravy správného tribologického systému zkouška dle Nakajimy

Pro snížení nepřesnosti výsledků je potřeba nástroj opatřit tzv. tribologickým systémem, který minimalizuje vliv měřicího zařízení na výsledky zkoušky. Pro dosažení platného výsledku zkoušky je nutné splnit podmínku, že k porušení došlo v pásmu širokém 15 % (v našem případě 15 mm) průměru tažníku od vrcholu vzorku, jinak je zkouška neplatná. Vliv na polohu trhliny má jednak přidržovač, tak i samotný tažník. V případě přidržovače je potřeba vytvořit takový tlak, který zamezí prokluzování vzorku a zároveň nedojde k dostatečné deformaci vzorku. Při zkoušce dochází k tažení materiálu a kontaktu materiálu s hranou přidržovače. Ta je zakulacena, aby nedošlo ke koncentraci napětí a nedošlo ke vzniku trhliny mimo definovanou oblast.

Pro samotný tažník byl pro zamezení tvorby trhliny mimo definovanou oblast vytvořen systém kluzných vrstev (tribologický systém), díky kterým byl zajištěn správný průběh procesu a dosažení platného výsledku zkoušky. Tribologický systém aplikovaný před každým měření se skládal z následujících fází: 1) Strojní olej, 2) PTFE páska, 3) PE fólie a 4) plastické mazivo.

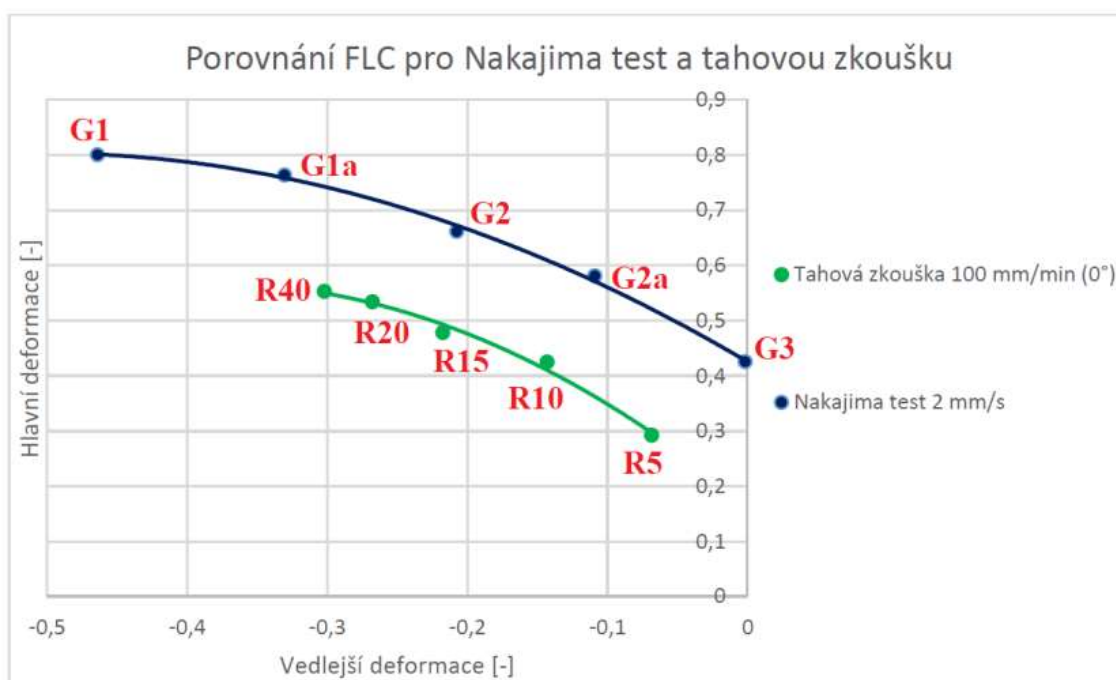


Obrázek 6.1 Postup aplikace jednotlivých částí tribologického systému [9A]

Systém po dokončení zkoušky vykazoval uspokojivé výsledky v podobě správné polohy trhliny. Aplikace vrstev byla rovnoměrná, aby nedocházelo ke kontaktu vzorku a tažníku. Vliv tribologického systému na výsledky zkoušky jsou v experimentu zanedbány, neboť by bylo potřeba širšího rozhraní experimentu. Jednotlivé vrstvy tribologického systému jsou zobrazeny na Obrázek 6.1 [3A], [4A], [6A].

6.2 Srovnání levé strany FLC křivky pro zkoušku Nakajima a zkoušku tahem s vrubem pro materiál DX57 (CR5)

Jak již bylo uvedeno v části zaměřené na měření FLC křivek, tak zkoušek existuje celá řada. Jednou z nich je i zkouška dle Nakajimy, při které dochází k deformování plechu půlkulovým tažníkem, až do vzniku trhliny. Rozdíly mezi Nakajima testem a tahovou zkouškou jsou především absence tření při tahové zkoušce a jiný stav napjatosti. Při Nakajima testu získáme levou i pravou stranu FLD. Na Graf 6.1 je porovnání křivek mezních deformací pro tahovou zkoušku 100 mm/min, pro směr 0° a 90° a Nakajima testu, při normované rychlosti 2 mm/s ~ 120 mm/min. Vyhodnocení hodnot rychlostí deformace probíhalo v SW ARAMIS Professional, kde byly porovnávány naměřené výsledky.



Graf 6.1 Srovnání FLC křivky pro Nakajima test a pro zkoušku tahem s vrubem pro materiál DX57 (CR5) [13A], [14A], [15A]

Tabulka 6.1 Vliv rychlosti pohybu nástroje na rychlost deformace pro materiál DX57 zkouška dle Nakajimy [13A]

| Rychlost nástroje [mm/min] | Hlavní rychlost deformace [s ⁻¹] | | | | |
|----------------------------|--|-------|------|------|------|
| | G1 | G2 | G3 | G4 | G5 |
| 120 | 0,40 | 0,354 | 0,34 | 0,56 | 0,30 |
| 600 | 2,23 | 1,79 | 1,57 | 2,13 | 1,85 |
| 900 | 3,43 | 1,99 | 1,83 | 2,40 | 2,16 |

Tabulka 6.2 Vliv rychlosti pohybu nástroje na rychlost deformace pro materiál DX57D_zkouška tahem s vrubem [14A]

| Rychlost nástroje [mm/min] | Orientace válcování | Hlavní rychlost deformace [s ⁻¹] | | |
|----------------------------|---------------------|--|------|------|
| | | R5 | R10 | R20 |
| 100 | 0° | 1,38 | 1,33 | 1,98 |
| 100 | 90° | 1,63 | 2,14 | 2,19 |

Cílem experimentu bylo porovnat hodnoty mezních deformací pro zkoušku Nakajima a zkoušku tahem u materiálu DX57. Dalším cílem bylo vyhodnotit a naměřit hodnoty hlavní rychlosti deformace pro rychlosti zatěžování 100 mm/min u zkoušky tahem a 120 mm/min u zkoušky dle Nakajimy viz Graf 6.1. Z výsledků je patrné, že zásoba plasticity je u zkoušky tahem menší než u zkoušky Nakajima. Když se srovnají hodnoty hlavní rychlosti deformace viz Tabulka 6.1 a Tabulka 6.2 u zkoušky tahem 100 mm/min a zkoušky dle Nakajima 120 mm/min hodnoty hlavní rychlosti deformace jsou pro zkoušku tahem 3x až 4x větší než hodnoty u zkoušky dle Nakajima. Z hlediska zásoby plasticity je zkouška dle Nakajimy pro materiál DX57 příznivější (větší zásoba plasticity). Srovnáme-li zkoušky dle Nakajima se zkouškou tahem pro zjištění mezních deformací jediné proměnné parametry pro tyto dvě zkoušky jsou rychlost deformace a stav napjatosti. Tento experiment dokazuje, že rychlost deformace a stav napjatosti mají velký vliv na polohu FLC křivky (zásobu plasticity).

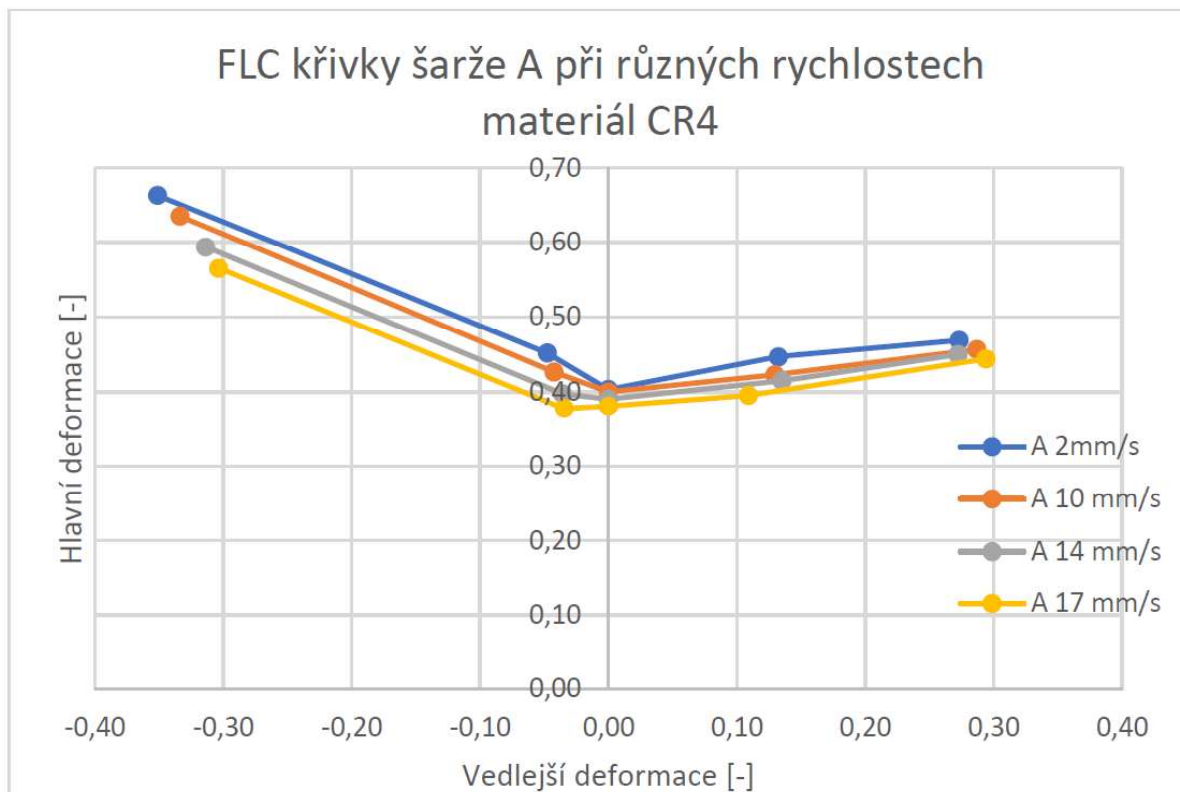
6.3 Srovnání vlivu jednotlivých parametrů pro materiál CR4

V rámci dalšího experimentu byl zkouškou dle Nakajimy analyzován materiál CR4. Především byl zkoumán vliv rychlosti zatěžování (deformace) na zásobu plasticity.

| Rychlost zatěžování | Šarže materialu CR4 | Poloha zkušební vzorku na svitku |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • 2 mm/s • 10 mm/s • 14 mm/s • 17 mm/s | <ul style="list-style-type: none"> • A • B • C • D • E | <ul style="list-style-type: none"> • Začátek svitku • Střed svitku • Konec svitku |

Obrázek 6.2 Proměnné, pro které byly měřeny jednotlivé FLC křivky

Na obrázku Obrázek 6.2 jsou uvedeny parametry pro které se jednotlivé FLC křivky měřily.

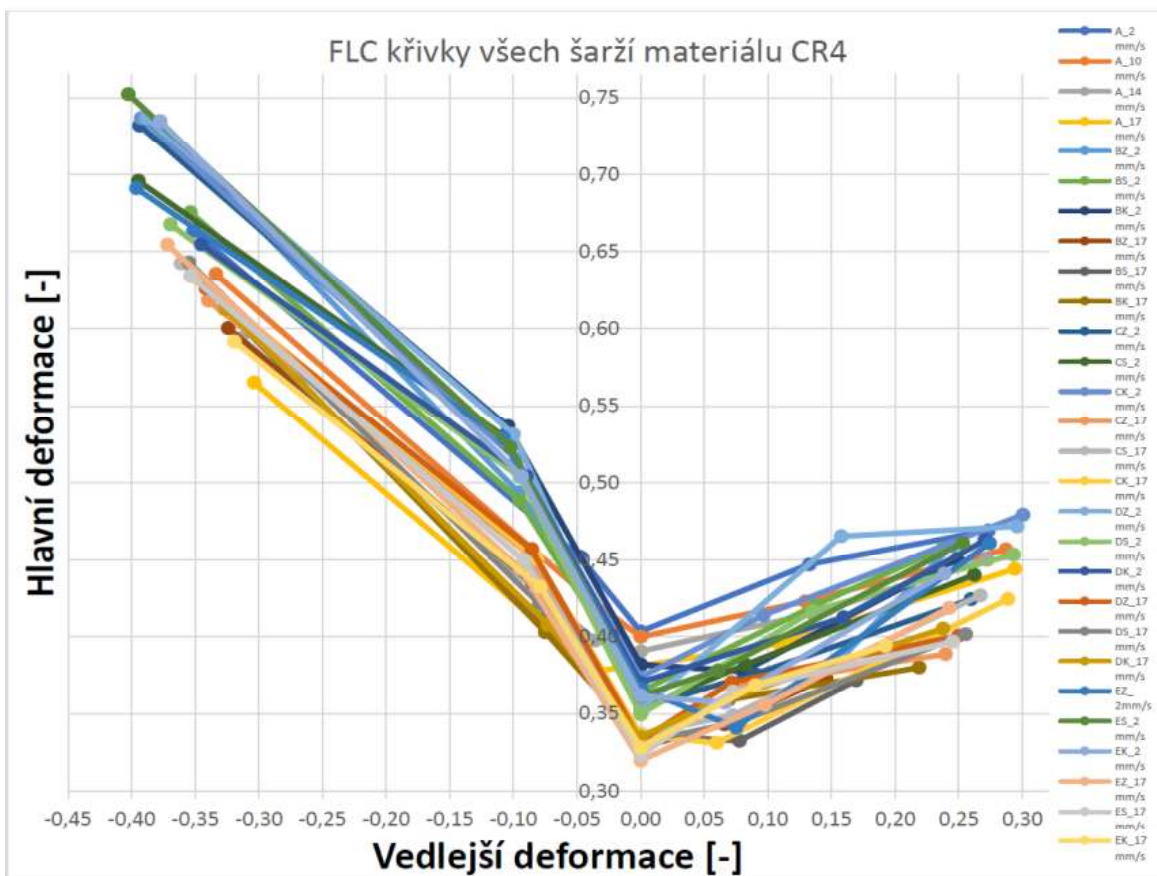


Graf 6.2: FLC křivky pro šarži A, při různých rychlostech zatěžování [12A]

Na Graf 6.2 jsou znázorněny již hodnoty jednotlivých geometrií, které byly následně propojeny s body zaznamenanými při stejné rychlosti zatěžování. Vznikly tak 4 křivky mezní tvářitelnosti, které ukazují, jaký vliv má rychlost tváření na zásobu plasticity v materiálu při daném poměru hlavních a vedlejších deformací.

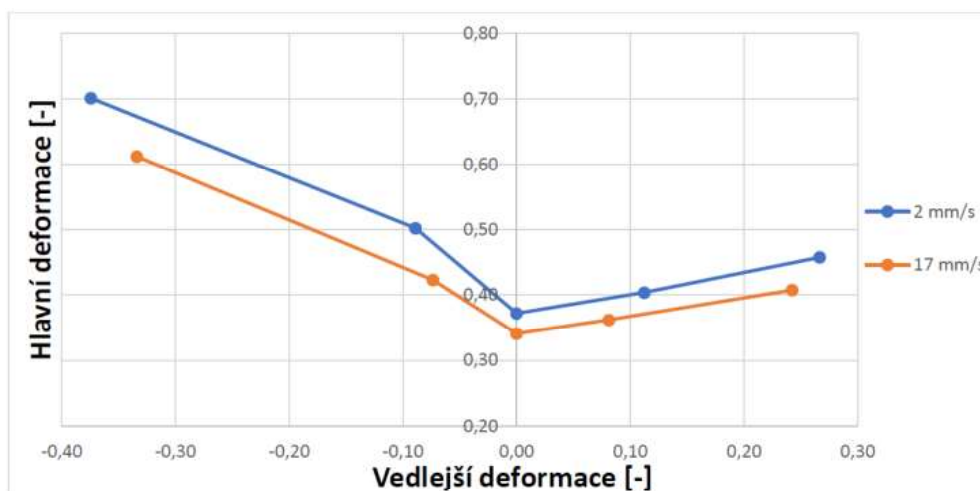
FLC křivka A pro rychlost 2 mm/s je položena nejvýše a disponuje tedy největší zásobou plasticity. S rostoucí rychlostí dochází k posunu křivky směrem dolů, což znamená snížení maximálních hodnot pro hlavní i vedlejší deformace. Na tento zkoumaný jev má dozajista vliv i parametr rychlosti deformace. Pro realizaci experimentů, byl pro správný výsledek zkoušky použit tribologický systém, jehož úkolem bylo zajistit minimální tření mezi vzorkem a tažníkem (kvůli iniciaci porušení). Při vyšších rychlostech bylo patrné, že po zkoušce docházelo ve větší míře k vytlačení maziva a k větším deformacím PTFE pásky a PE fólie. Po zkoušce byly také vzorky výrazně teplejší než před ní, což mohlo mít za následek změnu mechanických vlastností. Tento experiment však nebyl pro takové možnosti navrhnut a tyto důsledky nejsou brány v potaz.

Pro naměření 28 FLC křivek bylo vytvořeno značné množství vzorků. Naměřené FLC křivky pro šarže A až E jsou pro názornost vloženy do jednoho Graf 6.3. V praxi je však nereálné aplikovat jednotlivé FLC pro zrovna dodaný materiál, a tak byl ze všech FLC vytvořen průměr pro zatěžování rychlostí 2 mm/s a 17 mm/s viz Graf 6.4.



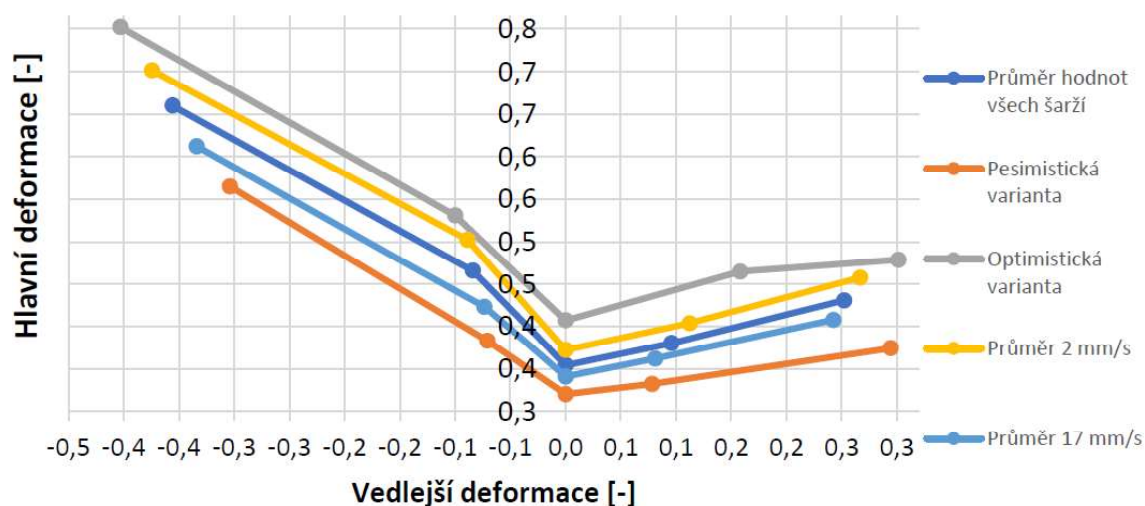
Graf 6.3: Souhrn všech naměřených FLC křivek pro materiál CR4 [12A]

Je vidět, že Graf 6.3 je méně přehledný, avšak i zde je znázorněno, že křivky tmavých odstínů (rychlost posuvu tažníku 2 mm/s) jsou položeny nad křivkami světlých odstínů (rychlost posuvu tažníku 17 mm/s), zároveň je zde znázorněn značný rozptyl všech naměřených hodnot. Křivky tak vytváří dvě určité oblasti pro každou rychlost, ve kterých dochází k proměnlivosti v závislosti na různých šaržích. Pro lepší přehled si můžeme prohlédnout již zmíněný průměr pro nejvyšší a nejnižší rychlost viz Graf 6.4.



Graf 6.4: Zprůměrované FLC křivky všech šarží materiálu CR 4 (A,B,C,D,E) pro rychlosti 2 a 17 mm/s [12A]

Křivky průměrují všechny šarže i polohy na svitku. Jedná se tak o univerzální křivky použitelné pro dosažení stabilního tvářecího procesu. Podstatou experimentu je získání nejhorsích možných mechanických vlastností materiálu pro zajištění stabilního tvářecího procesu. Z tohoto důvodu byly diskutovány různé varianty popisu materiálových vlastností, které jsou označovány jako pesimistická, průměrná, optimistická apod. Získáním „pesimistické“ varianty FLC bude dosaženo limitu, za kterým už hrozí porušení materiálu. Proto jeho použití bude znamenat bezpečnou variantu v materiálovém modelu, neboť v případě kladného výsledku simulace budou všechny šarže materiálu přesahovat nároky na výrobu. Jestliže budou do Graf 6.4 vyneseny křivky reprezentující průměr všech šarží, pesimistickou variantu sestávající z nejhorsích získaných hodnot a optimistickou variantu reprezentující nejlepší dosažitelné možnosti materiálu, získáme Graf 6.5.



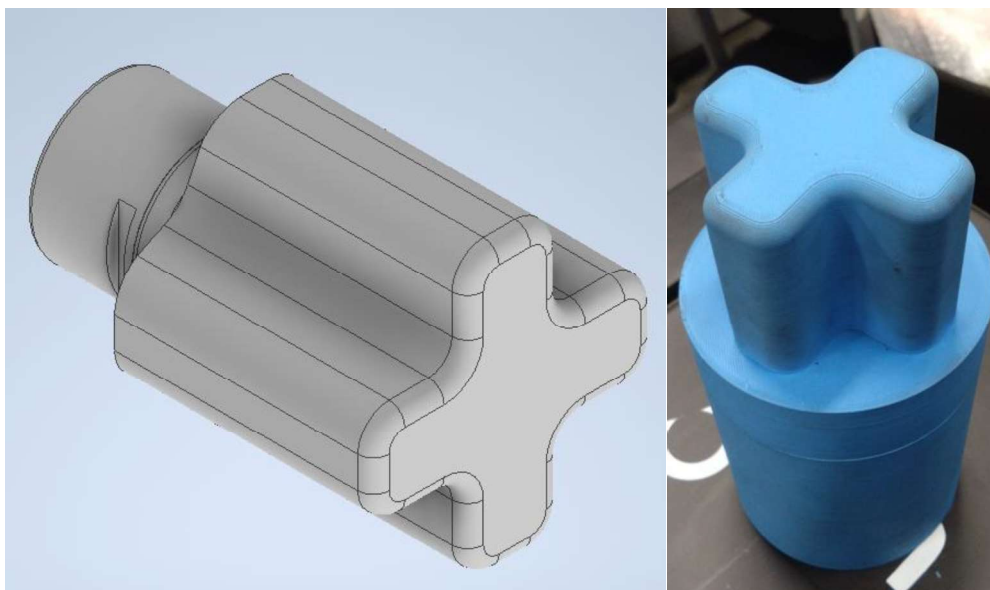
Graf 6.5: Rozptyl polohy FLC křivky pro materiál CR4 [12A]

U zkoušky dle Nakajimy bylo pro materiál CR4 celkem provedeno přes 540 měření pro všechny analyzované šarže (A až E) materiálu. Obdobně jako u zkoušky tahem byla nejdříve vyhodnocena jedna modelová šarže a následně byly jednotlivé šarže porovnány mezi sebou. Následovalo vyhodnocení vlastností a hodnot mezi šaržemi. Zaměřeno bylo především na rozdíly v hodnotách mezi různými polohami na svitku a rychlostech zatěžování.

U měření křivek mezní tvářitelnosti byly z naměřených dat vytvářeny jednotlivé FLC křivky, které byly následně porovnány. Vyhodnocení probíhalo na základě zvolených parametrů. Ukázalo se však, že některé křivky rychlostí 2 mm/s byly položeny na stejné úrovni či níže, než křivky pro rychlost zatěžování 17 mm/s, avšak pro rozdílné šarže. Dalším zkoumaným parametrem byl vliv polohy ve svitku. Ukázalo se, že většina šarží se až na výjimky chová v rámci tolerance a nedochází k výrazným odchylkám. Odchylku vykazovala šarže E, pro kterou hodnoty na začátku svitku padaly pod hodnoty ostatních šarží, a to i pro vyšší rychlost zatěžování.

7 Testování problematiky na prototypovém výlisku

V experimentu byl pozorován vlivu rychlosti pohybu nástroje na změnu tloušťky polotovaru materiálu CR4 pro nástroj označovaný Cross-Die. Ztenčení bylo měřeno pomocí optických systémů ARGUS a ARAMIS. Dále bylo srovnáváno chování materiálu pro rychlost posuvu tažníku 2 a 17 mm/s na různé dráze nástroje (systémem ARGUS a ARAMIS). V druhém experimentu pak byl sledován, jaký vliv má rychlost posuvu nástroje na výšku výtažku těsně před jeho porušením pomocí systému ARGUS a ARAMIS.



Obrázek 7.1. Cross-die tažník

Pro navržený experiment byl použit tažník ve tvaru Cross-die viz Obrázek 7.1 a to zejména pro jeho širokou škálu napěťových stavů a dobrou názornost realizovaných deformací. Nástroj byl vyroben metodou 3D tisku (metoda FFF = Fused Filament Fabrication) z materiálu PLA (polylactic acid – kyselina polymlečná) na tiskárně Ender 3 Pro. Parametry tisku jsou zobrazeny v

Tabulka 7.1. Použití tohoto materiálu na prototypové lisovací nástroje bylo publikováno v [23A], [24A], [25A], [26A], [27A] a [28A].

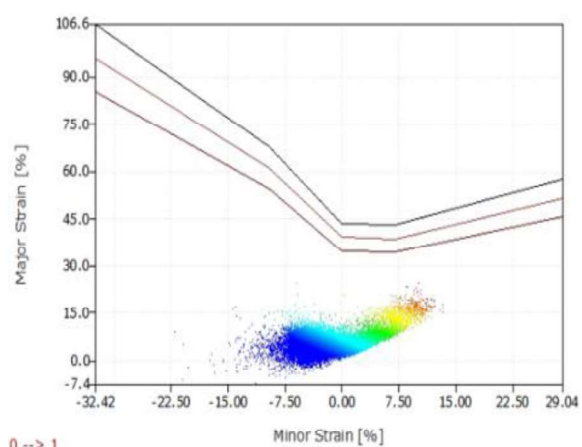
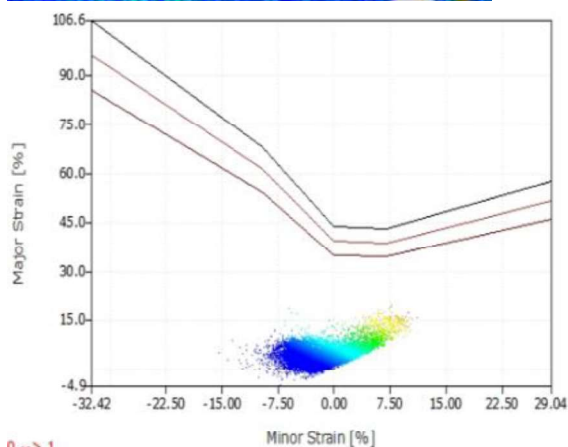
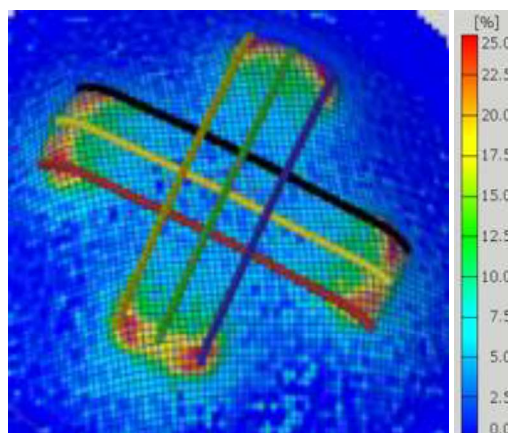
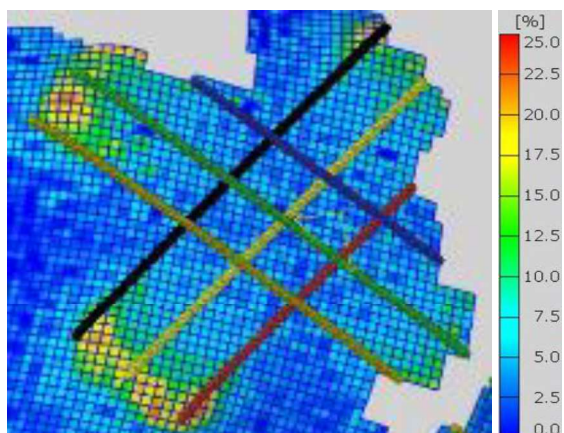
Tabulka 7.1 Parametry tisku

| | |
|------------------|--------|
| Počet perimetrů | 10 |
| Výška vrstvy | 0,2 mm |
| Infill | 100 % |
| Teplota podložky | 60 °C |
| Teplota trysky | 210 °C |

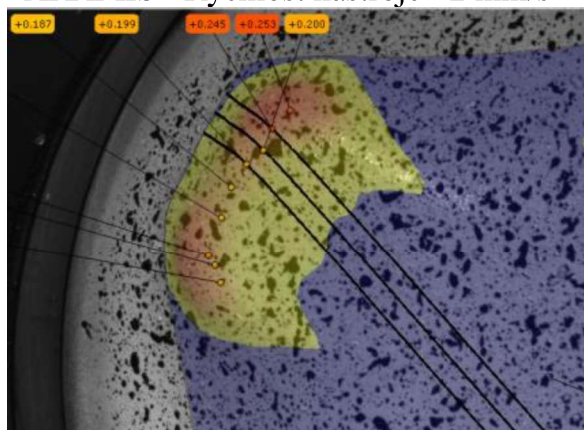
7.1 Vyhodnocení a porovnání dosažených výsledků ARGUS, ARAMIS

ARGUS - Rychlost nástroje 2 mm/s

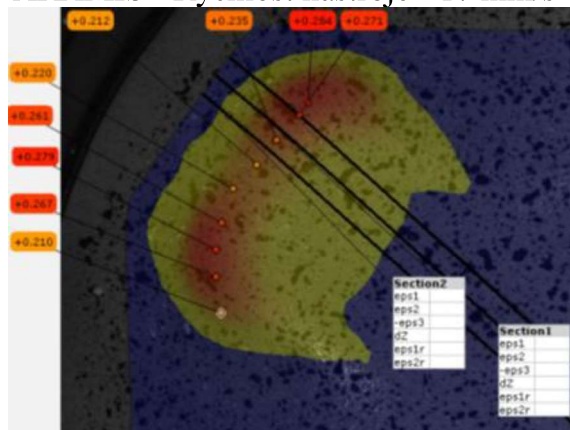
ARGUS - Rychlost nástroje 17 mm/s



ARAMIS - Rychlost nástroje - 2 mm/s



ARAMIS - Rychlost nástroje - 17 mm/s



Obrázek 7.2 Analýza ARGUS: Zkouška ukončena dráhou nástroje 20 mm (ARGUS) [29A]

Z výsledků viz Obrázek 7.2 je zřejmé, že rychlost pohybu nástroje má podstatný vliv na změnu tloušťky materiálu. Jak je možné z obrázků vyčíst u rychlosti 2 mm/s je dosaženo v kritických místech výlisku maximálního ztenčení okolo 20 %, u rychlosti 17 mm/s byly dosaženy hodnoty ztenčení v kritických oblastech až okolo 25 %. Zároveň na FLD diagramech je vidět, že s rostoucí rychlostí je větší rozptyl bodů a pohybuje se blíže hranici porušení (FLC křivka).

Tabulka 7.2 Výsledky zkoušky Cross die pomocí systému ARAMIS

| Optický systém | Výška zdvihu [mm] | Rychlost zdvihu [mm/s] | Procentuální ztenčení [%] |
|----------------|-------------------|------------------------|---------------------------|
| ARAMIS | 14,3 | 2 | 16,5 |
| ARAMIS | 20 | 2 | 25,3 |
| ARAMIS | 22,3 | 2 | 30,7 |
| ARAMIS | 14,3 | 17 | 18,2 |
| ARAMIS | 20 | 17 | 28,4 |
| ARAMIS | 22,3 | 17 | 36 |

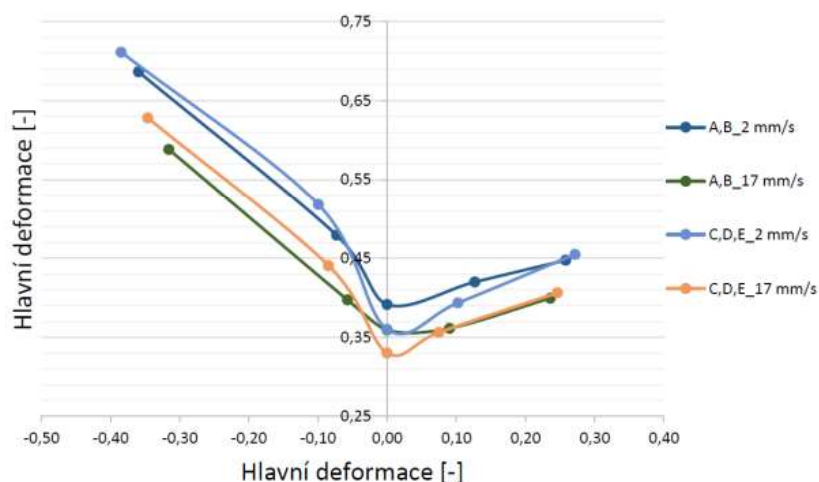
Tabulka 7.3 Srovnání přesnosti systémů ARAMIS a ARGUS

| Optický systém | Výška zdvihu [mm] | Rychlost zdvihu [mm/s] | Procentuální ztenčení [%] |
|----------------|-------------------|------------------------|---------------------------|
| ARGUS | 15 | 2 | 13-15 |
| ARAMIS | 15 | 2 | 13-16 |
| ARGUS | 20 | 17 | 25 |
| ARAMIS | 20 | 17 | 27 |

Experimentální část se věnovala zkoumání vlivu rychlosti deformace na ztenčení plechu. Jev byl sledován na materiálu CR4 o tloušťce 0,7 mm za pomoci stroje BUP 600. Pro zkoušku byl pomocí technologie 3D tisku vyroben křížový nástroj Cross-die. Tvar nástroje byl zvolen z důvodu pokrytí velké škály napěťových stavů. Vyhodnocování probíhalo pomocí systému ARGUS a ARAMIS. Před samotnou zkouškou je potřeba v případě systému ARGUS na vzorky nanést měrnou síť (zde byla zvolena síť s parametry, kde bod je o velikosti 0,75 mm a rozteč mezi body je 1,5 mm) a v případě systému ARAMIS pattern. Z vyhodnocených výsledků je zřejmé, že rychlost posuvu tažníku (rychlost deformace) má znatelný vliv na procentuální ztenčení materiálu viz Tabulka 7.2 a Tabulka 7.3. K tomuto zjištění bylo dospěno pomocí experimentů a zároveň pomocí FLD diagramů kde bylo vyhodnoceno, že s rostoucí rychlostí se materiál přibližuje limitní hranici porušení.

8 Sestavení materiálové karty

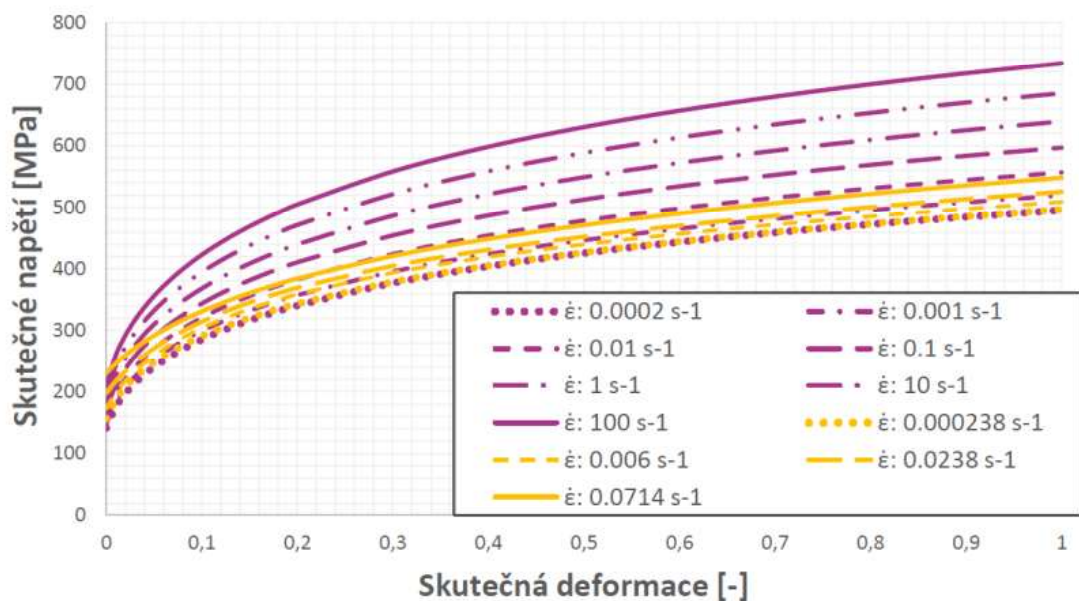
Naměřená data z obou experimentů (viz kapitola 5.1 a kapitola 6.3) byla po zpracování naimportována do programu AutoForm, kde z nich byly sestaveny čtyři materiálové karty (pro šarže AB a CDE) každá z uvedených šarží obsahovala dvě FLC křivky pro 2 mm/s a 17 mm/s. Důvodem, proč se vytvořily dvě karty je ten, že SW AutoForm nedokáže s více FLC křivkami pracovat, dokonce ani nelze do jedné materiálové karty vložit více FLC křivek pro různé rychlosti najednou. Obě karty poté obsahují křivky zpevnění pro různé deformační rychlosti. V případě, že je zapotřebí vytvořit materiálovou kartu s více křivkami zpevnění, je nutné si nejprve v textovém editoru připravit potřebná data ze kterých bude materiálová karta v systému AutoFormu vytvořena. Data z průběhu zkoušek tahem pro jednotlivé deformační rychlosti je nutné převést na hodnoty skutečné deformace a skutečného napětí. Data se upraví do požadovaného formátu včetně uvedení hodnoty příslušné deformační rychlosti. Dalším krokem bylo doplnění mezního kritéria plasticity, kdy bylo zvoleno kritérium dle Vegter 2017. Podle prostudované literatury vykazuje tento model největší shodu s realitou. Nakonec se do materiálové karty vložila data pro křivku mezních deformací (FLC) pro rychlost 2 mm/s a 17 mm/s již po korekci, čímž byly vytvořeny 2 materiálové karty s odlišnou polohou FLC. Na Obrázek 8.1 je vidět srovnání čtyř FLC křivek (1. Šarže AB_FLC_2 mm/s, 2. Šarže AB_FLC_17 mm/s, 3. Šarže CDE_FLC_2 mm/s, 4. Šarže CDE_FLC_17 mm/s). Spodní křivky jsou pro rychlost 17 mm/s a horní je pro rychlost 2 mm/s.



Obrázek 8.1 Srovnání zprůměrovaných FLC křivek materiálu CR4 pro šarže AB a CDE [21A]

Z důvodu použití křivek zpevnění i pro vyšší rychlosti deformace než pouze pro naměřené hodnoty $0,07 \text{ s}^{-1}$, byly výsledky aproximovány pomocí metody Swift/Hockett Sherby až na hodnoty rychlosti deformace 100 s^{-1} viz Obrázek 8.2. Stejným způsobem se aproximovaly křivky zpevnění i u šarže CDE. Srovnání základních parametrů pro sestavení křivek zpevnění je v Tabulka 8.1.

Křivky zpevnění materiál CR4 šarže A+B



Obrázek 8.2 Aproximace křivek zpevnění pomocí metody Swift/Hockett Sherby pro materiál CR4 šarže AB [21A]

Tabulka 8.1 Srovnání parametrů křivek zpevnění pro jednotlivé materiálové karty materiálu CR4

| Křivky zpevnění | Karta | ČVUT AB | ČVUT CDE | Tata Steel | VW | AF |
|--------------------|---------------------------|---------|----------|------------|--------------|--------------|
| Swift | ϵ_0 [-] | 0,00829 | 0,0125 | - | - | 0,01 |
| | m | 0,273 | 0,261 | - | - | 0,28 |
| | C [MPa] | 522,7 | 516,5 | - | - | 585 |
| Hockett-Sherby | σ_i [MPa] | 141,6 | 154,8 | - | - | 155 |
| | σ_{sat} [MPa] | 435,9 | 501,4 | - | - | 415 |
| | a | 3,72 | 2,24 | - | - | 6,75 |
| | p | 0,741 | 0,648 | - | - | 0,85 |
| | α | 0,3 | 0,15 | - | - | 0,15 |
| Rychlost deformace | m | 0,03 | 0,03 | | Off | Off |
| | $\dot{\epsilon}_{static}$ | | | | Jedna křivka | Jedna křivka |
| Pevnost | σ_0 [MPa] | 141,3 | 163 | 161,3 | 165 | 160,2 |
| | R_m [MPa] | 280,5 | 283,5 | 296,8 | 301 | 310,3 |
| | n_{0-Ag} | 0,235 | 0,21 | 0,213 | 0,228 | 0,235 |

Tabulka 8.2 Srovnání modelů plasticity pro jednotlivé materiálové karty materiálu CR4

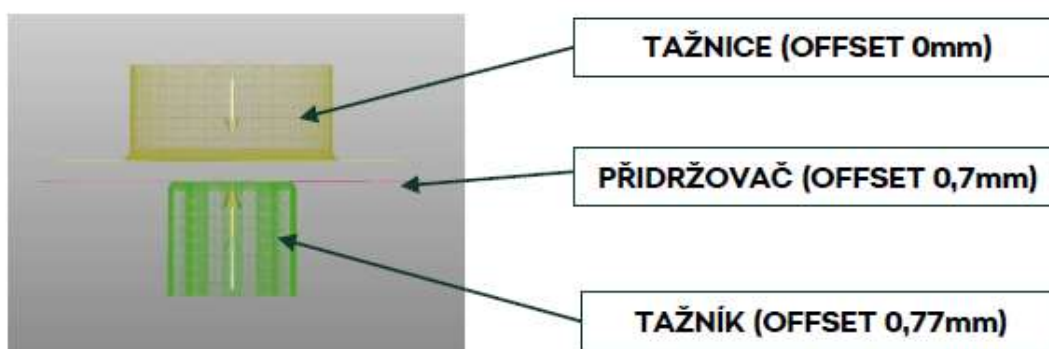
| Model plasticity | Karta | ČVUT AB Vegter 2017 | ČVUT CDE Vegter 2017 | Tata Steel Vegter | VW Hill 48 | AF Hil 48 |
|--------------------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------------|---|---------------|--------------|
| Součinitel plastické anizotropie r | r_0 | 1,996 | 2,346 | 2,219 | 1,8 | 1,7 |
| | r_{45} | 1,581 | 1,603 | 1,702 | 1,5 | 1,4 |
| | r_{90} | 2,238 | 2,132 | 2,496 | 2,4 | 2,1 |
| | r_m | 1,849 | 1,921 | 2,030 | 1,8 | 1,65 |
| | r_b | 0,892 | 1,1 | 0,889 | 0,75 | 0,81 |
| Poměr napětí na mezích kluzu | σ_0/σ_0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | σ_{45}/σ_0 | 1,0105 | 1,021 | 1,023 | 1,1314 | 1,1151 |
| | σ_{90}/σ_0 | 0,9853 | 0,9935 | 0,99 | 1,0479 | 1,0373 |
| Zkouška tahem | $A_{g,0}$ [%] | 28,6 | 24,6 | - | - | - |
| | $A_{g,45}$ [%] | 27,8 | 23,8 | - | - | - |
| | $A_{g,90}$ [%] | 26,4 | 24 | - | - | - |
| | $R_{m,0}$ [MPa] | 280,7 | 281,3 | - | - | - |
| | $R_{m,45}$ [MPa] | 283 | 287 | - | - | - |
| | $R_{m,90}$ [MPa] | 272 | 278 | - | - | - |
| Poměr napětí Rovinná deformace | σ_{ps0}/σ_0 | 1,245 | 1,267 | 1,26 | 1,353 | 1,321 |
| | σ_{shear}/σ_0 | 0,529 | 0,530 | 0,538 | 0,559 | 0,560 |
| | σ_{ps90}/σ_0 | 1,242 | 1,247 | 1,262 | 1,418 | 1,370 |
| | σ_b/σ_0 | 1,124 | 1,136 | 1,140 | 1,265 | 1,222 |
| FLC | <i>rychlost</i> | 2 mm/s | 2 mm/s | Model Abspoel Scholting $r_{90}=2,5$ | 2 mm/s | 2 mm/s |
| | ϵ_{10} [-] | 0,392 | 0,36 | 0,355 | 0,35 | 0,34 |
| | <i>rychlost</i> | 17 mm/s | 17 mm/s | $A_{80_{90}} = 45\%$ | - | - |
| | ϵ_{10} [-] | 0,359 | 0,33 | $A_{80_{min}} = 43\%$ | - | - |

Hlavním důvodem sestavení materiálových karet bylo zpřesnění numerických simulací pro rychlosti deformace. Byla vytvořena metodika sestavení materiálové karty pro více křivek zpevnění viz Obrázek 8.2. Dále v Tabulka 8.1, Tabulka 8.2 jsou srovnány vytvořené materiálové karty s kartami v SW AutoForm. Vytvořené materiálové karty obsahují křivky zpevnění od rychlostí deformace $0,0002 \text{ s}^{-1}$ až 100 s^{-1} . Dále pro každého dodavatele (dodavatel AB a CDE) jsou vytvořeny 2 FLC křivky pro nízké a vysoké rychlosti deformace. Hlavní motivací je použít materiál od levnějšího dodavatele (CDE) a materiál od dodavatele (AB) používat pouze na komplikovanější díly. Z Obrázek 8.1 je patrné, že materiál od dodavatele (AB) má větší zásobu plasticity (především v oblasti rovinné deformace) a je méně náchylný na větší rychlosti deformace. Používání FLC křivek při vyšších rychlostech (17 mm/s) u numerických simulací by mělo vést ke stabilnějšímu (robustnějšímu) tvářecímu procesu.

9 Numerická simulace, verifikace naměřených dat

V této části jsou uvedeny numerické simulace z naměřených dat a vliv rychlosti deformace na polohy FLC křivek a ověření získaných dat pomocí simulací.

Pro ověření naměřených dat z kapitoly 7 a 8 byly nastaveny simulace v SW AutoForm a Pamp-Stamp. Hlavní podmínky (stejně jako v kapitole 7) byly geometrie nástrojů viz Obrázek 9.1, hloubka tažení 20 mm , síla na přídržovači 100 kN , součinitel tření $0,15$ a rozměry polotovaru čtvercový přístřih o rozměrech $200 \times 200 \text{ mm}$ a tl. $0,7 \text{ mm}$. Mezi hlavními proměnnými byly rychlost lisování (2 a 17 mm/s) a použitá materiálová šarže pro materiál CR4 z kapitoly 8 (šarže AB a šarže CDE).

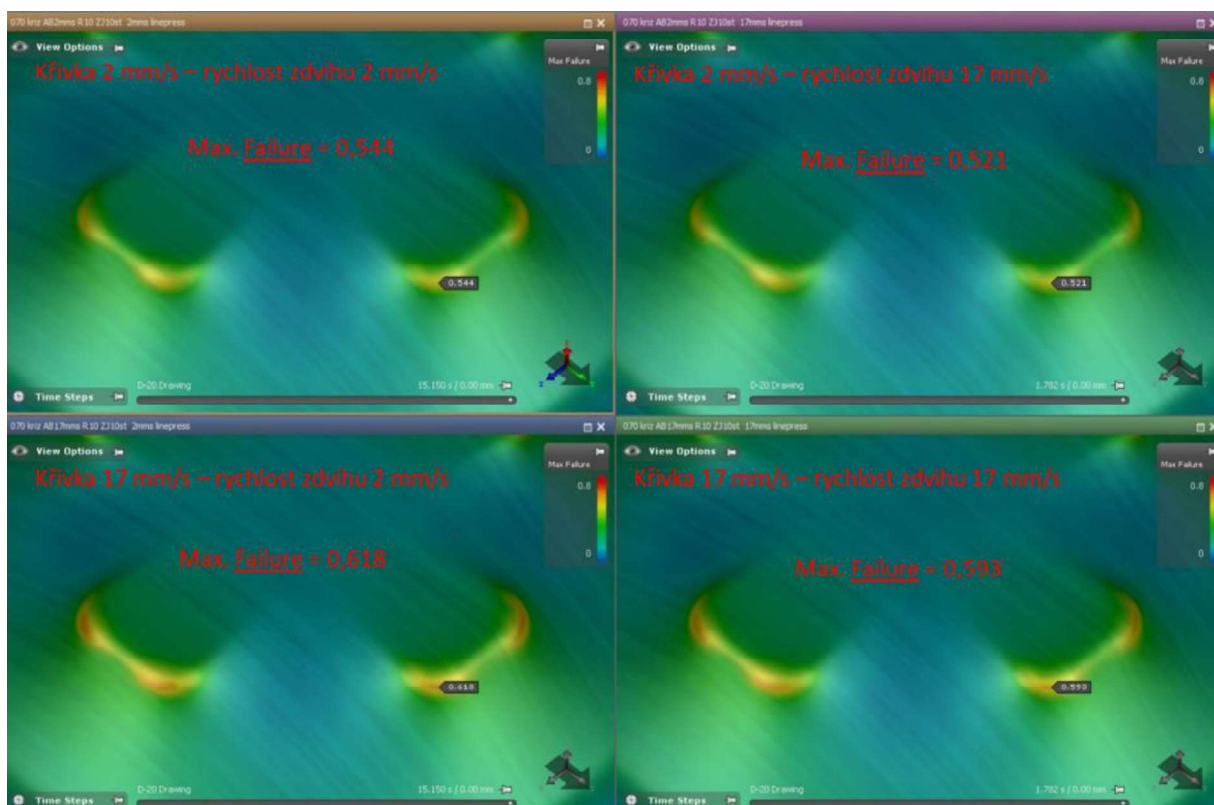


Obrázek 9.1 Lisovací nástroj Cross Die [21A]

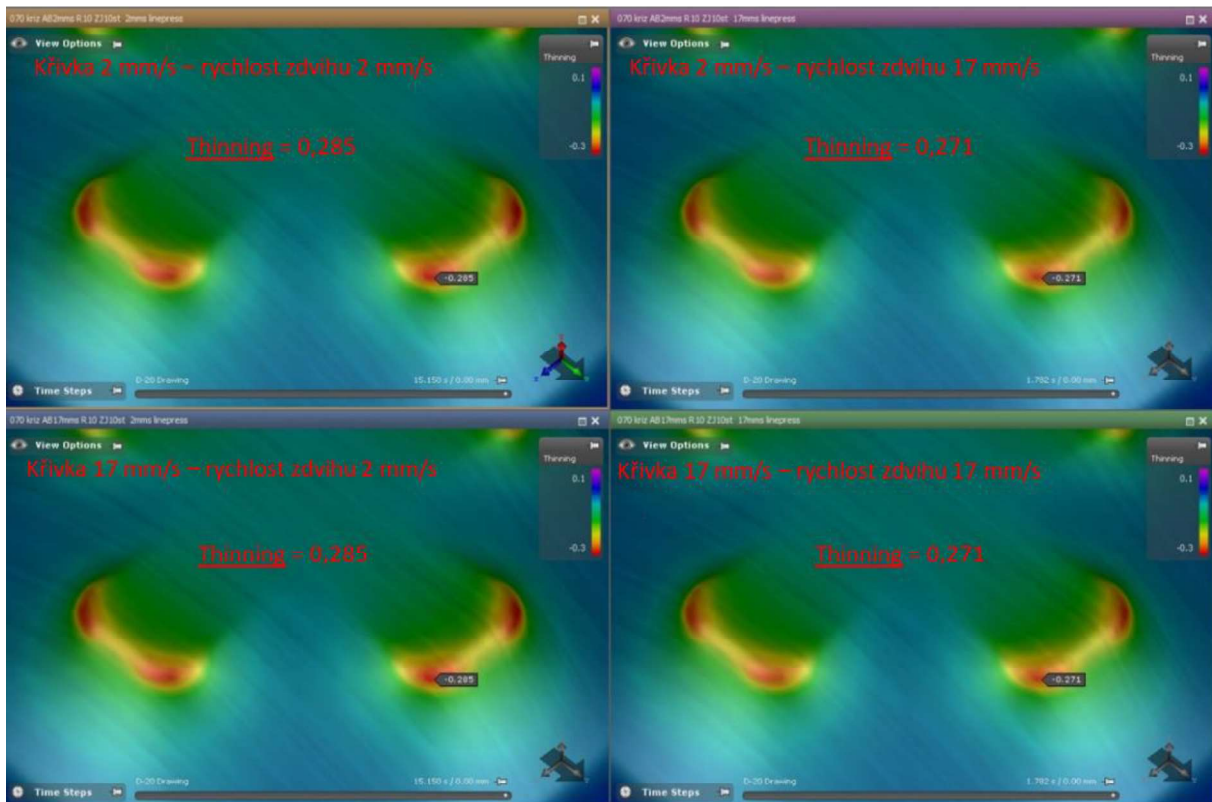
Na Obrázek 9.2, Obrázek 9.3 a Tabulka 9.1 jsou srovnány výsledky numerických simulací pro jednotlivé materiálové šarže, FLC křivky, simulační software a součinitel tření.

Tabulka 9.1 Srovnání simulačních SW Autoform a Pam-Stamp pro $\mu = 0,15$ [21A]

| Karta | FLC [mm/s] | Rychlost nástroje [mm/s] | Autoform, $\mu = 0,15$ | | Pam-Stamp, $\mu = 0,15$ | |
|-------|---------------|--------------------------------|------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|
| | | | Max. Failure [-] | Ztenčení [%] | Max. Failure [-] | Ztenčení [%] |
| AB | 2 mm/s | 2 | 0,544 | 28,5 | 0,537 | 25,5 |
| AB | 2 mm/s | 17 | 0,521 | 27,1 | 0,524 | 25,1 |
| AB | 17 mm/s | 2 | 0,618 | 28,5 | 0,612 | 25,5 |
| AB | 17 mm/s | 17 | 0,593 | 27,1 | 0,594 | 25,1 |
| CDE | 2 mm/s | 2 | 0,606 | 29 | 0,605 | 26,7 |
| CDE | 2 mm/s | 17 | 0,573 | 27,9 | 0,582 | 26,3 |
| CDE | 17 mm/s | 2 | 0,656 | 29 | 0,653 | 26,7 |
| CDE | 17 mm/s | 17 | 0,620 | 27,9 | 0,629 | 26,3 |



Obrázek 9.2 Hodnoty porušení Cross die test pro zprůměrovanou šarže AB (liší pouze FLC křivka pro rychlost zatěžování 2 a 17 mm/s) [21A]



Obrázek 9.3 Hodnoty ztenčení Cross die test pro zprůměrovanou šarže AB (liší pouze FLC křivka pro rychlost zatěžování 2 a 17 mm/s) [21A]

Trend numerických simulací je v rozporu s naměřenými daty z kapitoly 7. V kapitole 7 byly hodnoty ztenčení pro rychlost 2 mm/s okolo 25,3 % a pro rychlost 17 mm/s okolo 28,4 %. Tedy s rostoucí lisovací rychlostí se procentuální ztenčování zvětšovalo (pro experiment v kapitole 7), ale numerické simulace vykazují opačný trend. Dále hodnoty max. failure (riziko porušení) při vyšších rychlostech zatěžování (17 mm/s) a při zachování FLC křivky (rychlost 2 mm/s) vykazuje simulace menší riziko porušení materiálu, což je v rozporu s praxí. Kdy při vyšších lisovacích rychlostech hrozí větší riziko porušení materiálu. Jediný způsob, jak numerické simulace s vyšší rychlostí počítat je s použitím FLC křivek při vyšších rychlostech, tyto křivky zohledňují vliv rychlosti deformace a vykazují větší hodnoty rizika porušení.

10 Diskuze dosažených výsledků

Předložená disertační práce se ve svém úvodu zabývá pojmy souvisejícími s rychlostí deformace a jejím vlivem na tvářecí proces. Blíže jsou také vysvětleny metody zkoušení použité v experimentální části práce, především optické systémy pro měření deformací (ARGUS a ARAMIS) a problematika měření křivek mezního přetvoření (zkouška dle Nakajimy). V neposlední řadě se disertační práce věnuje problematice sestavování materiálových modelů pro numerické simulace plošného tváření. Současný stav poznání je založen na dostupných publikacích souvisejících s tématem vlivu rychlosti deformace pro technologii plošného tváření.

Motivací práce je sledování vlivu rychlosti deformace (rychlosti lisování) na materiály používané v automobilovém průmyslu (CR4, CR5, HCT490X), kde hlavním cílem je sestavení universálnějšího („robustnějšího“) materiálového modelu. Nahrazením současně používaných materiálových modelů [27], [28], [29], [30], [31] (s jednou křivkou zpevnění) za materiálové modely reflektující vliv rychlosti deformace [2A], [3A], [16A], [19A], [20A] a [35A] (více křivek zpevnění a více FLC křivek) povede k přesnějším výsledkům v rámci výroby i v rámci numerické simulace.

V rámci experimentu zkoušky tahem provedeným v kapitole 5 **Chyba! Nenašel jsem zdroj odkazů.** měl největší vliv ze sledovaných parametrů (rychlost deformace, šarže, poloha na svitku a orientace válcování) parametr rychlosti deformace. Z naměřených výsledků [2A], [3A], [5A] a [35A] vyplývá, že s rostoucí rychlostí deformace klesá A_g materiálu a roste $R_{p0,2}$ a R_m . Tento výsledek odpovídá zjištěním uvedeným v odborné literatuře. [16] V rámci experimentu studie polohy FLC křivek provedených zkouškou dle Nakajima v kapitole 4). Měl opět největší vliv ze sledovaných parametrů (rychlost lisování, šarže materiálu a poloha na svitku) parametr rychlosti lisování (rychlosti deformace). Tyto výsledky [8A], [12A], [16A] a [35A] odpovídají zjištěním v odborné literatuře [33], [34]. V literatuře [32] je tento vliv uveden především v levé části FLD diagramu. Co se týče výsledků citlivost materiálu na rychlost deformace odborná literatura [34] tvrdí, že s rostoucí hodnotou m (citlivost materiálu na rychlost deformace) se poloha FLC křivky zvyšuje, což odpovídá výsledkům z [12A], kdy materiálové šarže s nižší hodnotou m měly nižší zásobu plasticity (FLC křivky byly posazeny níž).

Z naměřených výsledků vyplývá (kapitola 5 a 6), že vliv rychlosti deformace (rychlosti lisování) má nezanedbatelný vliv na produktivitu lisovací linky i možnost použití levnějšího vstupního materiálu, bude-li proces matematicky popsán podle předpokladů [32], [35] a [36]. To znamená, že je potřeba vytvořit soustavu materiálových křivek zohledňujících rychlost lisování v rámci přípravy výroby [21A], [33A], [34A] a [35A]. V rámci nehmotné

přípravy výroby je numerická simulace klíčovým faktorem, na kterou je kladen důraz v předložené kapitole (kapitole 7 a 8). [7A], [10A], [11A], [22A], [30A], [31A], [32A], Jedná se především o materiálový model, který přesnost numerických simulací výrazně ovlivňuje [12A] a [21A]. Pro dosažení dostatečně spolehlivého návrhu, je tudíž nutné udržet krok s aktuálním stavem poznání a nejmodernějšími technologiemi. Platí, že okrajové podmínky (rychlost deformace) numerické simulace musí být nastaveny s ohledem na skutečné budoucí provedení lisovacích rychlostí.

11 Závěr

11.1 Splnění cílů disertační práce

Disertační práce se zabývá vstupními materiálovými parametry pro numerické simulace, především materiálovými modely plasticity, křivkou zpevnění a diagramem mezního přetvoření FLD.

Práce popisuje bezkontaktní měřicí systémy a jejich základní princip pro měření deformace plechů a vstupními materiálovými parametry, které ovlivňují přesnost numerických simulací. V rámci disertační práce byla v této problematice provedena série experimentů při různých rychlostech deformace, které odpovídají lisovacímu taktu používanému při výrobě výlisků v automobilovém průmyslu. Analýza deformace těchto dílů byla provedena za pomoci bezkontaktních měřicích systémů ARGUS a ARAMIS. Vliv rychlosti deformace byl sledován systémem ARAMIS a vyhodnocován také pomocí numerických simulací realizovaných v programu AutoForm a Pam-Stamp. Důležitým aspektem pro úspěšnou implementaci výsledků je správné nadefinování vstupních parametrů.

Experimentální část disertace prezentuje realizované výsledky z pohledu splnění cílů disertační práce.

Při realizaci experimentů **bylo nutné se vypořádat s řadou problémů souvisejících s přípravou vzorků**, a to nedostatečná soudržnost patternu, působení tribologického systému, či dostatečné osvětlení zkušebních těles v rámci experimentů. Z hlediska nedostatečné soudržnosti se jedná především o eliminaci vlivu maziva, ale také z hlediska vhodné volby prostředku pro vytvoření patternu – jeho dostatečná soudržnost na povrchu zkušební vzorku. V rámci práce byla řešena metodika odmašťování povrchu plechu a dále metodiku nanášení patternu formou vhodných barev. Vyřešení problému je důležité pro zajištění soudržnosti a čitelnosti patternu po celou dobu realizace experimentu. Tribologický systém řeší problematiku polohy vzniku trhliny, velikost tření mezi tažníkem a zkušebním tělesem a ovlivňuje polohu trhliny, s vyšší hodnotou součinitele tření se posouvá trhlina dále od vrchlíku a zkouška se stává neplatnou. Nízká hodnota součinitele tření mezi přídržovačem a

zkušební tělesem ovlivňuje snadné vyklouznutí plechu z přídržovače, což brání vzniku trhliny. Problematika dostatečného osvětlení zkušební tělesa je nutná pro dostatečný kontrast patternu v průběhu zkoušky. Zásadně se tak ovlivňuje pozorování zvláště při vyšších snímkovacích frekvencích, které jsou nutné při vyšších rychlostech deformace, aby byl děj popsán dostatečným počtem snímků. Z hlediska těchto problémů nebyl kladen hlavní důraz na výsledky zkoušky, které bude nutné verifikovat, ale především na vyřešení problémů s průběhem a vyhodnocením experimentů.

Pochopení vlivu deformační rychlosti na stabilitu lisovacího procesu povede k finanční úspoře v předvýrobní fázi výroby lisovacích nástrojů a eliminaci vzniku neshody numerické simulace a reálného lisovacího procesu. Problematika byla řešena ze strany dodavatelů materiálu i výrobních podniků.

Splnění dílčích cílů disertační práce:

1. Metodika vyhodnocování zkoušky tahem pomocí systému ARAMIS pro různé rychlosti deformace

Propojením zkušebního zařízení LabTest Model 5.100SP1 s optickým systémem ARAMIS bylo docíleno automatického vygenerování měřícího protokolu s hodnotami mechanických vlastností. Hlavním přínosem oproti běžnému konvenčnímu měření mechanických vlastností např. pomocí příčného a podélného extenzometru je vyloučení výpočtu součinitele plastické anizotropie a exponentu deformačního zpevnění z procesu vyhodnocování. **Cíl byl splněn.**

2. Metodika přípravy měrné sítě pro sledování deformací na povrchu plechu

Velmi důležitá je dobrá předúprava povrchu a dále správně zvolený typ barvy pro vytvoření kvalitního patternu. Zvolený postup, viz kapitola 4, se ukázal jako nejvíce odolný při vysokých rychlostech tažení, kdy bylo zapotřebí disponovat nevytvrzeným nátěrovým systémem. V případě to znamenalo komplikaci v podobě nemožnosti předpřípravy nástřiku a každý vzorek byl opatřen nástřikem v určité, časové krátké době před vlastním měřením. **Cíl byl splněn.**

3. Vliv jednotlivých parametrů na tahovou zkoušku

U zkoušky tahem bylo celkem provedeno 536 zkoušek tahem při různých rychlostech, orientaci vzorku vůči směru válcování, poloze a rychlosti zatěžování. V praktické části byl ukázán postup vyhodnocení jedné šarže materiálu a následně porovnání výsledků jednotlivých šarží. Pro detailní popis chování byla vybrána šarže A s ohledem na největší rozsah provedených zkoušek. U zkoušky tahem byl vytvořen soubor dat obsahující rozřazení dle jednotlivých šarží a dalších parametrů. Dále bylo provedeno porovnání mezi jednotlivými šaržemi a parametry. Byla vytvořena kontingenční tabulka obsahující záznamy všech zkoušek umožňující rychlé filtrování dle zadaných parametrů. Získáním jednotlivých hodnot ze zkoušky tahem byly získány vstupní data do materiálové karty pro křivky zpevnění a materiálový model plasticity. **Cíl byl splněn.**

4. Studium polohy FLC křivek v závislosti na rychlosti deformace

Pro studium polohy FLC křivek v závislosti na rychlosti deformace je podstatná příprava vzorku. Její součástí je správná volba tribologického systému pro zamezení tvorby trhlin. Zkouškami byl ověřen vliv různých metod přípravy zkušebních vzorků, viz kapitola 6.1. Byl také studován vliv nejmenší šířky zkušebního tělesa na velikost mezních přetvoření. Z provedených analýz plyne, že největší rozdíly výsledků jsou u nejmenších šířek zkušebních těles, s rostoucí šířkou se tento rozdíl zmenšuje.

Dalším cílem bylo vyhodnotit a naměřit hodnoty hlavní rychlosti deformace pro rychlosti zatěžování 100 mm/min u zkoušky tahem a 120 mm/min u zkoušky dle Nakajimy, tedy porovnání zkoušky tahem a zkoušek FLC u materiálu DX57 (CR4). Z výsledků je patrné, že zásoba plasticity je u zkoušky tahem menší než u zkoušky Nakajima viz Graf 6.1. Když se srovnají hodnoty hlavní rychlosti deformace viz Tabulka 6.1 a Tabulka 6.2 u zkoušky tahem 100 mm/min a zkoušky dle Nakajima 120 mm/min hodnoty hlavní rychlosti deformace jsou pro zkoušku tahem 3x až 4x větší než hodnoty u zkoušky dle Nakajima, ikdyž z hlediska zásoby plasticity, je zkouška dle Nakajimy pro materiál DX57 příznivější (větší zásoba plasticity). Srovnáme-li zkoušky dle Nakajima se zkouškou tahem pro zjištění mezních deformací jediné proměnné parametry pro tyto dvě zkoušky jsou rychlost deformace a stav napjatosti. Tento experiment dokazuje, že rychlost deformace a stav napjatosti mají velký vliv na polohu FLC křivky (zásobu plasticity).

Byla provedena řada zkoušek FLC dle Nakajima (540 zkoušek) pro materiál CR4. Celkově se ukázalo, že největší vliv na změnu mechanických vlastností měla rychlost zatěžování. U zkoušky tahem docházelo v orientaci 0° ke zvýšení hodnot meze kluzu, průměrem o 73,97 MPa, meze pevnosti průměrem o 29,65 MPa a ke snížení tažnosti, průměrem o 8,51 %. V případě polohy ve svitku se ukázalo, že při orientaci 0° je na změnu hodnot meze kluzu nejvíce citlivá šarže C, naopak u meze pevnosti nejméně. U meze pevnosti byla na rozptyl nejnáchylnější šarže B. Rozptyl hodnot tažnosti byl u všech šarží podobný. Celkově byl rozptyl hodnot větší u rychlosti 600 mm/min, než u rychlosti 2 mm/min. Orientace válcování ve svitku měla hlavně vliv na součinitel plastické anizotropie, naopak pro exponent deformačního zpevnění neměla vliv žádný. V grafickém srovnání je vidět, že mechanické vlastnosti se při změně orientace mění minimálně, je však znatelný rozdíl v trendu klesajících hodnot, kdy orientace 0° dosahuje nejvyšších hodnot, orientace 45° nižších a 90° nejnižších.

U měření křivek mezní tvářitelnosti byly z naměřených dat vytvářeny jednotlivé FLC křivky, které byly následně porovnány. Vyhodnocení probíhalo na základě zvolených parametrů. V souladu s literaturou se ukázalo, že FLC křivky zaznamenané pro vyšší rychlosti vytvářeli menší oblast bezpečné deformace než křivky zatěžované rychlostí nižší. Ukázalo se však, že některé křivky rychlostí 2 mm/s byly položeny na stejné úrovni či níže, než křivky pro rychlost zatěžování 17 mm/s, avšak pro rozdílné šarže. Dalším zkoumaným parametrem byl vliv polohy ve svitku. Ukázalo se, že většina šarží se až na výjimky chová v rámci tolerance a nedochází k výrazným odchylkám. Odchylku vykazovala šarže E, pro kterou hodnoty na začátku svitku padaly pod hodnoty ostatních šarží, a to i pro vyšší rychlost zatěžování. **Cíl byl splněn.**

5. Testování problematiky na prototypovém výlisku

Experimentálně byl zkoumán vliv změny tloušťky rychlosti deformace na ztenčení plechu na křížovém nástroji Cross-die vyrobeném technologií 3D tisku (Fused Filament Fabrication-FFF). Tento tvar nástroje pokrývá velkou škálu napěťových stavů. Experimenty byly vyhodnoceny pomocí systému ARGUS a ARAMIS. U obou systémů byly provedeny zkoušky při rychlosti deformace 2 mm/s vs 17 mm/s do výšky 20 mm.

Z výsledků je zřejmé, že rychlost posuvu tažníku (rychlost deformace) má znatelný vliv na procentuální ztenčení materiálu. Toto zjištění bylo získáno pomocí experimentů a zároveň pomocí FLD diagramů. S rostoucí rychlostí se materiál přibližuje limitní hranici porušení (FLC křivce). **Cíl byl splněn.**

6. Metodika sestavení materiálové karty

Sestavení materiálových karet je nutné pro zpřesnění numerických simulací pro rychlosti deformace. Byla vytvořena metodika sestavení materiálové karty pro více křivek zpevnění, viz Obrázek 8.2. Dále jsou srovnány vytvořené materiálové karty s kartami v SW AutoForm, viz Tabulka 8.1 a Tabulka 8.2. Vytvořené materiálové karty obsahují křivky zpevnění od rychlostí deformace $0,0002 \text{ s}^{-1}$ až 100 s^{-1} . Dále pro každého dodavatele (dodavatel AB a CDE) byly vytvořeny 2 FLC křivky pro nízké a vysoké rychlosti deformace. Hlavní motivací tohoto přístupu jsou ekonomické, nákladové důvody výrobců (materiál od levnějšího dodavatele (CDE) používat na běžné výlisky a materiál od dodavatele (AB) používat pouze na komplikovanější díly; tento materiál má větší zásobu plasticity a je méně náchylný na větší rychlosti deformace). Používání FLC křivek při vyšších rychlostech (17 mm/s) u numerických simulací by mělo vést ke stabilnějšímu (robustnějšímu) tvářecímu procesu. **Cíl byl splněn.**

7. Verifikace pomocí numerické simulace

Trend numerických simulací je v rozporu s naměřenými daty z kapitoly 7. V kapitole 7 byly hodnoty ztenčení pro rychlost 2 mm/s okolo $25,3 \%$ a pro rychlost 17 mm/s okolo $28,4 \%$. Tedy s rostoucí lisovací rychlostí se procentuální ztenčování zvětšovalo (pro experiment v kapitole 7), ale numerické simulace vykazují opačný trend. Dále hodnoty max. failure (riziko porušení) při vyšších rychlostech zatěžování (17 mm/s) a při zachování FLC křivky (rychlost 2 mm/s) vykazuje simulace menší riziko porušení materiálu, což je v rozporu s praxí. Kdy při vyšších lisovacích rychlostech hrozí větší riziko porušení materiálu. Jediný způsob, jak numerické simulace s vyšší rychlostí počítat je s použitím FLC křivek při vyšších rychlostech, tyto křivky zohledňují vliv rychlosti deformace a vykazují větší hodnoty rizika porušení. **Cíl byl splněn.**

Všechny dílčí cíle disertační práce byly splněny

Hlavní cíl disertační práce byl splněn.

11.2 Teoretický přínos disertační práce

- Navržena metodika práce s DIC systémy pro hlubokotažné materiály (CR4, CR5).
- Byl zjištěn a prezentován vliv rychlosti deformace při zkoušce tahem a zkoušce dle Nakajima.
- Výsledky řady zkoušek prokázaly nedostatky současných simulačních SW (AutoForm, Pam-Stamp), převážně z hlediska procentuálního ztenčení Tyto SW nepočítají s FLC křivkami pro různé rychlosti deformace (jako je tomu např. pro křivky zpevnění), ale pouze srovnávají deformace na výliscích s těmito křivkami.

11.3 Praktický přínos disertační práce

V důsledku tlaku na snižování nákladů na výrobu, kde převážně největší položkou je materiál, který v rámci celkových nákladů v automobilovém průmyslu tvoří ~ 75 %. Je požadavek, pokud lze používat materiál s nižšími parametry např. materiál CR4 za CR5, tzn. Používat nižší jakosti hlubokotažných ocelí. Rozdíl v cenách těchto materiálů je 15 až 30 € na jedné tuně. V rámci roční spotřeby 21 000 tun a při uvažování úspory 20 €/tunu mohou úspory činit až 420 000 €/rok, a za 5 let až 2 100 000 €. Dále zvýšením rychlosti zdvihu pouze o 0,1 (na 8,8 zdvihu/min) např. pro linku PL(LL28), kde se počítá běžně s využitím 8,7 zdvihu/min. by se efektivita zvýšila o 1,15 % což při běžném vytížení 3 530 000 zdvihů/rok představuje 40 230 zdvihů navíc. Z hlediska úspor to pak toto zvýšení rychlosti zdvihu představuje úsporu zhruba 201 000 € při hodnotě zdvihu min. 5 € a to pouze pro 1 linku PL (LL28).

11.4 Možnosti dalšího rozvoje disertační práce

V rámci dalšího rozšíření disertační práce navrhuji pokračovat v podrobnějším popisu materiálového modelu v rámci numerických simulací:

- Zkouška rozšiřováním otvoru HET (citlivost porušení materiálu od hrany), dle ČSN EN ISO 16 630.
- Zkouška tahem za zvýšených teplot do 130 °C (zkoumání vlivu ohřívání nástrojů, vlivem působení rychlosti deformace a deformačního tepla).
- Zakomponování SW TriboForm (řeší vliv tření) např. strip-drawing test.
- Vytvoření materiálové karty nejen s více FLC křivkami, ale i různými modely plasticity pro různé rychlosti deformace.
- Sledování nelineární deformační cesty a její vliv na polohu křivek mezního přetvoření.

Seznam použité literatury v tezích

- [1] ZERBONI, Alessandra; ROSSI, Tommaso; BENGALLI, Rossella; CATELANI, Tiziano; RIZZI, Cristiana et al. Diesel exhaust particulate emissions and in vitro toxicity from Euro 3 and Euro 6 vehicles. Online. *Environmental Pollution*. 2022, roč. 297. ISSN 02697491. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118767>. [cit. 2023-12-19].
- [2] KIM, Hyung Jun; JO, Seongin; KWON, Sangil; LEE, Jong-Tae a PARK, Suhan. NOX emission analysis according to after-treatment devices (SCR, LNT + SCR, SDPF), and control strategies in Euro-6 light-duty diesel vehicles. Online. *Fuel*. 2022, roč. 310. ISSN 00162361. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122297>. [cit. 2023-12-19].
- [3] *Autoforum*. Online. Autoforum.cz. 2015. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/predstaveni/figl-kterym-automobilka-vyzrala-na-emisni-limity-eu-se-dostal-do-prodeje/>. [cit. 2023-12-20].
- [4] FOREJTOVÁ, Lucie; KOLAŘÍK, Ladislav; SUCHÁNEK, Jan a PILVOUSEK, Tomáš. *Svařitelnost ocelí pro automobilové karoserie*. Online. MM průmyslové spektrum. 2017. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-oceli-pro-automobilove-karoserie>. [cit. 2023-12-19].
- [5] JURČIŠIN, Miroslav. *Experimentální měření křivky mezních deformací*. Online. Wwww.mmspektrum.com. 2015. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/experimentalni-mereni-krivky-meznich-deformaci>. [cit. 2023-12-20].
- [6] PETRUŽELKA, Jiří. *Tvařitelnost a nekonvenční metody ve tváření*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2000. ISBN 80-7078-635-3.
- [7] BILLU, Eren. *Digital Image Correlation for Creating FLCs*. Online. MetalForming Magazine. 2020. Dostupné z: <https://www.metalformingmagazine.com/article/?/materials/high-strength-steel/digital-image-correlation-for-creating-flcs>. [cit. 2023-12-20].
- [8] EVROPSKÝ VÝBOR PRO NORMALIZACI. ČSN EN ISO 12004-2, *Kovové materiály - Stanovení křivek mezní tvařitelnosti pro plechy a pásy - Část 2: Stanovení křivek mezní tvařitelnosti v laboratoři*. Řídicí centrum CEN-CENELEC: Rue de la Science 23, B-1040 Brusel, 2021.

- [9] MANOPULO, Niko; HORA, Pavel; PETERS, Philip; GORJI, Maysam a BARLAT, Frédéric. An extended Modified Maximum Force Criterion for the prediction of localized necking under non-proportional loading. Online. *International Journal of Plasticity*. 2015, roč. 75, s. 189-203. ISSN 07496419. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2015.02.003>. [cit. 2023-12-18].
- [10] VOLK, Wolfram; HOFFMANN, Hartmut; SUH, Jounghsik a KIM, Jaekun. Failure prediction for nonlinear strain paths in sheet metal forming. Online. *CIRP Annals*. 2012, roč. 61, č. 1, s. 259-262. ISSN 00078506. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.111>. [cit. 2023-12-18].
- [11] VOLK, Wolfram a SUH, Jounghsik. Prediction of formability for non-linear deformation history using generalized forming limit concept (GFLC). Online. In: . S. 556-561. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/1.4850035>. [cit. 2023-12-18].
- [12] VOLK, Wolfram a GABER, Christian. Investigation and Compensation of Biaxial Pre-strain During the Standard Nakajima- and Marciniak-test Using Generalized Forming Limit Concept. Online. *Procedia Engineering*. 2017, roč. 207, s. 568-573. ISSN 18777058. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.1022>. [cit. 2023-12-18].
- [13] ALLWOOD, Julian M. a SHOULER, Daniel R. Generalised forming limit diagrams showing increased forming limits with non-planar stress states. Online. *International Journal of Plasticity*. 2009, roč. 25, č. 7, s. 1207-1230. ISSN 07496419. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2008.11.001>. [cit. 2023-12-18].
- [14] CARR, Alan R.; WALKER, Andy a COMBAZ, Etienne. Derivation of a forming limit stress diagram from an experimental FLC, and comparison of the two criteria when applied to FE simulation of a pressing using different yield functions. Online. *International Journal of Material Forming*. 2015, roč. 8, č. 1, s. 45-57. ISSN 1960-6206. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12289-013-1146-7>. [cit. 2023-12-18].

- [15] HIPPKÉ, H; BERISHA, B a HORA, P. A failure model for non-proportional loading under plane stress condition based on GFLC in comparison to eMMFC and PEPS. Online. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, roč. 418. ISSN 1757-899X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/418/1/012044>. [cit. 2023-12-18].
- [16] STOUGHTON, Thomas B. a YOON, Jeong Whan. Path independent forming limits in strain and stress spaces. Online. *International Journal of Solids and Structures*. 2012, roč. 49, č. 25, s. 3616-3625. ISSN 00207683. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.08.004>. [cit. 2023-12-18].
- [17] KOTOUČ, Jiří. *Teorie a metodika tváření: Návod y ke cvičení...[a i.]*. Praha: ČVUT, 1992. ISBN 80-01-00842-8.
- [18] ARGUS. Online. MCAE. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/produkty/argus/>. [cit. 2023-12-20].
- [19] ARGUS. Online. High-precision, flexibility. Dostupné z: <https://www.gom.com/en/products/3d-testing/argus>. [cit. 2023-12-20].
- [20] ARAMIS. Online. MCAE. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/produkty/aramis/>. [cit. 2023-12-20].
- [21] ARAMIS 3D Camera. Online. Nenalezený vydavatel. Dostupné z: <https://www.gom.com/en/products/3d-testing/aramis-3d-camera>. [cit. 2023-12-20].
- [22] ARAMIS Adjustable. Online. Nenalezený vydavatel. Dostupné z: <https://www.gom.com/en/products/3d-testing/aramis-adjustable>. [cit. 2023-12-20].
- [23] KUT, S. a NIEDZIAŁEK, B. Numerical And Experimental Analysis Of The Process Of Aviation Drawpiece Forming Using Rigid And Rubber Punch With Various Properties. Online. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2015, roč. 60, č. 3, s. 1923-1928. ISSN 2300-1909. Dostupné z: <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0327>. [cit. 2024-01-05].

- [24] GU, Jiahui; ZOLLER, Laura a KIM, Hyunok. A New Testing Method to Evaluate Edge Cracking with Considerations of the Shear Clearance and Press Speed. Online. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*. 2020, roč. 2, č. 6, s. 3320-3325. ISSN 2641-9645. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2020-01-0758>. [cit. 2024-01-05].
- [25] DUCHAC, Alfred a KEJZLAR, Pavel. Optimization of Raster Point Deposition Methodology for Deformation Analyses. Online. *Materials Science Forum*. 2023, roč. 1081, s. 155-160. ISSN 1662-9752. Dostupné z: <https://doi.org/10.4028/p-2d795t>. [cit. 2024-01-05].
- [26] CENTENO, G.; MARTÍNEZ-DONAIRE, A.J.; VALLELLANO, C.; MARTÍNEZ-PALMETH, L.H.; MORALES, D. et al. Experimental Study on the Evaluation of Necking and Fracture Strains in Sheet Metal Forming Processes. Online. *Procedia Engineering*. 2013, roč. 63, s. 650-658. ISSN 18777058. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.204>. [cit. 2024-01-05].
- [27] KEELER, Stuart. *The Enhanced FLC Effect*. Online, Project Team Technology Report, vedoucí Stuart Keeler. Southfield, 2003. Dostupné z: <https://www.a-sp.org/wp-content/uploads/2020/08/Technology-Report-Final.pdf>. [cit. 2023-12-18].
- [28] HOFFMANN, H. a VOGL, C. Determination of True Stress-Strain-Curves and Normal Anisotropy in Tensile Tests with Optical Strain Measurement. Online. *CIRP Annals*. 2003, roč. 52, č. 1, s. 217-220. ISSN 00078506. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60569-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60569-1). [cit. 2023-12-18].
- [29] BANABIC, D.; LAZARESCU, L.; PARAIANU, L.; CIOBANU, I.; NICODIM, I. et al. Development of a new procedure for the experimental determination of the Forming Limit Curves. Online. *CIRP Annals*. 2013, roč. 62, č. 1, s. 255-258. ISSN 00078506. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.051>. [cit. 2023-12-18].
- [30] VEGTER, Henk; TEN HORN, Carel a ABSPOEL, Michael. The Vegter Lite material model: simplifying advanced material modelling. Online. *International Journal of Material Forming*. 2011, roč. 4, č. 2, s. 85-92. ISSN 1960-6206. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12289-010-1006-7>. [cit. 2023-12-20].

- [31] VEGTER, Henk; TEN HORN, Carel a ABSPOEL, Michael. The corus-vegter lite material model: simplifying advanced material modelling. Online. *International Journal of Material Forming*. 2009, roč. 2, č. S1, s. 511-514. ISSN 1960-6206. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12289-009-0640-4>. [cit. 2023-12-20].
- [32] KIM, S.B.; HUH, H.; BOK, H.H. a MOON, M.B. Forming limit diagram of auto-body steel sheets for high-speed sheet metal forming. Online. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011, roč. 211, č. 5, s. 851-862. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.01.006>. [cit. 2024-01-09].
- [33] VERLEYSSEN, Patricia; PEIRS, Jan; VAN SLYCKEN, Joost; FAES, Koen a DUCHENE, Laurent. Effect of strain rate on the forming behaviour of sheet metals. Online. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011, roč. 211, č. 8, s. 1457-1464. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.03.018>. [cit. 2024-01-09].
- [34] LI, Ming-Yao; ZHU, Xinhai a CHU, E. Effect of strain rate sensitivity on FLDs—An instability approach. Online. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2012, roč. 64, č. 1, s. 273-279. ISSN 00207403. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2012.05.013>. [cit. 2024-01-09].
- [35] BOČEK, Jan. *Vliv rychlosti přetvoření na mezní deformace pevnostních plechů: The effect of the strain rate on the forming limits of high-strength steel sheets : autoreferát disertační práce*. V Liberci: Technická univerzita, 2009. ISBN 978-80-7372-442-9.
- [36] NĚMET, Miroslav a MIHALIKOVÁ, Mária. The Effect of Strain Rate on the Mechanical Properties of Automotive Steel Sheets. Online. *Acta Polytechnica*. 2013, roč. 53, č. 4. ISSN 1805-2363. Dostupné z: <https://doi.org/10.14311/1839>. [cit. 2023-12-18].

Publikace autora vztahující se k disertační práci

- [1A] Dvořák, P.; Tatíček, F.; Novák, V.; Hejnic, J.; Havelka, J. (2020). Evaluation of tensile test using digitizing system ARAMIS. Technological Forum 2020. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2020. p. 24-28. ISBN 978-80-87583-32-6.
- [2A] Kostruněk, L.; Tatíček, F.; Novák, V.; Havelka, J.; Maryt, J.; Stejskal, O. (2022). Tensile Test at Different Strain Rates of the DX56 Material. Technological Forum 2022. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2022. p. 88-94. ISBN 978-80-87583-36-4.
- [3A] Maryt, J., Novák, V., Tatíček, F., Hejnic, J., Valeš, M., Havelka, J. (2022). Creation of material card for material quality DX56. Technological Forum 2022, Ing. Jan Kudláček, 124-130. ISBN 978-80-87583-36-4
- [4A] Petr, J.; Novák, V.; Tatíček, F.; Maryt, J.; Havelka, J.; Hejnic, J. (2022). Influence of strain rate on the position of FLC curves for steel DC05. Technological Forum 2022. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2022. p. 169-175. ISBN 978-80-87583-36-4.
- [5A] Tatíček, F.; Novák, V.; Valeš, M.; Kostruněk, L.; Kamenský, T.; Maryt, J. Formability analysis of selected batches of material grade CR4. Technological Forum 2023. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2023. p. 323-327. ISBN 978-80-87583-40-1.
- [6A] Havelka, J.; Tatíček, F.; Hejnic, J.; Novák, V.; Valeš, M.; Šanovec, J. (2021). Development trends in the field of deformation path study under the conditions of sheet metal forming. Technological forum 2021. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2021. p. 52-55. ISBN 978-80-87583-33-3..
- [7A] Valeš, M.; Novák, V.; Tatíček, F.; Šanovec, J.; Chrást'anský, L. (2019). Feasibility of DP500 Steel Outer Car Body Parts. TECHNOLOGICAL FORUM 2019. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2019. p. 170-176. ISBN 978-80-87583-30-2.
- [8A] Novák, V.; Valeš, M.; Tatíček, F.; Šanovec, J.; Chrást'anský, L. (2019). The Effect of Strain Rate on Position of Forming Limit Curve. METAL - CONFERENCE PROCEEDINGS. Ostrava: Tanger Ltd., 2019. p. 450-454. 1. ISBN 978-80-87294-92-5.
- [9A] Novák, V.; Valeš, M.; Tatíček, F.; Šanovec, J.; Chrást'anský, L. (2019). The Effect of Punch Speed on Position of Forming Limit Curve. In: Technological Forum 2019. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2019. p. 105-108. ISBN 978-80-87583-30-2.

- [10A] Havelka, J.; Tatíček, F.; Valeš, M.; Novák, V. (2020). The utilization of complex numerical simulations of stamping and hemming processes for the sake of visualizing the manufacturing process of the car's fifth door assembly. TECHNOLOGICAL FORUM 2020. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2020. p. 47-48. ISBN 978-80-87583-32-6.
- [11A] Valeš, M.; Novák, V.; Havelka, J.; Chrást'anský, L.; Tatíček, F. (2021). Production and Assembly of Car Body Fifth Door with Use of Dual-Phase Steel HCT500X. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, COMAT 2020. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2021. 1178. ISSN 1757-899X.
- [12A] Kostrunek, L.; Novák, V.; Valeš, M.; Tatíček, F.; Kamenský, T. (2023). Formability analysis for material CR5. Technological Forum 2023. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2023. p. 166-170. ISBN 978-80-87583-40-1.
- [13A] Novák, V.; Valeš, M.; Tatíček, F.; Šanovec, J.; Chrást'anský, L. (2021). Analysis of forming capacity of HCT490X and DX57D depending on strain rate. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, COMAT 2020. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2021. 1178. ISSN 1757-899X.
- [14A] Krejsa, P.; Novák, V.; Tatíček, F.; Valeš, M.; Chrást'anský, L. (2020). Determination of forming limit curves according to tensile test and ARAMIS system. Technological Forum 2020. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2020. p. 82-89. ISBN 978-80-87583-32-6.
- [15A] Hák, O.; Novák, V.; Tatíček, F.; Havelka, J.; Hejnic, J. (2020). The effect of strain rate on position of forming limit curve. Technological Forum 2020. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2020. p. 42-46. ISBN 978-80-87583-32-6.
- [16A] Novák, V.; Tatíček, F.; Valeš, M.; Havelka, J.; Hejnic, J.; Stejskal, O. (2021). Influence of punch speed on forming capacity for materials 1.0995 and 1.0853. Technological forum 2021. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2021. p. 206-210. ISBN 978-80-87583-33-3.
- [17A] Dvořáček, J.; Tatíček, F.; Novák, V.; Valeš, M.; Havelka, J.; Maryt, J. (2022). Design of a heating device for tensile test. Technological Forum 2022. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2022. p. 20-26. ISBN 978-80-87583-36-4.
- [18A] Maryt, J., Novák, V., Tatíček, F.; Stejskal, O.; Valeš, M. (2023). Effect of Temperature on Material Behaviour in the Tensile test. METAL 2023 Conference Proceedings, 6 s. (v recenzním řízení)
- [19A] Kettner, F.; Tatíček, F.; Novák, V.; Havelka, J.; Šanovec, J.; Stejskal, O. (2022). Verification of material behaviour in the hole expansion test. Technological Forum 2022. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2022. p. 79-83. ISBN 978-80-87583-36-4.

- [20A] Petr, J., Novák, V., Tatíček, F.; Rusz, S.; Havelka, J. (2023). Experimental analysis of crack formation at sheet metal edges. METAL 2023 Conference Proceedings, 6 s. (v recenzním řízení)
- [21A] Maryt, J.; Novák, V.; Valeš, M.; Tatíček, F.; Stejskal, O. (2023). Effect of different material grades on numeric simulation of stamping. Technological Forum 2023. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2023. p. 197-203. ISBN 978-80-87583-40-1.
- [22A] Valeš, M.; Šanovec, J.; Kubelka, M.; Novák, V. (2018). Cup Test Evaluation of DP500 Steel. Technological forum 2018 Book of Proceeding. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2018. p. 212-216. ISBN 978-80-87583-26-5.
- [23A] Heczko, N.; Novák, V.; Herman, A.; Janů, J.; Kment, T. (2021). Problematic 3D print of thin-walled parts by FDM technology. Technological Forum 2020. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2020. p. 63-68. ISBN 978-80-87583-32-6.
- [24A] Větrovec, M.; Tatíček, F.; Valeš, M.; Novák, V.; Maryt, J.; Stejskal, O. (2022). Comparison of tools made by 3D printing. Technological Forum 2022. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2022. p. 269-277. ISBN 978-80-87583-36-4.
- [25A] Váša, J.; Novák, V.; Tatíček, F.; Havelka, J.; Hejnic, J.; Stejskal, O. (2022). Design of a pressing tool produced by 3D printing for a part of a lock cover. Technological Forum 2022. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2022. p. 262-268. ISBN 978-80-87583-36-4.
- [26A] Janů, J.; Novák, V.; Tatíček, F.; Havelka, J.; Herman, A.; Hejnic, J. (2022). Desing of simple 3D printed stamping tools. Technological Forum 2022. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2022. p. 67-73. ISBN 978-80-87583-36-4.
- [27A] Novák, V., Tatíček, F., Stejskal, O.; Šanovec, J.; Hejnic, J. (2023). Design of forming tool for a lock cover part using the FFF 3D printing method. METAL 2023 Conference Proceedings, 6 s. (v recenzním řízení)
- [28A] Milsimer, P.; Novák, V.; Kostrunek, L.; Veselý, M.; Kamenský, T. (2023). Effect of infill type and density on mechanical properties of a 3D printed press tool. Technological Forum 2023. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2023. p. 223-227. ISBN 978-80-87583-40-1.
- [29A] Novák, V.; Šanovec, J.; Valeš, M.; Kostrunek, L.; Tatíček, F. (2023). Methodology of work with ARGUS optical system in the conditions of sheet metal forming. Technological Forum 2023. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2023. p. 232-236. ISBN 978-80-87583-40-1.

- [30A] Valeš, M., Novák, V., Tatíček, F., Šanovec, J., Chrást'anský, L. (2019). Outer Car Body Panels Made of Dual-Phase Steel. METAL 2019 Conference Proceedings, 507-512. 1. ISBN 978-80-87294-92-5. <https://doi.org/10.37904/metal.2019.824>
- [31A] Valeš, M.; Šanovec, J.; Tatíček, F.; Novák, V.; Havelka, J.; Chrást'anský, L. (2021). A method for applying Dual-Phase steel HCT500X in production on car body fifth door. Technological forum 2021. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2021. p. 301-305. ISBN 978-80-87583-33-3.
- [32A] Chrást'anský, L.; Valeš, M.; Novák, V.; Hejnic, J. (2021). Usability of Autoform assembly software for grooved fixation of the hemmed joints. Technological Forum 2021. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2021. p. 98-101. ISBN 978-80-87583-33-3.
- [33A] Valeš, M., Šanovec, J., Tatíček, F., Novák, V., Pačák, T. (2023). The methodology of using High-Strength Steel to Produce Outer Car Body Parts. Book of Proceeding from Conference Technological Forum 2023, Ing. Jan Kudláček. 337-341. ISBN 978-80-87583-40-1.
- [34A] Valeš, M., Tatíček, F., Šanovec, J., Novák, V., Maryt, J., Stejskal, O. (2023). A Method for Applying Dual-Phase Steel CR290Y490T-DP in Production of Tailgate Outer Lower. Book of Proceeding from Conference Technological Forum 2023, Ing. Jan Kudláček. 332-336. ISBN 978-80-87583-40-1.
- [35A] Novák, V.; Tatíček, F. (2023) Effect of tool speed on FLC curve position for DX56D, 06 February 2023, PREPRINT (Version 1) available at Research Square [<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2534744/v1>]

Anotace

Předkládaná disertační práce se zaměřuje na popis vlivu rychlosti deformace (rychlosti pohybu nástroje) na polohu FLC křivky, dále pak vytvoření metodiky hodnocení vlivu rychlosti deformace na polohu FLC křivky pro použití v numerických simulacích. V rámci disertační práce došlo k ověření vlivu rychlosti deformace na polohu FLC křivek. Byla provedena řada zkoušek pro vybrané materiály běžně používané v automobilovém průmyslu. Mechanické vlastnosti byly vyhodnocovány jednak zkouškou tahem a dalšími technologickými zkouškami (ověření tvářitelnosti, zejména zkouška dle Nakajimy) při odpovídajících rychlostech zatěžování. Vyhodnocení zkoušek bylo provedeno za pomoci bezkontaktních měřících systémů ARGUS a ARAMIS. Výsledky získané reálnými experimenty byly sledovány také pomocí numerických simulací v software AutoForm a PampStamp. Pochopení vlivu deformační rychlosti na stabilitu lisovacího procesu povede k finanční úspoře v předvýrobní fázi výroby lisovacích nástrojů a eliminaci vzniku neshody reálného lisovacího procesu a numerické simulace.

Summary

The present dissertation focuses on the description of the influence of the strain rate (speed of tool movement) on the position of the FLC curve, then the development of a methodology for the evaluation of the influence of the strain rate on the position of the FLC curve for use in numerical simulations. The influence of deformation rate on the position of FLC curves was verified in the dissertation. A series of tests were performed for selected materials commonly used in the automotive industry. The mechanical properties were evaluated by tensile testing and by other technological tests (formability verification, in particular the Nakajima test) at appropriate loading rates. The evaluation of the tests was performed using non-contact measuring systems ARGUS and ARAMIS. The results obtained by real experiments were also monitored by numerical simulations in AutoForm and PampStamp software. Understanding the effect of strain rate on the stability of the pressing process will lead to financial savings in the pre-production phase of the press tool manufacturing and eliminate the occurrence of mismatch between the real pressing process and numerical simulation.