

Vliv rychlosti deformace na polohu FLC křivek

Autor: Ing. Vít Novák

Školitel: doc. Ing. Jan Šanovec, CSc., Školitel specialista: Ing. František Tatíček, Ph.D.

ABSTRAKT

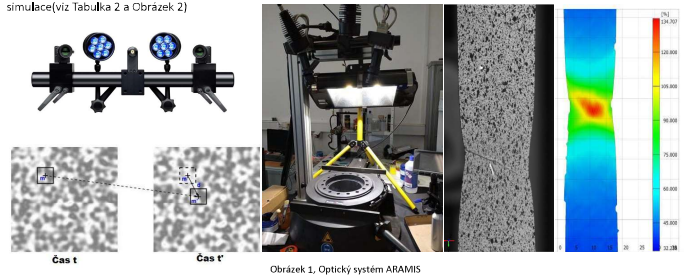
Disertační práce se zaměřuje na popis vlivu rychlosti deformace (rychlosti pohybu nástroje) na polohu FLC křivek, dále pak vytvoření metodiky hodnocení vlivu rychlosti deformace na polohu FLC křivek pro použití v numerických simulacích. V rámci disertační práce došlo k ověření vlivu rychlosti deformace 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 softwaru AutoForm a PampStamp. Pochopení vlivu deformací 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.

ÚVOD DO PROBLEMATIKY

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. Pochopení vlivu rychlosti deformace na lisovací proces přinese zprávesněn materiálůvých modelů používaných v numerických simulacích a možnost lépe a přesněji navrhout technologii tvářecího procesu. V současné době, je kladen větší důraz na stabilní lisovací proces, proces bez vzniku vad, což možná největší využití materiálu z hlediska dosažitelných deformací. V dnešní době je tendence vyrábět velké výlisky v rychlejších taktů 1-150 zdvihu za min. (dříve 4-10 zdvihu 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 zdvihu za min.) vede ke snížení počtu neshodných výlisků (vyšší se nestabilita lisovacího procesu). To ale není problém požadované produktivity práce, protože se snížením taktu výroby vznikají vícenásobky (delší čas pro dosažení požadované výrobní dávky). Proto vytvoření metodiky vlivu rychlosti deformace na polohu FLC křivek umožní lépe navrhovat výrobní proces s využitím simulacních softwarů pro technologii plísňového tváření, docílí se přesnějšího návrhu lisovacího procesu a umožní využívat vysokopevnostní oceli na hranici dosažitelných deformací.

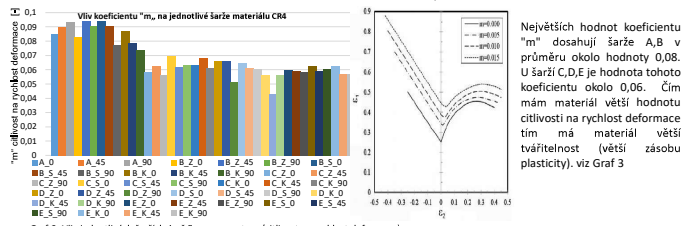
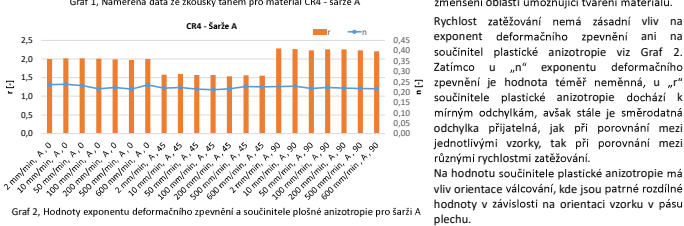
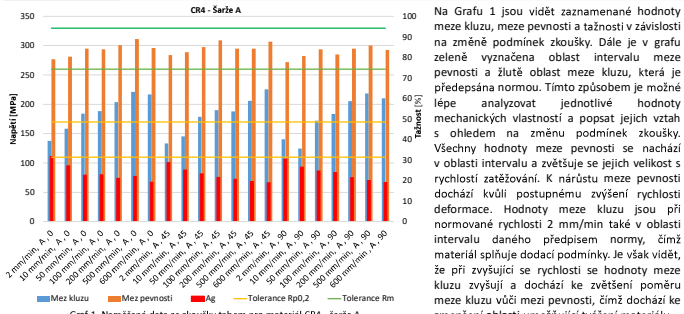
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Pomocí systému ARAMIS (viz Obrázek 1), který funguje na principu digitální korelace obrazu (DIC), zařízení na zkoušku tahem (LabTest 5.100SP1) a univerzálního zařízení na zkoušení plechů (BUP600) byl na materiálu CR4 (viz Tabulka 1) měřeny materiálové parametry pro numerických simulací. V rámci experimentální části byly zkoušeny různé metody vyhodnocování rychlosti tahem (bylo zajištěno propojení trhácho stroje se systémem ARAMIS), metodika přípravy měrné sítě, vliv jednotlivých parametrů na zkoušku tahem (viz Grafy 1 až 3). Studium polohy FLC křivek v závislosti na rychlosti deformace (viz Graf 4), testování problematiky na prototypovém výlisku, metodika sestavení materiálové karty (viz Graf 5) a verifikace naměřených výsledků pomocí numerické simulace (viz Tabulka 2 a Obrázek 2)

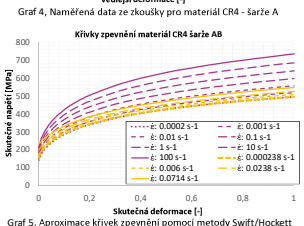
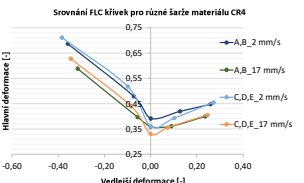


Tabulka 1. Mechanické vlastnosti pro materiál CR4 dle VDA 239-100

Materiál	R _{m0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A _{30mm} [%]	A _{20mm} [%]	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



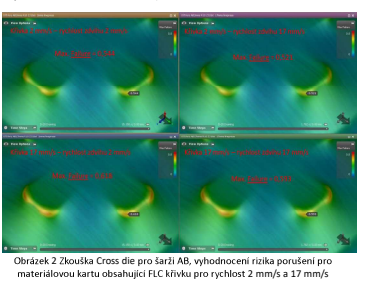
ZÁVĚR
 Disertační práce se zabývá vstupními materiálovými parametry pro numerické simulace, především materiálovými modely plasticity, křivkou zpevnění a diagramem mezího přetvoření FLD. Práce popisuje bezkontaktní měřící systémy a jejich základní princip pro měření deformace plechů a vstupními materiálovými parametry, které ověřily přesnost numerických simulací. V rámci disertační práce byla v této problematice provedena série experimentů při různých rychlostech deformace, které odpovídají lisovacímu taktu používanému v výrobě výlisků v automobilovém průmyslu. Analýza deformace těchto dílů byla provedena za pomoci bezkontaktních měřících systémů ARGUS a ARAMIS. Vliv rychlosti deformace byl sledován systémem ARAMIS a vyhodnocován také pomocí numerických simulací realizovaných v programu AutoForm a Pamp-Stamp. Důležitým aspektem pro úspěšnou implementaci výsledků je správné nadeformování vstupních parametrů. Experimentální část disertační práce prezentuje realizované výsledky z pohledu splnění cíl disertační práce. Při realizaci experimentů bylo nutné se vypořádat s řadou problémů souvisejících s přípravou vzorků, a to nedostatečná soudržnost materiálu, působení tribologického systému, či dostatečné osvětlení zkoušených těles v rámci experimentů. Z hlediska nedostatečné soudržnosti se jedná především o eliminaci vlivu maziva, ale také z hlediska vhodné volby prostředí pro vytvoření plechu – jeho dostatečná soudržnost na povrchu zkoušeného vzorku. V rámci práce byla řešena metodika odmašťování povrchu plechu a dále metodika navrhování patternu formou vhodných barev. Vyřešení problematiky je důležité pro zajištění soudržnosti a čitelnosti patternu pro celou dobu trvání experimentu. Tribologický systém řeší problematiku povrchu vzniku trhliny, vlivění tření mezi tělískem a zkoušeným tělesem a vlivění hodnotou součinitele tření se posouvá trhlina dle vrcholu a zkouška se stává neplatnou. Nízká hodnota součinitele tření mezi přídržovcem a zkoušeným tělesem ovlivňuje snadné vyklouznutí plechu z přídržovače, což brání vzniku trhliny. Problematika dostatečného osvětlení zkoušeného tělesa je nutná pro dostatečný kontrast patternu v průběhu zkoušky. Základně se tak ovlivňuje pozorování vzáhlé 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 deformací 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 dodavatele materiálu i výrobních podniků.



Tabulka 2. Srovnání simulací SW Autoform a Pamp-Stamp pro

Karta	Rychlost FLC [mm/s]	Rychlost nástroje [mm/s]	Autoform, μ = 0,15		Pam-Stamp, μ = 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

Naměřená data z obou experimentů (viz kapitola 13.2 a kapitola 14.8) byla po zpracování namaprotvořeno 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 netže do jedné materiálové karty vložit více FLC křivek pro různé rychlosti najednou. Obě karty poté obsahují křivky zpevnění pro různé rychlosti deformace. Z důvodu použití křivek zpevnění i pro vyšší rychlosti deformace ne pouze pro naměřené hodnoty 0,07 s⁻¹, byly výsledky aproximovány pomocí metody Swift/Hockett Šerby až na hodnoty rychlosti deformace 100 s⁻¹ viz Graf 5. Stejným způsobem se aproximovaly křivky zpevnění i do šarže CDE. V tabulce 2 a na obrázku 2 jsou srovnány výsledky numerických simulací pro jednotlivé materiálové šarže, FLC křivky, simulacní software a součinitele tření. Trend numerických simulací je v rozporu s naměřenými daty z kapitoly 15. V kapitole 15 byly hodnoty ztenčení pro rychlost 2 mm/s okolo 25,3 % a pro rychlost 17 mm/s okolo 28,4 %. Tedy s rostoucí rychlostí se procentuální ztenčování zvětšovalo, ale numerické simulace vykazují opačný trend. Dále hodnoty max. failure (riziko porušení) při vyšších rychlostech zatěžování (17 mm/s) a při zachování FLC křivek (rychlost 2 mm/s) vyjadřuje simulace menší riziko porušení materiálu, což je v rozporu s prakt. kdy při vyšších lisovacích rychlostech hrozí větší riziko porušení materiálu.



Splnění dílčích cílů disertační práce

- Metodika vyhodnocování zkoušky tahem pomocí systému ARAMIS pro různé rychlosti deformace**
 Propojením zkoušebního 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 přídělného a podélného extenzometru je vyloučení výpočtu součinitele plasticité anizotropie a exponentu deformačního zpevnění z procesu vyhodnocování. Cíl byl v rámci řešení disertační práce splněn.
- 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 nevyrutným náterovým systémem. V případě to znamenalo komplikaci v podobě nemožnosti předpřípravy nástřiku a každý vzorek byl opatřen nástržkem v určité, časově krátké době před vlastním měřením. Cíl byl v rámci řešení disertační práce splněn.
- 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 ukázan 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 díle jednotlivých šarží a dalších parametrů. Dále bylo provedeno porovnání měří jednotlivými šaržemi a materiálovými kartami. 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 v rámci řešení disertační práce splněn.
- Studium polohy FLC křivek v závislosti na rychlosti deformace**
 U měření křivek mezi tvářitelnosti byly v naměřených rychlostech vytvářeny jednotlivé FLC křivky, které byly následně porovnány. Vyhodnocení probíhalo na základě zvolených parametrů. V souladu s literaturou se ukázalo, že FLC křivky zamerané pro vyšší rychlosti vytvářely menší oblast bezpečné deformace než křivky zatěžované rychlostí nižší. Ukázalo se však, že některé křivky rychlosti 2 mm/s byly položené na stejné úrovni či níže, než křivky pro rychlost zatěžování 17 mm/s, avšak pro rozdílné šarže. Dalším zkoumaným parametrem byl vliv polohy ve svítku. Ukázalo se, že většina šarží se až na výjimky chová v rámci tolerance a nedochází k výrazným odchylkám. Odchylky vykazovala šarže E, pro kterou hodnota na začátku svítku padaly pod hodnoty ostatních šarží, a to i pro vyšší rychlosti zatěžování. Cíl byl v rámci řešení disertační práce splněn.
- Testování problematiky na prototypovém výlisku**
 Experimentálně byl zkoumán vliv změny tloušťky rychlosti deformace na ztenčení plechu na křížovém nástroji Cross-die vyrobeném technologii 3D tisk (Fused Filament Fabrication-FFF). Tento tvar nástroje pokrývá velkou škálu napětových 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 v rámci řešení disertační práce splněn.
- Metodika sestavení materiálové karty**
 Sestavení materiálových karet je nutně zprávesněn 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 rychlosti deformace 0,0002 s⁻¹ až 100 s⁻¹. Dále pro každého dodavatele (dodavatel A a CDE) byl vytvořen 2 FLC křivky pro nízké a vysoké rychlosti deformace. Hlavní motivací tohoto přístupu jsou ekonomické, nákladové důvody výroby (materiál od levnějšího dodavatele (CDE) používat na běžné výlisky a materiál od dodavatele (AB) používat pouze na komplikovanější díly; tento materiál má větší zásoby plasticity a je méně náchylný na větší rychlosti deformace). Používání FLC křivek při vyšších rychlostech (17 mm/s) v numerických simulacích by mělo vést ke stabilnějšímu (robustnějšímu) tvářecímu procesu. Cíl byl v rámci řešení disertační práce splněn.
- 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 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 křivek (rychlost 2 mm/s) vyjadřuje simulace menší riziko porušení materiálu, což je v rozporu s prakt. 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 vyjadřují větší hodnoty rizika porušení. Cíl byl v rámci řešení disertační práce splněn.