

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra tváření a plastů



KOMPLEXNÍ ANALÝZA PŘETVOŘENÍ VÝLISKŮ NEPRAVIDELNÝCH TVARŮ

habilitační práce

obor strojírenská technologie

23 - 07 - 8

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146071360

Ing. Zdeněk B u c h a r , CSc.

Liberec 1996

U 3085

KSP
129 A.
Obr

OBSAH

1.	ÚVOD	4
2.	PROBLEMATIKA TAŽENÍ VÝLISKŮ KAROSÁŘSKÉHO TYPU	6
2.1	Charakteristika výlisků karosářského typu	6
3.	DEFINICE DIAGRAMŮ MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ	10
4.	DMP STANOVENÉ POČETNÍMI METODAMI	12
4.1	Lokální a difúzní ztráta stability	13
4.1.1	Lokalizace přetvoření v difúzním ztenčení	16
4.1.2	Teorie rozdvojení	18
4.2	Teoretické Goodwin - Keelerovy diagramy mezních přetvoření	19
4.3	Metoda stanovení KMP dle Mk teorie	24
4.4	Metoda stanovení KMP dle Ghoshe	27
5.	DISKUSE K POČETNÍM METODÁM STANOVENÍ KMP	29
5.1	Vliv materiálových charakteristik na polohu a tvar KMP	30
5.1.1	Materiálová charakteristika - "n"	30
5.1.1.1	Způsoby určování "n" jako exponentu deformačního zpevnění	31
5.1.1.2	Způsoby určování "n" jako maximálního rovnoměrného přetvoření	32
5.1.1.3	Charakteristika "n" jako funkce stavu napjatosti	33
5.1.1.4	Vzájemné porovnání hodnot "n" určených různými postupy	33
5.1.2	Normálová anizotropie - "r"	36
5.2	Vymezení vlivu vstupních charakteristik na polohu a tvar početně stanovených KMP	39
6.	URČOVÁNÍ DIAGRAMŮ MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ EXPERIMENTÁLNÍM ZPŮSOBEM	43
6.1	Progresivní metoda experimentálního modelování diagramů mezních přetvoření	43
6.2	Určování mezního stupně přetvoření	46
6.3	DMP a jejich statistické zpracování	50
6.4	Vliv technologických faktorů na DMP	52
6.5	Způsob stanovení hranic tváření	56

6.6	Ověření platnosti KMP stanovených početními metodami	59
7.	POVRCHOVÉ DEFORMAČNÍ SÍTĚ	65
7.1	Vytváření sítí pomocí šablon	65
7.2	Leptací šablony, kvalita sítě a její hodnocení	67
7.3	Systémy proměřování deformační sítě	69
7.3.1	Automatizované měřicí systémy	71
8.	KOMPLEXNÍ ANALÝZA PŘETVOŘENÍ VÝLISKŮ NEPRAVIDELNÝCH TVARŮ	74
8.1	Výhody komplexní analýzy přetvoření	74
8.2	Základní filozofie oživování tažného nástroje	74
8.3	Využití diagramů mezních přetvoření v analýze přetvoření	76
8.3.1	Metodika využití DMP pro komplexní analýzu přetvoření	76
8.4	Vlastní metodika analýzy přetvoření výlisků nepravidelných tvarů	78
8.5	Diagram analýzy posuvů a vypínání	82
9.	PŘÍKLADY KOMPLEXNÍ ANALÝZY PŘETVOŘENÍ VÝLISKŮ NEPRAVIDELNÝCH TVARŮ	85
9.1	Charakteristika výlisku vnitřních dveří	85
9.2	Analýza přetvoření výlisku vnitřních dveří	87
9.2.1	Analýza přetvoření v oblasti " V "	87
9.2.2	Analýza přetvoření v oblasti vnitřního prolisu "T"	92
9.3	Analýza přetvoření výlisku spodního víka motoru	96
10.	NUMERICKÉ SIMULACE TAŽENÍ VÝLISKŮ	100
10.1	Program AUTOFORM a příklad jeho využití	102
11.	ZÁVĚR	114
12.	LITERATURA	116

1. ÚVOD

Problematika hodnocení lisovatelnosti plechových dílů je stále v popředí zájmu jak výrobců tak zpracovatelů tenkých plechů. Je to dáno tím, že dosud nebyla nalezena obecně použitelná metoda, která by umožňovala bezproblémový náběh nových typů výlisků a spolehlivý způsob odstraňování výskytu jejich zmetkovitosti ve výrobě samé.

Spolehlivé zhotovení výlisku od návrhu dílu k lisovacímu nástroji a jeho konečnému úspěšnému odzkoušení je dosti zdoluhavý, opatrně vedený proces. Při volbě technologických podmínek tažení, konstrukci nástrojů a uplatňování doplňkových technologických zásahů se např. prakticky ve všech lisovnách stále uplatňuje především dlouholetá praxe, zkušenost a dovednost konstruktérů, technologů a nástrojařů. Úspěšný chod výroby lisovaných dílů je tak stále zajištěn díky zkušenému kadru pracovníků, jejich kvalifikaci a citu pro věc, jež jsou vlastně odvozeny z dlouhodobé aplikace tzv. metody pokusu a omylu. Využití této metody však může být problematické, vstoupí-li do hry zcela nové parametry jako např. jiný druh plechu, nový tvar výlisku nebo značná změna v technologii výroby. Takže ani dlouhodobě získávané zkušenosti nejsou ve všech případech dostatečnou zárukou rychlého úspěchu. V některých případech zůstává, z hlediska výskytu zmetků, výlisek problémový i ve výrobě a překonávání těchto problémů pak vede i ke zvyšování nákladů na výrobu samu.

Řešení výrobních problémů nutně vyžaduje informace typu "jak to vyřešit". Odpověď na tuto zdánlivě jednoduchou otázku již tak jednoduchá není, zejména když použitá řešení, která u podobných výlisků byla úspěšná, nyní nepřinášejí kýžený efekt. Obvykle se totiž ani přesně neví, jak ten který zásah funguje a tedy ani proč určitý zásah v určitém případě přinese žádoucí výsledek a jindy ne. Pro hlubší porozumění problematice a pro možnost jejího zobecnění tak, aby bylo možné příslušné řešení spolehlivě aplikovat i přistě, jsou pak cennější informace typu "proč to tak funguje" než "jak to momentálně vyřešit" [1,2].

Každodenní potřeba rychlejšího, kvalitnějšího a spolehlivějšího přístupu k řešení problematiky zmetkovitosti výlisků z tenkých plechů je evidentní a stále aktuální. A to jak při vlastním sériovém lisování, tak i při oživování nového nástroje v nástrojárně. Čas od času se navíc přidruží i generační otázka, kdy staří a zkušení odborníci odchází do důchodu a na jejich místa přichází mladí pracovníci. V tom případě to není jen pouhá otázka nahrazení jednoho pracovníka druhým. Nutně zde musí nastat i předání cenných zkušeností, a to tak rychle jak jen je to možné. Pro konstrukci výlisků jsou dále používány stále nové druhy plechů, ať už se zvýšenými pevnostními hodnotami, s izotropními vlastnostmi, s nejrůznějšími druhy kovových či organických povlaků apod. Tyto materiály se však často chovají jinak, než tradičně používané plechy. Cena nových materiálů je vždy vyšší než těch předchozích, takže zde opět nutně vyvstává důležitá otázka snižování zmetkovitosti v lisovnách. Zmetkovitost se projeví jak ve ztrátě drahého plechu v podobě zmetkového výlisku, tak i ve snížení produkce příslušné lisovací linky, neboť "produkce" zmetkového výlisku znamená ztrátový čas. To ve svých důsledcích může ohrozit i celkovou výrobnost finálního automobilu s citelnými důsledky v podobě ztráty trhu ve prospěch konkurence. Z předchozího jednoznačně vyplývá, že jedna z velmi důležitých cest ke snižování ceny výrobku je důsledné snižování odpadu a zmetkovitosti ve výrobě. Výčet důvodů pro systematický, inženýrsky tvůrčí přístup k řešení problematiky zmetkovitosti výlisků by mohl dále pokračovat, ale i z tohoto stručného výčtu je zřejmá důležitost takového přístupu.

Přirozená a logická snaha účinně aplikovat zkušenosti z dříve řešených případů nutně vyžaduje jejich zobecnění. To je však možno provést pouze za předpokladu, jsou-li k dispozici spolehlivé údaje získané objektivní analýzou procesu přetvoření plechu. Efektivnost takové analýzy, jež nutně využívá povrchových deformačních sítí, je dále umocněna dostatečnou znalostí a vhodným využíváním vlastností zpracovávaného plechu.

Pro řešení problémů při lisování je tradičně úspěšně používána metoda analýzy přetvoření na výliscích. Tuto metodu, založenou na využití zmíněných deformačních sítí, lze

výhodně kombinovat s diagramy mezních přetvoření spolu s diagramy analýzy posuvů a vypínání, kdy se na výlisku zjištěná přetvoření porovnávají s mezními - kritickými hodnotami. Stručně lze tuto účinnou kombinovanou metodu nazvat "KOMPLEXNÍ ANALÝZOU PŘETVOŘENÍ".

Ta jistě není všelékem na každý lisařský problém. Ale správně a systematicky využíváná prokáže neocenitelné služby v rychlé a efektivní orientaci ve vzniklém problému a v nastínění cesty jeho řešení. V současné době tato metodika získala nové významné impulsy. Jsou to jak progresivní postupy určování diagramů mezních přetvoření, tak i automatizované systémy měření a vyhodnocení deformací na reálných výliscích spolu s numerickými simulacemi tažení výlisků, zejména nepravidelných tvarů. Kombinace těchto moderních prvků v tradiční analýze přetvoření je velmi efektivní nástroj pro řešení problémů vzniklých v souvislosti s lisováním výlisků, zejména karosářského typu. Tato technika umožňuje lépe porozumět procesům přetvoření plechu, než tomu bylo kdy v minulosti. Zmíněný moderní přístup k řešení problematiky lisování pak nejen analyzuje daný problém, ale nabízí navíc i možnosti vlastního řešení.

Tento trend je dále umocňován i tím, že se dnes do procesu výroby výlisků stále více zapojují i samotní výrobci karosářských plechů. Dodavatelé plechů podporují zpracovatele jak ve fázi konstrukce výlisku, tak i v průběhu lisování dílu. Tato pomoc je zejména ve formě rad při výběru plechu s vhodnými vlastnostmi pro daný díl, při vlastní konstrukci výlisku (možnosti plechu ve vztahu k tvarové náročnosti dílu), při volbě některých technologických podmínek lisování, tak i ve fázi konstrukce nástroje. Právě v této fázi předvýrobních etap i následně při náběhu výroby a sériovém lisování jsou velmi důležité co nejucelenější informace o reálném procesu plastického přetvoření plechu [3].

V rámci komplexní analýzy přetvoření je předkládána práce zaměřena zejména na následující oblasti :

- charakteristika výlisků nepravidelných tvarů zejména karosářského typu,
- problematika určování diagramů mezních přetvoření stanovených početními metodami pro různě definovaný mezní stav,
- metodika určování diagramů mezních přetvoření experimentálním způsobem,
- problematika vytváření a proměřování povrchových deformačních sítí,
- vlastní metodika komplexní analýzy přetvoření výlisků nepravidelných tvarů,
- příklad komplexní analýzy přetvoření na vybraných výliscích,
- možnost využití numerických simulací v oblasti tažení výlisků nepravidelných tvarů.

2. PROBLEMATIKA TAŽENÍ VÝLISKŮ KAROSÁŘSKÉHO TYPU

Tažení výlisků nepravidelných tvarů, jejichž klasickým představitelem jsou karosářské výlisky, představuje z technologického hlediska širokou problematiku výrazně se odlišující od problematiky hlubokého tažení jednoduché rotační nádoby. Při jejich lisování se uplatňují, na rozdíl od hlubokého tažení, jak posuvy tak vypínání. Výlisky nepravidelných tvarů je možné z hlediska jejich prostorového tvaru rozdělit do dvou základních skupin:

- ☐ 1. Ploché výlisky, při jejichž vzniku se uplatní hlavně vypínání a méně posuvy
- ☐ 2. Výlisky se složitým a hlubokým prostorovým tvarem, při jejichž vzniku se uplatní hlavně hluboké tažení a méně vypínání.

Vzhledem k tomu, že se jedná o výlisky nepravidelných tvarů, jejichž tvar se mění v závislosti na konstrukci a tvaru karoserie, je nutno vždy znovu řešit i základní otázky technologie tažení daného dílu. Jak bylo řečeno v kap. 1, spolehlivým vodítkem však nebývají ani zkušenosti, získané řešením technologie tažení obdobného výlisku [4]. Při globálním pohledu na uvedenou problematiku jako na systém vzájemného působení mnoha faktorů se názorně ukáže její náročnost. Jednotlivé prvky systému jsou:

- ☐ 1. vstupní materiál - plech
- ☐ 2. navržený tvar výlisku a nástřihu
- ☐ 3. vzájemná interakce nástroj - plech
- ☐ 4. funkce soustavy stroj - nástroj

Složitost přeměny rovinného polotovaru v prostorový díl a množství existujících vazeb nakonec vedlo i k představě tohoto interaktivního systému v podobě jakési "černé schránky" s příslušným vstupem (plech) a výstupem (výlisek).

Současná generace techniků zabývajících se výrobou výlisků má možnost se opřít o mocného pomocníka. Tím je v úvodu vzpomínaná komplexní analýza přetvoření založená na využití povrchových deformačních sítí spolu s diagramy mezních přetvoření. Taková analýza se zřetelem na působení dalších důležitých faktorů při lisování je vhodným a účinným prostředkem diagnostiky výrobních problémů a jejich odstranění. Tento přístup je dnes široce používán v lisovnách velkých výrobců zabývajících se lisováním dílů nepravidelných tvarů.

Využití těchto metod je v následujících kapitolách podrobněji osvětleno. Zde je však na místě připomenout, že ač se jedná o velmi jednoduché a snadno pochopitelné postupy, jejich praktická aplikace, vzhledem ke složité problematice tažení zejména velkorozměrných výlisků karosářského typu, není již tak snadná a jednoduchá. Nicméně její použití je na druhé straně velmi efektivní a užitečné.

2.1 CHARAKTERISTIKA VÝLISKŮ KAROSÁŘSKÉHO TYPU

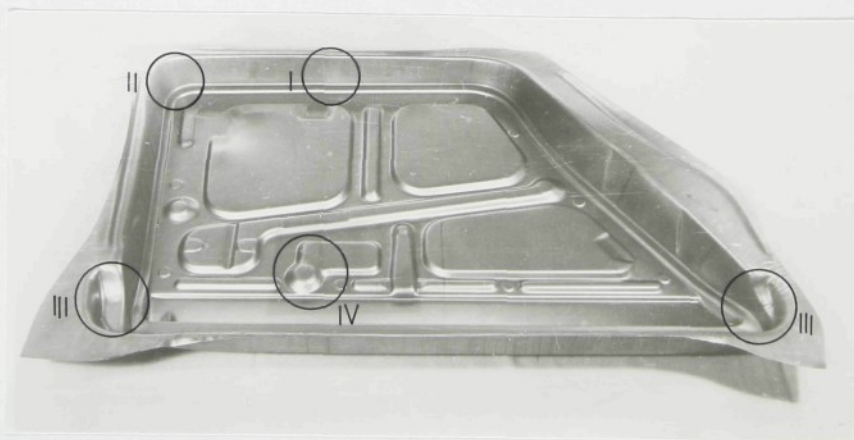
Jde v převážné většině případů o výlisky, které mají složitý prostorový tvar. Při jejich vzniku se uplatňují přetvoření jak posuvem (přes tažnou hranu tažnice) tak vypínáním (plech intenzivně brzděn pod přidržovačem), které představují dvě krajní polohy přetvoření plechu, ke

kterým při tažení dochází. Při praktickém lisování se oba tyto mezní případy přetvoření objevují současně se vzájemným proměnným podílem, dle příslušného tvaru výlisku a technologických podmínek tažení.

Pro daný typ výlisku je pak důležitý vhodný podíl posuvů a vypínání. Pro hlubší tvar je nutné více "pustit" plech z oblasti přidržovače (méně vypínání), aby bylo dostatek materiálu na vytvoření požadovaného tvaru výlisku. Tím je ale na plochách výlisku menší zpevnění. Pro mělký tvar je výhodnější více brzdit posuv plechu do tažnice. Dojde tak k většímu přetvoření vypínáním a tím i k většímu zpevnění materiálu a plocha výlisku tak bude mít větší pevnost. Ovšem při intenzivním brzdění posuvů může tahové napětí v plechu překročit mez pevnosti materiálu a dojde k jeho trhání. Z nastíněné úvahy vyplývá důležitost volby optimálních poměrů posuvů a vypínání pro daný výlisek, a to s ohledem na možnost úspěšně vytáhnout požadovaný tvar i s požadovaným zpevněním v ploše výlisku a bez vad. Těmi jsou např. trhliny, zvlnění, poškození povrchu, rozměrová a tvarová přesnost apod.

Obrys výtazku je ve většině případů nepravidelný a složitý. Složitými prostorovými plochami je tvořena nejen pracovní část tažnicku a tažnice, ale i přidržovače. Stavby napjatosti a přetvoření jsou na výlisku rozloženy nerovnoměrně. Při výrobě takových dílů je materiál podroben komplexním přetvořením, které v sobě zahrnují vedle hlubokého tažení a vypínání i ohýbání a narovnávání. Příklady uvedených stavů napjatosti a přetvoření, které se uplatňují při tažení výlisků karosářského typu, lze popsat i na výlisku vnitřních dveří [5], na obr. 2.1.1. Schémata těchto stavů napjatosti a přetvoření jsou pak na obr. 2.1.2.

- Oblast I. Uplatňují se především posuvy s ohybem a narovnáváním za tažnou hranou. Stavby napjatosti a přetvoření jsou blízké variantě 2 na obr. 2.1.2.
- Oblast II. Podmínky tažení jsou podobné podmínkám při hlubokém tažení, tj. s převládajícími posuvy. Stavby napjatosti a přetvoření pod přidržovačem odpovídají variantám 1 a za tažnou hranou na boční stěně variantám 2 eventuálně 3, s uplatněním vypínání.
- Oblast III. Jde o tvarově složitě oblasti, kde v důsledku omezeného styku plechu s nástrojem v průběhu tažení (zejména v počáteční fázi) a při stavech napjatosti odpovídajících variantě 1, může docházet ke vzniku vln. V závěrečné fázi tažení dochází k místnímu vypínání.
- Oblast IV. V těchto oblastech výlisku s místními prolisy jednoznačně převládá vypínání za podmínek odpovídajících variantám 3 a 4 na obr. 2.1.2.

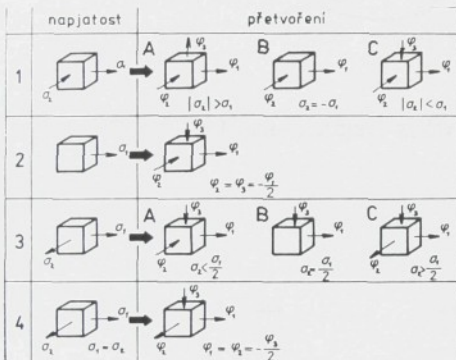


Obr. 2.1.1 Výlisek vnitřních dveří jako příklad výlisku nepravidelného tvaru karosářského typu

K technologickým zvláštnostem tažení výlisků karosářského typu patří i to, že plocha vlastního výlisku je mnohem větší než plocha té jeho části, která se nachází v oblasti přidržovače. Tuto skutečnost je možno považovat za určující z hlediska volby technologických podmínek tažení. Další specifické zvláštnosti tažení výlisků karosářského typu lze shrnout do následujících bodů :

- 1) K přetvoření plechu dochází za působení převážně tahových napětí. Tlaková se objevují především v oblasti přidržovače. V první fázi tažení mohou působit i mimo ni, což může mít za následek vznik vln.
- 2) Pro získání dostatečně tuhého výlisku bez zvlnění je nutno v oblasti přidržovače nebo tažné hrany plech intenzivně brzdit a tuto intenzitu po obvodu výlisku měnit.
- 3) Velké rozměry výtahů členitých tvarů neumožní často ovlivnit průběh tažení změnami podmínek v oblasti přidržovače. Pak je nutno použít různých prolisů a otvorů již v nástřihu.
- 4) Úspěšné tažení lze zajistit i vhodným tvarem plochy přidržovače, lisovací polohou v nástroji a často je nutné provést i seskupování výlisků.
- 5) Konečná úprava tažného nástroje a volba technologických podmínek v oblasti přidržovače, jsou prováděny v rámci jeho zkoušení, kdy je stanoven i definitivní tvar a rozměr nástřihu, včetně konečné volby jakosti zpracovávaného plechu [5,6].

Množství nejruznějších faktorů působících v jednotlivých etapách výroby tak může negativně ovlivnit vznik kvalitního výlisku. Velmi důležité jsou již předvýrobní etapy, kdy je navrhován tvar výlisku, technologický postup výroby, materiál, tažný nástroj a nástroje další atd. Neméně důležitým momentem je i správná funkce soustavy stroj-nástroj. Složitost celého procesu vzniku kvalitního výlisku může ve svých důsledcích vést k narušení zdáného průběhu či výsledku lisování, a tím k možnému vzniku zmetků, které se projeví např. v některé následující podobě :

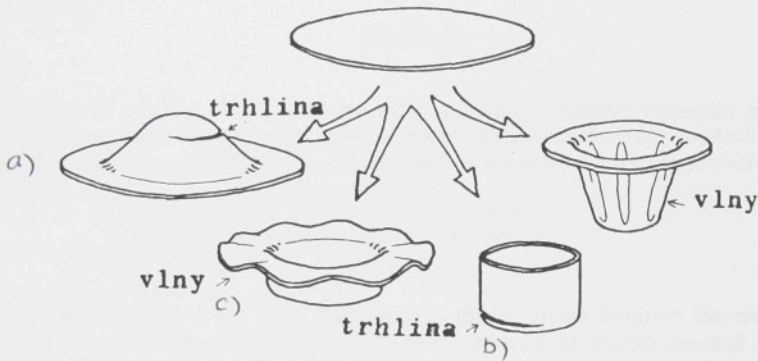


Obr. 2.1.2 Schémata stavů napjatosti a přetvoření uplatňující se při tažení výlisků

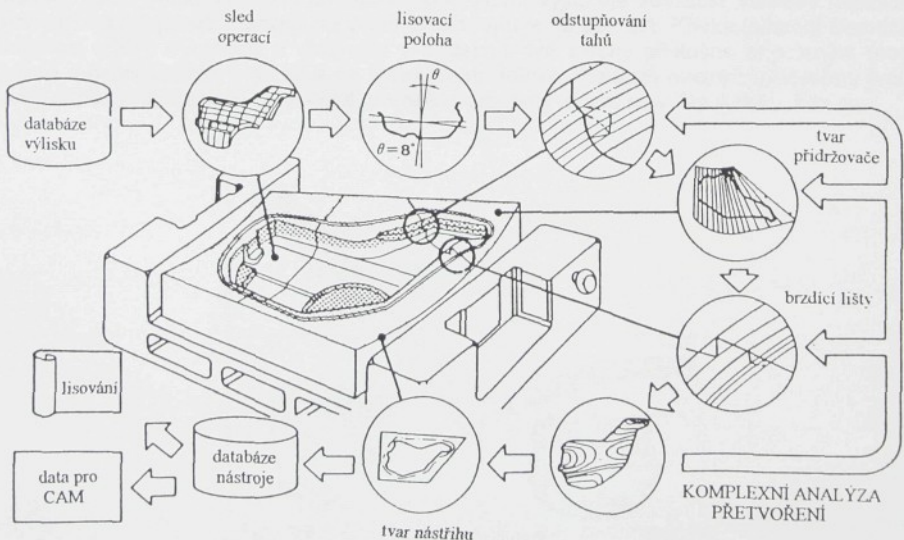
- 1) Lokalizace přetvoření, která vede v nejvíce přetvořené oblasti výlisku ke vzniku tvárného lomu v důsledku vyčerpání plasticity materiálu, případ a) na obr. 2.1.3.
- 2) Porušení výlisku, vznik trhliny, způsobené překročením pevnosti plechu v tahu mimo ohnisko přetvoření, případ b) na obr. 2.1.3.
- 3) Zvlnění plechu jako projev nestability při působení tlakových napětí, případ c) na obr. 2.1.3.
- 4) Výskyt povrchových vrásek, zadírání při styku plechu s nástrojem (rýhy, záděry), nedodržení tvarové a rozměrové přesnosti, různé vyboulení či propadliny, puchýře, přeložení, otlaky, otřepy, přesazené otvory, korozní napadení, atd.

Za nejzávažnější lze pak označit případy vzniku trhlin na výliscích. Z předchozích úvah plyne, že výlisek je lisovatelný, jsou-li uspokojivě vyřešeny všechny nastíněné problémy, a že řešení otázek lisovatelnosti dílů nepravidelných tvarů je jedním z nejsložitějších problémů plošného tváření. Záměrem komplexní analýzy přetvoření pomocí povrchových deformačních sítí je určit hodnoty přetvoření v kritických oblastech výlisku a porovnat je s mezními hodnotami

přetvoření zachycenými formou diagramu mezních přetvoření. Analýzu přetvoření výlisku lze chápat i jako předstupeň rychlého a úspěšného ožívování nového lisovacího nástroje. Z předchozího vyplývá důležitost znalosti mezních přetvoření ve vztahu ke komplexní analýze přetvoření výlisků nepravidelných tvarů. Mezní přetvoření jsou optimálně zachycena formou diagramů mezních přetvoření. Na jejich určování jsou zaměřeny následující kapitoly 3, 4, 5 a 6.



Obr. 2.1.3 Některé projevy ztráty stability při tažení výlisků z plechu



Obr. 2.1.4 Dílčí prvky charakterizující proces výroby lisovacího nástroje [7]

3. DEFINICE DIAGRAMŮ MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ

Při lisování souvisí ztráta stability procesu přetvoření s vyčerpáním schopnosti libovolného elementu plechu přenášet tvářecí sílu. Ve smyslu definice plastičnosti závisí mezni stupeň přetvoření daného plechu i na stavu napjatosti v průběhu tažení. Označme hlavní normálová napětí v rovině plechu σ_1, σ_2 , ($\sigma_3 = 0$, přičemž $|\sigma_2| \leq |\sigma_1|$) a odpovídající přetvoření $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ jsou definována jako logaritmické deformace.

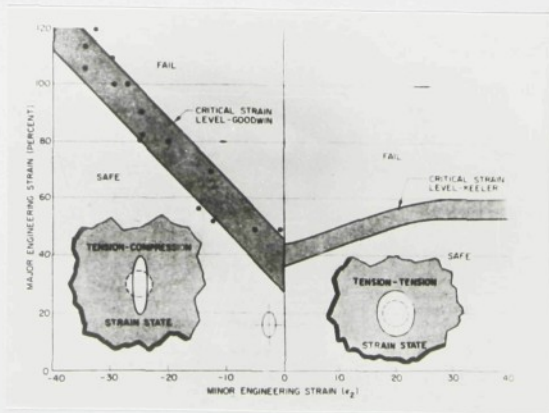
Rovinnou napjatost lze vyjádřit ve tvaru $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 1 : m_\sigma : 0$, a pak ukazatel stavu rovinné napjatosti m_σ

$$m_\sigma = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (3.1)$$

nabývá hodnot $m_\sigma \in \langle -1, 1 \rangle$. Mezní stavy přetvoření daného materiálu je pak možno vyjadřovat za daných teplotně - rychlostních podmínek v závislosti na napjatosti. Všechna tři hlavní přetvoření lze vyjádřit jednou veličinou nazývanou kritická intenzita přetvoření φ_{1K} ,

$$\varphi_{1K} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varphi_{1K}^2 + \varphi_{2K}^2 + \varphi_{1K}\varphi_{2K}} \quad (3.2)$$

Tímto přístupem uplatněným např. Tomlenovem [8] lze získat Diagram Mezních Přetvoření (DMP) v souřadnicích $m_\sigma - \varphi_{1K}$. K získání diagramu mezních přetvoření lze dojít i kratší cestou než přes výpočet intenzity přetvoření (ze známých hodnot hlavních přetvoření) a stavu napjatosti spočteného pomocí vztahů mezi tenzory napětí a přetvoření. K určení diagramu mezních přetvoření lze bezprostředně využít zjištěné hodnoty hlavních normálních přetvoření $\varphi_{1K}, \varphi_{2K}$. S touto myšlenkou přišli poprvé Keeler (1965) a Goodwin (1968), kdy byl poprvé představen diagram mezních přetvoření jako závislost největšího přetvoření (major strain) φ_1 , resp. ε_1 na nejmenším přetvoření φ_2 (ε_2) v rovině plechu ($\varepsilon_{1,2}$ jsou poměrné deformace). Jednotlivé stavy napjatosti charakterizované opět ukazatelem m_σ (pro prosté zatěžování $m_\sigma = \text{konst.}$) jsou v tomto diagramu představovány paprsky vycházejícími z počátku souřadného systému. Tedy i diagram s těmito souřadnými osami vyjadřuje závislost velikosti mezních přetvoření na napjatosti. Ukázka diagramu tohoto typu je na obr. 3.1. Křivka (pásmo) Mezních Přetvoření (KMP) vymezuje v diagramu v podstatě dvě plochy příslušné přípustným (pod křivkou) a nepřípustným (nad křivkou) přetvořením. Křivka (pásmo) mezních přetvoření tvoří hranici obou ploch a určuje tak kritická přetvoření pro daný mezní stav. Na vyřisku, kde se



Obr. 3.1 Původní Goodwin - Keelerův diagram mezních přetvoření

obecně uplatňují stavy napjatosti dle obr. 2.1.2, nelze určit přímo velikost napětí. Je však možné pomocí deformační sítě bezprostředně změřit hodnoty přetvoření jako následek působící napjatosti. Pak je výhodné pro proporcionální přetvoření definovat ukazatel stavu přetvoření m_φ vztahem

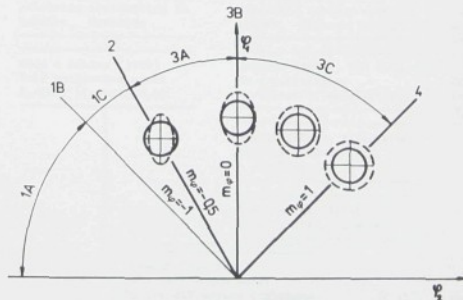
$$m_\varphi = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \quad (3.2)$$

Je zřejmé, že ukazatel stavu přetvoření m_φ je ve stejném intervalu jako ukazatel m_σ čili $m_\varphi \in (-1, 1)$. Obdobně jako u m_σ paprsky vycházející z počátku souřadného systému určují stav přetvoření $m_\varphi = \text{konst.}$ (proportionální přetvoření), čili v tomto případě určují tzv. lineární deformační stopu. Vzhledem k těmto skutečnostem bude ve vztahu ke komplexní analýze přetvoření výhodné používat výhradně DMP v souřadnicích $\varphi_2 - \varphi_1$, a používat ukazatel m_φ namísto ukazatele m_σ .

Stavy napjatosti a přetvoření (obr. 2.1.2) je možné charakterizovat v těchto diagramech příslušnými deformačními stopami podle obr. 3.2. Současně je v něm znázorněn i kruhový element deformační sítě před a po přetvoření při dané napjatosti. Praktické zkušenosti ukázaly, že ke vzniku trhlin na výliscích dochází při stavech přetvoření ohraničených hodnotami $m_\varphi = -0.5$ a $m_\varphi = 1$, (pro izotropní materiál $m_\sigma \in (0, 1)$). V tomto rozsahu (sektory 3A a 3C na obr.3.2) je pak nutno při sestavování diagramů mezních přetvoření modelovat stavy přetvoření.

Velikost mezních přetvoření je dána nejen plasticíostí plechu, ale je i výrazně závislá na způsobu definování mezního stavu. Za ten lze považovat na jedné straně dosažení meze pevnosti materiálu, na druhé straně je to až porušení soudržnosti plechu tvárným lomem. K určení DMP je proto nutné získat množství hodnot mezních přetvoření v rozsahu příslušných stavů m_φ pro zvolený mezní stav v daném intervalu. Modelovat různé stavy m_φ lze experimentálně či početně, je-li vytvořen matematický model chování příslušného plechu. Experimentální metody zahrnují jednak zjišťování kritických přetvoření přímo z různých míst rozmanitých reálných výlisků (původní postup Goodwina a Keelera) nebo představují laboratorní modelování požadovaných stavů přetvoření. Tím jsou obecně vymezeny metody získávání DMP. Bližší specifikace dvou základních produktivních metod (početní a laboratorní modelování) jsou věnovány následující kapitoly 4 a 5.

Praktické využití DMP je pak možné jak ve vztahu k hodnocení plasticíosti plechů, srovnání jejich plasticíých vlastností v daném rozsahu stavů přetvoření (kap.6.1), či jejich využití ve vztahu ke komplexní analýze přetvoření výlisků (kap.9).

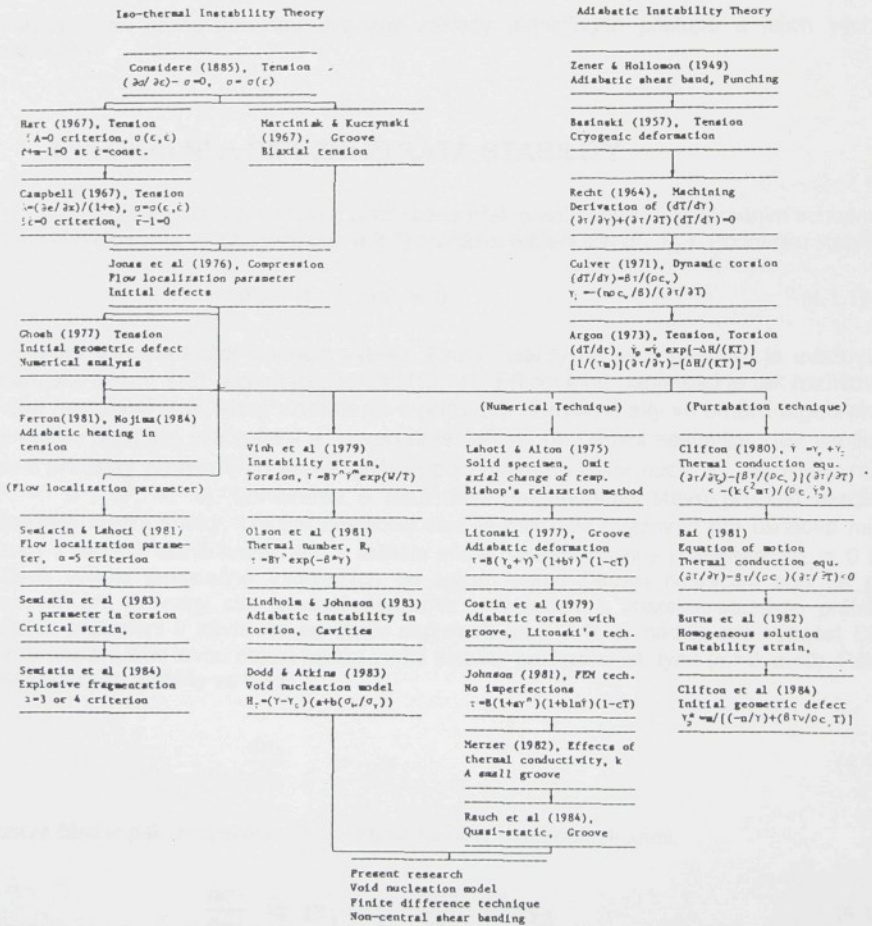


Obr. 3.1.3 Stavy přetvoření v DMP charakterizované ukazatelem m_φ

4. DMP STANOVENÉ POČETNÍMI METODAMI

Proces plastického přetvoření plechu platný obecně pro jakýkoli výlisek je v podstatě procesem postupné lokalizace přetvoření, zužování plasticky přetvářených oblastí, což v konečné fázi přetvoření vede ke vzniku tvárního lomu.

Ve studiích zabývajících se lokalizací plastického toku materiálu se používá řada výrazů popisujících tyto děje. Je to např. "zužování" (necking), termoplastické smykové pásy, ztráta stability a teorie rozdělení (bifurcation). Zužování je pozorovatelné např. při zkoušce tahem při dosažení maximální síly. Vlastní zužování se prakticky ještě rozděluje na tzv. difúzní a lokální. Pod pojmem ztráta stability je pak myšlen jev, kdy se rovnoměrně přetvoření stává nestabilním, tj. i malé dodatečné změny v tomto stavu již vedou ke změně původní deformační stopy [9,10,11]. Rozdělení je pak jiná představa nestability či počátku vzniku lokálního zužení, které nastane, jestliže způsob přetvoření se stává nejednoznačným (kap. 4.1.2). Z přehledu vývoje některých teorií ztráty stability uvedeného na obr. 4.1 vyplývá rozsáhlost celé problematiky [9].



Obr. 4.1 Základní přehled vývoje teorií ztráty stability [9]

Při využití početních metod lze křivky mezních přetvoření získat na základě teoretického rozboru vlastností plechů. Tyto metody se jeví jako cesta rychlá a poměrně jednoduchá. Hodnoty mezních přetvoření jsou vypočteny, při zavedení určitých zjednodušujících předpokladů, pomocí vztahů odvozených z teorie plasticity anizotropního tělesa. Jsou vyjádřeny jako funkce materiálových charakteristik zjišťovaných zkouškou tahem a stavu napjatosti, přičemž se vychází z různých definic mezního stavu. V současné době patří mezi nejrozšířenější následující matematické modely (početní metody) pro výpočet mezních přetvoření:

1. Metoda spočívající na matematickém určení okamžiku ztráty stability na mezi pevnosti (kap. 4.1)
2. Metoda vycházející z faktu, že plech obsahuje výchozí nehomogenity zapříčiňující vznik lokálních ztenčení, jež vedou k porušení. (kap. 4.3)
3. Metoda vycházející z existence vměstků v plechu, kolem nichž se tvoří dutiny, jejichž postupným spojením dojde k porušení. (kap. 4.4)

V následujících kapitolách jsou uvedeny základy jednotlivých přístupů a jejich výchozí předpoklady.

4.1 LOKÁLNÍ A DIFÚZNÍ ZTRÁTA STABILITY

Ztráta stability procesu plastického přetvoření souvisí s vyčerpáním schopnosti libovolného elementu výlisku (viz. obr. 4.2.1) přenášet tvářecí sílu (F_1 , F_2). Podmínku stability

$$dF_1 > 0 \quad , \quad dF_2 > 0 \quad (4.1.1)$$

musí proto splňovat každý element výlisku. Ztráta stability na mezi pevnosti je uvažována jednak jako difúzní [12], jednak jako lokální [13,14]. Při rovinné napjatosti je tak rozlišován lokální nestabilní stav, který vznikne, je-li přírůstek přetvárné síly ve směru algebraicky největšího hlavního přetvoření φ_1 roven nule ($dF_1 = 0$). Difúzní nestabilní stav vznikne, jsou-li přírůstky přetvárných sil ve směru obou hlavních deformací φ_1 , φ_2 rovny nule, ($dF_1 = 0$, $dF_2 = 0$). Lokálnímu a difúznímu nestabilnímu stavu přísluší rozdílné teoretické mezní křivky. Lokální nestabilní stav je pak dále uvažován pro okrajová místa výlisku v blízkosti tažné hrany, kde v určitém místě nastane rovinné přetvoření $d\varphi_2 = 0$ a v místech výlisku dostatečně vzdálených od tažné hrany. Difúzní nestabilní stav je pak uvažován pro libovolný stav rovinné napjatosti. Vzhledem k charakteristickému průběhu mezních přetvoření v závislosti na stavu napjatosti (obr. 3.1), je nadále pro výpočet DMP uvažována pro jeho levou oblast lokální ztráta stability pro napjatost typu ($\sigma_1 > 0$, $\sigma_2 < 0$). Pak je podmínka ztráty stability ve tvaru

$$\frac{d\sigma_1}{d\varphi_3} = -\sigma_1 \quad (4.1.2)$$

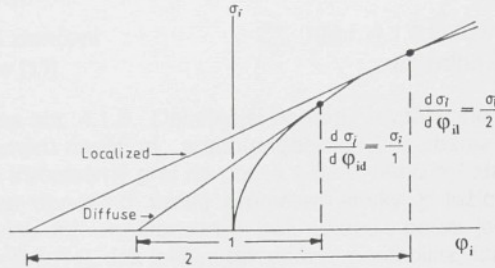
V pravé části je pak uvažována difúzní ztráta stability daná podmínkami,

$$\frac{d\sigma_1}{d\varphi_1} = \sigma_1 \quad ; \quad \frac{d\sigma_2}{d\varphi_2} = \sigma_2 \quad (4.1.3)$$

Podmínky (4.1.2) a (4.1.3) lze vyjádřit i pomocí intenzit napětí a přetvoření vztahem (4.1.4)

$$\frac{d\sigma_i}{d\varphi_i} = \frac{d\sigma_i}{Z} \quad (4.1.4)$$

Na obr. 4.1.1 jsou zobrazeny počátky obou typů nestabilního toku.

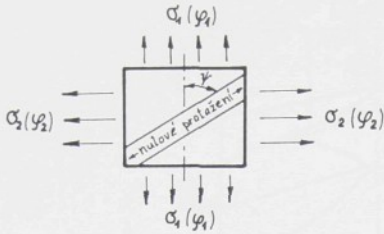


Obr. 4.1.1 Grafické zobrazení počátku obou typů nestabilního toku [15]

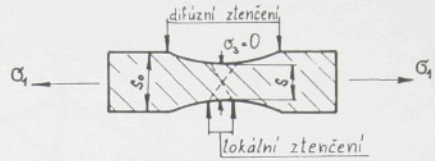
V případě, že obě hlavní přetvoření byla všude kladná, nemělo by se vyskytnout lokalizované ztenčení a plastická nestabilita se projeví jako difúzní ztenčení. Tento nestabilní tok je široce a symetricky rozložen podél směrů zatěžování. Setkáme se s ním při dosažení hodnoty φ_{id} (obr.4.1.1) a současně subtangenta Z ve výrazu (4.1.4), který platí pro oba typy ztráty stability, nabývá hodnoty $Z_d=1$. Lokální nestabilní stav začínající při hodnotě φ_{id} zahrnuje tenký pruh tekoucího materiálu skloněného pod určitým úhlem ψ napříč plechem, viz obr.4.1.2. Současně subtangenta Z ve výrazu (4.1.4) nabývá hodnoty $Z_1=2$. Přičemž lokální ztenčení začíná vždy ve středu difúzního ztenčení a šíří se k jeho okrajům dle obr. 4.1.3. [16].

Nezbytná podmínka pro lokální ztenčení pak je, že v materiálu přiléhajícímu k oblasti tečení nedochází k přetvoření a že ve směru krčku nedojde k žádnému prodloužení. Tedy vzniku lokálního ztenčení by vyhovovala podmínka $d\varphi_2 \leq 0$. Při $d\varphi_2 = 0$ je $Z_d = Z_1$, oba dva typy ztráty stability se stávají ekvivalentní a krček se může vytvořit ve směru $\psi = 90^\circ$ k ose (pro izotropní materiál to je při napjatosti $m_\sigma = \sigma_2/\sigma_1 = 0,5$). Z podmínky $d\varphi_2 = 0$ dále plyne, že podmínce lokálního ztenčení je vyhověno při větším přetvoření (pro $m_\sigma = 0$ a izotropní materiál platí, že $(\varphi_{id})_k = n$ a $(\varphi_{id})_k = 2n$ [16]) nebo při nižší rychlosti deformačního zpevnění, tj. platí $Z_1 > Z_d$. Při $d\varphi_2 > 0$, tj. vypínání, se nevyskytuje žádný směr nulového prodloužení a lokální ztenčení by nemělo nastat.

Pro ilustraci složitosti celé problematiky je uveden diagram ukazující podmínky pro začátek obou typů ztrát stability v izotropním materiálu při rovinné napjatosti, obr.4.1.4. Počátek ztráty stability je představován plnou silnou čarou - křivka k_1 . Je-li plech charakterizován rotačně symetrickou anizotropií (tj. nevyskytuje-li se plošná anizotropie, $\Delta r = 0$) při $r > 1$, $d\varphi_2$ je algebraicky menší vůči $d\varphi_1$ pro dané m_σ , v důsledku čehož nemůže být $d\varphi_2$ kladné (tj. nemohlo by pak už nastat lokální ztenčení), a to až do stavu, dokud není $m_\sigma > 0,5$. Hodnota m_σ pro tento limitní případ pro

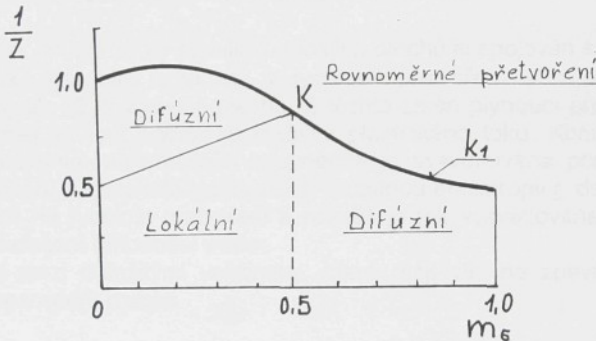


Obr. 4.1.2 Lokální ztenčení pod úhlem ψ [11]

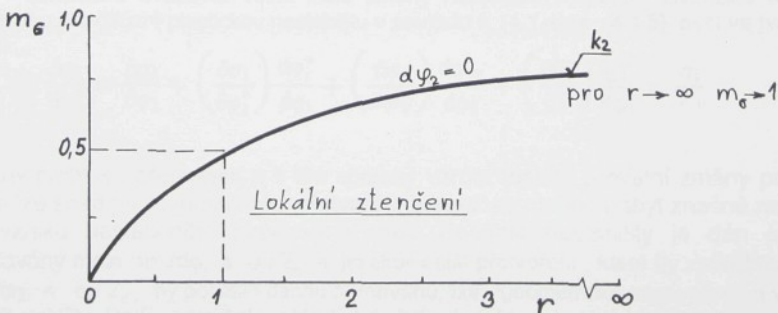


Obr. 4.1.3 Lokální ztenčení v zóně difúzního ztenčení [17]

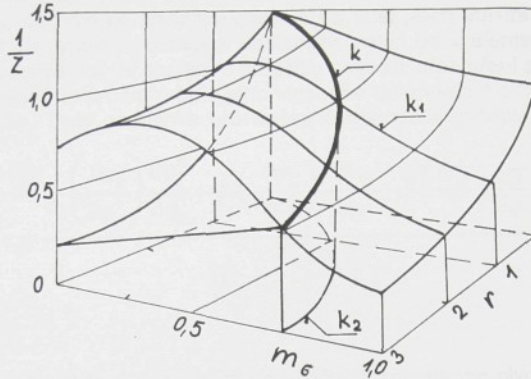
proměnnou r je na obr. 4.1.5. Detailnější pohled na vzájemné vztahy mezi hodnotami anizotropie r , poměru napětí m_σ a subtangentou Z a oběma uváděnými typy ztráty stability poskytuje třírozměrný graf na obr. 4.1.6. Z něho byl získán řezem pro $r = 1$ obr. 4.1.4, zatímco obr. 4.1.5 vznikl průmětem křivky k ležící na obecné prostorové ploše grafu na rovinu $m_\sigma - r$. Obr. 4.1.4 pak ukazuje pouze jeden bod (K) křivky k pro hodnotu $m_\sigma = 0,5$ [11]. Jak lokální tak difúzní nestabilita, které jsou uvažovány pro výpočet tzv. teoretických Goodwin-Keelerových KMP, jsou blíže osvětleny v následující kapitole.



Obr. 4.1.4 Vývoj nestabilního toku v závislosti na ukazateli m_σ a charakteristice zpevnění vyjádřené pomocí poměru $1/Z$



Obr. 4.1.5 Závislost mezního m_σ na hodnotě normálové anizotropie r [11]



Obr. 4.1.6 Trojrozměrné zobrazení závislosti vývoje nestabilního toku na různých poměrech Z , r a m_ϕ [11]

4.1.1 Lokalizace přetvoření v difúzním ztenčení

Počátek difúzní ztráty stability u tenkých plechů je spojován s počátečně malými, ale postupně rostoucími změnami v rychlosti přetvoření $\dot{\varphi}^*$ a v poměru hlavních přetvoření m_ϕ dle (3.2) v rovině plechu. Z těchto změn plynoucí příspěvky zpevnění a odpevnění mají vliv na podmínku stability plastického toku. Kombinací těchto vlivů spolu se základním deformačním zpevněním je vysvětlována pomalost či prudkost procesu ztenčení u materiálů vykazujících rozdílnou anizotropii $\underline{r}$, deformační zpevnění $\underline{n}$ a citlivost na rychlost přetvoření a rovněž je tak vysvětlována velikost difúzního ztenčení a rozložení deformací v něm.

Vztah mezi důležitými veličinami, které mají vliv na zpevňování při dvojosé napjatosti, lze vyjádřit rovnicí

$$\sigma_i = f(\varphi_i, \varphi_i^*, m_\phi, T) \quad (4.1.5)$$

kde T je teplota přetvoření.

Budeme-li uvažovat velmi malé změny napjatosti v daném okamžiku tváření, lze podmínku pro difúzní plastickou nestabilitu v souladu s (4.1.4) a (4.1.5) psát ve tvaru

$$\frac{d\sigma_i}{d\varphi_i} = \frac{\partial\sigma_i}{\partial\varphi_i} + \left(\frac{\partial\sigma_i}{\partial\varphi_i^*}\right) \frac{d\varphi_i^*}{d\varphi_i} + \left(\frac{\partial\sigma_i}{\partial m_\phi}\right) \frac{dm_\phi}{d\varphi_i} + \left(\frac{\partial\sigma_i}{\partial T}\right) \frac{dT}{d\varphi_i} = \frac{\sigma_i}{Z_d} \quad (4.1.6)$$

Změny rychlosti přetvoření a s tím spojený vzrůst teploty a místní změny poměru m_ϕ , které lze snad při rovnoměrném přetvoření zanedbat, mohou nabýt značně na významu po vzniku nestabilního plastického toku. Počátek nestability je dán podmínkou rovnováhy mezi $d\sigma_i/d\varphi_i$ a σ_i/Z_d a jakékoli další přetvoření, které by způsobilo nerovnost $d\sigma_i/d\varphi_i < \sigma_i/Z_d$, by porušilo danou rovnováhu, tzv. "geometrické odpevnění", a vedlo by ke ztrátě stability. Další zpevnění v oblasti, kde bylo dosaženo poprvé ztráty stability způsobí, že $d\sigma_i/d\varphi_i > \sigma_i/Z_d$ a z toho vyplývá, že je opět obnovena stabilita. Poněvadž sousední

elementy materiálu mají snahu samy bránit přetváření elementu, který se již nachází v nestabilním stavu, dochází ke změně napjatosti na účet jejich vlastní deformace. Sousední elementy tak mohou vyhovět podmínce nestability; zatím co v elementu, který první dosáhl nestability, změny napjatosti ve spojení s přírůstkem rychlosti přetvoření a teploty mohou vyvolat dostatečné *dodatečné* zpevnění (vedle jeho vlastního deformačního zpevnění), které povede k obnovení stability. Tedy podmínka pro dočasné obnovení stability plastického toku je ve tvaru

$$S = \frac{\frac{1}{\sigma_1} \left(\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varphi_1} \right) \frac{d\varphi_1}{d\varphi} + \frac{1}{\sigma_1} \left(\frac{\partial \sigma_1}{\partial m\varphi} \right) \frac{dm\varphi}{d\varphi} + \frac{1}{\sigma_1} \left(\frac{\partial \sigma_1}{\partial T} \right) \frac{dT}{d\varphi}}{\frac{1}{Z_d} \frac{1}{\sigma_1} \left(\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varphi_1} \right)} \quad (4.1.7)$$

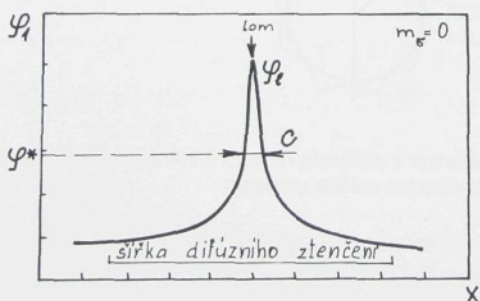
Čitatel je v relaci s možným dosažitelným *dodatečným* zpevněním plynoucím z přírůstků $\Delta\varphi^*$, Δm_φ a ΔT , zatímco jmenovatel je v relaci s velikostí potřebného *dodatečného* zpevnění nutného k udržení stability. Tedy s je pak parametr, který určuje stupeň stability plastického toku.

Jestliže je $s=1$ v daném rozsahu přetvoření, může tváření pokračovat při konstantní zatěžovací síle a výsledkem je rozsáhlé difúzní ztenčení. Je-li $s>1$ je dočasně obnovena stabilita, dokud v jiné oblasti nedojde opět k nestabilnímu toku. Čím větší je čitatel vůči jmenovateli, tím pozvolnější ztrátu stability lze očekávat. Tomu také odpovídá větší rozšíření oblasti ztenčení a dokonce může dojít ke vzniku mnohonásobných zúžení - "krčků", vlivem pomalu vzrůstající zatěžovací síly. Pak lze očekávat značný plastický tok v každém krčku, dokud se do jednoho z nich nesoustředí veškerý nestabilní tok. Je-li přírůstek čitatele záporný, dojde k poměrně rychlé ztrátě stability a rozsah difúzního ztenčení bude malý. Z obr.4.1.3 vyplývá, že difúzní ztenčení je ukončeno výskytem lokálního ztenčení, jež se objeví ve středu difúzního a které vede ke vzniku porušení. Tato situace je zřejmá i z obr. 4.1.7, kde je vynesena velikost hlavního přetvoření φ_1 (a obdobně lze vynést φ_2) jako funkce odlehlosti x od vznikající trhliny.

Oblast lokálního ztenčení je od okolí oddělena viditelnou hranicí, při čemž velikost přetvoření φ^* přiléhající z vnějšku k tomuto rozhraní je považována za **mezí stupeň**

přetvoření. Ačkoli jsou mezí přetvoření ovlivňována hlavně velikostí

φ_1 , *dodatečná* zpevnění, uvažovaná při difúzním ztenčení, hrají důležitou roli při zvyšování těchto mezí tím, že nedovolí, aby lokalizace krčku probíhala příliš rychle. Difúzní ztenčení tak představuje další zásobu plasticity pro tváření a v důsledku toho se může tažnost plechů dost lišit, i když ukazatel deformačního zpevnění je prakticky stejný.



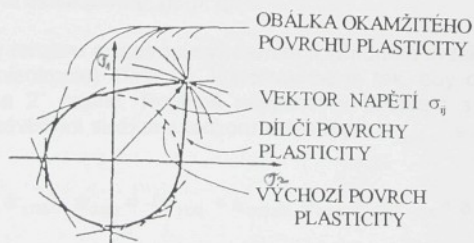
Obr. 4.1.7 Rozložení deformací v okolí trhliny, kde c představuje šířku lokálního ztenčení [17]

4.1.2 Teorie rozdvojení

Jednou z dalších možných teorií popisujících lokalizaci deformace je teorie rozdvojení (bifurcation theory). Tato teorie je zaměřena na zkoumání stavu, ve kterém řešení problémů přesně ohraničených okrajových podmínek není jednoznačné. Je popisován určitý stav, za nímž může existovat více způsobů přetvoření. Předpokládá, že v určitém okamžiku se deformace lokalizuje do pásu přetvoření, v němž se odehrávají změny deformačních rychlostí, ale vně této lokalizované zóny pokračuje deformace rovnoměrná. Ztráta stability kontinua je chápána tak, že homogenní deformace dospěje do bodu tzv. rozdvojení, při kterém vznikne za podmínky přetrvávající rovnováhy vzpomínaná lokální zóna, vně které je deformace i nadále rovnoměrná. Teorie rozdvojení tak popisuje podmínky, kdy vznikají nerovnoměrné napěťo-deformační stavy v podmínkách rovnoměrného přetvoření.

Toto rozdvojení napětí je vztažené k jednoduchému skluzovému modelu, kterých je v materiálu velké množství a jsou v něm nahodile orientovány. Každému takovému skluzovému modelu přísluší samostatný povrch plasticity v prostoru napětí. Pro každý stupeň deformace je okamžitý povrch plasticity tvořen obálkou v podstatě nekonečného množství jednotlivých okamžitých povrchů plasticity pro vzpomínané jednotlivé skluzové modely všech možných nahodilých orientací. Taková situace vede při určité velikosti plastické deformace k vytvoření vrcholu na povrchu plasticity, viz. obr.4.1.8.

Touto teorií lze vysvětlit i lokalizaci deformace za podmínek tlakových napětí obdobnou vzniku krčku při tahových napětích. Hillova teorie rozdvojení vychází z řady omezujících předpokladů a matematická složitost jejího popisu brání dosud jejímu širšímu využití v běžné inženýrské praxi [15, 19 - 25].



Obr. 4.1.8 Povrch plasticity s vrcholem vytvořený jako obálka povrchů plasticity dílčích nahodilých skluzových modelů [22]

4.2 TEORETICKÉ GOODWIN - KEELEROVY DIAGRAMY MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ

Při stanovení těchto diagramů mezních přetvoření je uvažována ztráta stability na mezi pevnosti. V levé části DMP je využita podmínka lokální ztráty stability dle (4.1.2) a pro pravou část je uvažována podmínka difúzní ztráty stability dle (4.1.3). Následné odvození vztahů pro výpočet křivek mezních přetvoření vychází z prací řady autorů, kteří se uvedenou problematikou zabývali [6,26-32].

Uvedené vztahy popisují i ty případy, kdy se hlavní osy tenzoru napětí neztotožňují s přírůstky deformací, zatížení nemusí být prosté a berou v úvahu i anizotropii plastických vlastností plechu. Vychází z teorie plasticity anizotropního tělesa vytvořenou Hillem [13] a uvažují materiál ortotropní, tj. mechanické vlastnosti jsou symetrické vzhledem ke třem osám pravoúhlého souřadného systému. Zanedbává se vliv Bauschingerova efektu a materiál splňuje podmínku nestlačitelnosti

$$d\epsilon_{ii} = 0, i = 1, 2, 3 \quad (4.2.1)$$

Pro anizotropní materiál podmínka plasticity nutně zahrnuje jak vliv napjatosti, tak i anizotropních vlastností a může být vyjádřena ve tvaru

$$d\varphi_{ij} = \frac{d\bar{\varphi}}{\bar{\sigma}} \bar{A}_{ijpq} \sigma_{pq} \quad (4.2.2)$$

kde: $\bar{\sigma}$ je intenzita napětí

$\bar{\varphi}$ je intenzita přetvoření; na rozdíl od předcházejících kapitol jsou tyto intenzity označeny pruhem, neboť při tenzorovém vyjádření veličin by se index "i" mohl plést

σ_{pq} , $d\varphi_{ij}$ jsou složky tenzorů napětí a přírůstků přetvoření

$\bar{A}_{ijpq}$ je matice parametrů charakterizujících plastický tok, která se transformuje dle zákona transformace tenzoru 4. řádu a je symetrická jak dle párů indexů (ij), (pq), tak i dle indexů uvnitř párů (i, j), (p, q).

Označme složky tenzoru anizotropie v hlavním souřadném systému ortotropního tělesa (systém hlavních os anizotropie) $1', 2', 3'$. Orientujeme je tak, aby osa $1'$ byla totožná se směrem válcování, osa $2'$ napříč. Rovinná napjatost v takovém souřadném systému je charakterizována 4 nezávislými složkami tenzoru anizotropie a_{nmrs} : a'_{1111} , a'_{2222} , a'_{1122} , a'_{1212} , přičemž platí:

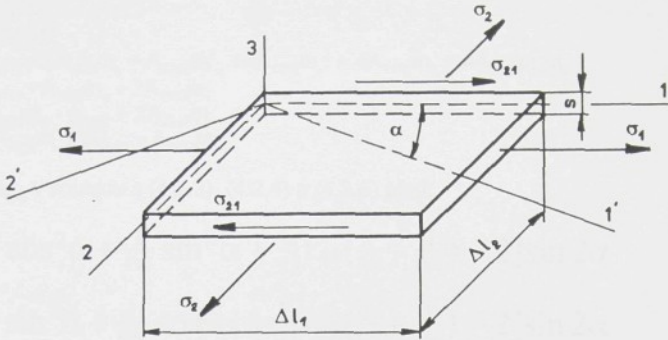
$$a'_{1111} = -(a'_{1122} + a'_{1133}), a'_{2222} = -(a'_{1122} + a'_{2233}), a'_{3333} = -(a'_{1133} + a'_{2233}) \quad (4.2.3)$$

Pro složky tenzoru anizotropie a_{ijpq} v pootočeném souřadném systému 1, 2, 3, (osy 1, 2 leží v rovině plechu - viz obr. 4.2.1) v souladu se zákonem transformace tenzoru 4. řádu, dostaneme

$$a_{ijpq} = \Theta_{in} \Theta_{jm} \Theta_{pr} \Theta_{qs} a'_{nmrs} \quad (4.2.4)$$

kde Θ_{ik} jsou směrové kosiny úhlů mezi osami hlavního a pootočeného systému. Pomocí (4.2.1), (4.2.2), (4.2.3), (4.2.4) dostaneme

$$r_{\alpha} = \frac{a'_{1122} + (2a'_{1212} - a'_{1133} - a'_{2233} - 4a'_{1122}) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}{a'_{1133} \cos^2 \alpha + a'_{2233} \sin^2 \alpha} \quad (4.2.5)$$



Obr. 4.2.1 Element výlisku s hlavním a pootočeným souřadným systémem;
1, 2 - rovina plechu, 1' - směr válcování

z rovnice (4.2.5) vyplývá, že

$$\text{při } \alpha = 0^\circ \quad \frac{a_{1122}}{a_{1133}} = r_0, \quad \text{při } \alpha = 90^\circ \quad \frac{a_{1122}}{a_{2233}} = r_{90},$$

$$\text{při } \alpha = 45^\circ \quad \frac{a_{1122}}{a_{1212}} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} + r_{45} \right) \left(\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_{90}} \right) \quad (4.2.6)$$

kde r_0 , r_{45} , r_{90} jsou parametry normálové anizotropie, které lze určit ze zkoušky tahem ze vzorků odebraných pod úhly $\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ vůči směru válcování. Uvažujme dále takovou napjatost se složkami tenzoru napětí σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} , při níž nevznikají skosity, tj. osy 1, 2, 3 jsou hlavní osy tenzoru přírůstků přetvoření, ale nejsou hlavními osami tenzoru napětí. V souladu s (4.2.2) je toto možné pouze, pokud smyková napětí σ_{12} splňují podmínku

$$\sigma_{12} = - \frac{a_{1112}\sigma_{11} + a_{2212}\sigma_{22}}{2a_{1212}} \quad (4.2.7)$$

Tento stav ovšem nemůže nastat při tváření izotropního tělesa. Zavedme vztahy

$$m_\sigma = \frac{\sigma_{22}}{\sigma_{11}} \quad m_\tau = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_{11}} \quad (4.2.8)$$

s jejichž využitím lze napsat

$$d\varphi_1 = \frac{d\bar{\varphi}}{A\bar{\sigma}} D_1 \sigma_{11}$$

$$d\varphi_2 = \frac{d\bar{\varphi}}{A\bar{\sigma}} D_2 \sigma_{11} \quad (4.2.9)$$

$$d\varphi_{12} = \frac{d\bar{\varphi}}{A\bar{\sigma}} D_3 \sigma_{11} = 0$$

$$\text{přičemž } \bar{\sigma} = A^{-\frac{1}{2}} D^{\frac{1}{2}} \sigma_{11} \quad (4.2.10)$$

$$\text{kde } A = \frac{1}{3}(A_{1111} + A_{2222} + A_{3333})$$

$$A_{ijpq} = \frac{a_{ijpq}}{a_{1122}}$$

$$D = A_{1111} - 2A_{1122}m_\sigma + A_{2222}m_\sigma^2 + 4A_{1212}m_\tau^2 + 4A_{1112}m_\tau + 4A_{2212}m_\sigma m_\tau$$

$$D_1 = A_{1111} - A_{1122}m_\sigma + 2A_{1112}m_\tau$$

$$D_2 = A_{2222}m_\sigma - A_{1122} + 2A_{2212}m_\tau$$

$$D_3 = 2A_{1212}m_\tau + A_{1112} + A_{2212}m_\sigma$$

(4.2.11)

Pro složky A_{ijpq} v souladu s (4.2.3), (4.2.4) a (4.2.6) platí:

$$A_{1111} = 1 + \frac{1}{r_0} \cos^2 \alpha + \frac{1}{r_{90}} \sin^2 \alpha + \frac{1}{2} [r_{45} (\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_{90}}) - 2] \sin 2\alpha$$

(4.2.12)

$$A_{2222} = 1 + \frac{1}{r_0} \sin^2 \alpha + \frac{1}{r_{90}} \cos^2 \alpha + \frac{1}{2} [r_{45} (\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_{90}}) - 2] \sin 2\alpha$$

$$A_{1122} = 1 + \frac{1}{2} [r_{45} (\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_{90}}) - 2] \sin 2\alpha \quad (4.2.12)$$

$$A_{1212} = \frac{1}{2} (\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_{90}}) (0.5 + r_{45}) + \frac{1}{2} [2 - r_{45} (\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_{90}})] \sin 2\alpha$$

$$A_{2212} = \frac{1}{2} \{ \frac{1}{r_{90}} \cos^2 \alpha - \frac{1}{r_0} \sin^2 \alpha + [2 - (\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_{90}}) (0.5 + r_{45})] \cos 2\alpha \} \sin 2\alpha$$

$$A_{1112} = \frac{1}{2} \{ \frac{1}{r_{90}} \sin^2 \alpha - \frac{1}{r_0} \cos^2 \alpha + [(\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_{90}}) (0.5 + r_{45}) - 2] \cos 2\alpha \} \sin 2\alpha$$

U materiálů vykazujících deformační zpevnění vzrůstá hodnota subtangenty závislosti $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varphi})$, (viz. obr. 4.1.1), s mírou zvětšování $\bar{\varphi}$ (nebo s $\int d\bar{\varphi}$ není-li zatěžování prosté). Rovnici subtangenty lze psát dle (4.1.4) ve tvaru

$$Z = \bar{\sigma} \frac{d\bar{\varphi}}{d\bar{\sigma}} \quad (4.2.13)$$

Diferencováním (4.2.10) dle $d\bar{\sigma}$ získáme

$$d\bar{\sigma} = A^{-\frac{1}{2}} D^{-\frac{1}{2}} [D_1 d\sigma_{11} + D_2 d\sigma_{22} + 2D_3 d\sigma_{12}] \quad (4.2.14)$$

Pro normálové síly působící na element dle obr. 4.2.1 platí

$$F_1 = -s_{11} D_1 s_{11} - s_{12} D_2 s_{12} \quad (4.2.15)$$

$$F_2 = -s_{22} D_1 s_{22} - s_{12} D_2 s_{12}$$

V okamžiku ztráty stability dosahují síly maximálních hodnot. Diferencováním (4.2.15) při $dF=0$ vyjádříme

$$\frac{d\sigma_{11}}{d\varphi_1} = \sigma_{11}, \quad \frac{d\sigma_{22}}{d\varphi_2} = \sigma_{22} \quad (4.2.16)$$

Diferencováním (4.2.7) s použitím (4.2.16) najdeme

$$d\sigma_{12} = -\frac{A_{1112}\sigma_{11}d\varphi_1 + A_{2212}\sigma_{22}d\varphi_2}{2A_{1212}} \quad (4.2.17)$$

Pomocí (4.2.9), (4.2.10), (4.2.14), (4.2.16), (4.2.17) vyjádříme kritickou intenzitu přetvoření ve tvaru

$$\overline{\varphi}_k = \frac{A_{1212}^{\frac{1}{2}} D_{12}^{\frac{3}{2}} A_{1212}}{(A_{1212} D_1 - D_3 A_{1112}) D_1 + (A_{1212} D_2 - D_3 A_{2212}) D_2 m_\sigma} n \quad (4.2.18)$$

Pro izotropní materiál $m_\tau = 0$, $A_{1111} = A_{2222} = 2$, $A_{1122} = 1$, $A_{1212} = \frac{3}{2}$, $A_{1112} = A_{2212} = 0$ a (4.2.18) přejde ve tvar

$$\overline{\varphi}_k = \frac{4(1 - m_\sigma + m_\sigma^2)^{\frac{3}{2}}}{(1 + m_\sigma)(4 - 7m_\sigma + 4m_\sigma^2)} n \quad (4.2.19)$$

Nutno podotknout, že poměry m_σ a m_τ v (4.2.18) a (4.2.19) jsou určovány předcházejícím přetvořením. Platí pro ně

$$(m_{\sigma j}) = \frac{(A_{1111} A_{1212} - A_{1112}^2)(m_\varphi)_j + (A_{1122} A_{1212} + A_{2212} A_{1112})}{(A_{1122} A_{1212} + A_{1112} A_{2212})(m_\varphi)_j + (A_{2222} A_{1212} - A_{2212}^2)} \quad (4.2.20)$$

$$(m_{\tau j}) = -\frac{A_{1112} + A_{2212} m_\sigma}{2A_{1212}} \quad (4.2.21)$$

$m_\varphi = \frac{\varphi_2}{\varphi_1}$ (viz. (3.2)) a index "j" znamená číslo etapy tažení ($j = 1, 2, 3, \dots$)

Výraz (4.2.19) byl poprvé publikován Swiftem [12]. Tato ztráta stability vyjádřená (4.2.18) a (4.2.19) se projevuje v podobě difúzního zúžení.

Při prostém zatěžování platí $m_\sigma = \text{konst}$, $m_\tau = \text{konst}$, síly F_1 a F_2 se jeví jako závislé a v okamžiku ztráty stability stačí, je-li splněna pouze jedna podmínka (4.2.15). V tomto případě (pro $dF_1 = 0$)

$$\frac{d\sigma_{11}}{d\varphi_1} = \sigma_{11}, \quad d\sigma_{22} = m_\sigma d\sigma_{11}, \quad d\sigma_{12} = m_\tau d\sigma_{11} \quad (4.2.22)$$

$$0 \leq m_\sigma \leq 1$$

Při rovinné napjatosti může dojít ke vzniku lokálního ztenčení plechu podél linie porušení (obr. 4.1.2). Podél linie porušení jsou rychlosti přetvoření nulové a úhel ψ , který svírá krček se směrem zatěžování 1 se určí z rovnice

$$\Psi = \arctg \sqrt{-\frac{D_1}{D_2}} \quad (4.2.23)$$

Vznik krčku při ztrátě stability dle (4.1.2) je možný pouze při

$$\frac{d\sigma_{11}}{\sigma_{11}} = \frac{d\sigma_{22}}{\sigma_{22}} = -d\varphi_3 \quad (4.2.24)$$

$$\text{a při} \quad m_\sigma \leq m'_\sigma = \frac{(A_{1122} - 2A_{2212} m_\tau)}{A_{2222}}$$

V tomto případě je kritická hodnota intenzity přetvoření rovna

$$\overline{\varphi}_k = \frac{A_{1212}^{\frac{1}{2}} D_1^{\frac{1}{2}}}{D_1 + D_2} n \quad (4.2.25)$$

V souřadnicích $\varphi_{1k} - \varphi_{2k}$ pro uvedený rozsah m_σ (4.2.24), pak platí

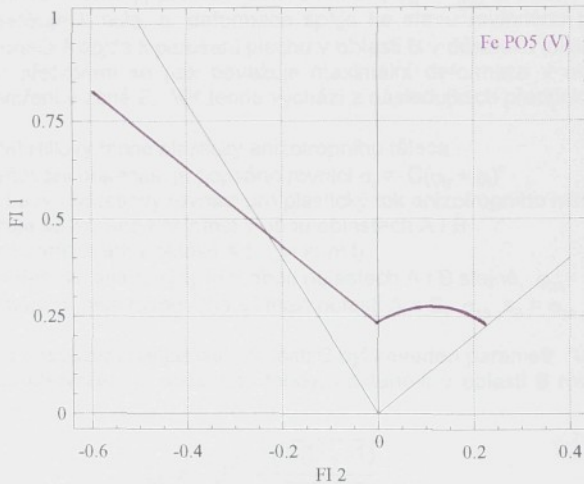
$$\begin{aligned}\varphi_{1k} &= \frac{D_1}{D_1+D_2} n \\ \varphi_{2k} &= \frac{D_2}{D_1+D_2} n\end{aligned}\quad (4.2.26)$$

Uvedené rovnice (4.2.25), resp. (4.2.26) určují křivku mezních přetvoření v levé části DMP. V pravé části DMP je dle (4.1.3) uvažována difúzní ztráta stability. Intenzita přetvoření pro tento typ ztráty stability je popsána rovnicí (4.2.18). Při obdobném způsobu odvození, lze získat i vztahy pro tento typ ztráty stability v pravé části diagramu mezních přetvoření v souřadnicích φ_{2k} - φ_{1k} .

$$\varphi_{1k} = \frac{D_1}{A^{\frac{1}{2}} D^{\frac{1}{2}}} \overline{\varphi}_k \quad (4.2.27)$$

$$\varphi_{2k} = \frac{D_2}{A^{\frac{1}{2}} D^{\frac{1}{2}}} \overline{\varphi}_k$$

Výše popsaným způsobem lze vyjádřit mezní přetvoření jako funkce normálové anizotropie a exponentu deformačního zpevnění v závislosti na stavu napjatosti a v závislosti na orientaci vůči směru válcování. Je uvažována lokální a difúzní ztráta stability na mezi pevnosti v tahu. Teoretická Goodwin-Keelerova KMP spočtená dle (4.2.26) resp. (4.2.27) pro materiál FePO5 je na obr. 4.2.2.



Obr. 4.2.2 Teoretická Goodwin-Keelerova KMP spočtená dle vztahů (4.2.26) resp. (4.2.27)

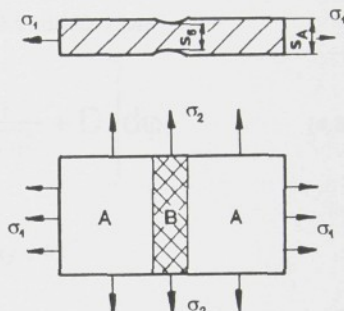
4.3 METODA STANOVENÍ KMP DLE MK TEORIE

Tuto metodu výpočtu mezních přetvoření plechu v podmínkách rovinné napjatosti v důsledku lokálního zmenšení tloušťky vytvořili Marciniak a Kucziński. Odtud označení jako MK teorie [33]. Marciniakovo pojetí ztráty stability, které je blíže popsáno např. v [6] má, velice blízko k realitě plastického přetvoření skutečného plechu. Vlastní výpočet vychází z předpokladu existence počáteční nerovnoměrnosti tloušťky, nebo jiné nehomogenity v plechu, které během tváření zapříčiňují vznik ztenčených oblastí. Vliv těchto faktorů lze popsat chováním jakési počáteční "rýhy", obr. 4.3.1 [34], jejíž směr je kolmý na směr největšího hlavního normálního přetvoření φ_1 , a je charakterizována parametrem zeslabení

$$T_0 = \frac{s_B}{s_A} \quad (4.3.1)$$

kde s_B je počáteční tloušťka plechu uvnitř rýhy
 s_A je počáteční tloušťka plechu vně rýhy

Obr. 4.3.1 Element plechu s nerovnoměrnou tloušťkou [33]



S rostoucím stupněm přetvoření klesá rychlost zpevnění (v oblasti "B" rychleji), zvětšuje se rozdíl přetvoření ve směru φ_1 pro obě oblasti A i B ($\varphi_B > \varphi_A$) a poměr přírůstků přetvoření $d\varphi_2/d\varphi_1$ se zmenšuje k nule, tj. deformace spěje ke stavu rovinného přetvoření ($d\varphi_2 = 0$, $d\varphi_1 = -d\varphi_3$), až konečně dojde k porušení plechu v oblasti B v důsledku lokalizace přetvoření. Za mezní hodnotu přetvoření se pak považuje maximální deformace v oblasti A v okamžiku rovinného přetvoření v zóně B. MK teorie vychází z následujících předpokladů:

- použití Hillovovy teorie plasticity anizotropního tělesa
- zpevňování materiálu je popsáno rovnicí $\sigma_1 = C(\varphi_0 + \varphi_1)^n$
- platí Levy - Misesovy rovnice pro plastický tok anizotropního materiálu [33]
- uvažuje se rovinná napjatost v obou oblastech A i B
- prosté zatěžování v oblasti A ($m_\sigma = \text{konst}$)
- přetvoření ve směru rýhy je v obou oblastech A i B stejné, $\varphi_{2A} = \varphi_{2B} = \varphi_2$
- ve směru σ_1 platí rovnováha sil mezi oblastí A a B, $\sigma_{1B} \cdot s_B = \sigma_{1A} \cdot s_A$

K jednoduššímu posouzení napjatosti v oblasti B byl zaveden parametr "u", který je definován tak, že mezního přetvoření je dosaženo tehdy, nastane-li v oblasti B rovinné přetvoření při $d\varphi_2=0$, pak je $u = 1$.

$$u = \frac{\sigma_{1B}}{\sigma_{1A}} \frac{\sqrt[4]{3(2r_s+1)}}{\sqrt{2(r_s+1)}} \quad (4.3.2)$$

kde σ_{1B} je hlavní normální napětí v oblasti B

σ_{1A} je intenzita napětí tamtéž.

r_s je střední hodnota normálové anizotropie.

Z obr. 4.3.1 a z uvedených předpokladů, při prostém zatěžování popsaném vztahem

$$\frac{d\sigma_{1A}}{\sigma_{1A}} = \frac{d\sigma_{2A}}{\sigma_{2A}} = \frac{d\sigma_{3A}}{\sigma_{3A}} = \frac{d\sigma_{iA}}{\sigma_{iA}} \quad (4.3.3)$$

pak vyplývá, že poměr přetvoření m_φ je konstantní

$$m_\varphi = \frac{\varphi_{3A}}{\varphi_{2A}} = \frac{d\varphi_{3A}}{d\varphi_{2A}} \quad (4.3.4)$$

Na druhé straně se mění poměr napětí m_σ neboť se zvětšuje rozdíl tlouštěk plechu v A i B (při platnosti $\varphi_{2A} = \varphi_{2B} = \varphi_2$ je nutně $d\varphi_{1B} > d\varphi_{1A}$, a tedy $\varphi_{3B} > \varphi_{3A}$). Shrnutím uvedených faktů lze odvodit diferenciálně - integrální rovnici, která představuje funkční závislost mezi hodnotou přetvoření φ_2 , jenž je chápáno jako nezávislý parametr procesu přetvoření, a hodnotou "u"

$$\frac{du}{u} = \frac{d\sigma_{1A}}{\sigma_{1A}} - \frac{d\sigma_{1B}}{\sigma_{1B}} + d\varphi_{3A} - d\varphi_{3B} \quad (4.3.5)$$

Po dosazení všech předchozích vztahů do (4.3.5) se získá konečný tvar

$$\frac{du}{u} = \left[\frac{1}{A + \frac{1}{n}\varphi_2} + \left(Bu - \frac{1}{C + \frac{1}{n} \int \frac{d\varphi_2}{\sqrt{1-u^2}}} \right) \frac{1}{\sqrt{1-u^2}} + D \right] d\varphi_2 \quad (4.3.6)$$

kde: φ_{2A} , φ_{3A} je přetvoření podél rýhy a ve směru tloušťky v A,

$$A = \frac{\varphi_0^4 \sqrt{3(2r_s+1)}}{2n \sqrt{\frac{1}{2}(r_s+1)m_\sigma^2 + m_\sigma + 1}}$$

$$B = \frac{\sqrt{2r_s+1}}{r_s+1}$$

$$C = \frac{\varphi_0}{n \sqrt{\frac{2}{r_s+1}} \sqrt[4]{\frac{2r_s+1}{3}}}$$

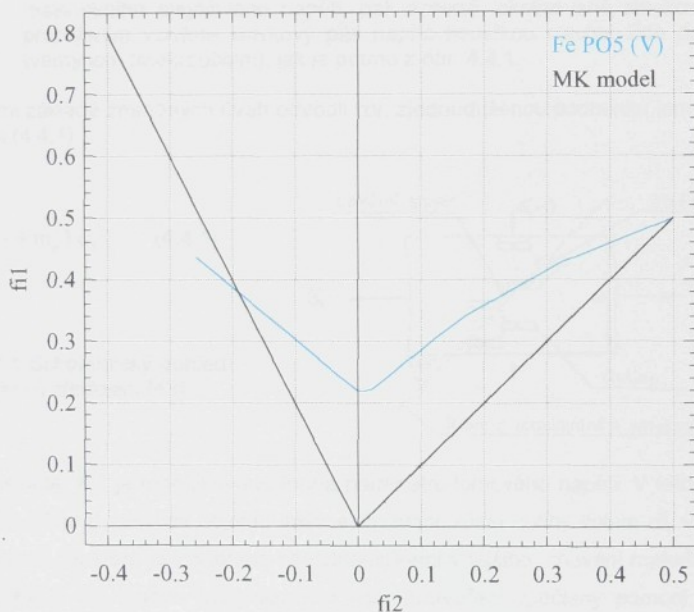
$$D = m_\sigma + \frac{1}{r_s+1}$$

K přesnému definování mezního stupně přetvoření je nutné stanovit, při jakých podmínkách v oblasti B bude přetvoření v oblasti A považováno za mezní. V podstatě mohou nastat tři případy.

- pro materiály s vysokou hodnotou přetvoření v místě lomu (φ_L) je kritérium dosažení mezního stupně přetvoření definováno jako $d\varphi_{1B}/d\varphi_2 \rightarrow \infty$
- dojde-li v B k porušení dřívě, než je dosaženo tohoto stavu, je stanovena hodnota lomového přetvoření zkouškou tahem a mezního přetvoření je dosaženo, je-li $\varphi_{1B} = \varphi_L$
- třetí možnost je ohraničit přípustné ztenčení T_L a mezního stupně je dosaženo, je-li $s_B/s_A = T_L$.

Přínos MK teorie je hlavně v tom, že ukazuje na příčiny vývoje lokalizovaného ztenčení (působením mechanismu koncentrace přetvoření) v podmínkách (v pravé části DMP), ve kterých početní metoda popsaná v kap. 4.2 tento typ ztráty stability neuvažuje, ale ke kterému při praktickém lisování skutečně dochází. Ukazuje rovněž i na důležitost poměru velikosti vnitřních a povrchových vad k tloušťce plechu.

MK teorii byla od jejího vzniku věnována značná pozornost široké odborné veřejnosti. Teorie byla průběžně rozvíjena, což se projevilo ve značném počtu publikací nejrůznějších variant výše popsaného základního principu ztráty stability přetvoření, např. [35-42]. Na obr. 4.3.2 je křivka mezních přetvoření stanovená na základě výše popsaného principu MK metody. Konkrétní výpočet KMP je proveden dle vztahů uvedených v [41].



Obr. 4.3.2 Křivka mezních přetvoření spočtená na základě MK teorie.
(vstupní hodnoty: $n_s=0,227$; $r_s=1,72$; $C=487[\text{MPa}]$,
 $T_0=0,985$, $\varphi_0=0,006$)

4.4 METODA STANOVENÍ KMP DLE GHOSHE

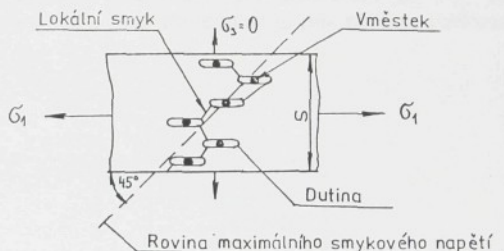
Tato metoda výpočtu KMP vychází z druhé krajní polohy definice mezního stavu - dosažení tvárného lomu, oproti první, kterou je dosažení pevnosti v tahu (kap. 4.2). Tento postup výpočtu odvodil A.K. Ghosh [43], který vycházel z poznatků o mechanismu tvárného lomu. Kritériem mezního stavu je porušení materiálu, čili okamžik, kdy soustava ztrácí svou termodynamickou stabilitu. Lomové kritérium ztráty stability v podstatě vymezují mezní (kritické) hodnoty vnitřních parametrů vedoucí k rozsáhlé koalescenci vnitřních dutin v celém průřezu materiálu [18,43,44]. Vlastní způsob výpočtu se rovněž opírá o celou řadu předpokladů:

- použití Hillovy teorie plasticity anizotropního tělesa [13]
- prosté zatěžování a rovinná napjatost
- je uvažována pouze existence vměstků kulového tvaru, které mají stejnou průměrnou velikost a statisticky rovnoměrné rozložení
- deformační zpevnění a anizotropie nejsou ovlivněny růstem dutin
- smykové zřetězení začíná nejprve lokálním spojením dutin (mikroobjem) v rovině maximálního smykového napětí, pak vznikají lokalizované smykové pásy, jejichž propojením vznikne smykový pás napříč tloušťkou plechu. Zde nakonec vznikne tvárný lom (makroobjem), jak je patrné z obr. 4.4.1.

Ghosh na základě zmíněných úvah odvodil tzv. zjednodušenou podmínku lomu, která je dána výrazem (4.4.1),

$$K_{cr} = (1 + m_{\sigma}) \sigma_1^2 \quad (4.4.1)$$

Obr. 4.4.1 Schematický pohled na smykové zřetězení [43]



kde konstanta K_{cr} je modifikovaná forma parametru lomového napětí. V této konstantě jsou obsaženy údaje o velikosti objemu inkluze, rychlosti růstu dutiny kolem ní, výchozí velikosti dutiny apod., ale která je vyjádřena charakteristikami vnějšího chování materiálu. Na základě vztahu (4.4.1) tak mohou být mezní hodnoty přetvoření spočteny pomocí klasické teorie plasticity anizotropního tělesa.

$$\begin{aligned} \sigma_i &= A \sigma_1 \sqrt{1 + m_{\sigma}^2 - P m_{\sigma}} \\ \varphi_i &= B \varphi_1 \sqrt{1 + m_{\varphi}^2 + P m_{\varphi}} \end{aligned} \quad (4.4.2)$$

$$\begin{aligned} \text{kde: } A &= \sqrt{\frac{3+3r_s}{4+2r_s}} \\ B &= \sqrt{\frac{(2+2r_s)(2+r_s)}{6r_s+3}} \quad ; \quad P = \frac{2r_s}{1+r_s} \end{aligned} \quad (4.4.3)$$

$$m_{\sigma} = \frac{(1+r_s)m_{\varphi}+r_s}{1+r_s+r_s m_{\varphi}} \quad \sigma_i = C\varphi_i^n \quad (4.4.4)$$

m_{φ} je definováno dle (3.2) a r_s je střední hodnota normálové anizotropie. Pomocí rovnic (4.4.1) až (4.4.4) lze vyjádřit maximální lomové přetvoření ve tvaru

$$\varphi_{1L} = \frac{\left\{ \frac{A^2 K_{Cr}(1+m_{\sigma}^2 - P m_{\sigma})}{C^2(1+m_{\sigma})} \right\}^{\frac{1}{2n}}}{B \sqrt{1+m_{\sigma}^2 - P m_{\sigma}}} \quad (4.4.5)$$

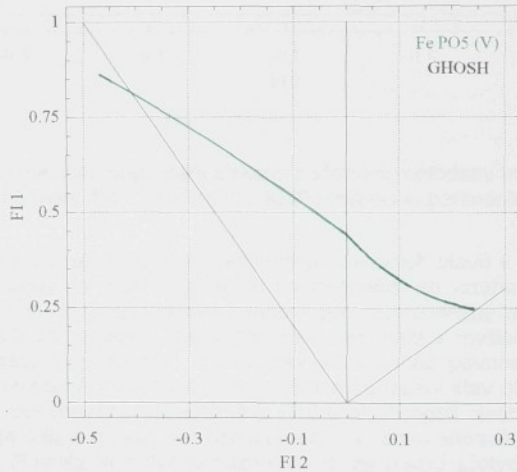
Jsou-li známy materiálové charakteristiky C , n , r_s a K_{Cr} lze pro dané m_{φ} spočítat pomocí (4.4.5) φ_{1L} a k němu příslušné φ_{2L} dle vztahu $\varphi_{2L} = m_{\varphi} \varphi_{1L}$.

Velikost K_{Cr} je vypočtena pomocí pro zkoušku tahem modifikovaného výrazu (4.4.5), tj.

$$K_{CR} = \frac{\left\{ C \left[B(1+m_{\varphi U}^2 + P m_{\varphi U})^{\frac{1}{2}} \varphi_{1L} \right]^n \right\}^2 (1+m_{\sigma U})}{A^2(1+m_{\sigma U}^2 - P m_{\sigma U})} \quad (4.4.6)$$

kde $m_{\sigma U}$ je vypočteno pomocí (4.4.4) dosazením $m_{\varphi U}/2$ za m_{φ} .

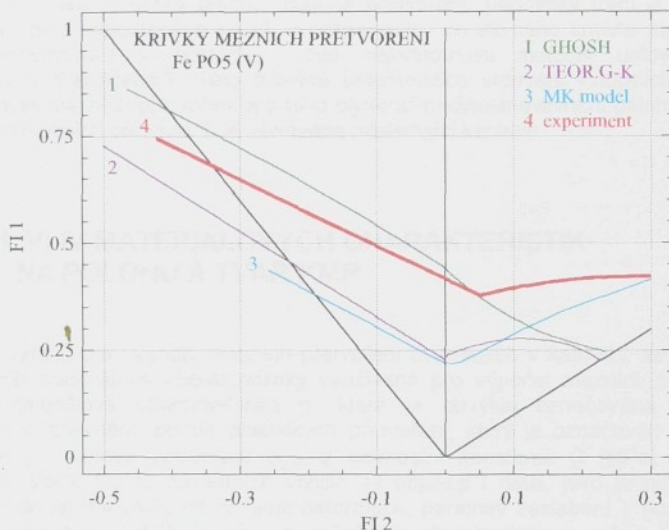
Na obr. 4.4.2 je zachycena křivka mezních přetvoření spočtená dle výše uvedených vztahů. Důležitým momentem v uvedeném postupu je určení lomových přetvoření (φ_{2L} , φ_{1L}), hlavně pak hodnoty většího lomového přetvoření φ_{1L} . Tato skutečnost je pak blíže specifikována v kap. 5.2.



Obr. 4.4.2 Křivka mezních přetvoření dle Ghoshe

5. DISKUSE K POČETNÍM METODÁM STANOVENÍ KMP

V kap. 4 byly popsány některé nejznámější početní metody získávání diagramů mezních přetvoření. Mezní hodnoty jsou spočteny pomocí vztahů odvozených z Hillovy teorie plasticity pro různě definované mezní stavy. Nejprve byla uvažována ztráta stability na mezi pevnosti (kap. 4.2) pro případy tzv. lokální a difúzní ztráty stability. Jim příslušná KMP spočtená ze vztahů (4.2.26) a (4.2.27) je na obr. 5.1 označena číslem 2. Z porovnání této KMP s hodnotami mezních přetvoření určených experimentálně (obr. 6.3.1 v kap. 6.3), KMP označena č.5, je zřejmé, že charakter průběhu KMP je obdobný, značně se však liší jejich vzájemná poloha v DMP.



Obr. 5.1 Křivky mezních přetvoření získané početními metodami uvedenými v kap. 4.2, 4.3 resp. 4.4 v porovnání s KMP určenou experimentálně (obr. 6.3.1)

Tato odlišnost plyne zejména z různě definovaných mezních stavů v jednotlivých případech. Kritérium ztráty stability na mezi pevnosti je nejnáročnější ve vztahu k funkční spolehlivosti výlisku. Z pracovního diagramu zkoušky tahem pro hlubokotažný materiál je patrný velmi pozvolný pokles síly po dosažení meze pevnosti, což vede k myšlence využít více zásobu plastičnosti materiálu a "posunout" mezní stav až za mez pevnosti. Takovému přístupu vyhovuje metoda uvedená v kap. 4.4, kdy je zvolen za mezní stav okamžik vzniku tvárného lomu. Tím je také dosahováno maximálního využití plastičnosti plechu. Křivka spočtená dle vztahů (4.4.1) až (4.4.6) je na obr. 5.1 označena č.1. V tomto případě vznik lomu znamená již zmetkový výlesek. Rovněž je důležité poznamenat, že mezní přetvoření, jejichž velikost je dána hlavně nárůstem v oblasti lokálního ztenčení, jehož výskyt lomu bezprostředně předchází, jsou z praktického hlediska již nevyužitelná. Také přesné zjišťování přetvoření v místě lomu, jež tento způsob výpočtu předpokládá, je poměrně náročné a často nejednoznačné, což výrazně ovlivní polohu KMP, viz. obr. 5.2.7.

Oba zde uvedené případy mezních stavů (KMP č. 1 a 2) představují obecně již komentované krajní meze. Zde se nabízí výhodná možnost volit mezní stav mezi těmito

krajnostmi. Tomuto přístupu odpovídá metoda popsaná v kap. 4.3. a dle ní spočtená křivka je na obr. 5.1 označena jako č. 3. Ale i tato KMP se liší svou polohou i průběhem od experimentem stanovených hodnot. To je způsobeno tím, že se stále nedaří přesněji podchytit matematickým modelem míru působení mnoha faktorů, které ovlivňují dosaženou hodnotu mezního stavu. Navíc zde hrají důležitou roli ještě i jiné, zatím nepopsané neznámé vlivy. Z obr. 5.1 je patrná jak odlišnost v charakteru a průběhu mezních křivek, tak i značné rozpětí v poloze KMP. Tato skutečnost se odráží i v odlišnosti spočtených a experimentálně určených mezních přetvoření. Kde hledat příčiny nesouladu?

Používané vzorce vycházejí z množství zjednodušujících předpokladů, které nemusí být vždy obecně platné pro všechny materiály a podmínky přetvoření. Teoretické předpoklady řešení jsou často příliš vzdálené od skutečnosti a ani nemohou zatím konkrétní realitu postihnout. Odvozené vztahy dost obtížně berou v úvahu i takové důležité faktory jako jsou rychlost přetvoření, tloušťka plechu, historie přetvoření, podmínky tření a mnoho dalších. Rovněž srovnání vypočtených křivek vycházejících i ze stejného kritéria mezního stavu, je velice problematické v důsledku určité nejednotnosti metodik určování základních materiálových charakteristik. Této důležité problematice určování vstupních parametrů pro výpočty křivek mezních přetvoření a z toho plynoucí možnosti ovlivnění polohy a tvaru KMP v diagramech mezních přetvoření, je věnována následující kapitola.

5.1 VLIV MATERIÁLOVÝCH CHARAKTERISTIK NA POLOHU A TVAR KMP

Ze vztahů pro výpočty mezních přetvoření uvedených v kap. 4.2 až 4.4 jsou zřejmé nejdůležitější materiálové charakteristiky využívané pro výpočet mezních přetvoření. Je to zejména materiálová charakteristika $\underline{n}$, která je obvykle označována jako exponent deformačního zpevnění, poměr plastických přetvoření, který je označován jako normálová anizotropie $\underline{r}$, lomová přetvoření $\varphi_{2,1L}$ a pevnostní konstanta $\underline{C}$ [MPa] a jejich plošné anizotropie. Vedle těchto základních veličin se objevují i další, jako je např. exponent $\underline{m}$ popisující citlivost materiálu na rychlost deformace, parametr zeslabení $\underline{T}$ popisující rozdíly v tloušťce plechu a řada dalších. Většina zmíněných charakteristik se určuje zkouškou tahem. Vlastní metodika jejich stanovení však do určité míry může ovlivnit i výsledné KMP. Stručný rozbor těchto vlivů v následujících kapitolách nastíní do jaké míry mohou být početní KMP ovlivnitelné vstupními materiálovými charakteristikami a metodikou jejich stanovení.

5.1.1 Materiálová charakteristika - " $\underline{n}$ "

Materiálová charakteristika popisující deformační zpevnění obecně označovaná jako $\underline{n}$ je chápána v podstatě ve dvojím významu. Jednak jako exponent výrazu popisujícího nelineární zpevnění materiálu ($\underline{n}_{exp}$),

$$\sigma = C \varphi^n \quad (5.1.1)$$

resp.

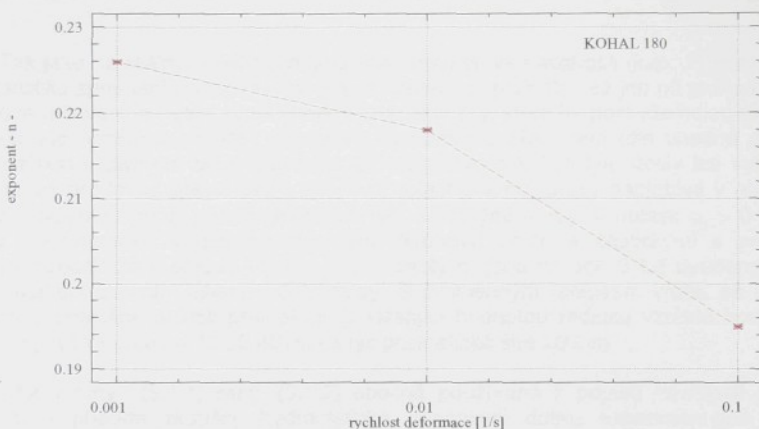
$$\sigma = C(\varphi_0 + \varphi)^n, \quad (5.1.2)$$

kde σ , resp. φ jsou skutečné napětí resp. přetvoření při zkoušce tahem, jednak představuje i maximální rovnoměrné přetvoření ($\underline{n}_m \equiv \varphi_m$), což lze pro jednoosé zatěžování jednoduchým postupem snadno dokázat. I když na základě provedeného odvození by měly být obě hodnoty $\underline{n}$ stejné, praktická měření prokázala, že $\underline{n}_m \equiv \varphi_m > \underline{n}_{exp}$. Přestože $\underline{n}$ ve vztazích pro výpočet KMP vystupuje jako exponent, nabízí se logicky spíše možnost využít k výpočtu $\underline{n}$ jako maximální rovnoměrné přetvoření.

5.1.1.1 Způsoby určování "n" jako exponentu deformačního zpevnění

Běžně je charakteristika n určována jako exponent výrazu popisujícího nelineární zpevnění materiálu dle vztahů (5.1.1), resp. (5.1.2). Tyto vztahy jsou vlastně regresními funkcemi a řešení úlohy je případem regresní analýzy, při které se určují dvě neznámé hodnoty C a n . Tyto hodnoty se určují pro oblast rovnoměrných plastických deformací příslušného materiálu. I v tomto případě se však nabízí různé varianty řešení s výsledky, které se navzájem více či méně odlišují.

- Pro nalezení obou neznámých hodnot C a n lze použít, jak již řečeno, regresních rovnic ve tvaru (5.1.1) nebo (5.1.2), což ve svých důsledcích poskytne již poněkud odlišné hodnoty C a n .
- Výsledky postupu použitého v předchozím bodě budou dále ovlivněny i vlastním způsobem řešení této úlohy. Běžně uváděný postup spočívá v linearizaci závislosti skutečné napětí - skutečné přetvoření (dvojice σ , φ spočteny z experimentálně stanovených hodnot $F - \Delta L$) před vlastní regresní analýzou. Jiným postupem řešení této úlohy je vyhnout se linearizaci a pro výpočet použít některou z iteračních metod. Dosavadní zkušenosti na katedře tváření a plastů ukazují, že hodnoty n určené iterací (např. Newtonova metoda) se poněkud liší od těch stanovených linearizací a rovněž tento způsob výpočtu dává nižší hodnoty reziduální směrodatné odchylky.
- Značně je charakteristika n ovlivněna i rozsahem hodnot σ - φ , které jsou použity k výpočtu [45-47]:
 - Dle doporučení ČSN 42 0436 [48] je to v intervalu zahrnující oblast ustálené rovnoměrné plastické deformace, což je dle této normy od $\varepsilon=5\%$ do max. rovnoměrné deformace (problematika jejího stanovení je popsána v kap. 5.1.1.2),
 - Dle ASTM E 646 -78 [49] je n stanoveno linearizací dle vztahu (5.1.1) z libovolného intervalu hodnot σ - φ . Minimum tohoto intervalu je dáno mezí kluzu a maximum odpovídá přetvoření při $F_{\max}$ či těsně před tímto momentem,
 - Dle evropské normy EN 10130:1991 [50] je n určováno jako exponent rovněž linearizací ze vztahu (5.1.1), avšak jednoznačně z intervalu $\varepsilon=10$ až 20%.
- Exponent deformačního zpevnění se počítá i bez potřeby znalosti zatěžující síly dle postupu (metoda B) uvedeného v ČSN 42 0436 [48]. Princip metody spočívá ve využití dvoustupňové zkušební tyče, kdy je n stanoveno ze dvou rozdílných deformací v užší a širší části zkušební tyče. V tomto případě byl exponent deformačního zpevnění určen při $\varepsilon_L=20\%$, $n=0,348$.
- Charakteristika n je rovněž silně ovlivněna rychlostí deformace. Při zkoušce tahem je tato rychlost jednoznačně definována a to obdobně ve všech zmiňovaných normách (EN, ČSN $\dot{\varphi} \leq 0,008 \text{ s}^{-1}$, ASTM připouští i větší rychlosti). Při praktickém lisování je však dosahováno zejména na klikových lisech podstatně vyšších rychlostí. Pak hodnota n stanovená normalizovanou zkouškou tahem a použitá k výpočtu KMP poskytne hodnoty mezních přetvoření dosti vzdálené od reality. Nabízí se tedy otázka, zda do těchto výpočtových modelů nedosazovat materiálové charakteristiky určené při vyšších deformačních rychlostech. Pro tři různé deformační rychlosti je změna exponentu deformačního zpevnění patrná z grafu na obr. 5.1.2.



Obr. 5.1.1 Vliv rychlosti deformace na hodnoty exponentu deformačního zpevnění

5.1.1.2 Způsoby určování "n" jako maximálního rovnoměrného přetvoření

Současné hlubokotažné materiály vykazují v oblasti $F_{\max}$ velmi dlouhé "plató". Praktické určení maximálního rovnoměrného přetvoření φ_m tak nemusí být jednoznačnou úlohou. Nabízí se pak několik možností jeho stanovení.

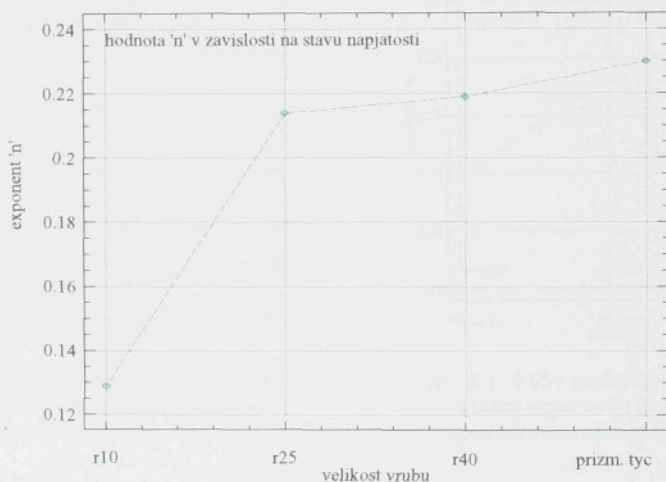
- Přetvoření je vztaženo k okamžiku dosažení $F_{\max}$, tj. $dF=0$. Realizovat tedy zkoušku tahem do okamžiku $F_{\max}$, přerušit zatěžování a na zkušební tyči odečíst příslušné přetvoření φ_m .
- Realizovat zkoušku tahem až do porušení a hodnota φ_m je stanovena z přetvoření úseku neovlivněného krčkem (lokalizací) [51].
- Realizovat zkoušku tahem až do porušení a zároveň pořídit záznam veličin síly a prodloužení, $F - \Delta L$. Pomocí tohoto záznamu pak následně pro max. sílu stanovit příslušné přetvoření (manuálně či pomocí jednoduchého programu). Určité kolísání síly spolu se šumy, které se do záznamu promítají a které se nepodaří zcela vyhladit (ať už hardwarově či softwarově) mohou odečítání požadovaných hodnot poněkud zkreslit. Při této nesporně výhodné metodě využívající výpočetní techniku je ovšem nutné vzít v úvahu, že na rozdíl od předchozích dvou způsobů je zaznamenávána celková (plastická i elastická) deformace, a tuto skutečnost vzít v úvahu v případě vzájemného porovnání s $\underline{n}$ stanovenými předchozími postupy.
- Dále se nabízí možnost využít pořízeného záznamu $F - \Delta L$ a určit φ_m dle ASTM E6. Při tomto postupu se nejprve vymezí délka vlastního "plató" v oblasti $F_{\max}$ a maximální rovnoměrné přetvoření je vztaženo ke středu tohoto intervalu.
- Konečně se pak nabízí možnost použít tyče odstupňované šíře [51, 52] a hodnota $\underline{n}$ je stanovena z úseku tyče s rovnoměrnou deformací.

Všechny výše popsané postupy vedou k cíli, kterým je určení požadovaného maximálního rovnoměrného přetvoření φ_m , ale poskytované výsledky se budou navzájem od sebe poněkud lišit. Rozptyl těchto hodnot je dále ovlivněn i dalšími faktory, jako je např. druh zkoumaného materiálu, jeho tloušťka apod.

5.1.1.3 Charakteristika "n" jako funkce stavu napjatosti

Tak jako na reálných výliscích jsou rozmanité stavy napjatosti (kap. 2) je možné také charakteristiku zpevnění $\underline{n}$ určovat i při jiných stavech napjatosti, než jen při jednoosém tahu. Pro takové určování je nutné zvolit vhodný druh zkoušky, která by poskytla nejen různé stavy napjatosti, ale umožnila změřit i maximální rovnoměrné přetvoření (dle vhodné definice) a zároveň získat i závislost skutečného napětí na přetvoření. Pro tyto účely lze vybrat stavy napjatosti jak pro levou oblast DMP, tak i pro oblast pravou. Stavy napjatosti v oblasti DMP $\varphi_2 \leq 0$ lze modelovat např. pomocí plochých tyčí s různými vruby, v oblasti $\varphi_2 > 0$ se nabízí zkouška hydrostatická s různými tažnicemi (kruhová spolu s eliptickými s proměnným poměrem poloos). Jako příklad vlivu m_σ na hodnoty $\underline{n}$ jsou na obr. 5.1.2 uvedeny výsledky získané pomocí zkoušky tahem tyčí s vruby. S proměnným rádiusem vrubu se mění stav napjatosti v příslušné oblasti přetvoření (s klesající hodnotou rádiusu vzrůstá hodnota m_σ). Byly použity tyče s vruby $r=10, 25, 40$ mm a tyč prismatická šíře 20 mm.

Oba vztahy (5.1.1) resp. (5.1.2) obecně používané k popisu závislosti napětí na přetvoření v případě zkoušky hydrostatické nepopisují dobře experimentálně zjištěnou závislost, což se projeví vysokými hodnotami reziduální směrodatné odchylky s_R při výpočtu $\underline{n}$. V případě zkoušky hydrostatické jsou křivky zpevnění rovněž ovlivněny hodnotou normálové anizotropie příslušného plechu [53,62].



Obr. 5.1.2 Vliv stavu napjatosti na hodnoty exponentu deformačního zpevnění

5.1.1.4 Vzájemné porovnání hodnot "n" určených různými postupy

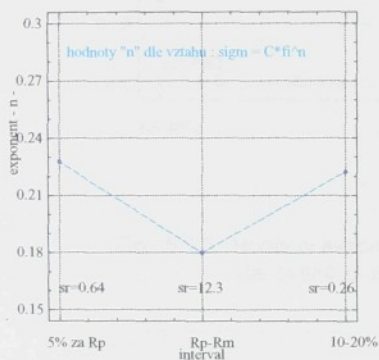
V kap. 5.1.1.1 až 5.1.1.3 byly shrnuty některé nejrozšířenější způsoby určování materiálové charakteristiky $\underline{n}$. Byla uvedena možnost jejího stanovení jako exponentu deformačního zpevnění i jako maximálního rovnoměrného přetvoření, a to jak při stavu napjatosti $m_\sigma=0$, tak i $m_\sigma \neq 0$. V případě zkoušky tahem a stanovení $\underline{n}$ jako exponentu bylo

realizováno celkem šestnáct variant výpočtu pro hodnoty odpovídající hlubokotažnému plechu jakosti KOHAL 180.

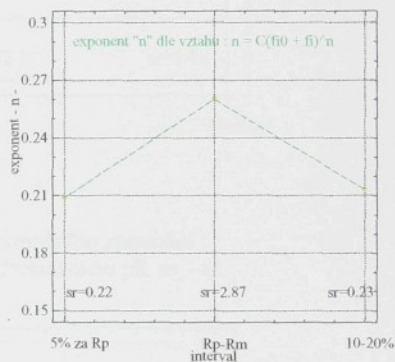
Pro čtyři výpočetní varianty (dle obou vztahů (5.1.1) - varianta A, resp. (5.1.2) - varianta B, a výpočet s logaritmováním ("L") i iterací ("I") byly výpočty provedeny i pro čtyři druhy vstupních dat $\sigma-\varphi$:

- ♦ 1. Data od 5% za R_p do R_m ,
- ♦ 2. data z celého intervalu R_p-R_m ,
- ♦ 3. data z intervalu $\varepsilon=10-20\%$ a konečně,
- ♦ 4. data od R_p do $\varepsilon=10\%$.

Množství získaných výsledků lze stručně shrnout do následujících závěrů. Největší rozdíly mezi hodnotami $\underline{n}$ spolu s reziduálními směrodatnými odchylkami s_R byly pro variantu (2), nejmenší rozdíly obou sledovaných hodnot naopak pro variantu (3). Nejvyšší hodnoty $\underline{n}$ byly dle očekávání pro vztah (5.1.2) varianty (4), $n \approx 0,279$. Vztah (5.1.2) také vykazoval obecně nižší hodnoty s_R oproti (5.1.1), tedy tato regresní funkce lépe vyhovuje experimentálně určeným hodnotám $\sigma-\varphi$. Rovněž výpočet pomocí iterace dával vždy nižší hodnoty s_R oproti výpočtu logaritmováním. Některé z výsledků ze zkoušky tahem pro postupy všeobecně normami doporučovanými (tj. výpočet s linearizací závislosti $\sigma-\varphi$ logaritmováním) jsou pro obě regresní funkce (5.1.1) resp. (5.1.2) uvedeny na obr. 5.1.3 a obr. 5.1.4.



Obr. 5.1.3 Vliv zvolené metodiky na velikost exponentu deformačního zpevnění dle vztahu (5.1.1)



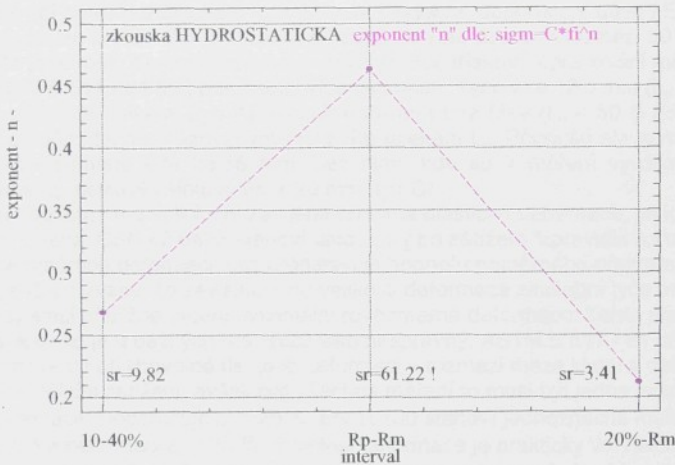
Obr. 5.1.4 Vliv zvolené metodiky na velikost exponentu deformačního zpevnění dle vztahu (5.1.2)

Na obr. 5.1.5 jsou zachyceny hodnoty $\underline{n}$ jako exponentu deformačního zpevnění určené ze zkoušky hydraulické ($m_0 \approx 1$), logaritmováním pomocí vztahu (5.1.1) - varianta C. Rovněž zde byly použity tři varianty vstupních dat:

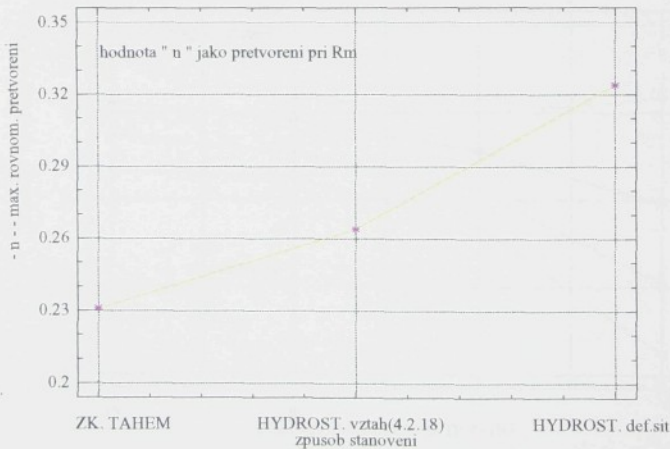
- ♦ Data $\sigma_1-\varphi_1$ z intervalu $\varepsilon=10-40\%$,
- ♦ celý rozsah přetvoření $\sigma_1-\varphi_1$ a konečně
- ♦ data z intervalu $\varepsilon=20\%$ až $\varphi_{1\max}$.

Na obr. 5.1.6 jsou hodnoty $\underline{n}$ jako maximální rovnoměrné přetvoření (n_m) ze zkoušky tahem (odečteno ze záznamu při hodnotě F_{max}) a další dvě varianty ze zkoušky hydrostatické. Při této zkoušce byly uvažovány hodnoty mezních přetvoření dosažené v okamžiku ztráty stability zkoušeného vzorku, kdy tlak dosáhl svého maxima ($dp=0$). Intenzita přetvoření byla stanovena

ze změny tloušťky plechu v oblasti vrcholu vzorku ($\varphi_1 = 0,668$). Ze vztahu (4.2.18) pak vyplývá, že pro $m_\sigma = 1$ a hodnoty r_α odpovídající plechu KOHAL 180 ($r_s = 1,81$, [55]), je $n_m = \varphi_1 / 2,526$. V případě izotropního materiálu platí vztah (4.2.19) a $n_m = \varphi_1 / 2$. Tedy hodnota n_m stanovená přímou metodou provedením hydrostatické zkoušky dle vztahu (4.2.18) je $n_m = 0,264$ (je-li $r_\alpha = 1$ je $n_m = 0,334$). Poslední varianta pak znamená $\bar{n}$ jako maximální rovnoměrné přetvoření změřené jako průměrná hodnota pomocí deformační sítě na vrcholu vzorku při maximálním dosaženém tlaku, kdy je $n_m = 0,324$.



Obr. 5.1.5 Hodnoty exponentu deformačního zpevnění stanovené zkouškou hydrostatickou při $m_\sigma \rightarrow 1$

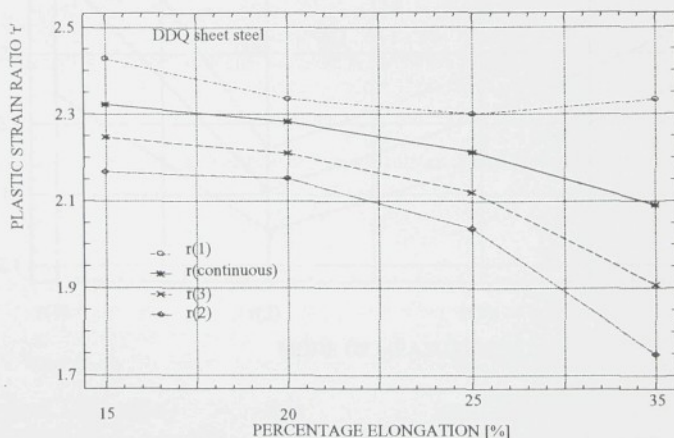


Obr. 5.1.6 Hodnota materiálové charakteristiky $\bar{n}$ jako maximálního rovnoměrného přetvoření při $m_\sigma = 0$ a $m_\sigma \rightarrow 1$

5.1.2 Normálová anizotropie - "r"

Normálová anizotropie vyjadřuje poměr plastických přetvoření ve směru šířky a tloušťky zkušební tyče při zkoušce tahem. Podobně jako charakteristika zpevnění i tato materiálová charakteristika nerovnoměrnosti plastického toku může být významně ovlivněna způsobem svého určování.

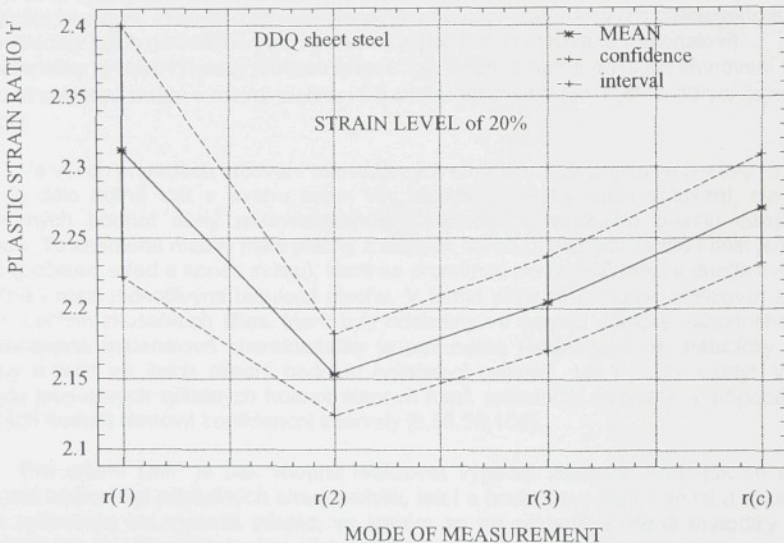
- V první řadě se zde promítá již samotná zkušební tyč. Dle ČSN 42 0435 [56] se uvažuje pro stanovení r tyč šíře 20 mm s upínacími hlavami, přičemž měření se provádí na úseku dlouhém $L_0 = 80$ mm. Obdobné doporučení dává i EN 10130 [50] s tím, že lze měřit nejen na úseku 80 mm, ale i na úseku v rozmezí 50 - 80 mm, šířka tyče je rovněž 20 mm. Obě tyto normy vyžadují třískové opracování měřeného úseku. ASTM E 517 - 81 [57] pak nabízí více možností. Tyče šíře 12,5 mm ($L_0 = 50$ či 25 mm) s upínacími hlavami (typ A), tyče šíře 20 mm bez hlav ($L_0 = 50$ či 25 mm, typ B), v obou případech s frézovaným měřeným úsekem L_0 . Připouští ale rovněž použití tyče pouze stříhané šíře 28,58 mm, bez hlav, kde se k měření využije značek, které vymezují délkový i šířkový úsek 20 mm (typ C).
- Na hodnotu r má velký vliv zejména hodnota plastické deformace, při které je r stanovena. ČSN 42 0435 stanoví určování r po zatížení "zpravidla na maximální rovnoměrnou deformaci, což představuje hodnotu poměrného přetvoření asi 20%". Vychází z úvahy, že závislost r na velikosti deformace zkušební tyče není výrazná, a tedy stačí přibližné určení maximální rovnoměrné deformace. Tento předpoklad se však ukazuje u běžných materiálů jako nesprávný. ASTM E 517 - 81 připouští stanovení r při libovolné délkové deformaci v rozmezí meze kluzu a deformaci při maximálním zatížení, avšak pro všechna měření to musí být jedna jediná hodnota této deformace. Doporučuje $\epsilon_L = 20\%$. EN 10130 stanoví jednoznačně měření r při délkové deformaci $\epsilon_L = 20\%$. Rychlost deformace je prakticky ve všech případech stejná $\dot{\varphi} \leq 0,008 \text{ s}^{-1}$. Z rozboru této problematiky jednoznačně vyplynula závislost velikosti r na hodnotě délkové deformace, při které je stanovena [54]. Pro materiály s $r > 1$ s rostoucí deformací ϵ_L hodnota r klesá, viz. obr. 5.1.7. Naopak u materiálů s $r < 1$ vzrůstá. Takovéto chování lze předpokládat a bude bezpochyby souviset se změnou deformační textury plechu.



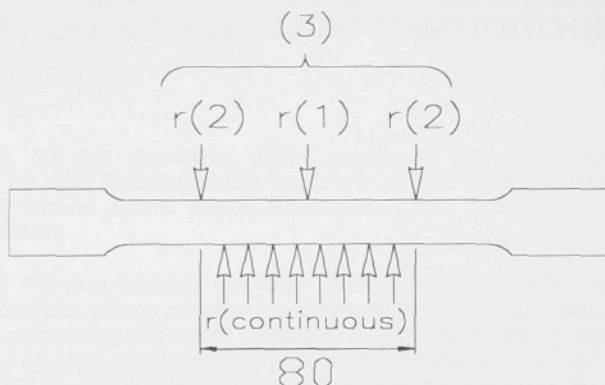
Obr. 5.1.7 Závislost hodnoty normálové anizotropie na velikosti přetvoření [54]

- Dle vybavení laboratoří lze normálovou anizotropii měřit ručně nebo automaticky s pomocí snímačů podélné a příčné deformace. Vlastní metodika měření je podrobně popsána v příslušných normách [50,57]. V případě ručního měření je dle těchto norem doporučováno měření šířky zkušební tyče nejméně ve třech rovnoměrně rozložených místech na měřené délce - symetricky od středu tyče a vždy po jednom měření na každém konci měřeného úseku L_0 . Pro výpočet $\bar{r}$ je pak stanovena střední hodnota těchto měření. Způsob měření je stejný jak pro výchozí šířku tyče před přetvořením, tak po přetvoření. V případě použití snímačů příčných deformací je situace poněkud odlišná. Dle konstrukce mohou být totiž použity snímače měřící šířku tyče pouze v jednom místě - v prostředku L_0 , nebo snímače měřící ve dvou místech - na okrajích měřeného úseku L_0 . Vezme-li se v úvahu skutečnost, že deformace tyče není v rozmezí $R_p - R_m$ zcela homogenní, a to ani když je tyč vyrobena s požadovanou přesností (tj. rovnoběžnost hran v úseku L_0 je do 0,02 mm), pak při různé délkové deformaci ϵ_L je i rozdílná šířka tyče v rozmezí L_0 .

To bezesporu platí i pro deformaci $\epsilon_L = 20\%$, kdy jsou měřeny vstupní hodnoty pro výpočet $\bar{r}$. Jinými slovy, i při dodržení metodiky ve smyslu norem při ručním či automatickém způsobu měření dle počtu měřených míst příčných deformací se budou stanovené hodnoty $\bar{r}$ navzájem odlišovat. Pro dokreslení celé problematiky lze ještě uvést, v souladu s normou, možnost měřit šířku tyče ve více než třech místech. Čili určit jakousi "spojitou" šířku tyče (např. po 5 mm, což při $L_0=80$ mm představuje 17 měřených míst). Vliv počtu měřených míst příčné deformace na výslednou hodnotu $\bar{r}$ je zřejmý z obr. 5.1.8. Počet měřených míst pro jednotlivé varianty určování normálové anizotropie je zřejmý ze schématu na obr. 5.1.9.



Obr. 5.1.8 Rozdíly v hodnotách $\bar{r}$ v závislosti na počtu měřených míst šířky zkušební tyče [54]
($r(i)$, $i=1,3$ počet měřených míst ; $r(c)$ - 17 měření)



Obr. 5.1.9 Čtyři možné způsoby měření šířky zkušební tyče pro určení hodnoty normálové anizotropie

Z předchozího (kap. 5.1.1, 5.1.2) stručného rozboru zdánlivě jednoduchého stanovení základních materiálových charakteristik vyplývá poměrná náročnost a komplikovanost celé problematiky ve vztahu k určování diagramů mezních přetvoření početními metodami. Není to dáno jen variabilitou v použití zkušebních tyčí. Ať již jde o tyče s upínacími hlavami či bez nich, stříhané či s následným obráběním nebo s různou měřenou délkou a šířkou (80/20 ; 50/12,5 ; 80/25). Je to dáno např. i určitou benevolencí ve vlastní metodice měření umožněnou stávajícími normami, které se zabývají stanovením těchto materiálových charakteristik, aniž by předpokládaly jejich následné využití k dalším výpočtům. Uvažované materiálové charakteristiky rovněž vykazují plošnou anizotropii, takže je nutné při jejich stanovení brát v úvahu tři základní směry v rovině plechu vůči směru válcování ($\alpha=0^\circ, 45^\circ$ a 90°) a jejich střední hodnoty.

Ve všech případech určování materiálových charakteristik popsaných v kap. 5.1.1 resp. 5.1.2 je dále nutné vzít v úvahu nejen vliv vlastní metodiky jejich určování, ale i rozptyl stanovených hodnot daný nerovnoměrností vlastností příslušného plechu daných hutní výrobou. To znamená rozdíly mezi plechy z různých taveb, z různých svitků i míst jednotlivých svitků (počátek, střed a konec svitku), které se promítnou do rozdílů mezi jednotlivými balíky a konečně i mezi jednotlivými tabulemi plechu. V tomto případě je nutné realizovat zkoušky s větším počtem zkušebních těles, které byly odebrány ve smyslu staticky náhodného výběru. Na stanovení materiálové charakteristiky je pak nutno hledět jako na statisticky náhodné veličiny a určit jak jejich střední hodnotu (výběrový průměr), tak i jejich rozptyl. V případě rozptylu jednotlivých zjištěných hodnot stanovit např. toleranční intervaly, v případě rozptylu středních hodnot stanovit konfidenční intervaly [6,58,59,106].

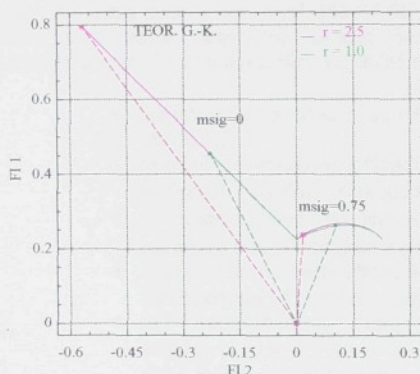
Pro určení DMP je pak vhodné realizovat výpočet vlastních KMP jak se zjištěnými středními hodnotami příslušných charakteristik, tak i s hodnotami minimálními a maximálními. Tímto způsobem lze vymezit pásmo, ve kterém se na základě zvolené metodiky určování materiálových charakteristik budou příslušné KMP daného materiálu pohybovat.

Jak jsou KMP jednotlivých výpočetních modelů ovlivněny některými materiálovými charakteristikami použitými k výpočtu, je stručně popsáno v následující kapitole.

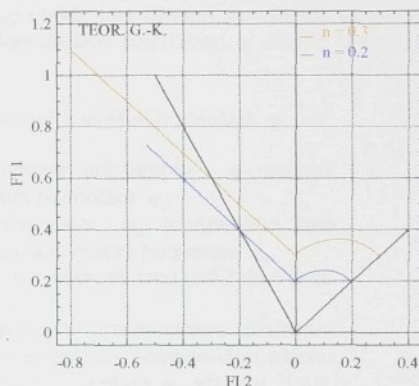
5.2 VYMEZENÍ VLIVU VSTUPNÍCH CHARAKTERISTIK NA POLOHU A TVAR POČETNĚ STANOVENÝCH KMP

V kap. 5.1 byl diskutován dopad používané metodiky určování materiálových charakteristik na jejich hodnotu. V této kapitole je stručná zmínka o tom, do jaké míry tyto charakteristiky mohou ovlivnit polohu eventuálně i tvar pomocí nich spočtených křivek mezních přetvoření.

V kap. 4.2 jsou popsány teoretické Goodwin-Keelerovy KMP. Zde jsou vyjádřena mezní přetvoření jako funkce normálové anizotropie $r(\alpha)$ a exponentu deformačního zpevnění $\underline{n}$ v závislosti na orientaci vůči směru válcování. Změny v hodnotách $\underline{r}$, byť v širokém rozsahu $r \in (1; 2,5)$, se na první pohled na KMP příliš znatelně neprojeví, viz. obr. 5.2.1 [60]. Pouze v pravé větvi KMP dochází s rostoucí hodnotou $\underline{r}$ poněkud k posuvu křivky k vyšším hodnotám φ_1 . Na zdánlivě neměnné KMP však došlo k výrazné změně v poloze deformačních stop. S rostoucí hodnotou $\underline{r}$ se deformační stopy stáčí v DMP doleva, k nižším hodnotám φ_2 . Na obr. 5.2.1 je demonstrován posuv dvou deformačních stop, $m_\sigma = 0$ resp. 0.75. Poloha KMP je však evidentně přímo úměrná hodnotě charakteristiky $\underline{n}$. S rostoucí hodnotou $\underline{n}$ se KMP posouvá v diagramu mezních přetvoření k vyšším hodnotám φ_1 [61], jak je patrné z obr. 5.2.2.

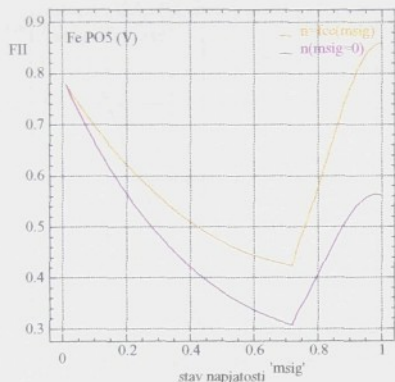


Obr. 5.2.1 Vliv hodnoty anizotropie $\underline{r}$ na KMP (teor. G-K)

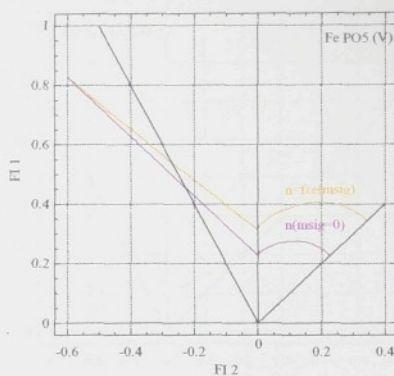


Obr. 5.2.2 Vliv hodnoty exponentu $\underline{n}$ na KMP (teor. G-K)

Vezme-li se v úvahu, že exponent deformačního zpevnění může být určen i při jiných stavech napjatosti než při běžné zkoušce tahem, čili $n=fce(m_\sigma)$ lze získat KMP poněkud odlišné od běžně známých teoretických Goodwin-Keelerových křivek, a to v DMP obou typů. Za předpokladu, že se hodnota $\underline{n}$ od $m_\sigma = 0$ do $m_\sigma = 1$ [46] bude měnit lineárně, pak po příslušné úpravě základních vztahů (4.2.26) resp. (4.2.27) budou spočteny křivky zachycující vliv $n=fce(m_\sigma)$ na teoretické Goodwin-Keelerovy KMP, patrné z obr. 5.2.3 resp. 5.2.4 (kreslena červeně). KMP označená jako " $n(m_\sigma = 0)$ " je známá křivka z obr. 4.2.2.



Obr. 5.2.3 Vliv $n=fce(m_e)$ na teoretické Goodwin-Keelerovy KMP



Obr. 5.2.4 Vliv $n=fce(m_e)$ na teoretické Goodwin-Keelerovy KMP

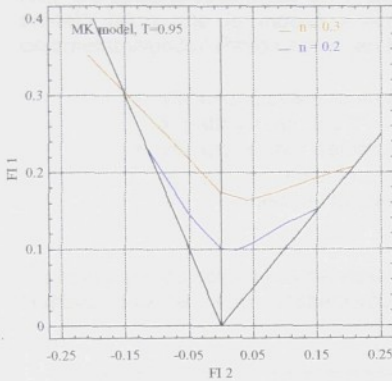
Do výpočtu KMP dle MK teorie vstupuje celá řada materiálových charakteristik a dalších údajů, viz. kap. 4.3. Jsou to např. střední hodnoty normálové anizotropie a exponentu deformačního zpevnění, lomová deformace φ_{3L} , faktor zeslabení T a mnoho dalších vstupních dat tak, jak se MK teorie postupně rozvíjela (drsnot povrchu, velikost zrn, rychlost deformace, rychlost růstu vnitřních dutin apod.), viz. např. [63,64,65]. Je nad rámec této kapitoly podrobněji se zabývat vlivy všech těchto parametrů i detailnějším studiem dalších souvislostí. V dalším bude proto učiněna jen krátká zmínka o těch nejdůležitějších.

- S rostoucí hodnotou $\underline{n}$ se KMP posouvá k vyšším hodnotám φ_1 , viz. obr. 5.2.5
- opačně je tomu v případě normálové anizotropie - s rostoucí hodnotou $\underline{r}$ se KMP posouvá k nižším hodnotám φ_1 ,
- při rostoucí hodnotě lomového přetvoření φ_{3L} (chápaného jako parametr plastičnosti) se KMP posouvá k vyšším hodnotám φ_1 ,
- s rostoucím poměrem tloušťky plechu k k velikosti zrna (od 2 do 60) se KMP posouvá k vyšším hodnotám φ_1 ,
- vliv nehomogenity materiálu vyjádřený parametrem zeslabení $T=s_B/s_A \in (0,9; 0,999)$ je takový, že s rostoucí homogenitou plechu (s_B/s_A roste) se KMP posouvá k vyšším hodnotám φ_1 , viz. obr. 5.2.6
- s rostoucí hodnotou exponentu citlivosti materiálu na rychlost deformace pak naopak KMP klesá k nižším hodnotám φ_1 .

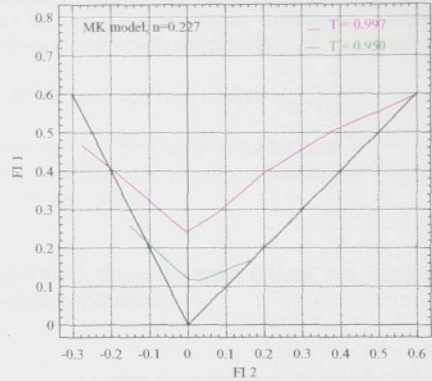
Na KMP dle Ghoshe má základní a největší vliv stanovení lomových přetvoření (φ_{2L} , φ_{1L}), hlavně pak hodnoty většího lomového přetvoření φ_{1L} , které prostřednictvím K_{cr} nejvýrazněji ovlivňuje polohu vypočtené KMP.

Tuto důležitou veličinu lze v podstatě určit dvěma způsoby [6,43]:

- dle Ghoshe nepřímou metodou z přetvoření ve směru tloušťky (φ_{3L}) a šířky (φ_{2L}) v místě lomu zkušební tyče (na obr. 5.2.7 KMP označena $\varphi_{1L} = fce(\varphi_3)$),
- stanovení φ_{1L} jako funkce vzdálenosti od místa lomu s použitím deformační sítě a následnou regresí a extrapolací známého průběhu přetvoření do místa lomu (na obr. 5.2.7 KMP označena $\varphi_{1L} = fce(\varphi_1)$).

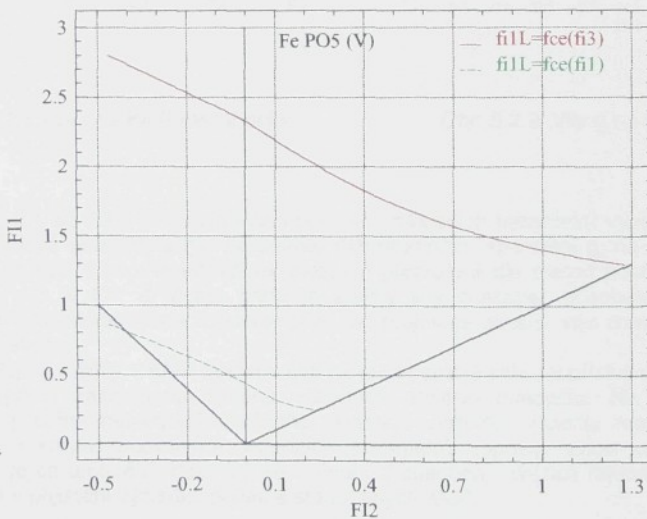


Obr. 5.2.5 Vliv exponentu zpevnění n na KMP dle MK-teorie



Obr. 5.2.6 Vliv parametru zeslabení T na KMP dle MK-teorie

Takto různě definované způsoby zjišťování lomového přetvoření vedou k výpočtu značně rozdílných hodnot mezních přetvoření, viz. obr. 5.2.7. KMP označena jako " $\varphi_{1L}=fce(\varphi_1)$ " je známou křivkou č.1 z obr. 5.1 nebo z obr. 4.4.2.

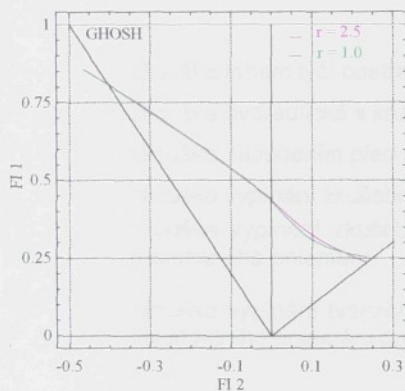


Obr. 5.2.7 Křivky mezních přetvoření dle Ghoshe spočtené pomocí lomového přetvoření φ_{1L} určeného dvěma způsoby

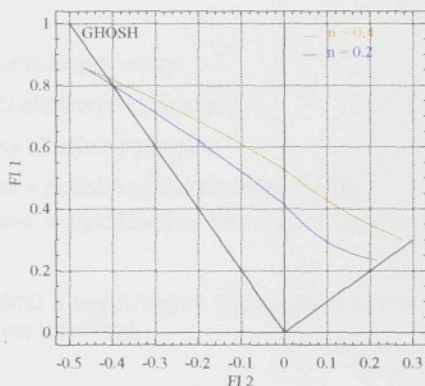
KMP dle Ghoshe však může být významně ovlivněna i dalšími parametry. Obdobně jako u MK modelu tak i zde je možná značná variabilita působení různých kombinací vstupních parametrů výpočtu. Proto i zde je jen krátká zmínka o některých nejdůležitějších faktorech:

- vliv normálové anizotropie na KMP, při stejných hodnotách $\varphi_{2L}, \varphi_{1L}$, je patrný z obr. 5.2.7
- vliv exponentu deformačního zpevnění $\underline{n}$, při stejných hodnotách $\varphi_{2L}, \varphi_{1L}$, se projeví na sklonu KMP, kdy dochází s rostoucí hodnotou $\underline{n}$ k mírnějšímu poklesu křivky, viz. obr. 5.2.8,

Obdobně lze popisovat i vliv pevnostního koeficientu C , objemu a tvaru inkluzí, atd. včetně kombinace vzájemného působení všech zmíněných parametrů.



Obr. 5.2.8 Vliv $\underline{r}$ na KMP dle Ghoshe



Obr. 5.2.9 Vliv $\underline{n}$ na KMP dle Ghoshe

Na obr. 5.2.1 až 5.2.9 je stručně zachycen vliv některých parametrů výpočtu KMP, zejména pak normálové anizotropie $\underline{r}$ a exponentu deformačního zpevnění $\underline{n}$, na mezní přetvoření v podobě početně stanovených křivek mezních přetvoření dle metod postupně popsaných v kap. 4.2, 4.3 a 4.4. Z těchto grafů je zřejmý jiný charakter působení obou zmíněných materiálových charakteristik. Jednoznačně se projevuje silnější vliv charakteristiky $\underline{n}$ oproti charakteristice $\underline{r}$.

Zřejmé rozdíly v KMP dokumentují na jedné straně citlivost příslušné početní metody a její schopnost zaznamenat změnu vlastností daného materiálu. Na straně druhé ale představují určité nebezpečí značného zkreslení výsledků výpočtu mezních přetvoření v důsledku rozptylu určovaných vstupních parametrů výpočtu vinou určité nejednotnosti metodiky jejich určování. Vezme-li se v úvahu i působení dalších faktorů, je zřejmá určitá opatrnost v přijímání výsledků početně stanovených KMP.

V tomto světle se pak jeví vhodnost a nutnost dalšího rozvíjení početních metod určování DMP a konečně i jejich konfrontace s KMP stanovenými experimentálním způsobem. V kap. 6 je proto dále věnována pozornost právě diagramům mezních přetvoření určených experimentálním způsobem a konečně v kap. 6.6 je naznačena metodika porovnání mezních přetvoření stanovených početně s mezními přetvořeními určenými experimentálně.

6. URČOVÁNÍ DIAGRAMŮ MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ EXPERIMENTÁLNÍM ZPŮSOBEM

K určení diagramu mezních přetvoření je nutné získat množství hodnot mezních přetvoření, vždy dvojic $[\varphi_{2K}, \varphi_{1K}]$, v rozsahu $m_{\varphi} \in (-0,5; 1)$ při daném kritériu mezního stavu. Původním postupem uplatněným Keelerem, totiž zjišťováním mezních přetvoření na různých typech výlisků, je získání KMP značně náročné, pracné a zdlouhavé. Mnohem výhodnější je experimentální modelování stavů m_{φ} či m_{ψ} v laboratorních podmínkách použitím některého z následně uvedených postupů. Popsané postupy se navzájem liší složitostí, nároky na zkušební zařízení, tvarem a provedením zkušebních vzorků a úplností výsledků, které poskytují. Hlubší rozbor těchto metod je uveden v [6], a proto je zde komentář k nim omezen jen na jejich prostý výčet. Z nejvíce rozšířených a všeobecně známých zkoušek je to např.:

- zkouška tahem tyčí opatřených rozmanitými vruby,
- zkouška hydraulická s kruhovou či eliptickými tažnicemi,
- zkouška hloubením plechu tažníky různých poloměrů,
- zkouška vypínání zkušebních těles v podobě pruhů proměnné šíře,
- zkouška vypínání zkušebních těles s vystříženými kruhovými segmenty proměnného poloměru,
- zkouška vypínání tvarových nástřihů s vystříženými kruhovými segmenty konstantního poloměru polokulovým tažníkem.

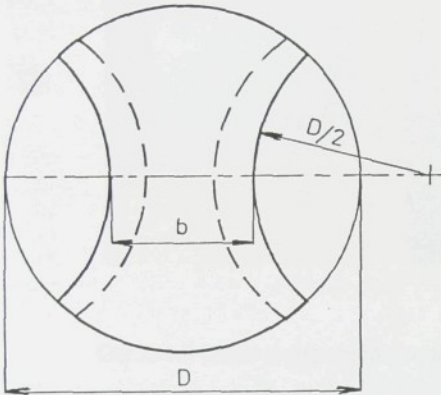
Posledně uvedená metoda se ukázala [6] jako nejprogresivnější v nejdůležitějších parametrech, a proto je v následující kapitole stručně charakterizována.

6.1 PROGRESIVNÍ METODA EXPERIMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ DIAGRAMŮ MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ

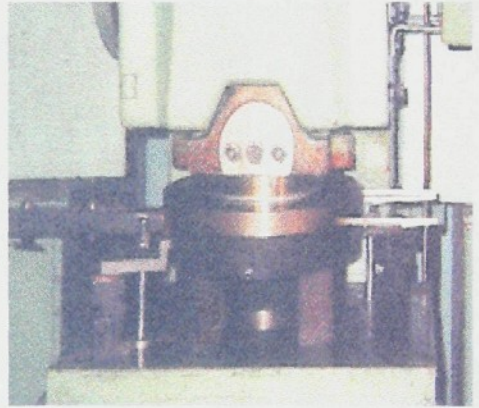
Z řady existujících metod experimentálního modelování různých stavů přetvoření z uvedeného rozsahu byla využita modifikována metoda vypínání tvarových zkušebních těles s proměnnou šířkou b dle obr. 6.1.1 [6]. K celé přípravě potřebného sortimentu zkušebních těles nutných k určení diagramu mezních přetvoření v celém požadovaném rozsahu $m_{\varphi} \in (-0,5; 1)$, tj. v celém intervalu sektorů 3A a 3C na obr. 3.2, pak postačí jediný střížný nástroj zachycený na obr. 6.1.2.

Zkušební zařízení pro vypínání tvarových zkušebních těles se skládá ze speciálního nástroje umístěného na hydraulickém lisu CBA 300. Nástřihy pevně sevřené v oblasti přiruby jsou vypínány polokulovým tažníkem ($\varnothing 100$ mm). Ke sledování procesu plastického přetvoření slouží uzavřený televizní okruh. Princip konstrukce vlastního nástroje se zabudovanou televizní kamerou je zřejmý z obr. 6.1.3. Pohled do otevřeného nástroje před vyjmutím deformovaného zkušební vzorku s patrným počínajícím lomem na jeho vrcholu je na obr. 6.1.4. Celkové uspořádání zařízení v provozních podmínkách je zřejmé z obr. 6.1.5.

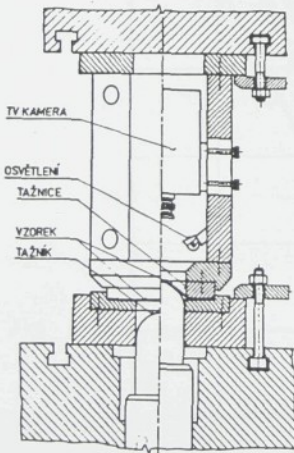
Vlastní konstrukce diagramu mezních přetvoření je patrná z obr. 6.1.6. Zde je diagram vytvořen pomocí vzorků pěti šířek. Pět různých šířek nástřihů modelovalo pět různých stavů přetvoření m_p představovaných příslušnými deformačními stopami. Pro rovnoměrné pokrytí požadovaného intervalu stavů přetvoření $m_p = -0,5$ až $m_p = 1$ mezními hodnotami přetvoření je obvykle nutno použít vzorků celkem 14ti různých šířek. V práci [6] bylo prokázáno, že deformační stopy získané touto metodou jsou v podstatě lineární, čili lze říci, že se jedná o případ proporcionálního přetvoření.



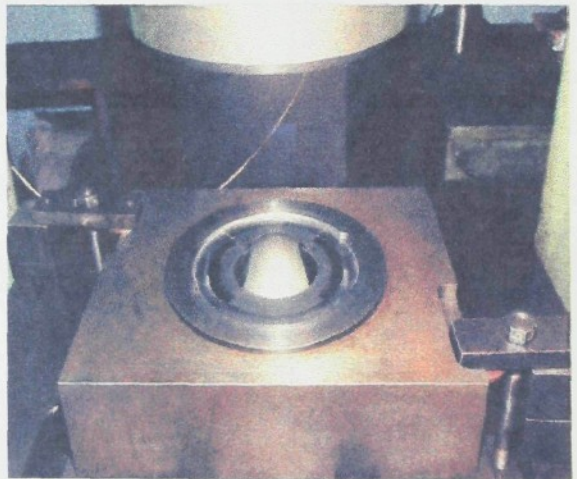
Obr. 6.1.1 Tvarový nástřih k modelování různých stavů přetvoření



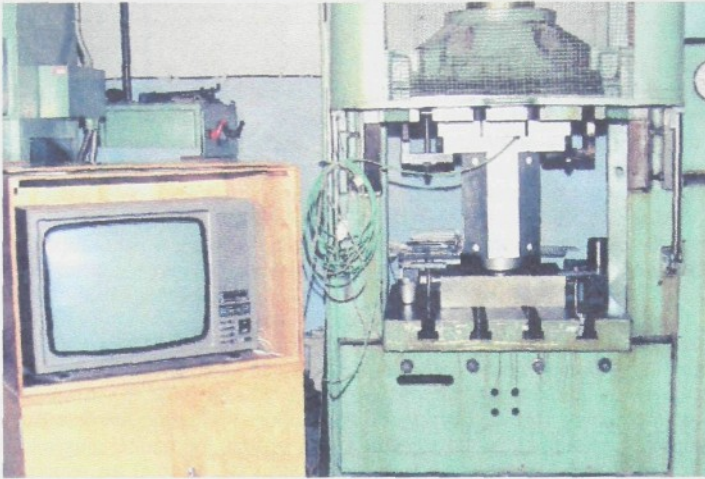
Obr. 6.1.2 Střízný nástroj sloužící k přípravě zkušebních těles dle obr.6.1.1



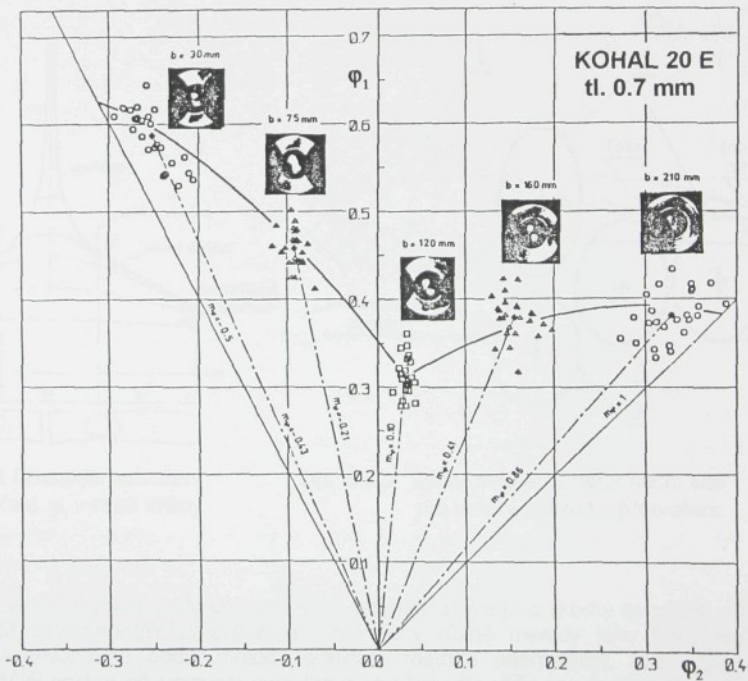
Obr. 6.1.3 Zkušebního nástroje



Obr. 6.1.4 Pohled do otevřeného nástroje



Obr. 6.1.5 Celkové uspořádání pracoviště pro vypínání tvarových nástřihů



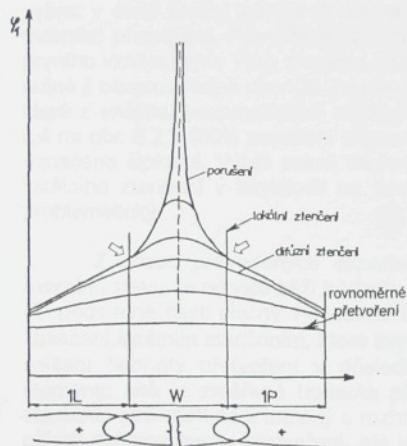
Obr. 6.1.6 Zjednodušený diagram mezních přetvoření získaný

6.2 URČOVÁNÍ MEZNÍHO STUPNĚ PŘETVOŘENÍ

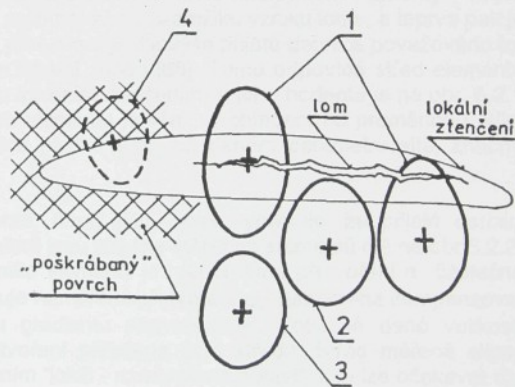
Jednoznačné definování mezního stavu přetvoření a způsobů jeho určování je velmi důležité, neboť to jsou faktory silně ovlivňující polohu a tvar křivek mezních přetvoření. Řešení problému spočívá v určení, pro jak definovaný mezní stav a jakým způsobem se bude zjišťovat velikost dosaženého přetvoření, jež bude považováno za mezní. V oblasti velkých plastických přetvoření lze mezní stav definovat v rozmezí meze pevnosti a vznikem tvárného lomu (kap.4). Oba takto zvolené mezní stavy představují krajní hranice. Je zřejmé, že mezi těmito krajními mezemi může existovat celá řada různě definovaných mezních stavů. Určit dosažení meze pevnosti u výlisku je dost obtížné, ne-li nemožné, zatímco objevení se trhliny je naprosto evidentní. První případ může znamenat nevyužití plastičnosti materiálu, druhý znamená neopravitelný zmetek.

Přestože vysokého lomového přetvoření nelze z praktického hlediska ve vztahu k výlisku již využít, bylo by možné ke komplexní analýze přetvoření použít i KMP stanovenou pro okamžik vzniku lomu (KMPT, kde "T" znamená "trhlina"). Z pohledu reálných výlisků je ale prakticky využitelné jen přetvoření realizované do okamžiku vzniku lokálního ztenčení. Pak se přetvoření lokalizuje pouze do úzkého krčku, kdy za stavu rovinného přetvoření dochází k prodloužení pouze na úkor tloušťky plechu. V okolí krčku k přetvoření prakticky nedochází. Vzhledem k malé tloušťce plechu je pak přírůstek přetvoření v tomto stádiu pro realizaci změny tvaru výlisku zanedbatelný.

Z těchto důvodů je obecně přijato za **mezní přetvoření** to, kterého je dosaženo v **okamžiku počátku vzniku lokálního ztenčení tloušťky** plechu (DMPL, kde "L" znamená "lokální"). Charakter rozložení přetvoření v okolí trhliny v různých fázích tažení je zřejmý z obr. 6.2.1.



Obr. 6.2.1 Charakter rozložení přetvoření ϵ_1 v okolí trhliny



Obr. 6.2.2 Výběr elementů deformační sítě pro určení mezního přetvoření

Objektivní vizuální určení takto definovaného mezního stavu je prakticky nemožné. Proto byly na základě experimentálních pozorování navrženy různé metody jeho stanovení. Např. metoda ekvivalentního bodu, metoda grafická, metoda interpolační, apod. [6]. Obecně nejrozšířenější postup při určování mezního přetvoření dle výše uvedené definice vychází z výběru vhodných elementů z okolí lomu [66,67], viz. obr. 6.2.2. Zviditelnění lokálního ztenčení okolo trhliny se dosáhne mírným poškrábáním povrchu plochým brouskem. Výběr zahrnuje

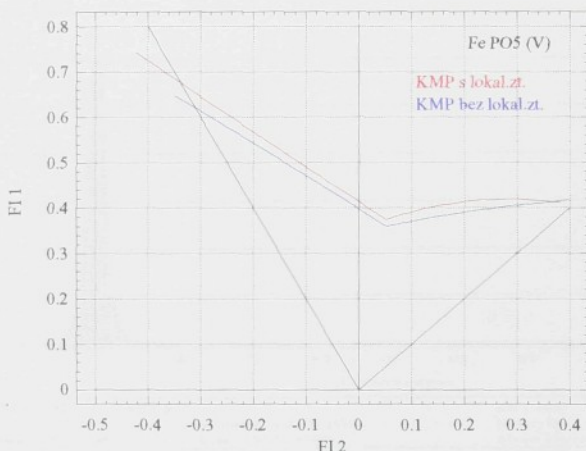
elementy deformační sítě zasažené lomem (č.1 na obr. 6.2.2), lokálním ztenčením (č.2) a takové, které sousedí s místem porušení, ale nejsou zasaženy ani lomem ani lokálním ztenčením (č.3). Poloha bodů představujících přetvoření dle jednotlivých vybraných elementů je zřejmá - v diagramu budou nejvýše č.1, pak č.2 a nejnižší č.3. Křivka mezních přetvoření (KMP) je vedena tak, aby ležela **nad** body určené elementy č.3 a **pod** body z elementů č.1 a č.2. Takto určená KMP v podstatě odděluje v DMP dvě oblasti. Nad ní existuje lokální ztenčení, pod ní ještě nedošlo k lokalizaci. KMP ležící na rozhraní obou oblastí tak **může** odpovídat počátku vzniku lokálního přetvoření a plně vyhovět dané definici mezního stavu. Ovšem s ohledem na určitý gradient přetvoření v okolí trhliny, viz. obr. 6.2.1, již malá vzdálenost měřeného elementu od trhliny znamená měření výrazně nižšího přetvoření. Body č.3 tak mohou posunout KMP k nižším hodnotám přetvoření, než odpovídá přijaté definici. Popsaný postup je možné dále zjednodušit tím, že nebudou do výběru zahrnuty lomové elementy (č.1). V diagramu dle nejvš, zahrnují největší podíl prakticky nevyužitelného lokálního přetvoření, nejvíce se vzdalují přijaté definici mezního stavu a konečně svým charakterem odpovídají diagramům DMPT nikoli DMPL.

Všechny výše zmíněné postupy určení mezního stavu si kladou za cíl co nejpřesnější a nejjednodušší určení mezního přetvoření v souladu s přijatou definicí. V této souvislosti je nutno si dále uvědomit, že rozložení přetvoření (zvláště φ_1) vykazují různě velký gradient, daný zejména tvarem zkušebních těles, ukazatelem stavu přetvoření m_p , podmínkami tření, křivostí tažníku a významně se zvětšují v oblasti lokálního ztenčení, jehož šířka je i funkcí m_p [6]. Uvedené skutečnosti komplikují a znesnadňují efektivní určení mezního přetvoření. S ohledem na využívání experimentální metody určení DMP v rozsáhlejší měřítku, důležitým pro potřeby praxe, je vhodné modifikovat předchozí způsoby tak, aby přijatá metoda určování mezního přetvoření byla rychlá, snadná, pokud možno jednoznačná a v souladu s jeho definicí. Vzhledem k tomu, že vznik lomu na výlisku je evidentní, je výhodné odvíjet stanovení mezního stavu právě od vzniku lomu. Pak ve smyslu přijaté definice mezního stavu vhodné vybrat v okolí trhliny jednotlivé elementy deformační sítě, které budou použity ke stanovení mezního přetvoření. Pro přesné určení mezního stavu je navíc nutno měřit elementy v místě prvního vzniku lomu. Tedy zkouška musí probíhat až do okamžiku vzniku lomu, a teprve pak je nutné ji bezprostředně ukončit. Za mezní přetvoření je dle výše přijaté definice považováno to, které z vnějšíku bezprostředně sousedí s lokální zónou [68]. Tomu odpovídá střed elementu č.4 na obr. 6.2.2 (50% zasažení elementu lokálním ztenčením) a jeho hodnota je na obr. 6.2.1 označena šipkami. Výběr právě takového elementu je však, s ohledem na proměnnou šířku lokálního ztenčení v závislosti na tloušťce plechu a m_p při daném parametru sítě, značně problematický.

Z dosud provedených experimentů, např. [53], pak vyplynulo, že přijaté definici mezního stavu se nejvíce blíží hodnoty, které jsou získány měřením elementů č.2 na obr.6.2.2. Na podstatné části plochy vymezené těmito elementy je rovnoměrné přetvoření a částečné zasažení lokálním ztenčením, které zvyšuje naměřené přetvoření φ_1 , napomáhá kompenzovat snížení hodnoty přetvoření v důsledku gradientu přetvoření φ_1 . Totiž při dané velikosti elementu sítě je změřená hodnota přetvoření **přifažena jeho středu**. Střed měřeného elipsy elementu sítě však není totožný s rozhraním "lokál - rovnoměrná oblast", kde lze očekávat dle přijaté definice mezní přetvoření, ale je posunut dál do rovnoměrné oblasti, a tedy k nižším hodnotám přetvoření. Částečné zasažení elementu sítě lokálním ztenčením tak posouvá změřené přetvoření blíže k předpokládané hodnotě mezního stavu ve smyslu přijaté definice.

Tento postup má tu výhodu, že snížením počtu měření (omezuje se pouze na měření elementů č.2) se poněkud sníží pracnost celého experimentu. Další výhodou pak je, že umožňuje následné statistické zpracování výsledků, které značně rozšiřuje množství informací vytěžitelné z realizovaného experimentu (kap. 6.3). Zatímco v prvním případě je výsledkem pouze KMP, v druhém případě je možné vedle KMP získat i pásmo mezních přetvoření - PMP, které dává realističtější představu o okamžiku vzniku mezního stavu [69]. Nevýhodou tohoto postupu pak může být poněkud větší rozptyl naměřených přetvoření. Pak zbývá ještě možnost vybrat k stanovení mezního stavu elementy sítě, které jsou zcela v

rovnoměrně přetvořené oblasti vzorku v těsném sousedství oblasti lokálního ztenčení, č.3 na obr. 6.2.2. Takto získané křivky mezních přetvoření se však statisticky významně liší od křivek, které byly stanoveny pomocí elementů sítě částečně zasažených lokálním ztenčením. Porovnání KMP stanovených oběma výše popsány způsoby (elementy č.2 resp. 3 na obr. 6.2.2) je na obr. 6.2.3. KMP byly stanoveny postupem popsáným v kap. 6.3. Na základě testu o rovnosti vektorů regresních koeficientů dle kap. 6.3 [59] se obě KMP navzájem statisticky významně liší ($F_L = 7.18$, $F_P = 7.87 > F_{0.95}(3.204) = 2.65$).



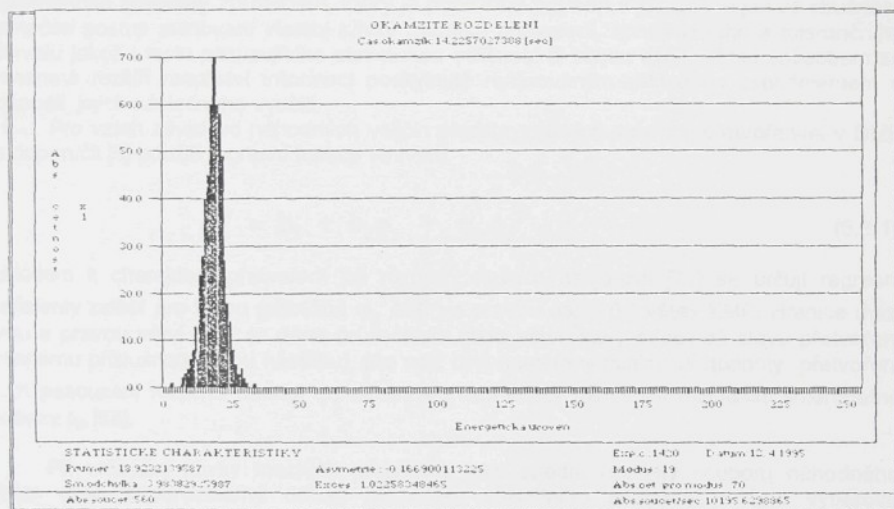
Obr. 6.2.3 Porovnání dvou křivek mezních přetvoření určených z mezních elementů deformační sítě s částečným zasažením lokálním ztenčením (element č.2) a bez zasažení lokálním ztenčením (element č.3) dle obr. 6.2.2

Ačkoli mezní přetvoření jsou materiálovou vlastností, při jejich využití pro hodnocení tvárnosti materiálu je nutné vzít v úvahu výše uvedené skutečnosti. Že totiž mezní přetvoření může být ovlivněno technologickými podmínkami experimentu (geometrií nástroje, třením, rychlostí deformace, apod.) a právě i výběrem mezního elementu [7].

Na základě provedeného rozboru byl pro zpracování naměřených výsledků experimentů ve vztahu ke komplexní analýze přetvoření reálných výlisků preferován ten způsob vyhodnocení, kdy jsou měřeny deformované elementy sítě částečně zasažené lokálním ztenčením. Ty jsou označeny na obr. 6.2.2 jako č.2.

Praktikovaný způsob stanovení mezních přetvoření vyžaduje včasné ukončení zkoušky, tj. zastavení pohybu tažníku. Při nynějším provedení nástroje je zkouška ukončena ručním vypnutím posuvu tažníku. Je zřejmé, že mezi okamžikem vzniku trhliny a ručním vypnutím lisu uplyne určitý časový úsek, během kterého dojde k poměrně velkému rozšíření trhliny. Snaha o vyřešení tohoto problému vedla k možnosti využít vzniku signálu akustické emise, ke které dochází při porušení plechu, pro sledování vzniku a šíření trhlín při vypínání zkušebních vzorků [70]. Piezoelektrický snímač akustické emise byl umístěn na tažnici nástroje dle obr. 6.2.4. Graf sumárního rozdělení signálu zachycený při zkoušce je na obr. 6.2.5. Realizované zkoušky prokázaly, že metodou akustické emise se dá spolehlivě zaznamenat vznik trhliny v tvářeném plechu. Včasná diagnostika počátku vzniku trhliny tak může být

využita jako vstupní signál pro automatické ukončení zkoušky. Malé šíření trhliny po dosažení mezního stavu tak umožní měřit mezní deformace skutečně v místě vzniku trhliny, kde bylo dosaženo právě mezního stavu.



Obr. 6.2.4 Graf sumárního rozdělení signálu akustické emise při vzniku trhliny



Obr. 6.2.5 Pohled na snímač akustické emise umístěný na tažnici nástroje

6.3 DMP A JEJICH STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ

Základní formou diagramů mezních přetvoření (DMP) je pásmo bodů o souřadnicích $[\varphi_{2j}, \varphi_{1j}]$ představujících mezní přetvoření dle přijaté definice, kde φ_{2j} resp. φ_{1j} jsou definována jako logaritmická přetvoření, $j = 1$ až N je počet bodů v pásmu. Toto experimentálně získané pásmo mezních přetvoření (PMP) je dále zpracováno s využitím matematické statistiky způsobem, který je podrobně popsán v [6]. Zde je jen ve stručnosti naznačen postup stanovení vlastní křivky mezních přetvoření, konfidenčního a tolerančního intervalu jakož i testu posuzujícího statistickou odlišnost či shodu KMP. Tímto způsobem se významně rozšíří množství informací poskytnuté realizovaným základním experimentem a možností jejich následného využití.

Pro vztah závislosti náhodných veličin představovaných mezními přetvořeními v DMP lze doporučit [6] použití regresní funkce ve tvaru

$$\varphi_1^* = b_1 + b_2\varphi_2 + b_3\varphi_2^2 \quad (6.3.1)$$

Vzhledem k charakteru přetvoření při různých stavech napjatosti [71] se určují regresní koeficienty zvlášť pro levou (přibližně $\varphi_2 \leq 0$) a pravou ($\varphi_2 > 0$) větev KMP. Hranice mezi levou a pravou větví KMP je dána průsečíkem obou větví, který odpovídá stavu přetvoření (určenému příslušnou šířkou nástřihu), pro nějž byly naměřeny minimální hodnoty přetvoření φ_1 . K posouzení rozptylu hodnot φ_1 kolem regresní křivky lze využít reziduální směrodatné odchylky s_R [58].

Při určování křivky mezních přetvoření jako střední hodnoty souboru náhodného výběru (jako dvourozměrný odhad parametru základního souboru) je tato výběrová charakteristika náhodnou veličinou a její odhad (resp. odhad vektoru regresních koeficientů b_1, b_2, b_3) je zatížen příslušnou chybou. Přesnost, s jakou tento odhad (vlastní křivka mezních přetvoření) odhaduje parametr základního souboru, popisuje konfidenční interval [6]. V případě KMP ve tvaru polynomu 2. řádu dle (6.3.1), lze oboustranný konfidenční interval vyjádřit následujícím vztahem,

$$\varphi_{1j}^* \pm t_{\alpha}(n-p) s_R \sqrt{S}, \quad \text{kde } S = \mathbf{f}_j (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{f}_j^T \quad (6.3.2)$$

kde $t_{\alpha}(n-p)$ je α -kritická hodnota t rozdělení (Studentova) s $(n-p)$ stupni volnosti, s_R je reziduální směrodatná odchylka, $\mathbf{f}_j$ je vektor rovný j -tému řádku matice $\mathbf{X}$, která obsahuje funkce nezávisle proměnné φ_2 dle rovnice (6.3.1).

Vedle oboustranného konfidenčního intervalu lze pro pásmo experimentálně naměřených bodů stanovit i tzv. oboustranné toleranční meze (toleranční pásmo) dle vztahu

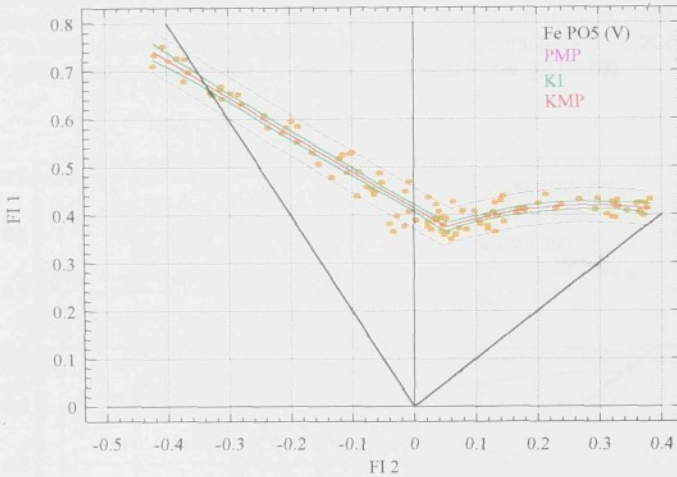
$$\varphi_1^* \pm k_1 s_R \quad (6.3.3)$$

kde k_1 je tabelováno v [58] v závislosti na N, P a γ , N je počet naměřených bodů a P je podíl bodů základního souboru zahrnutého do tolerančních mezí s pravděpodobností γ .

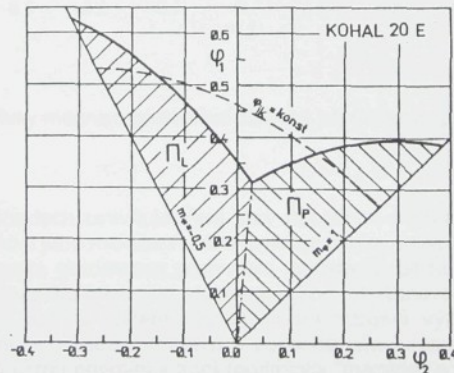
V případě, kdy je nutno posoudit odlišnost či shodu dvou KMP, je toto možné provést objektivním pravidlem, které je založeno na testu statistické hypotézy o rovnosti vektorů regresních koeficientů obou KMP. Tento test je podrobně popsán v [6,59]. Testová charakteristika F je porovnávána s kritickou hodnotou $F_{\alpha}(v_1, v_2)$, jejíž hodnoty jsou rovněž tabelovány v [58]. V případě, že testová charakteristika pro levou (F_L) resp. pravou (F_P) stranu DMP je větší než kritická hodnota, se testovaná hypotéza na dané hladině významnosti zamítá ve prospěch alternativní.

Na obr. 6.3.1 je diagram mezních přetvoření, který souhrnně zachycuje všechny výše uvedené možnosti zachycení mezních přetvoření pro hlubokotažný plech Fe PO5 (V), tloušťky 0.75 mm. Jsou to body představující experimentálně stanovená mezní přetvoření, křivka mezních přetvoření (KMP), pásmo mezních přetvoření (PMP), které je představováno oboustranným tolerančním intervalem a konečně konfidenční interval (KI).

Konkrétní hodnoty plastičnosti plechu ve zvoleném rozsahu stavů napjatosti lze rovněž vyjádřit prostřednictvím DMP postupem uvedeným např. v [6,72-74]. Zde je plastičnost definována jako plocha pod křivkou mezních přetvoření, a to buď v celém rozsahu stavů napjatosti nebo v libovolném jejich úseku, viz. obr. 6.3.2. Z hlediska praktického využití je výhodné stanovit plastičnost zvlášť pro levou (Π_L) a pravou (Π_P) část diagramu mezních přetvoření. Celková plastičnost je pak dána součtem obou dílčích plastičností, čili $\Pi_C = \Pi_L + \Pi_P$. Hranice mezi nimi je dána deformační stopou procházející minimem křivky mezních přetvoření.



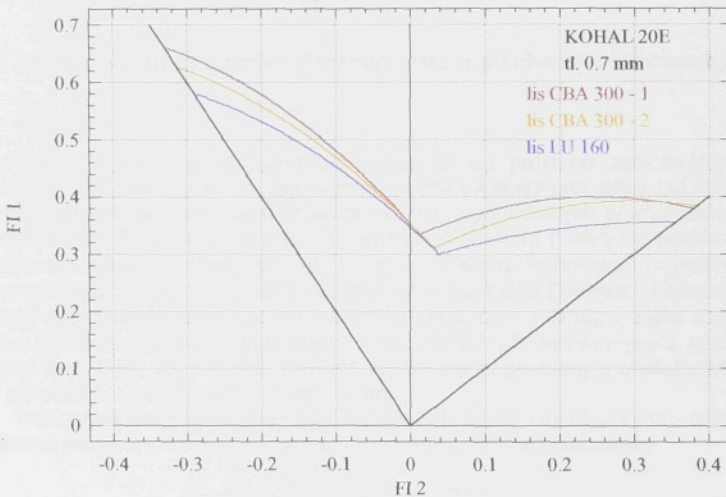
Obr. 6.3.1 DMP souhrnně zachycující všechny výše uvedené možnosti zobrazení mezních přetvoření



Obr. 6.3.2 Diagram mezních přetvoření z něhož je patrný způsob určování plastičnosti

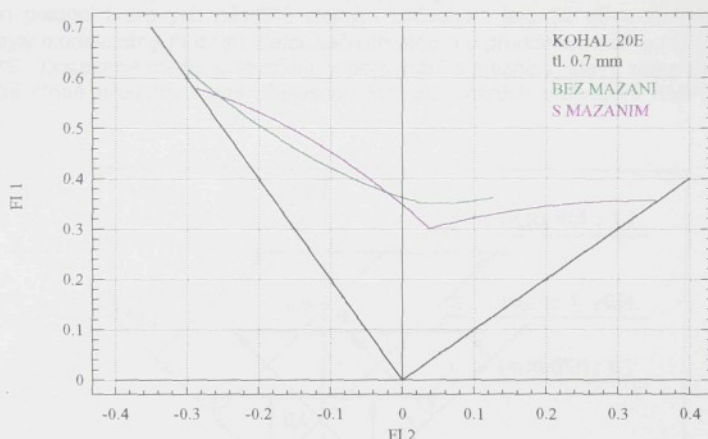
6. 4 VLIV TECHNOLOGICKÝCH FAKTORŮ NA DMP

Hodnoty mezních přetvoření poskytované početními metodami určování DMP jsou ovlivněny jak přijatými zjednodušujícími předpoklady (kap. 4.2, 4.3, 4.4) tak i metodikou určování vstupních materiálových charakteristik (kap. 5). Rovněž hodnoty mezních přetvoření stanovené experimentálně mohou být ovlivněny řadou různých faktorů. Je to nejen způsob jejich definování (kap. 6.2), tvar zkušebních těles, charakter použité deformační sítě a mechanické vlastnosti zkoumaného plechu (např. mez kluzu [1], ale i jeho tloušťka [91]), ale i vlastní technologické podmínky provádění zkoušky. K posledně jmenovaným se řadí především rychlost přetvoření, podmínky tření, ale i odchylky od prostého zatěžování čili tvar deformační stopy. Na míru ovlivnění DMP těmito faktory lze usuzovat např. prostřednictvím změn polohy a tvaru křivek mezních přetvoření v návaznosti na změny technologických podmínek tažení [67,75-77]. Na obr. 6.4.1 je zachycen vliv rychlosti deformace na KMP. Křivky mezních přetvoření byly realizovány při třech různých rychlostech tažníku. KMP č.1 a č.2 byly realizovány na hydraulickém lisu CBA 300 (obr. 6.1.5) při rychlostech $v_1=0,208$ resp. $v_2 = 10 \text{ mms}^{-1}$, KMP č.3 na mechanickém lisu LU 160, $v_3=273$ až $0 \text{ [mms}^{-1}]$, [78,79].



Obr. 6.4.1 Křivky mezních přetvoření získané při různých rychlostech tažení

V technologických pochodech ovlivňuje tření stav napjatosti a přetvoření, dosažený stupeň přetvoření a rovnoměrnost jeho rozložení. Při experimentálním určování DMP nemůže být jeho vliv opominut. S rostoucím gradientem přetvoření vzrůstá rozdíl hodnot mezních přetvoření odpovídajících počátku vzniku lokálního ztenčení a hodnot stanovených ve smyslu metodik komentovaných v kap. 6.2. S růstem třecích sil tak vzrůstá význam znalosti celkového rozložení přetvoření, definice mezního stavu a způsobu jeho určování [67,68,80-82]. Křivky mezních přetvoření pro různé podmínky tření (podmínky "mazáno" a "bez mazání") stanovené dle metodiky uvedené v kap. 6.1 jsou na obr. 6.4.2. Vedle výsledných KMP je značný dopad podmínek tření i na rozložení deformací na zkušebních vzorcích a na polohu deformačních stop [79,83].



Obr. 6.4.2 Křivky mezních přetvoření získané při různých podmínkách tření

Problematicke vlivu historie přetvoření (odchylek od prostého zatěžování) je věnována pozornost v celé řadě publikací. Její význam na mezní stavy přetvoření byl prokázán i v řadě prací zabývajících se analýzou přetvoření výlisků nepravidelných tvarů (karosářského typu), např. [84,86,87]. Za standardní diagram mezních přetvoření (DMP) lze pokládat ten, v němž bylo mezních stavů dosaženo při $m_\varphi = \varphi_2 / \varphi_1 = \text{konst.}$ Podmínka $m_\varphi = \text{konst.}$ představuje lineární deformační stopu a získaný diagram lze označit jako DMP(ids). Nestandardní diagram označený jako DMP(n) je získán při nelineární stopě ($m_\varphi \neq \text{konst.}$), která může být tvořena obecnou křivkou nebo může být složena i z jednotlivých přímkových úseků, přičemž pro každý jednotlivý úsek platí $m_\varphi = \text{konst.}$ DMP(n) tak lze získat postupným modelováním příslušných stavů přetvoření v jednotlivých etapách tažení.

Pro usnadnění popisu uvažujeme nadále nelineární dvoustupňovou deformační stopu, tj. složenou pouze ze dvou úseků, kterou lze charakterizovat ukazatelem

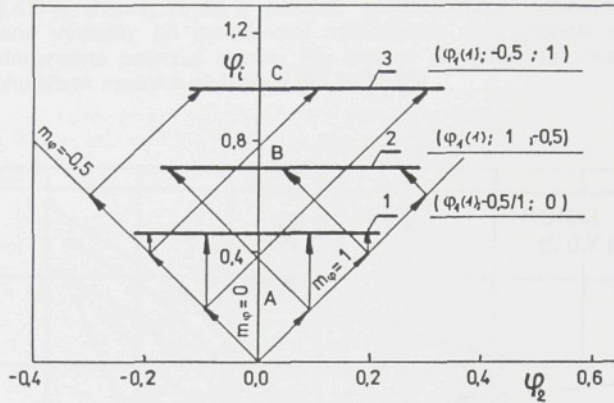
$$[\varphi_1(1), m_\varphi(1), m_\varphi(2)] \quad (1)$$

kde $\varphi_1(1)$ je hodnota přetvoření dosaženého v 1. etapě tažení při $m_\varphi(1)$, při které došlo ke změně poměru přetvoření na $m_\varphi(2)$ ve 2. etapě tažení.

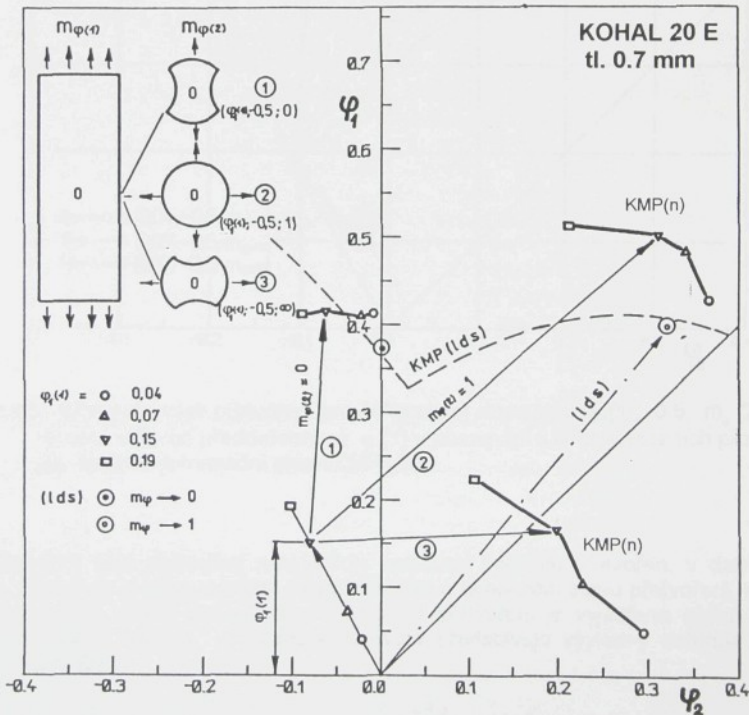
Ucelený přehled o dopadech historie přetvoření na mezní stav, vyjádřený např. kritickou hodnotou intenzity přetvoření φ_1 , je zachycen na obr. 6.4.3. Nejvyšších hodnot mezních přetvoření je dosaženo pro deformační stopu popsanou ukazatelem dle (1) jako $[\varphi_1(1), -0.5, 1]$, varianta C. Nižších hodnot mezních přetvoření než v předchozím případě je dosaženo pro deformační stopu charakterizovanou jako $[\varphi_1(1), 1, -0.5]$, tj. varianta B. Nejnižších hodnot mezních přetvoření, a tedy nejnepríznivější případ historie přetvoření, je dosaženo pro deformační stopu typu $[\varphi_1(1), -0.5/1, 0]$, tj. varianta A.

Vliv trajektorie přetvoření na mezní stav byl ověřován porovnáním mezních přetvoření dosažených při lineární a nelineární deformační stopě. DMP(ids) byl získán s využitím metodiky popsané v kap. 6.1. Nelineární dvoustupňová deformační stopa typu $[\varphi_1(1), -0.5, m_\varphi(2)]$ byla modelována pomocí speciálního přípravku, pomocí něhož se u pásu

plechu dosáhne tahové předdeformace $\varphi_1(1)$ při $m_\varphi = -0.5$. Druhý úsek deformační stopy je realizován pomocí tvarových nástřihů stejným způsobem jako již dříve zmíněný DMP(lds). Nejprve byly modelovány tři druhy deformačních stop pro předdeformace $\varphi_1(1) = 0.04, 0.07, 0.15, 0.19$. Dosažená mezní přetvoření, v porovnání s mezními stavy získanými při lineární deformační stopě představované příslušnou křivkou mezních přetvoření KMP(lds), jsou na obr.6.4.4.



Obr. 6.4.3 Vliv historie přetvoření na kritickou hodnotu intenzity přetvoření

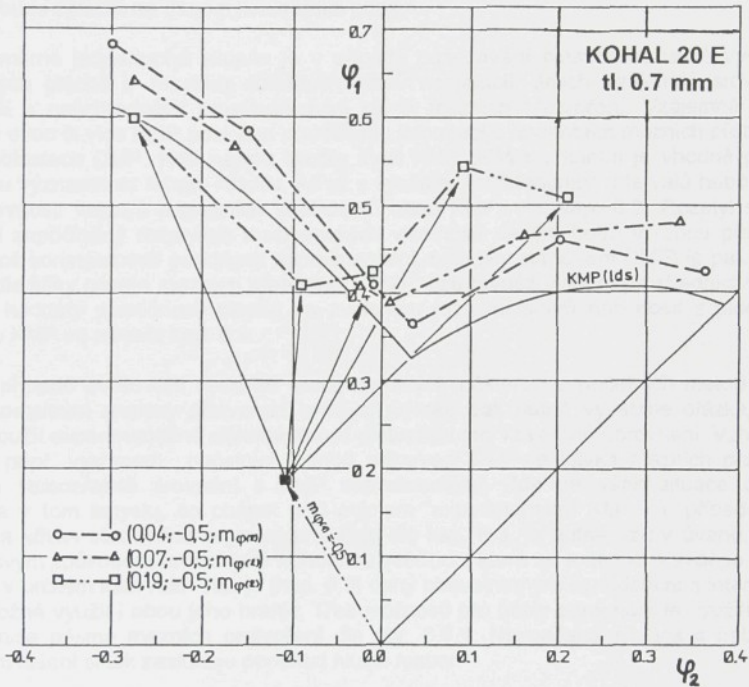


Obr. 6.4.4 Mezní přetvoření pro lineární a některé typy nelineárních deformačních stop

Z tohoto obrázku vyplývá, že podle charakteru deformační stopy (historie zatěžování) lze skutečně dosáhnout vyšších i nižších mezních stavů vyjádřených konečnými hodnotami φ_{2k} , φ_{1k} , ve srovnání s případem kdy je $m_\varphi = \text{konst.}$ během celého procesu tažení (KMP(lds)).

Vliv historie přetvoření na KMP je pak patrný z obr. 6.4.5, kde jsou porovnány KMP(n) odpovídající nelineárním dvoustupňovým stopám s předdeformacemi $\varphi_1(1)=0.04, 0.07$ a 0.19 při $m_\varphi(1) = -0.5$ s KMP(lds). Různých stavů přetvoření $m_\varphi(2)$ bylo opět dosaženo s využitím tvarových nástřihů.

Z obr. 6.4.5 je zřejmé, že se s velikostí předdeformace významně mění poloha KMP(n). Získané výsledky při modelování nelineárních deformačních stop tedy zcela konkrétně a jednoznačně potvrzují značný vliv historie přetvoření na mezní stavy, tj. na charakter a polohu křivek mezních přetvoření [65,79,85,88].



Obr. 6.4.5 Křivky mezních přetvoření pro deformační stopu typu $[\varphi_1(1), -0.5, m_\varphi(2)]$ s různou velikostí předdeformace $\varphi_1(1)$ v porovnání s křivkou mezních přetvoření pro lineární deformační stopu KMP(lds)

Konečný stav přetvoření nevyjadřuje celkovou intenzitu přetvoření v daném místě. Intenzita přetvoření je závislá nejen na počátečním a konečném stavu přetvoření, nýbrž také na jejím průběhu. Jinými slovy, celková hodnota přetvoření je vyjádřena délkou příslušné deformační stopy [90,91]. Intenzita deformace představuje výsledný deformační účinek intenzity napětí [92].

6. 5 ZPŮSOB STANOVENÍ HRANIC TVÁŘENÍ

V experimentálně určených DMP vystupují mezní deformace v základní podobě diskretních bodů představujících jednotlivá mezní přetvoření tvořících více či méně souvislé a různě široké pásmo. Početní metody poskytují mezní deformace jako funkce stavu napjatosti v podobě křivky dané příslušnou funkční závislostí. Je-li obecně hlavním účelem využití DMP stanovení a vzájemné porovnání mezních stavů, vyvstává nutně otázka, jak tyto mezní stavy vzájemně porovnávat. To nastane již nejen v případě porovnávání spočtených a experimentálně určených mezních přetvoření, čili v případě experimentálního ověření spočtených KMP. Obdobná situace je i v případě komplexní analýzy přetvoření reálných výlisků, ať už jsou přetvoření na výlisku srovnávána s mezními stavy spočtenými či experimentálně určenými. V jaké podobě a jak budou nakonec mezní přetvoření použita ke srovnání, bude záležet na daném konkrétním případě.

Poměrně jednoduchá situace je v případě posuzování plastičnosti nově vyvíjených karosářských plechů v rozsahu důležitých stavů napjatosti. Jejich vzájemné srovnání je nejrychlejší a nejvýhodnější prostřednictvím křivek mezních přetvoření. Vzájemné vizuální porovnání dvou či více KMP poskytne přehlednou informaci o hodnotách mezních přetvoření v různých oblastech DMP. Kde nejsou rozdíly mezi KMP příliš markantní je vhodné posoudit statistickou významnost tohoto rozdílu. Ať už s využitím konfidenčních intervalů nebo pomocí testu o rovnosti vektorů regresních koeficientů obou KMP, viz. kap. 6.3. Rozptyl mezních přetvoření zapříčiněný rozptylem mechanických vlastností daným hutní výrobou plechu (při samozřejmě konstantnosti podmínek experimentální metodiky stanovení DMP) je pak vhodné posoudit dle šířky pásma mezních přetvoření - PMP. Lze rovněž vyjádřit prostřednictvím DMP konkrétní hodnoty plastičnosti plechu ve zvoleném rozsahu stavů napjatosti z plochy pod příslušnou KMP ve smyslu kap. 6.3.

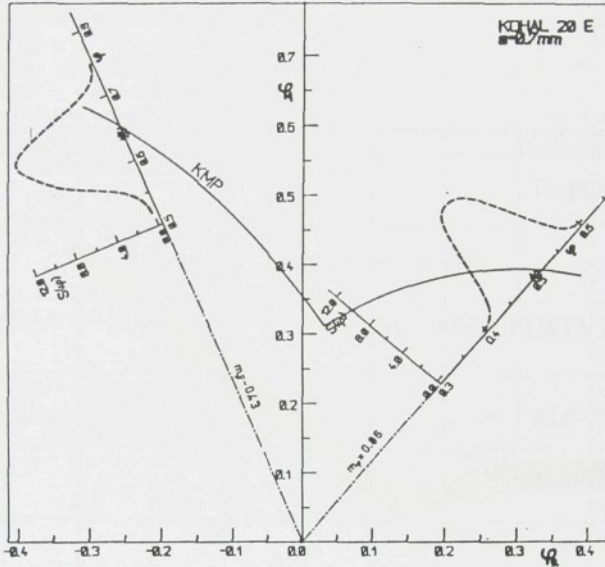
V případě ověřování mezních stavů získaných některou z početních metod nebo v případě komplexní analýzy přetvoření reálných výlisků pak nutně vyvstane otázka, v jaké podobě použít experimentálně získaná mezní přetvoření pro vzájemné porovnání. Vzhledem k tomu, že např. výstupem početních metod stanovení DMP je křivka mezních přetvoření, nabízí se samozřejmě srovnání s KMP experimentální. Zde se však situace poněkud komplikuje v tom smyslu, co chápat pod pojmem "experimentální KMP". V případě, že je uvažována křivka stanovená regresní analýzou dle kap. 6.3, je nutné vzít v úvahu, že tato křivka je svým způsobem určení také náhodnou veličinou, která se s danou pravděpodobností vyskytuje v určitém intervalu. Ten je (kap. 6.3) daný oboustranným konfidenčním intervalem a tedy je možné využít i obou jeho hranic. Třetí možnosti pro účely porovnání je využít dolní či horní hranice pásma mezních přetvoření dle obr. 6.3.1. Naznačená situace s nabízenými možnostmi řešení si tak zasluhuje poněkud hlubší rozbor.

Mezní hodnoty přetvoření jsou v souladu s [58,93] dvourozměrnou náhodnou veličinou. Vzhledem k větší složitosti zpracování dvourozměrné veličiny je výhodné snížit dvě proměnné pro každý bod na jednu. Takový jednorozměrný soubor lze získat promítnutím bodů (jednotlivých jejich deformačních stop) příslušného deformačního stavu m_φ na odpovídající deformační stopu. Mezní hodnoty přetvoření budou v tom případě určeny velikostí promítnutých deformačních stop. Tak vznikne jednorozměrná náhodná veličina Φ "mezní přetvoření", která nabývá hodnot φ . Tuto náhodnou veličinu charakterizují pravděpodobnosti, s nimiž se vyskytují její hodnoty v předem zvolených mezích. Pro vyjádření této skutečnosti je zavedena distribuční funkce, jež je funkcí proměnné φ a její hodnota v daném bodě φ_K udává pravděpodobnost, že náhodná veličina nabude hodnoty menší nebo rovné φ_K , $F(\varphi)=P(\Phi \leq \varphi_K)$, čili

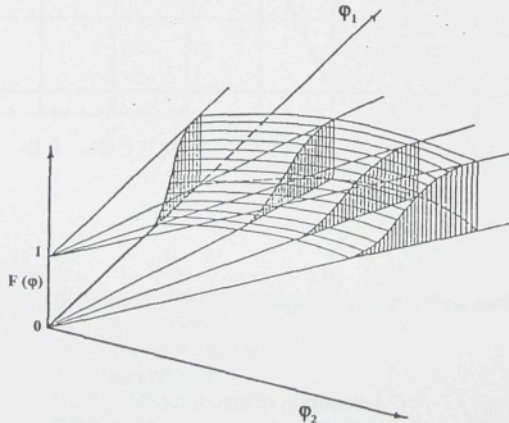
$$F(\varphi) = \int_a^{\varphi_K} s(\varphi) d\varphi \quad (6.5.1)$$

kde $s(\varphi)$ představuje funkci hustoty pravděpodobnosti skutečného rozdělení stanovené pomocí třetího a čtvrtého centrálního momentu souboru pomocí Čebyševova - Hermitova polynomu 3. a 4. stupně dle postupu uvedeného v [6].

Význam zavedení distribuční funkce lze jednoduše vyjádřit následovně. Změřené mezní hodnoty přetvoření, představované v DMP koncovým bodem příslušné deformační stopy, se pohybují v určitém rozmezí. Toto rozmezí lze se zvolenou pravděpodobností vymezit oboustrannými tolerančními mezemi (PMP). Funkce $F(\varphi)$ pak udává, s jakou pravděpodobností se budou určité mezní stavy vyskytovat v určitém místě z udaného rozmezí ve směru deformační stopy. Průběh funkce $s(\varphi)$ pro dvě různé skupiny bodů určené zkušebními vzorky šířek $b = 30$ a 210 mm, je zřejmý z obr. 6.5.1.

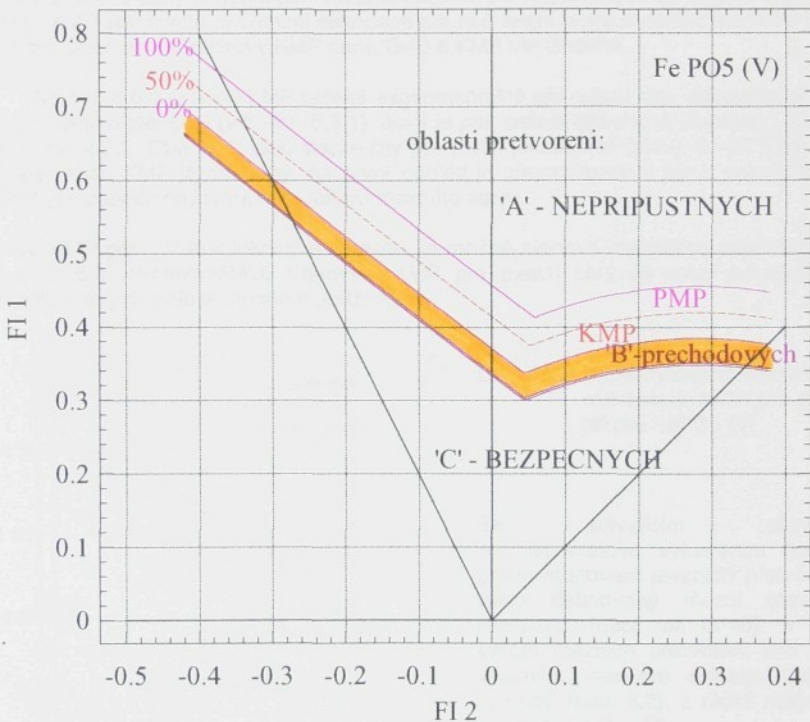


Obr. 6.5.1 Průběh funkce $s(\varphi)$ pro dva deformační stavy dané nástřihy šířek $b = 30$ a 210 mm



Obr. 6.5.2 Průběh distribučních funkcí pro různé stavy přetvoření v DMP

Průběh distribučních funkcí pro různé stavy přetvoření v DMP je schematicky nakreslen na obr. 6.5.2. Na základě uvedeného postupu lze konstatovat, že pravděpodobnost výskytu mezního stavu dle přijaté definice v PMP vzrůstá od jeho spodní hranice (0%) k hranici horní (100%). Pro KMP, určenou ve smyslu kap. 6.3 jako střední hodnotu pásma bodů představujících mezní přetvoření, je tak pravděpodobnost výskytu mezního stavu právě 50%. Pod PMP je pak oblast přípustných deformací, čili oblast bezpečného přetvoření. Nad PMP je logicky oblast nepřípustných deformací. Vzhledem k mnoha nejrůznějším náhodným a obtížně podchytitelným faktorům ovlivňujících proces plastického přetvoření je vhodné (zejména s ohledem na větší spolehlivost lisování v případě analýzy přetvoření výlisků, viz. kap. 7) neoddělovat PMP od oblasti přípustných deformací ostrou hranicí, ale připustit zde určité přechodové pásmo. Souhrnně jsou výše uvedené oblasti přetvoření v DMP zachyceny na obr. 6.5.3. Šířka přechodového pásma může být různá. V tomto případě byla zvolena 10% hodnoty φ , v oblasti minima mezních přetvoření.



Obr. 6.5.3 Rozdělení DMP na jednotlivé oblasti přetvoření :

"A" - nepřipustných,

"B" - přechodových a

"C" - bezpečných;

KMP je křivka mezních přetvoření

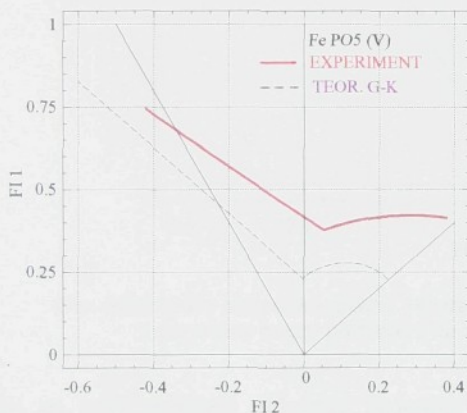
PMP je pásmo mezních přetvoření

6. 6 OVĚŘENÍ PLATNOSTI KMP STANOVENÝCH POČETNÍMI METODAMI

Diagramy mezních přetvoření lze obecně určovat početně nebo experimentálně (kap. 4 a 6). Početní řešení vždy vychází z celé řady zjednodušujících předpokladů. Nakolik dosažený výsledek odpovídá skutečnosti, lze ověřit pouze vhodným experimentem. V kap. 4 byly popsány některé rozšířené početní metody stanovení KMP odpovídající různě definovaným mezním stavům, které se pohybují v rozmezí daném dosažením meze pevnosti a tvárného lomu. Vznik lomu na výlisku je evidentní a proces plastického přetvoření je jím jednoznačně ukončen. Výhodnost kritéria lomu pro určení různě definovaných mezních stavů přetvoření byla diskutována v kap. 6.2. V oblasti velkých plastických přetvoření, kdy je mezní stav definován v rozmezí meze pevnosti a vznikem tvárného lomu, představují oba takto zvolené mezní stavy krajní hranice, viz. kap. 5.2. Určit dosažení meze pevnosti u výlisku je dost obtížné, ne-li nemožné, zatímco objevení se trhliny je naprosto evidentní. Pro porovnání s experimentálně určenými hodnotami mezních přetvoření stanovenými ve smyslu kap. 6.1 byly zvoleny KMP stanovené početními metodami pro obě krajní hranice definic mezního stavu, tj. teoretické Goodwin - Keelerovy KMP (teor. G-K) a KMP dle Ghoshe.

Na obr. 6.6.1 je horní KMP určena experimentálně pro mezní stav odpovídající počátku vzniku lokálního ztenčení (viz. obr. 6.3.1), dolní je pak známá teoretická Goodwin - Keelerova KMP z obr. 4.2.2. Obě KMP jsou stanoveny pro plech jakosti FePO5(V), tl.=0.75 mm. I když charakter obou KMP je obdobný, na první pohled je zřejmý rozdíl v jejich poloze v DMP bezpochyby zapříčiněný rozdílnou definicí mezního stavu.

Zatímco KMP pro počátek lokálního ztenčení je možné stanovit metodikou popsanou v kap. 6.2, resp. 6.3, experimentální stanovení KMP pro mezní stav na mezi pevnosti je pro rozmanité stavy napjatosti mnohem obtížnější.



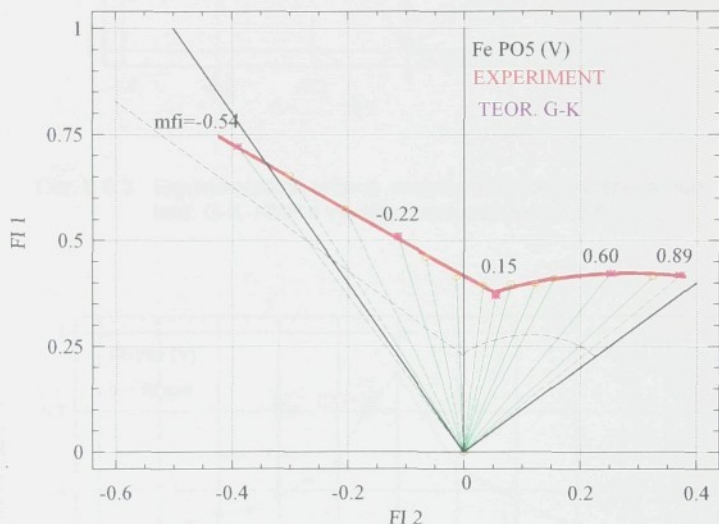
Obr. 6.6.1 Experimentálně a početně stanovené KMP pro plech jakosti FePO5(V)

Se stávajícím standardním experimentálním vybavením (kap. 6.1) přímé stanovení mezních přetvoření pro takto definovaný mezní stav nelze realizovat (např. při $dF=0$). V případě určení mezních přetvoření pro počátek lokálního ztenčení existuje celá řada postupů (kap. 6.2), z nichž některé jsou popsány např. v [6].

Jsou to jednak "POSTUPY PŘÍMÉ", kdy je zkouška ukončena v okamžiku vzniku lokálního ztenčení, jednak "POSTUPY NEPŘÍMÉ". Takový nepřímý postup v podstatě představuje několik po sobě následujících kroků. Nejprve se realizuje přetvoření do okamžiku dosažení evidentního mezního stavu jakým je již zmíněný tvárný lom. A protože zkušební vzorky opatřené deformační sítí vždy vykazují větší či menší nerovnoměrnosti v rozložení přetvoření (je zde určitý gradient přetvoření, viz. obr. 6.2.1), je možné této obvykle nežádoucí skutečnosti využít právě pro stanovení mezních přetvoření i pro jinak definovaný mezní stav, než je právě tvárný lom. V tomto případě tak jde o využití ve vztahu k stanovení přetvoření odpovídajících mezi pevnosti materiálu.

Při vzniku tvárného lomu je v místech trhliny dosaženo nejvyšších hodnot přetvoření. Všechna ostatní přetvoření v jiných místech zkušebního vzorku pak budou jistě menší. V důsledku existujícího gradientu v rozložení přetvoření tím menší, v čím větší vzdálenosti se budou od trhliny nacházet. Čili navržená nepřímá metoda spočívá v následujícím.

Pro daný stav napjatosti stanovit určitým postupem takovou vzdálenost od lomu, kde budou změřena přetvoření odpovídající zvolené definici mezního stavu. V tomto případě se tedy jedná o mezní stav na mezi pevnosti, jenž je stanoven s využitím početně stanovené teoretické Goodwin-Keelerovy KMP a KMP experimentální. Ta byla stanovena pomocí 14ti různých deformačních stavů, $m_p \rightarrow -0,5$ až $m_p \rightarrow 1$ (obr. 6.3.1). Pro tyto stavy byly stanoveny střední deformační stopy. Ty jsou představovány čárkovanými zelenými čarami vycházejícími z počátku souřadného systému, viz. obr. 6.6.2. Průsečíky těchto deformačních stop s teor. G-K KMP tak stanoví hodnoty mezní přetvoření pro tento mezní stav v daném rozsahu stavů přetvoření. Pak byla stanovena poloha těchto mezních přetvoření vůči trhlíně na zkušebních vzorcích modelujících příslušné stavy přetvoření. V takto určených vzdálenostech v povrchu kolmo na trhlínu tak byla změřena přetvoření u celé sady použitých vzorků. Konfrontace takto změřených mezních přetvoření ležících na teor. G-K KMP s KMP stanovenou pro mezní stav pro počátek vzniku lokálního ztenčení je na obr. 6.6.3.

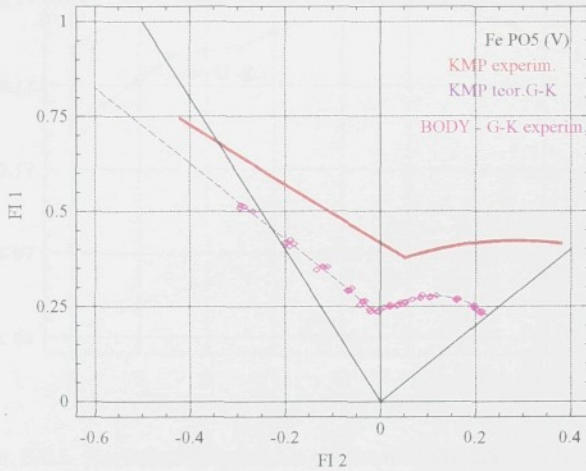


Obr. 6.6.2 Stavy přetvoření určené 14ti deformačními stopami, pro které byly stanoveny mezní přetvoření na teoretické Goodwin-Keelerově KMP

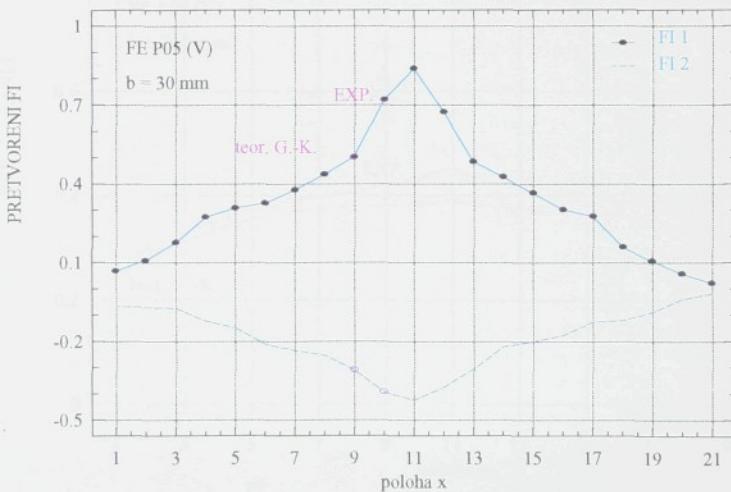
Jak se mění rozložení deformací (gradient přetvoření) u zkušebních vzorků pro tři charakteristické stavy přetvoření ($m_p = -0,54$; $0,15$; $0,89$) a poloha mezních přetvoření pro mezní stav definovaný dle teor. G-K KMP je zachyceno na obr. 6.6.4 až 6.6.6. Z těchto grafů je zřejmé, že s rostoucí hodnotou ukazatele stavu přetvoření m_p se gradient přetvoření jak pro φ_1 tak i pro φ_2 na zkušebních vzorcích zmenšuje. Naopak vzrůstá vzdálenost od lomu, ve které jsou měřena přetvoření odpovídající meznímu stavu dle teor. G-K KMP. U vzorků představujících pravou krajní část DMP, $m_p \rightarrow 1$, jsou již zcela v okrajové části přetvořené oblasti zkušebního vzorku.

Na základě provedeného rozboru je pak možné dále realizovat tažení vzorků pro mezní stav "mez pevnosti materiálu". To znamená tažení vzorků jen na takovou hloubku, kdy bude na

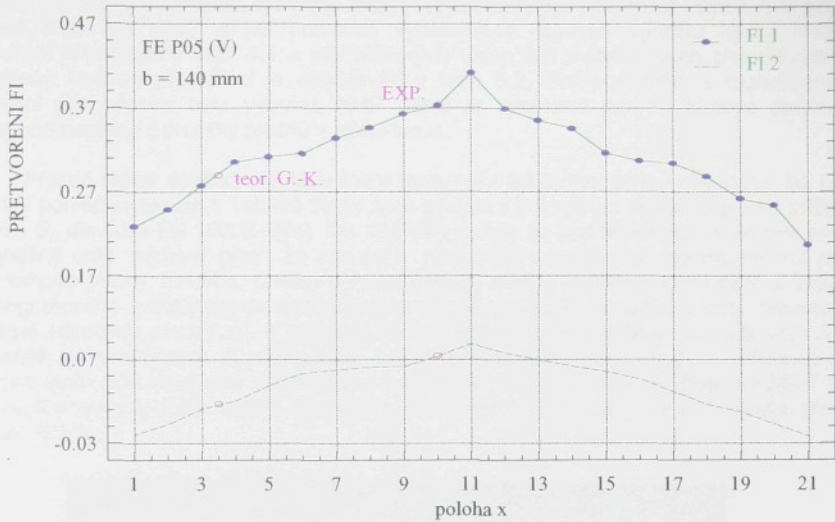
jejich vrcholu dosaženo přetvoření určené výše uvedeným postupem a odpovídající mezi pevnosti dle teor. K-G KMP. Výše popsaným způsobem je tak možné experimentálně stanovit mezní přetvoření pro mezní stav na mezi pevnosti tak, jak to odpovídá teoretickým Goodwin - Keelerovým křivkám mezních přetvoření.



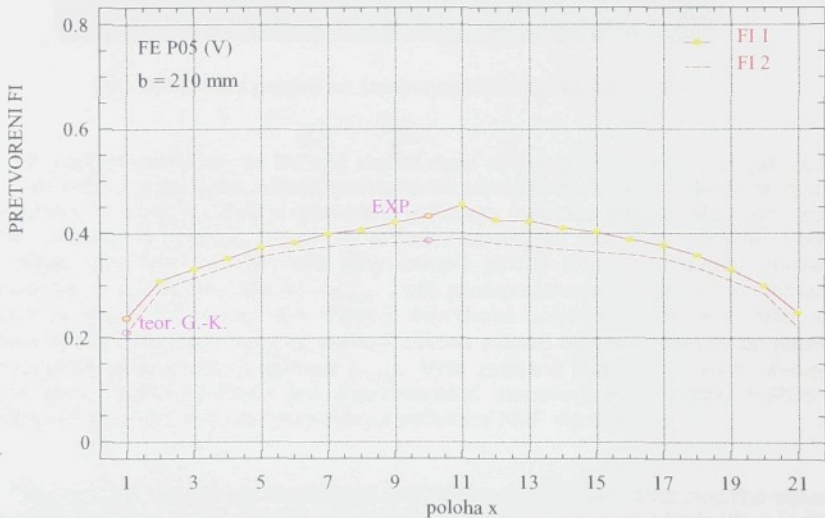
Obr. 6.6.3 Experimentálně určená mezní přetvoření pro spočtenou teor. G-K KMP s využitím postupu dle obr. 6.6.2



Obr. 6.6.4 Rozložení deformací a poloha mezního přetvoření dle mezního stavu definovaného teor. G-K KMP pro zkušební vzorek šířky $b = 30$ mm



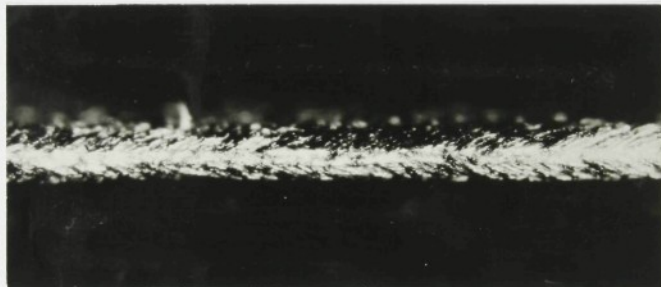
Obr. 6.6.5 Rozložení deformací a poloha mezního přetvoření dle mezního stavu definovaného teor. G-K KMP pro zkušební vzorek šířky $b = 140$ mm



Obr. 6.6.6 Rozložení deformací a poloha mezního přetvoření dle mezního stavu definovaného teor. G-K KMP pro zkušební vzorek šířky $b = 210$ mm

Pro výhodnost kritéria lomu pro určení mezních přetvoření a současné poznatky o významu mikroporuch v procesu vzniku tvárného lomu [44] je věnována pozornost i Ghoshově početní metodě stanovení KMP a její praktické využitelnosti. Způsob výpočtu křivky mezních přetvoření je uveden v kap. 4.4 a vliv některých vstupních materiálových charakteristik na vypočtené hodnoty přetvoření je diskutován v kap. 5.2. Pro porovnání s experimentálně určenými přetvořeními byla vybrána KMP, která je spočtena pomocí lomové deformace stanovené nepřímo z tloušťky plechu v místě lomu.

Přesné určení tloušťky plechu v místě lomu není tak jednoduchou záležitostí, jak by se na první pohled mohlo zdát. Taková úloha úzce souvisí s určováním nejmenší plochy příčného průřezu S_0 dle ČSN EN 10002-1[94]. Dle citované normy se pro tenké plechy dá tato plocha jen obtížně určit, zejména proto, že zde není nijak blíže specifikován postup měření právě šířky lomové plochy. Tloušťku plechu v místě lomu je možné prakticky měřit např. s využitím metalografického makrovýbrusu zachyceného na fotografii. Tento postup však představuje poměrně náročnou proceduru. V případě měření lomových přetvoření na sadě vzorků pro rozmanité stavy napjatosti to představuje velmi náročné laboratorní práce. Z těchto důvodů byla pro tento účel navržena zjednodušená metodika měření, která spočívá v měření šířky lomové plochy pomocí dilenského mikroskopu při čelním pohledu na vzniklou lomovou plochu, viz. obr. 6.6.7.

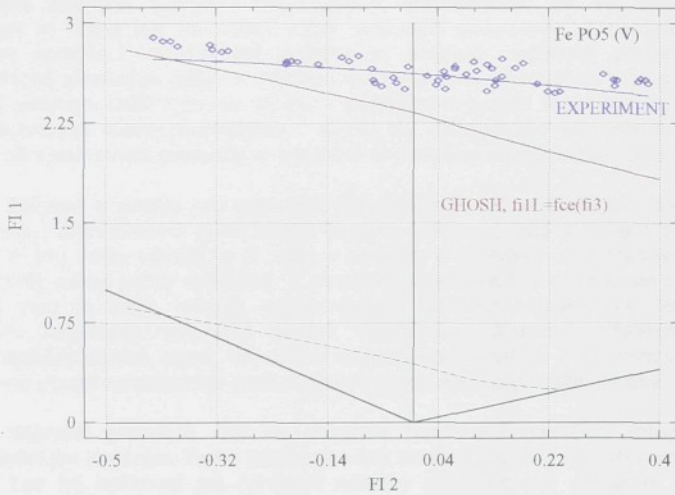


Obr. 6.6.7 Čelní pohled na lomovou plochu (zvětšení $\approx 50\times$)

Při použitím osvětlení se lomová plocha lepší světelnou obrazivostí jeví jako světlá ploška. Její šířka je jednoduše měřena postupně na několika místech po celé délce vybrané lomové plochy a z těchto údajů je stanoveno minimum, nejspíše odpovídající místu vzniku lokálního ztenčení. U zkušebních tyčí pro zkoušku tahem se toto místo obvykle nachází blízko středu tyče. Minimální hodnota šířky lomové plochy je pak vzata jako maximální deformace ve směru tloušťky plechu - φ_{3LOM} . Další postup stanovení zbylých dvou lomových přetvoření je stejný jako v kap. 4.4. Pomocí povrchové deformační sítě je v místě lomu odměřena příčná deformace φ_{2LOM} a pomocí zákona stálosti objemu materiálu při plastické deformaci je konečně spočtena hodnota φ_{1LOM} . Výše zmíněné hodnoty lomových přetvoření jsou pro sadu vzorků použitých pro experimentální stanovení KMP plechu FePO5 (V) zachyceny na obr. 6.6.8, kde jsou porovnány s početními KMP dle Ghoshe.

Závěrem této kapitoly lze konstatovat značný vliv zvoleného kritéria mezního stavu na polohu KMP. Kritérium ztráty stability odpovídající mezi pevností je nejnáročnější z hlediska přípustných deformací a tvoří tak spodní hranici výskytu mezních přetvoření. Je-li za mezní stav považováno porušení materiálu, připouští se největší přetvoření, příslušná KMP je v diagramu nejvýše a tvoří horní hranici možného výskytu mezních přetvoření. Přetvoření odpovídající kritériu mezního stavu pro počátek vzniku lokálního ztenčení, ať již početní KMP dle MK teorie či KMP experimentální, leží v oblasti vymezené křivkami definované dle obou

předchozích mezních stavů. Takto definovaný mezní stav představuje jakýsi kompromis mezi oběma citovanými krajními hranicemi. Ve vztahu ke komplexní analýze přetvoření reálných výlisků je samozřejmou podmínkou stejná metodika stanovení mezních přetvoření jak pro diagramy mezních přetvoření, tak na samotných výliscích.



Obr. 6.6.8 KMP dle Ghoshe (obr. 5.2.7) v porovnání s experimentálně získanými přetvořeními v místě tvárného lomu



Obr. 6.6.9 Pohled na lomovou plochu představující jamkovou morfologii typickou pro tvárný lom ($m_p \rightarrow 1$, $\text{FePO}_5(\text{V})$, zvětšení 2500x)

7. POVRCHOVÉ DEFORMAČNÍ SÍTĚ

Základním předpokladem aplikace komplexní analýzy přetvoření je optimální zvládnutí metod vytváření a vyhodnocování povrchových deformačních sítí. V současné době existuje celá řada způsobů vytváření povrchových deformačních sítí. Při výběru metody jejich vytváření je nutné mít na zřeteli určité omezující požadavky. Z hlediska jejich přesnosti, složitosti vytváření, dostupnosti potřebných zařízení, možností proměňování a celkové spolehlivosti získaných údajů o velikosti realizovaného přetvoření. V případě experimentální metody určování DMP byla, ve vztahu k podmínkám použití a požadavků na sítě kladených, použita metoda elektrochemického (někdy též označeného jako elektrolytické) leptání při použití sít s kruhovými elementy eventuálně doplněnými ortogonálními liniemi.

Zařízení a postup pro nanášení deformačních sítí se bude lišit dle tohoto, zda je síť vytvářena v laboratorních podmínkách či přímo v lisovně, zda je určena pro rozměrově malý vzorek či pro velký nástřih, a to vždy v souladu s ohledem na požadavky přesnosti sítě a produktivity práce jejího vytváření. Z množství existujících a v literatuře popsanych postupů [95-97] jsou to např. sitotisk, ofsetový tisk, gumostereotypie, rytí, fotografická metoda (pozitivní, negativní), chemické leptání, vyjiskřování, laserové vytváření, elektrochemické (elektrolytické) leptání, apod. Ve vztahu ke komplexní analýze přetvoření výlisků je pozornost zaměřena pouze na poslední jmenovanou metodu elektrolytického leptání.

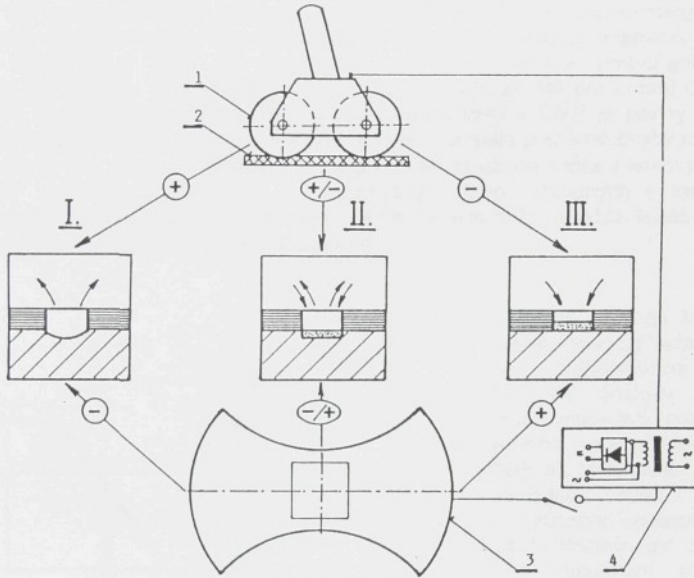
Nejvyšší přesnosti sítě se dosáhne kombinací negativní fotografické metody s elektrolytickým leptáním. Tento postup je však značně náročný na vybavení a je velmi pracný [6,98]. Lze ho aplikovat jak na malé nástřihy potřebné pro vytváření diagramů mezních přetvoření tak (ovšem s určitými obtížemi) i na velké nástřihy. Obojí ovšem v laboratorních podmínkách. V případě, že není velmi vysoká přesnost sítě bezprostředně vyžadována, je jednodušší a produktivnější použít pro oba typy zmíněných nástřihů metody elektrolytického leptání pomocí speciálních textilních sít s vytvořeným obrazem požadované sítě, tzv. šablon. Tento postup je využitelný nejen v laboratoři, ale i přímo v podmínkách lisovny. Zaleptaná síť se nesetře tak snadno jako síť tvořená barvou (např. sitotisk, gumostereotypie, fotografická metoda). S ohledem na charakter řešené problematiky byla upřednostněna právě metod vytváření sítí pomocí textilních šablon, které je přednostně věnována pozornost v následujících kapitolách.

7.1 VYTVÁŘENÍ SÍTÍ POMOCÍ ŠABLON

Vlastní postup vytváření sítě pomocí šablony je v podstatě velmi jednoduchý. Na očištěný nástřih se položí příslušné sito - šablona a na něj se přiloží plstěná podložka nasáklá vhodným elektrolytem, obr. 7.1.1. Při přímém průchodu elektrického proudu elektrolytem mezi plechem a pojezdovými válečky (event. elektrodou v podobě plochého "razítka"), které jsou vedeny po plstěné podložce zvolenou rychlostí (cca 20 cm min^{-1}), dochází k vytvoření obrazu sítě. Soubor pomůcek a zařízení pro vytvoření deformační sítě na povrchu nástřihu se skládá ze zdroje elektrického proudu, vhodných elektrod, příslušných šablon s obrazem sítě, plstěné podložky, rozmanitých elektrolytů a dalších pomocných roztoků (roztok neutralizační a pro výplach šablony).

Zdroj s příslušnými elektrodami lze jednak zakoupit u renomovaných firem jako je např. Erichsen GmbH (SRN), Etch-Mark Ltd. (Anglie) nebo TechLab (Francie), jednak si je vyvinout a vyrobit svépomocí. Toto zařízení vyvinuté a používané na KPT je na obr. 7.1.2. Zdroj elektrického proudu, schopný krátkodobě poskytnout proud řádově desítek ampér o nízkém napětí (stejnoseměrný 18V, i střídavý 15V) je doplněn elektrodami v podobě malých a velkých válečků či plochých "razítek". Malé válečky spolu s razítkovými elektrodami se používají pro

malé nástřihy, velké válečky jsou určeny pro větší nástřihy. Elektrolyt je tvořen roztoky kovových solí a kyselin spolu s dalšími přísadami (inhibitor koroze, vhodné smáčedlo apod.). Při přímém průchodu elektrického proudu dochází dle zvolené polaroty k vyleptání či zabarvení obrazu sítě nebo k obojimu (viz. obr. 7.1.1). Elektrolyt lze při známé receptuře připravit z dostupných surovin přímo v laboratoři, v dnešní době se však jeví jako výhodnější jeho zakoupení přímo u výše zmíněných renomovaných firem. Otázka šablon a přesnosti měření je pak obsahem následující kapitoly.



Obr. 7.1.1 Schéma elektrolytického leptání : 1 - pojezdové válečky, 2 - šablona a plstěná podložka s elektrolytem, 3 - nástřih, 4 - zdroj elektrického proudu (I, II, III, - detaily plechu se šablonou představující vliv polaroty el. proudu na charakter vyleptané sítě

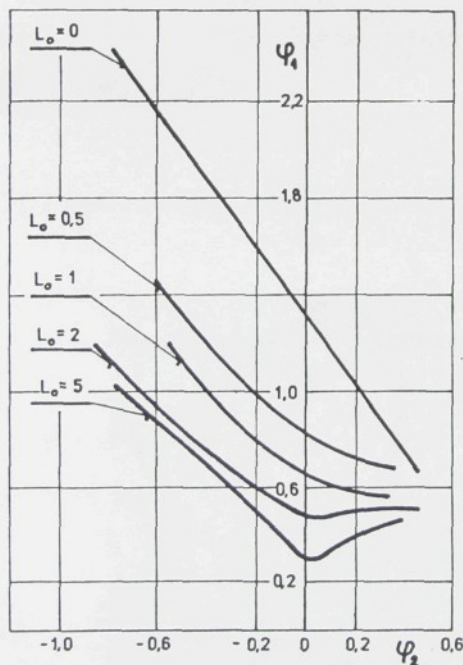


Obr. 7.1.2 Zařízení pro elektrolytické leptání povrchových deformačních sítí v vyvinuté a vyrobené na KPT

7.2 LEPTACÍ ŠABLONY, KVALITA SÍTĚ A JEJÍ HODNOCENÍ

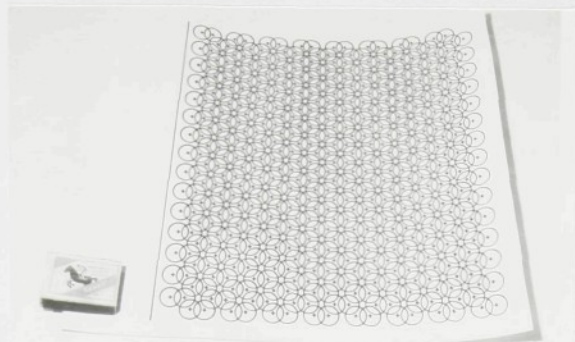
Ve vztahu ke komplexní analýze přetvoření, po provedeném rozboru podmínek použití a požadavků na síť kladených, se jeví jako nejvhodnější použití šablon s kruhovými elementy doplněnými pro některé případy globálního mapování toku materiálu na výliscích ortogonálními liniemi (tzv. síť typu "Goodwin-Keeler").

Pro určování přetvoření v případě nevýrazného gradientu se používá uspořádání kruhových elementů sítě v řadách, které představuje poměrně řídké pokrytí sledované plochy. Větší hustoty pokrytí plochy lze dosáhnout těsným uspořádáním elementů nebo jejich překrytím. Využitelnost DMP ve vztahu ke komplexní analýze přetvoření na výlisku předpokládá použití sítě se stejným elementem jak pro výlisek, tak pro určení DMP (kap. 8). Vliv velikosti použitého parametru sítě na mezní přetvoření v DMP je patrný z obr. 7.2.1. Požadavky rovnoměrnosti přetvoření v ploše elementu a malé poměrné chyby měření ustálily parametr sítě na $\varnothing I_0 = 2,5$ mm. Šablony pro leptání sítí (ať už jde o síta v kovových rámech či "samonosné" šablony) lze zakoupit u renomovaných firem citovaných v kap. 7.1. Tato komerčně vyráběná síta však mají společnou nevýhodu v tom, že nenabízí husté uspořádání s překrývajícími se elementy pro parametr 2,5 mm.



Obr. 7.2.1 Vliv parametru sítě na zjištěné hodnoty mezních přetvoření [99]

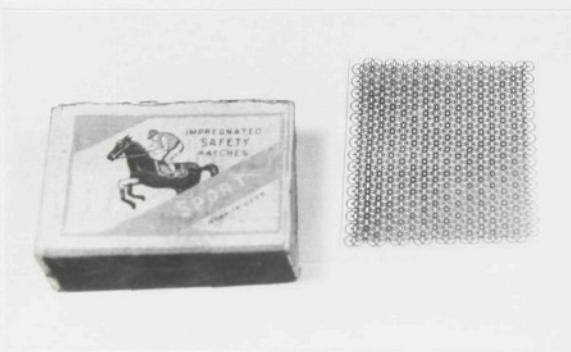
Z těchto důvodů byla vlastními silami vyvinuta šablona s hustě se překrývajícími elementy. Přesnost šablony je primárně dána přesností použité filmové předlohy (matrice) s obrazem sítě. Matrice byla proto kreslena na kreslicím stole Digigraf s parametrem elementu $\varnothing 15$ mm. Tento průměr byl zvolen proto, aby následným šestinásobným zmenšením kartografickou technikou bylo dosaženo zvoleného parametru $\varnothing 2,5$ mm. Na obr. 7.2.2 je originál kresby s parametrem elementu 15 mm, zatímco na obr. 7.2.3 je již zmenšená síť s parametrem 2,5 mm. Oblast pokrytá sítí je v tomto případě 50×50 mm. To na vzorky pro určení DMP plně postačuje. Pro použití na výlisek je však tato plocha příliš malá, a proto pro použití překryté sítě na výlisku byla obdobným postupem zhotovena matrice pokrývající plochu 180×220 mm. Vlastní šablona pak byla zhotovena klasickou technikou výroby sít pro sítotisk používaný v textilním průmyslu.



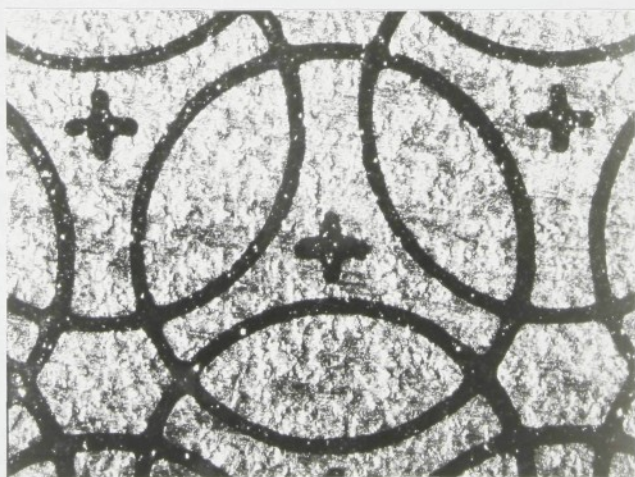
Obr. 7.2.2 Matrice sítě s parametrem 15 mm

S ohledem na přesnost stanovení přetvoření by měla být na plechu vytvořená síť nejen pěkná na první pohled, ale zejména dobře čitelná, s ostrou kresbou, a to i při zvětšení v okuláru mikroskopu. Takový požadavek však jednoznačně splňuje jen síť vytvořená leptáním v kombinaci s metodou fotografickou [698], viz. obr. 7.2.4.

V případě použití textilních šablon, kdy elektrolyt způsobující leptání prolíná drobnými otvory v osnově textilie, které nejsou zakryty emulzí, však vzniklá kresba nutně vykazuje určité nedostatky. Obraz je méně kvalitní, s neostřím přechodem mezi čarou tvořící kresbu sítě a plechem. Čím menší je pak parametr elementu deformační sítě, tím jsou nepříznivější poměry pro vznik kvalitní sítě. Všechny zde uvedené faktory je nutné vzít v úvahu při výběru techniky vytváření příslušné sítě vzhledem k jejímu konkrétnímu použití tak, aby dosažený výsledek byl vždy co nejoptimálnější z hlediska, pracnosti, množství, úplnosti a přesnosti dosažených výsledků.

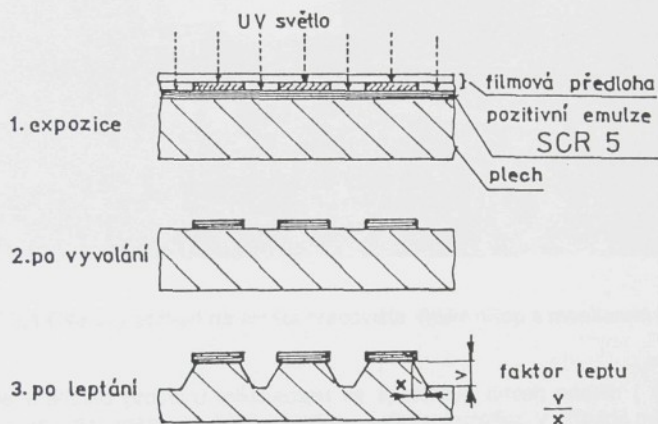


Obr. 7.2.3 Pozitiv zmenšené sítě již s parametrem 2,5 mm



Obr. 7.2.4 Detailní fotografie deformační sítě vytvořené kombinací metod fotografické a elektrolytického leptání (zvětšení 25x)

Z rozboru nanášení a vyhodnocení deformačních sítí vytvářených elektrolytickým leptáním [6,98,100] vyplynuly jak nesporné přednosti metody využívající šablon, tak také jejich nedokonalosti. K jejich přednostem jistě náleží větší produktivita práce ve srovnání s jinými metodami. U nástřihů větších rozměrů je to pak v podstatě jediný produktivní způsob vytvoření sítě potřebné k analýze přetvoření výlisku. Nedostatkem je pak nižší kvalita kresby sítě, která je však této metodě zcela vlastní a je jí nutno eliminovat v co největší míře perfektním zvládnutím technologie leptání spolu se zdokonalením metod jejich proměřování. Kvalita a zejména tvarová a rozměrová přesnost sítě není dána jen matricí, ale může být negativně ovlivněna i ve fázi jejího leptání. To může být zapříčiněno působením nejrůznějších jevů, které ovlivňují tzv. *podleptání*. Velikost podleptání je charakterizována veličinou nazývanou *faktor leptu*, což je poměr hloubky leptu (V) k velikosti podleptání (x), obr. 7.2.5.



Obr. 7.2.5 Schematické naznačení působení faktoru leptu na přesnost sítě

Při neměnných podmínkách během leptání sítě je i faktor leptu konstantou, která závisí na charakteru leptaného materiálu, složení leptadla a celkově na technice provedení leptu. Podleptání ve svých důsledcích ovlivní tloušťku čáry sítě a tím i výchozí parametr sítě. Rovněž zapříčiní odlišnost (tvarovou a rozměrovou) vyleptaného elementu od téhož na matrici. Tento fakt je nutné brát v úvahu a při každé změně v postupu nanášení sítě na plech je důležité vždy znovu stanovit hodnotu výchozího parametru l_0 (jako výběrový průměr z náhodného výběru většího počtu elementů). Důležité je rovněž rozhodnutí zda měřit na elementu sítě jeho *vnitřní* rozměr, či měřit *střed čáry*. V případě nedostatečné kvality sítě bezprostředně analyzovat příčiny tohoto stavu, a pak vhodným zásahem do procesu leptání tyto nedostatky eliminovat. Přesnost spočtené hodnoty mezního přetvoření je blíže diskutována v [6].

7.3 SYSTÉMY PROMĚŘOVÁNÍ DEFORMAČNÍ SÍTĚ

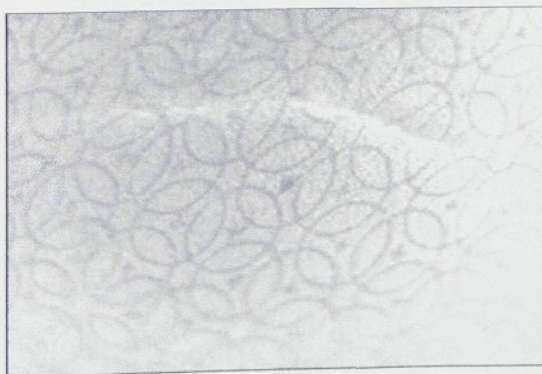
Realizace komplexní analýzy přetvoření představuje proměření značného množství vzorků. A to jak pro určení DMP, tak i většího počtu výlisků (odstupňované tahy, historie přetvoření, varianty změn technologických podmínek tažení atd.). Zvládnout proměření velkého počtu elementů sítě nutně vyžaduje použití adekvátních měřících systémů. Takový systém by měl dosahovat stejné či vyšší přesnosti měření, než s jakou je vytvořena vlastní síť,

a který by umožnil proměřit příslušný počet zkušebních těles s vyhovující produktivitou práce. V podmínkách katedry tváření a plastů je pro účely proměřování deformačních sítí používán modulový měřicí systém dle obr. 7.3.1. Jádrem systému tvoří měřicí mikroskop ZEISS BK 70x50 spolu s doplňkovým vybavením sestávajícím se z inkrementálních čidel (IRC) a mikropočítače pro vyhodnocení výsledků.



Obr. 7.3.1 Celkový pohled na měřicí pracoviště (mikroskop s monitorem počítače)

Do upravené měřicího prostoru mikroskopu se spolehlivě umístí nástřih ($\varnothing$ 210 mm) na magnetickém stojánku, který umožňuje vhodné nastavení vzorku. V případě měření přetvoření velkých výlisků je nutno z nich nejprve vydělit kritické oblasti se sítí v takové velikosti, aby je bylo možné umístit na měřicí stůl mikroskopu. Zde se uchycují do stojánku s několika stupni volnosti v různých osách, aby byla opět zaručena správná poloha měřeného elementu vůči optické ose. Je zřejmé, že takové proměřování velkorozměrného výlisku je značně náročné a velmi pracné. V souladu s požadavky na zvýšení komfortu a produktivity měření je vyvíjen nový měřicí systém, kdy je deformovaná síť snímána TV kamerou již při vypínání vzorku v nástroji (obr. 6.1.3) a získaný obraz, viz. obr. 7.3.2, je následně vyhodnocen příslušným programem.



Obr. 7.3.2 Obraz deformované sítě určený k následnému vyhodnocení

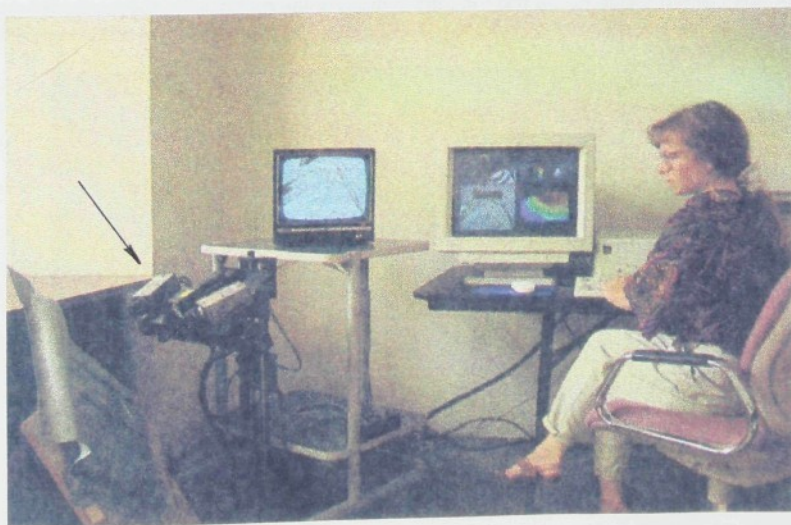
7.3.1 Automatizované měřicí systémy

V současné době se již nabízí celá řada nejrůznějších měřicích systémů využitelných ve vztahu k analýze přetvoření, které umožňují měření velkých výlisků bez jejich dělení na dílčí malé části, např. [101-104]. Následně je proto uvedena stručná charakteristika některých modelů určených právě pro velkorozměrné výlisky.

Takový produktivní, plně automatický systém měření přetvoření pracující s vysokou přesností, pracovním komfortem a velkou rychlostí měření a vyhodnocení výsledků se skládá z minikamery s integrálním osvětlením měřeného místa, počítače řady PC s výkonnou videokartou a speciálním programovým vybavením [104]. Podmínkou automatické činnosti je dostatečně kontrastní a neporušená síť. V případě méně kvalitní sítě přechází systém na poloautomatický režim vyžadující spolupráci obsluhy.

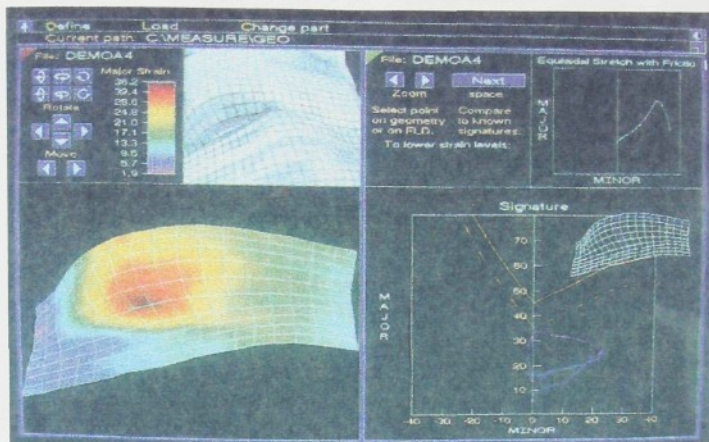
Před zahájením měření se systém kalibruje na výchozí nedeformovanou síť. Tento vstupní údaj je uchován v paměti počítače. Je-li síť dobře čitelná, měření je ihned provedeno a výsledná přetvoření jsou prezentována v DMP. V poloautomatickém režimu, kdy není výsledek ihned poskytnut pro nejasné kontury sítě, může do procesu měření zasáhnout obsluha. Zásah spočívá v tom, že se manuálně na obrazovce monitoru pomocí jednotlivých bodů označí obrys příslušného elementu sítě (v případě elipsy stačí pět bodů) a program sám si již doplní obrazec na elipsu a provede výpočet přetvoření. Výsledná chyba měření v rozmezí 1,4% až 3,2% je ovlivněna celou řadou faktorů a popis jejich jednotlivých složek by si vyžadoval mnohem více prostoru, než jaký je vymezen touto informativní kapitolou (zejména velmi záleží na charakteru kresby sítě, je-li síť elektrolyticky leptána přes síto či vytvořena preciznější technikou a pod.).

Takové systémy snadno proměří nejen deformace v určité omezené oblasti, ale jsou schopny určit i rozložení přetvoření ve zvoleném řezu výlisku nebo lze celkově pořádit i prostorovou mapu přetvoření příslušné kritické oblasti výlisku. Jako příklad lze uvést systém ASAME (Automated Strain Analysis and Measurement Environment) [105]. Systém je nabízen ve dvou variantách - jako pojízdný, viz. obr. 7.3.3., nebo jako rozměrově úspornější stolní verze. Princip činnosti systému spočívá v zachycení povrchu vybrané oblasti výlisku opatřeného deformační sítí pomocí dvou kamer, viz. obr. 7.3.3.



Obr. 7.3.3 Pojízdná varianta systému ASAME při proměřování výlisku

Po sejmutí obrazu deformační sítě jsou stanoveny prostorové souřadnice povrchu výlisku a z nich je vytvořena prostorová geometrie výlisku. Následně jsou vypočtena přetvoření. Pak je možné zobrazit přetvoření příslušné partie výlisku, jejich konfrontace s DMP, zobrazení rozložení přetvoření ve zvolených řezech v různých souřadných osách a konečně i souhrnné zobrazení výsledných dat. Jedním záběrem lze zachytit až 400 elementů sítě. Detailní pohled na obrazovku monitoru se zobrazenými souhrnnými výsledky je na obr. 7.3.4.

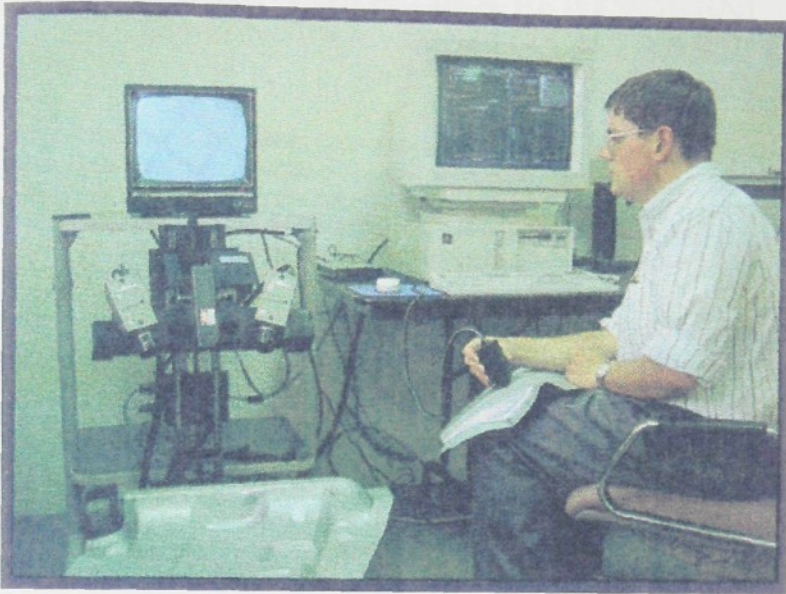


Obr. 7.3.4 Detailní pohled na obrazovku monitoru s naměřenými výsledky

Výše popsaný systém pro velkoplošné vyhodnocování přetvoření lze vhodně doplnit i přídatnou jednotkou GPA (Grid Pattern Analyzer). Ta je v podstatě představována minikamerou se zabudovaným osvětlením, která snímá obraz pouze jednoho jediného elementu deformační sítě, obr. 7.3.5. Program je uzpůsoben pro snímání minimálně deseti různých typů sítě, a to jak samostatných, tak i dotýkajících se a překrývajících se elementů, kruhových i čtvercových. Použití kombinovaného zařízení pro automatické měření sítě ASAME spolu GPA jednotkou je patrné na obr. 7.3.6.



Obr. 7.3.5 Přídatná jednotka GPA pro detailní proměření sítě



Obr. 7.3.6 Kombinované zařízení pro automatické měření
sítě ASAME spolu GPA jednotkou

Nutnost operativního použití výkonných měřicích systémů v různých podmínkách, jejich snadná manipulovatelnost a možnost přenosu, jakož i nutnost měření různých oblastí na velkorozměrných výliscích, vedly nakonec k vytvoření systému ASAME TM (Target Model). Tento systém, který je schopen provést analýzu tak jako výše zmiňované kombinované zařízení a pracující na obdobném principu, se skládá z přenosného počítače a digitálního fotoaparátu Kodak. Přesnost měření tohoto systému při sejmutí tří snímků z různých úhlů při použití objektivu s ohniskovou vzdáleností 50 mm je okolo $\pm 2,5\%$.

Uvedené měřicí systémy spoří čas potřebný na analýzu přetvoření složitého výlisku tím, že velmi rychle poskytnou rozsáhlé informace o rozložení deformací na výlisku. Jsou na vysokém stupni miniaturizace, snadno přenosné a operativně použitelné v různých provozech. Množství rychle získaných informací lze bezprostředně operativně využít při řešení problémů jak při sériovém lisování tak při ožiování nových lisovacích nástrojů s účinnou zpětnou vazbou pro konstruktéry výlisků i lisovacích nástrojů. Tímto způsobem se výrazně urychlí celá analýza přetvoření, která tak může operativně poskytnout důležité informace potřebné pro úspěšné zásahy do technologie lisování.

8. KOMPLEXNÍ ANALÝZA PŘETVOŘENÍ VÝLISKŮ NEPRAVIDELNÝCH TVARŮ

Tato metodika je zaměřena zejména na případy, kdy dochází u výlisků k výskytu trhlin a nepřípustným zvlněním plechu. Je-li správným způsobem využita, má všechny předpoklady být mocným nástrojem k řešení zmetkovitosti při tažení výlisků [1]. V kap. 3 až 7 byla obsáhle diskutována problematika stanovení mezních stavů přetvoření, která jsou nezbytná pro konfrontaci s přetvořeními na reálných výliscích. V následujících kapitolách bude popsána vlastní metodika komplexní analýzy přetvoření.

8.1 VÝHODY KOMPLEXNÍ ANALÝZY PŘETVOŘENÍ

Možnosti dané komplexní analýzou přetvoření lze shrnout do několika základních bodů:

1. S její pomocí lze "zmapovat" přetvoření na celém výlisku, takže je možné lépe porozumět deformačním procesům odehrávajících se v jednotlivých částech výlisku během celého procesu tváření výchozího nástřihu v hotový výlisek.
2. Pomáhá významně při hledání příčin ztrát stability procesu plastického přetvoření. Zda je způsobeno nevhodnými technologickými podmínkami tažení nebo je to spíše záležitost konstrukce výlisku či vlastního nástroje. Zároveň umožní i objektivně popsat odezvy na doplňkové technologické zásahy.
3. Vede ke snížení rizika zmetkovitosti tím, že i u dobrých dílů bude známo, jak blízko kritické hranici ztráty stability se pohybují deformace na výlisku.
4. Umožní vytypovat použití jak optimálního mazadla pro tažení s ohledem na charakter povrchu plechu tak usnadní i hledání optimální rovnováhy mezi přetvořením posuvy a vypínáním.
5. Poskytne nezbytné informace při rozhodování jaká kombinace mechanických vlastností plechu, jeho tloušťky a charakteru povrchu je optimální z hlediska bezproblémové výroby.
6. Takto získané zkušenosti povedou nejkratší cestou k cíli i při zkoušení nových materiálů, se kterými dosud nejsou zkušenosti.
7. Umožní rychlejší získání cenných zkušeností pro začínající odborníky - nástrojaře i lisaře.

Analýza přetvoření samozřejmě nenahradí zkušeného odborníka a sama o sobě za nikoho nic neudělá ani nevyřeší. Je to jen velmi užitečný "nástroj", který v rukou znalého odborníka učiní celou záležitost při odstraňování nadměrné zmetkovitosti při sériovém lisování nebo při zkoušení nového nástroje rychlejší, snadnější a přesnější. Oba tyto případy totiž spolu velmi úzce souvisí. O dosažení co nejmenší zmetkovitosti se rozhoduje jak ve fázi konstrukce samotného výlisku a nástroje na jeho výrobu, tak samozřejmě i ve fázi ožívání nástroje před jeho uvedením do sériového provozu.

8.2 ZÁKLADNÍ FILOZOFIE OŽÍVOVÁNÍ TAŽNÉHO NÁSTROJE

Uvádění nového nástroje do provozu - jeho ožívání nebo jinak řečeno také ladění - je činností značně komplikovanou a časově náročnou. Celá tato záležitost je stále postavena na citu pro věc a umění techniků i nástrojařů, i když je snahou aby i do této oblasti více pronikl vědecký přístup. Na druhé straně vlastní filozofie ožívání nástroje je ve své podstatě jednoduchá a metoda komplexní analýzy přetvoření znamená významný pokrok na cestě snižování zmetkovitosti a zvyšování konkurenceschopnosti finálního výrobku. Cílem je pak

spolehlivě fungující nástroj s minimální zmetkovitostí po celou dobu své životnosti. Postup hledání optimálního řešení se bude měnit i podle velikosti série příslušného vylisku, která ovlivní časovou náročnost celého procesu. Pro vylisky středních či velkých rozměrů, u kterých si analýza již vyžaduje určitý nutný čas k řešení, je obvyklý následující postup:

- ☐ Numerickou simulací optimalizovat jak konstrukci vylisku a nástroje, tak i volbu materiálu a technologických podmínek řešení.
- ☐ Výroba nástroje, který bude produkovat daný vylisek s přijatelným výsledkem.
- ☐ Vyladění nástroje tak, aby se lisovaly vylisky co nejspolehlivěji a nejlevněji.
- ☐ Úspěšná realizace celého procesu ožívování nástroje v co nejkratší době.

První bod je dnes pro moderní výrobu již samozřejmou nutností (naznačení využití numerických simulací je v kap. 10). Druhý bod je pak v celé záležitosti obvykle ten nejdůležitější. Třetí bod je jistě také pochopitelný, neboť výroba musí být co nejlevnější (o otázce zisku a konkurenceschopnosti výrobce není třeba diskutovat!). A rozumně vynaložený čas na oživení nástroje se vrátí v jeho spolehlivém chodu a v maximální úspoře materiálu při minimální zmetkovitosti. Tak jak se používají stále kvalitnější materiály a cena plechu je stále vyšší, lze zvýšit ekonomičnost výroby nejen minimalizováním zmetkovitosti, ale i cestou zmenšování velikosti nástřihu, a i vyřešením celé technologie výroby tak, aby bylo možno použít stále co nejlevnější materiál. Správné a úspěšné naplnění předchozích stručných pravidel ale vyžaduje i některá další doplňková pravidla, jako např. :

1. POUŽITÍ VHODNÝCH VÝZKUMNÝCH METOD

Veškerá činnost musí být vedena stejnými pravidly jako každá jiná výzkumná či vědecká práce. Jednou z nezbytných podmínek pak je i vedení řádné, podrobné a přehledné dokumentace. Je nutné vést záznamy o podmínkách každého experimentu a o dosažených výsledcích, včetně průběžné kontroly a hodnocení trvátelnosti použitého plechu (je-li to potřeba, pak uchovat i příslušný pokusný vylisek po nezbytné nutnou dobu). Obvykle se osvědčuje dobře zavedená praxe měnit při pokusu v daném čase vždy jen jeden parametr, i když i zde by se dala najít výjimka. Např. na začátku zkoušení, kdy je zřejmé, že bude nutno udělat několik změn, tak je prostě realizovat najednou. Ale později, když nastává závěrečná etapa jemného dolaďování, je nejlepší držet se zásady změny pouze jednoho parametru v daném čase.

2. ANALYZOVÁNÍ VLASTNÍHO PROBLÉMU

Většinou analýza spočívá v tom, že se porovnávají vylisky zmetkové s vylisky úspěšně vytaženými. Nebo jinak, porovnává se vylisek následně zhotovený s vyliskem vylisovaným v předchozím kroku, a to v souvislosti s danými technologickými podmínkami. Použití povrchové deformační sítě pak značně tuto etapu srovnávání usnadní. Pro vylisky je výhodné použít deformační síť typu "Goodwin-Keeler" s kruhovými elementy i ortogonálními liniemi (viz. kap. 7.2). Ortogonální linie lépe popíší celkové posuvy plechu, kruhové elementy pak umožní stanovit směr a velikost maximálního přetvoření (a tím i rovněž minimálního přetvoření, které je kolmé na předchozí směr) a přesně stanovit hodnoty přetvoření $[\varphi_2, \varphi_1]$ v daném místě. To je velmi důležité, neboť vznik trhliny je obvykle záležitostí malé kritické oblasti. Získané hodnoty přetvoření lze pak konfrontovat s mezními hodnotami zachycenými v podobě diagramů mezních přetvoření. Je nutné mít vždy na paměti, že výsledkem veškeré činnosti musí být nástroj, který bude produkovat co nejekonomičtější. Za tím účelem je samozřejmě nutné analyzovat i vylisky bez vad. Pomocí analýzy přetvoření dobrého vylisku spolu s DMP lze totiž zjistit, jak "blízko" je příslušná oblast vylisku kritickému stavu. Pro minimalizaci zmetkovitosti po celou dobu výroby příslušného dílu je nezbytné nástroj vyladit tak, aby přetvoření na příslušném vylisku nebyla příliš blízko mezního stavu. Jedině tak lze zajistit, že v budoucnu i při malých změnách podmínek výroby (např. výkyvy v kvalitě a tloušťce zpracovávaného plechu, teplotě při lisování, změně podmínek mazání, určité opotřebení nástroje, přeseřízení lisu, apod.) nebudou vznikat zmetky.

3. ŘEŠENÍ PROBLÉMU

Jakmile se podaří ozřejmit, co se s plechem děje při tváření, je pak již jen krůček ke stanovení příslušného řešení. Ovšem tato řešení nepřichází zcela automaticky, ale jsou silně závislá na zkušenostech řešitele.

8.3 VYUŽITÍ DIAGRAMŮ MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ V ANALÝZE PŘETVOŘENÍ

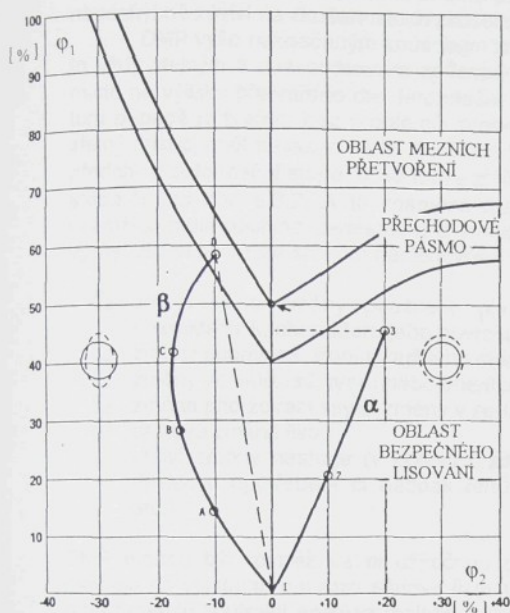
Důvodů k využívání diagramů mezních přetvoření v souvislosti se zjišťováním přetvoření reálných výlisků je celá řada. Některé jsou zřejmé na první pohled, jiné si vyžadají krátké vysvětlení.

1. DMP lze přirovnat k autopapě při cestování. Umožňují přehledně zaznamenat kde jsme byli, kde jsme, kam se chceme dostat a jaká úskalí jsou před námi. Je to přehledný obraz přetvoření, kterými musí tvořící se výlisek projít na své cestě z rovinného nástřihu k dílu konečného tvaru.
2. Mapa DMP je rozdělena do několika deformačních oblastí (obr. 6.5.3):
 - v DMP nejvýše položená oblast (nad PMP) je oblastí nepřipustných přetvoření z hlediska přijaté definice mezního stavu, tj. vyskytují se zde přetvoření nad mezí pevnosti, lokální ztenčení nebo dokonce trhliny
 - oblast pásma mezních přetvoření (PMP), kde lze očekávat výskyt mezních přetvoření s určitou pravděpodobností (0% až 100%) danou polohou v PMP,
 - oblast pod PMP, tzv. přechodové pásmo, zahrnuje nebezpečná přetvoření, která se nemusí projevit při lisování dnes, ale třeba zítra. Čili dnes úspěšně lisovaný díl bude zítra vykazovat zvýšenou zmetkovitost, a to z toho důvodu, že přetvoření v ohrožených místech výlisku je příliš blízko hodnotám kritickým. Ale tato skutečnost není zřejmá, pokud se na výlisku skutečně trhlinka neobjeví. Právě na toto nebezpečí DMP spolehlivě upozorní. Jinými slovy přechodové pásmo znamená, že dnes se sice lisuje bez problémů, ale zítra problémy přijít mohou. Šířka tohoto přechodového pásma pak bude opět záviset na mnoha faktorech jako je např. stálost kvality použitého plechu, kvalita lisovacího nástroje a jeho odladění, funkční spolehlivost lisu, spolehlivost v dodržení technologických podmínek lisování apod.,
 - část pod přechodovým pásmem pak představuje oblast přípustných (bezpečných) přetvoření čili jedná se o oblast bezpečného lisování.
3. Jak je již z předchozích kapitol známo (kap. 6.4), každý materiál má svůj vlastní DMP. Ty se liší dle tloušťky plechu, jeho kvality, atd. Z polohy přetvoření jednotlivých míst výlisku v DMP lze usuzovat, zda změny kvality zpracovávaného plechu způsobí výrobní problémy či naopak.

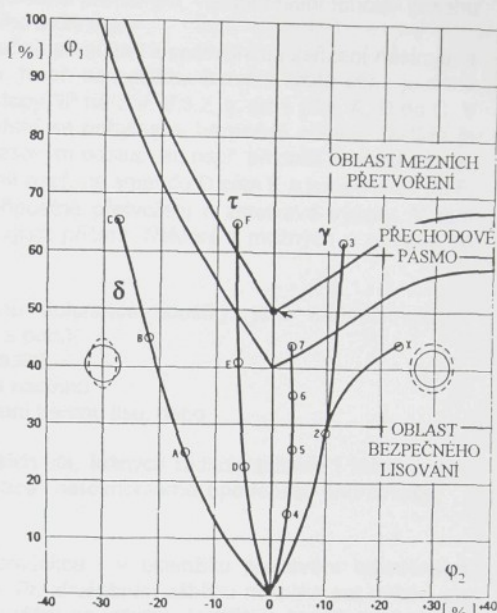
Vlastní způsob využití DMP pro komplexní analýzu přetvoření je zřejmý z popisu v následující kapitole.

8.3.1 Metodika využití DMP pro komplexní analýzu přetvoření

Způsob vynášení deformací do DMP lze popsat následujícím způsobem. Uvažujeme určitou deformační stopu označenou jako " α " na obr. 8.3.1.



Obr. 8.3.1 Způsob vynášení deformací do DMP [1]



Obr. 8.3.2 Změna deformační stopy v případě neúspěšného lisování

Element dosud nepřetvořené deformační sítě vykazuje na začátku tažení nulové hodnoty obou hlavních normálních přetvoření, $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$. Výchozí bod deformační stopy, označen jako "1", je proto v počátku souřadného systému DMP. Nástrih je postupně tvářen v nástroji, kdy je výlisek tažen v odstupňovaných hloubkách. Po každém odstupňovaném dílčí tahu je tvořící se výlisek vyjmut z nástroje a v daných místech jsou změřeny změny rozměrů původně kruhových elementů deformační sítě. Následně vypočtená přetvoření jsou vynesena do DMP, viz. body 2 a 3 na obr. 8.3.1. V tomto případě se jedná o tzv. dvoustupňovou deformační stopu (úsek 12 a úsek 23), viz. kap. 6.4. V případě jiných, složitějších, tvarů deformačních stop, např. stopa "β" na obr. 8.3.1, by bylo nutné učinit mnohem více než dva výše popsané dílčí kroky. Realizace velkého počtu krátkých úseků, které by velmi přesně popsaly danou stopu, je však prakticky velmi obtížně proveditelná pro svou velkou pracnost. Proto se volí omezený počet kroků, úseků deformační stopy, který by byl rozumným kompromisem a popsal stopu s přijatelnou přesností i pracností. V případě, že se neprovede postupné tažení výlisku a deformační stopa je určena jen dvěma body ("1" a "konečný bod"), nezbyvá, než vytvořit deformační stopu v podobě úsečky, která je spojnicí obou známých bodů - lineární deformační stopa (což je vhodné jen za předpokladu proporcionálního přetvoření). Zde je potřeba si uvědomit (viz. kap. 6.4), že v případě nelineární deformační stopy může být dosažená intenzita přetvoření větší (a tím i vyčerpání plastičnosti), než kolik signalizuje poloha samotného koncového bodu deformační stopy.

Jestliže se vyskytnou při lisování obtíže, pomocí DMP je možné zvolit jinou deformační stopu, tak jako zmíněná automapa umožní změnu trasy, viz. např. obr. 8.3.2. Stopa "γ" (1-2-3) vede evidentně ke zmetkovému výlisku. Správným využitím DMP lze deformační stopu změnit, např. v bodě 2 namísto pokračování do bodu 3 zahnout k bodu x. Praktická realizace změny trajektorie přetvoření pak ale závisí na rozhodnutí zkušební technika. Jinými slovy,

zatímco DMP poskytne vodítko ke změně trajektorie přetvoření, vlastní řešení tohoto zásahu nepochybně závisí na zkušenostech zkušební technika.

DMP výše naznačeným způsobem značně pomůže i k optimálnímu seřízení nástroje, a to vždy stejným a opakovatelným způsobem. Např. na začátku lisování určité série je dané místo na výlisku přetvářeno dle deformační stopy "δ" na obr. 8.3.2, tj. od 1 přes A, B do C. V tom případě je tvárění bez problémů, přetvoření se pohybují v bezpečné oblasti. Jestliže je stejný nástroj opět nasazen na lis s určitým časovým odstupem, např. při další lisovací dávce, předchozí deformační stopa "δ" se může změnit např. na směr do D přes E a konečně až do F, stopa "τ" na obr. 8.3.2. A to znamená nepřipustné přetvoření a zmetkové výlisky. V tom okamžiku musí obsluha zareagovat a ihned zjistit příčinu. Některé z možných a obvykle se vyskytujících příčin lze shrnout následovně:

- ☐ Jedná se o změny použitého plechu (tolerance tloušťky, jeho materiálových charakteristik, charakteru jeho povrchu a pod.),
- ☐ změny podmínek tření (použitého mazadla),
- ☐ změny ve velikosti, tvaru nebo orientaci nástřihu,
- ☐ změna přidržovací síly či změny v seřízení beranu lisu, nebo
- ☐ celková změna lisu
- ☐ určité změny nástroje (v oblasti brzdících lišt, tažných rádiusů tažnice i tažníku v důsledku opotřebení či naopak renovace, nerovnoměrné opotřebení přidržovače, atd.)

DMP mohou být rovněž velmi užitečnou pomůckou i v okamžiku předávání odladěného nástroje do vlastního provozu sériové lisovny. Po zkušebním záběhu několika set výlisků se opět provede kontrolní analýza rozložení přetvoření na výlisku. Jestliže je použit pro lisování typický a v budoucnu běžně používaný plech a všechna přetvoření padnou do bezpečných oblastí lisování v DMP, pak lze nástroj předat k sériovému lisování bez obav. Jestliže ale přetvoření padnou do přechodového pásma, je ještě nutné určité doseřízení soustavy stroj - nástroj. Avšak v případě, že přetvoření jsou v kritické oblasti PMP, pak by se mělo učinit rozsáhlejší přeseřízení zmíněné soustavy dříve, než bude předán k provoznímu použití.

Lisovací podmínky se samozřejmě stále během použití nástroje mění. Např. v důsledku jeho opotřebení, seřízení lisu atd. Zmapování přetvoření na výlisku při náběhu lisování, a pak pravidelně v určitých časových intervalech může velmi operativně a včas odhalit počínající změny v rozložení a v historii přetvoření na výlisku. V případě změn směrem k nepřipustným přetvořením pak učinit včas účinná opatření k zamezení zvýšení procenta zmetkovitosti.

8.4 VLASTNÍ METODIKA ANALÝZY PŘETVOŘENÍ VÝLISKŮ NEPRAVIDELNÝCH TVARŮ

Je-li zvládnuta metodika určování DMP, je nasnadě ji využít co nejlépe k získání maxima informací o procesu plastického přetvoření reálného výlisku. K tomuto cíli je potřebné vykonat celou řadu po sobě jdoucích logických kroků a samozřejmě všechny důležité informace pečlivě zaznamenat. V následujícím textu je naznačen postup základní analýzy získaných informací a nastíněny základní myšlenky nabízející vodítko pro následná opatření a korekce, jež je nezbytné přijmout k dosažení úspěšného řešení. Pro přehlednost a srozumitelnost je celý postup rozčleněn do následujících jednotlivých kroků.

1. KROK - *Komplexní hodnocení tváritelnosti plechu*

V současné karosářské produkci je používán široký sortiment plechů. Je proto velmi důležité správně charakterizovat plech, který se bude k lisování používat (např. chemické složení, charakteristiky ze zkoušky tahem, informace z některých technologických zkoušek, charakter povrchu a v neposlední řadě i DMP). Samozřejmě se předpokládá, že se pečlivě zmapuje

právě ten plech, který bude používán při sériovém lisování. V případě, že by právě tento konkrétní plech nebyl k dispozici, tak použít náhradní, co nejbližší svými mechanickými charakteristikami původně zamýšlenému, ale přece jen nižší kvality.

2. KROK - *Stanovení přibližného výchozího tvaru nástřihu*

Analýza přetvoření je založena na vyhodnocení dějů již proběhlých, tedy vlastně jakýsi "zpětný pohled na věci minulé". Je proto nezbytné stanovit výchozí tvar a velikost nástřihu dle svých dosavadních zkušeností. V tomto případě je možné využít i některých teoretických metod pro navržení optimálního tvaru nástřihu (např. metodu kluzových čar apod.)

3. KROK - *Definování počátečních podmínek lisování*

V tomto okamžiku to představuje zaznamenání podmínek realizace experimentu, např. druh lisu, identifikovat lisovací nástroj (např. originál či duplicitní), číslo výkresu výlisku a jeho název, druh použitého plechu s odkazem na veškeré uložené údaje o jeho vlastnostech např. v příslušné databance (viz. 1. krok), tlak či jiné údaje o seřízení přidržovače, polohu dolní úvrati tažníku, tvar a rozměr nástřihu, použité mazivo, a pod....

4. KROK - *Možnosti změny tvaru nástřihu*

Označit místa na nástřihu, která nelze měnit s ohledem na finální tvar výlisku (daný návrhářem či konstruktérem výlisku) nebo následných technologických operací.

5. KROK - *Odlisování výlisku a vytypování možných kritických oblastí přetvoření.*

6. KROK - *Lisování s využitím deformačních sítí*

Na další nástřihy nanést oboustranně deformační síť ve vytypovaných kritických oblastech určených v 5. kroku. Je samozřejmě vhodné nanést síť i v dalších potenciálních kritických oblastech a v těch místech, kde použití sítě může pomoci celkové analýze plastického toku materiálu.

7. KROK - *Postupné lisování výlisku*

Je to lisování výlisku v několika etapách při postupně narůstající hloubce výlisku až do finálního tvaru, který představuje konečnou hloubku dílu nebo až do vzniku trhliny (viz. kap. 8.3.1). Pro každou etapu tažení, tj. pro každou zvolenou hloubku, se použije samostatný nástřih opatřený deformační sítí. Je-li výlisek vytvářen ve více nástrojích (a to je obvyklé), pak by měl být k dispozici osítovaný výlisek postupně z každého tvářecího nástroje v příslušné lisovací lince.

8. KROK - *Vyhodnocení ("přečtení") deformační sítě*

Na výlisku, na kterém se v poslední fázi objevila trhlina, identifikovat přesně místo, kde trhlina vznikla. A nyní změřit přetvoření v takto označeném místě na všech výliscích vytvořených předchozím postupným tažením dle předchozího 7. kroku.

9. KROK - *Zaznamenání přetvoření do DMP*

V předchozím kroku zjištěná přetvoření vynést do DMP. Je-li více kritických oblastí, pak je vhodné pro lepší přehlednost vynášet každou oblast do samostatného DMP. Vedle tohoto popisu přetvoření je nutné též zaznamenat všechny dílčí podmínky, které mohly ovlivnit lisovatelnost plechu. Např. tažné radiusy, stav střížné hrany nástřihu, zejména pokud je tato tvářena v následné operaci (lemování, rozšiřování) [72, 107, 108] a pod....

10. KROK - *Analýza deformační stopy a celkově dosažených přetvoření*

Při realizaci této analýzy je nutné sledovat čtyři následující základní motivy :

- ☐ A: Obvykle je velmi důležité přetvoření realizované zejména v poslední fázi tažení. Jestliže padne v DMP do přechodového pásma či dokonce do pásma kritického (PMP), pak je nutné učinit taková opatření, aby se tento bod posunul do zóny bezpečného lisování.

- ☐ B : Zhodnotit celkově výslednou deformační stopu a položit si otázku: "Je kterákoli její část v těsné blízkosti kritických pásem, i když její větší část je v dostatečné vzdálenosti od nich?" Jestliže ano, pak je opět vhodné učinit nějakou změnu k lepšímu, a tím se vyhnout budoucím provozním potížím.
- ☐ C : Věnovat pozornost jednotlivým úsekům deformační stopy, jestli nevykazují příliš velký nárůst deformace (při postupném lisování by bylo optimální, aby na každý stupeň tažení připadala zhruba stejně velká deformační energie). Jestliže ano, pak je potřeba zjistit proč tomu tak je. Např. jestliže dojde k přílišnému nárůstu deformace v konečné fázi tažení, tak to může být způsobeno nadměrným sevřením plechu v oblasti přídržovače. Nebo jestliže dojde k přílišnému nárůstu deformace v počáteční fázi tažení, pak to může být způsobeno sevřením zvlněného plechu v tažných listách, a pod.
- ☐ D : V této fázi analýzy se opět vrátit k vlastnímu výlisku a sledovat deformační síť. Jestliže jsou patrně silně deformované elementy sítě v blízkosti málo přetvořených, pak to svědčí o nedobré rozložení přetvoření (velký gradient přetvoření). Čím rovnoměrnější je totiž přetvoření, tím hlubší tah se podaří zrealizovat. Zároveň je důležité sledovat směr delších os nejvíce přetvořených elips deformované sítě (φ_1). Tento směr obvykle ukazuje na zdroj obtíží, jako může být nerovnoměrné brzdění plechu zapříčiněné např. příliš malým tažným rádiusem nebo příliš malou tažnou mezerou, různým tvarem brzdných listů, polohou beranu, apod.

11. KROK - *Rozhodnutí o opatřeních směřujících k nápravě*

Na základě provedené analýzy by se mělo dospět k návrhu CO udělat, aby se vyloučil vznik trhlin či vln na výlisku nebo aby operace lisování byla méně kritická. Pak je nutné rozhodnout JAK příslušný zásah realizovat. Veškeré návrhy musí také brát v úvahu i řadu dalších faktorů, aby řešením jednoho problému nepřibýly některé další, ještě nepříznivější. Např. volný (nástrojem nepodepřený) plech při snaze o zvětšení posuvu plechu odstraňující riziko vzniku trhlin dává naopak možnost vzniku zvlnění v důsledku tlakových napětí.

Další příklad dle známého obr. 8.3.2. Deformační stopa může vést do bodu 7 v přechodovém pásmu. Pak se nabízí více možností k výběru následných zásahů. Je možné zmenšit přetvoření φ_1 tím, že se usnadní tok materiálu právě v tomto směru nebo přidržet více plech v příčném směru, aby se zvětšilo přetvoření právě v tomto příčném směru (φ_2). Oba tyto zásahy povedenou k přesunutí konečné kritické deformace do oblasti bezpečného lisování v DMP. Avšak jestliže má daný díl problémy se vznikem vln, pak je nevhodné umožnit volnější posuv plechu z oblasti přídržovače. Použití mazadel různých kvalit na tažníku obvykle povede k přerozdělení přetvoření na výlisku, které může zmenšit přetvoření φ_1 . Avšak použití kvalitnějšího mazadla v oblasti přídržovače může zhoršit podmínky tažení tak, že vzroste nebezpečí zvlnění.

Přerozdělit přetvoření tak, jak je to jen možné po celém povrchu tažného nástroje, je obecně dobrá myšlenka. Toho lze docílit, vedle změny mazadla či jiných zásahů, i změnou velikosti tažných rádiusů a jejich dobrým vyleštěním. Někdy se ovšem tento krok může obrátit proti původnímu záměru, protože přerozdělení v rozložení přetvoření rovněž znamená i přerozdělení sil působících na plech. A větší tažná síla působící na ostřejším rádiu blíže k střední oblasti výlisku může snadno zapříčinit vznik trhlin. Posunout bod 7 z obr. 8.3.2 do bezpečného pásma lze i použitím plechu vyšší jakosti, který posune PMP k vyšším hodnotám φ_1 . Avšak tyto kroky lze často uskutečnit jen obtížně, a to kvůli vyšší ceně kvalitnějšího plechu nebo pro omezení týkající se konstrukčních změn výlisku.

Jedna z neefektivnějších cest vedoucích ke změně v rozložení přetvoření na výlisku je změna tvaru a velikosti nástřihu. Má-li se však rozhodnout o takovémto kroku, je nutno si vždy

uvědomit, že změna velikosti nástřihu může ovlivnit cenu výlisku víc, než cokoli jiného. Je rovněž vhodné používat pokud možno nástřihy co nejjednoduššího (obdélníkového) tvaru.

Jak je již v tomto okamžiku z předchozích úvah zřejmé, existuje mnoho nejrůznějších zásahů, kterými lze proces tváření výlisku ovlivnit. A právě dobře provedená analýza přetvoření umožní dostat se co nejrychleji a co nejefektivněji k co nejlepšímu a nejspolehlivějšímu řešení.

12. KROK - *Pečlivé zdokumentování konečných podmínek seřízení nástroje*

V tomto okamžiku nastává čas na doplnění vedené dokumentace o nejnovější informace. Rovněž je nutné pečlivě zaznamenat všechna opatření, která měla největší vliv na úspěšném vyřešení lisovatelnosti daného dílu. Takto vedená dokumentace bude velkým pomocníkem při řešení příštích problémů podobných výlisků nebo při následných změnách těchto dílů v rámci vylepšování stávajícího modelu karoserie. Rovněž může sloužit i jako zpětná vazba k ověření kroků, které byly realizovány v rámci numerických simulací v předvýrobní etapě daného dílu.

13. KROK - *s h r n u t í dosavadních výsledků*

Aplikace výše popsaného postupu komplexní analýzy přetvoření umožní rychle:

- ☐ Rozpoznat na výlisku možné kritické oblasti již na začátku oživování nástroje, a to i když se při zkoušení neobjevují trhliny. Pak je možné soustředit pozornost ihned do těchto oblastí.
- ☐ Přesně určit míru působení provedených (dílcích i souhrnných) zásahů.
- ☐ Určit okamžik, kdy bylo optimalizováno rozložení přetvoření na výlisku natolik, že je možné předat nástroj do sériového lisování.
- ☐ Poznat okamžik, kdy mohou být vyčerpány možnosti ovlivnění stávající technologie. Tj. okamžik, kdy stále existují určité problémy, i když byly v maximální míře optimalizovány veškeré podmínky včetně maximální optimalizace konstrukce výlisku tak, jak to jen jeho výkres dovolil.

Všechny výše popsané přednosti a výhody analýzy přetvoření vedou k usnadnění práce při oživování nástroje a usnadní rovněž hledání způsobů vylepšení funkce nástroje. Jak bylo řečeno již v úvodu této kapitoly, zde popsaná metoda je určitým "nástrojem", který značně zefektivní celý proces a který významně pomůže při řešení provozních problémů při sériovém lisování. Pomocí tohoto "nástroje" lze kvantifikovat vliv mnoha faktorů působících při lisování a ovlivňujících rozložení deformací na výlisku a porovnávat je se známými kritickými hodnotami přetvoření zachycenými ve formě DMP.

Pro komplexní analýzu přetvoření je ovšem nutné co nejvíce sjednotit podmínky stanovení přetvoření jak pro DMP, tak u reálných výlisků. Na výlisku i zkušebním vzorku používat stejnou deformační síť (co se týče parametru i hustoty elementů dávajících stejné možnosti jejich výběru při měření). Na výlisku ve shodě s DMP stejně definovat mezní stav a způsob jeho určení (měření sítě mimo lokální ztenčení, měření těsně u trhliny v oblasti lokálního ztenčení či měření lomových přetvoření). Brát v úvahu skutečnost plošné anizotropie mechanických vlastností plechu a přetvoření zjištěná na výlisku porovnávat s mezními v DMP určenými rovněž pro příslušný směr [87]. Zohlednit jednoduchým přepočtem měření deformační sítě na malých rádiusech, kdy je pomocí mikroskopu měřena sečna, na skutečnou délku příslušného oblouku. Uvažovat vliv tření na dosažená mezní přetvoření jak u výlisku, tak u zkušebního vzorku, uvažovat tvar deformační stopy a konečně i gradient přetvoření napříč i podél trhliny, atd.

Možnosti a konečný výsledek komplexní analýzy přetvoření stojí za vynaloženou námahu. Dosavadní zkušenosti se systematicky aplikovanou analýzou přetvoření prokazují její využitelnost jak v procesu snižování zmetkovitosti a obecně při zvyšování efektivnosti výroby v lisovnách, tak i při zvyšování efektivnosti výroby lisovacích nástrojů.

8.5 DIAGRAM ANALÝZY POSUVŮ A VYPÍNÁNÍ

Tento typ analýzy vychází z potřeb dosažení optimálního poměru mezi vypínáním a posuvy plechu dle charakteru výlisku (kap. 2.1) a technologickými podmínkami tažení. Takový postup sleduje zlepšení možnosti přiřadit určitému typu výlisku plech s určitými vlastnostmi a optimalizování technologických podmínek tažení jako je např. velikost a tvar nástřihu, podmínek mazání, síly přidržovače [109-111] apod. Na rozdíl od předchozí analýzy přetvoření (kap. 8.3 a 8.4), která mapuje kritická přetvoření v omezených oblastech výlisku, využitím *diagramu analýzy posuvů a vypínání* (DPV) lze získat mnohem komplexnější přehled o přetvoření plechu tím, že se analyzují deformace zahrnující větší oblasti výlisku. Takto realizovaný rozbor je vlastně analýzou přetvoření v daném řezu výlisku, kdy měření deformací je vztaženo ke zvolené linii, povrchu, procházející nejnáročněji tvarovanou částí dílu. Taková analýza poskytne i velmi užitečné informace o míře konstrukční náročnosti daného výlisku. V rámci této kapitoly je proto stručně charakterizována problematika analýzy posuvů a vypínání jako nedílné součásti komplexní analýzy přetvoření výlisku. Uvedený postup byl realizován např. Kasperem [112-114].

Kasper uvažuje ve vztahu k tvářitelnosti plechu dva základní pojmy - *hlbokotažnost*, na kterou má vliv zejména hodnota normálové anizotropie a *vypínatelnost*, ovlivnitelnou zejména hodnotou součinitele deformačního zpevnění. Jelikož se při praktickém lisování obě materiálové vlastnosti podílejí svým vlivem na výsledném přetvoření současně a zároveň různě, uvažuje Kasper i dvě základní složky přetvoření, tj. dvě krajní polohy přetvoření, ke kterým při lisování dochází:

1. přetvoření posuvem $-\varphi_p$ (např. přes tažnou hranu tažnice - vlastní hluboké tažení)
2. přetvoření vypínáním $-\varphi_v$ (materiál není odebrán z oblasti pod přidržovačem)

Při praktickém lisování se oba tyto mezí případy přetvoření objevují současně s proměnným vzájemným podílem dle příslušného tvaru výlisku a technologických podmínek. Křivku mezího přetvoření, v tomto případě tzv. *linie přetvoření* - LT, lze graficky vyjádřit jako závislost $\varphi_v - \varphi_p$. Její konkrétní stanovení v diagramu analýzy posuvů a vypínání je možné následujícím postupem. Na výlisku lze nalézt polokulovitě či jím podobné tvary a obdobně i tvary válcové. U prvního tvarového typu lze popsat velikost přetvoření tzv. *poměrem vypínání* - P

$$P = \frac{h}{d_2} \quad (8.5.1)$$

kde h je výška polokulovité sféry a d_2 je její průměr (průměr tažníku), a u druhého uvažovaného tvaru lze popsat náročnost přetvoření známým *stupněm tažení* - K,

$$K = \frac{D}{d_2} \quad (8.5.2)$$

kde D je průměr nástřihu.

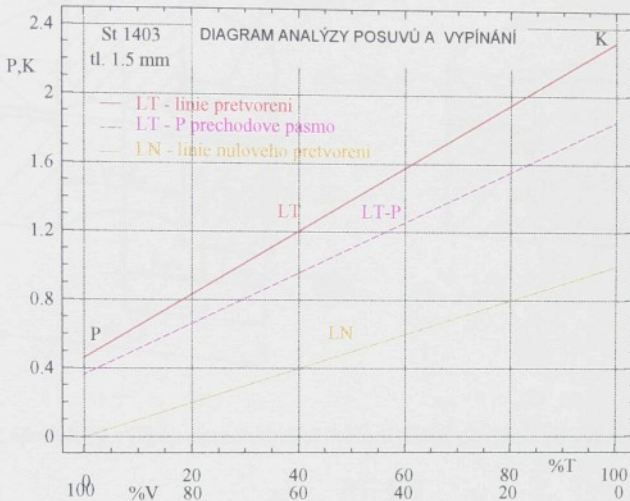
Obecný tvar *linie přetvoření* - LT, může být tedy popsán funkcí, která bude probíhat od 100% vypínání (V) k 100% tažení (T) přes kombinaci V - T, tedy platí

$$LT = P \frac{\%V}{100} + K \frac{\%T}{100} \quad (8.5.3)$$

Grafické znázornění *linie přetvoření* v diagramu analýzy posuvů a vypínání je na obr. 8.5.1.

Levý krajní bod P je získán zkouškou vypínáním, pravý krajní bod *linie přetvoření* K zkouškou kalíškovou. Linie LT je doplněna o tzv. *linii nulového přetvoření* - LN. Nulová náročnost při vypínání bude při $h = 0$, tedy $P = 0$. Nulová náročnost při hlubokém tažení bude

při $D = d_2$, a tedy $K = 1$. Takto lze získat linii nulové náročnosti přetvoření, jejíž průběh odpovídá kvantitativně hodnotě $\%T/100$. Praktické provedení tvarové analýzy na konkrétním výlisku je dané následujícím postupem. Po proměření délek povrchů ve vybraném řezu výlisku, popsaných např. na modelovém výlisku dle obr. 8.5.2, jsou pomocí vztahu (8.5.4) vypočteny hodnoty $\%T$ a $\%V$. Jak je zřejmé, k celkové konečné délce povrchy přispívá jak přetvoření vypínáním, tak posuvy, proto jsou obě části vyjádřeny zvlášť.



Obr. 8.5.1 Diagram analýzy posuvů a vypínání

$$\%T = \frac{L_T - L_{OT}}{L_{VT} - L_O} 100 \quad (8.5.4)$$

$$\%V = \frac{L_V - L_{OV}}{L_{VT} - L_O} 100$$

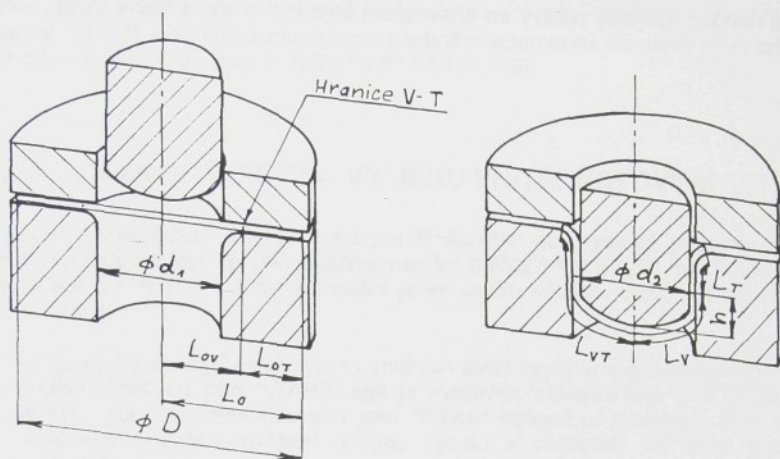
Podíl přetvoření vypínáním PT_V a podíl přetvoření posuvy PT_P vypočteme dle (8.5.5)

$$\begin{aligned} PT_V &= P \%V \\ PT_P &= K \%T \end{aligned} \quad (8.5.5)$$

a celkový poměr tažení PT daného výlisku dle (8.5.6)

$$PT = PT_V + PT_P \quad (8.5.6)$$

je pak vynesena jako bod příslušného procenta tažení ($\%T$) do grafu na obr. 8.5.1. Jestliže takto vypočtený bod leží pod linií přetvoření LT , je přetvoření v oblasti bezpečného tváření. Pro stanovení nejkritičtějších oblastí výlisku je vhodné provést výše popsanou analýzu v několika řezech příslušného dílu. Tato analýza umožňuje i kvantitativní stanovení tvarové náročnosti tažené součásti - N . Pro její určení je porovnávána vypočtená hodnota PT s hodnotou LT pro příslušnou velikost $\%T$ při uvažování hodnoty LN dle (8.5.7)



Obr. 8.5.2 Modelový výlisk demonstrující měření délek površek ve vybraném řezu výlisku

$$N = \frac{PT - LN}{LT - LN} \quad (8.5.7)$$

kde $LT = \frac{\%T}{100\%}(K_{\max} - P_{\max}) + P_{\max}$.

Vzhledem k působení mnoha obtížně podchytilitelných faktorů při lisování se doporučuje stanovit i v případě tohoto diagramu určité přechodové pásmo před LT linií, viz. kap. 6.5. Tedy při šířce přechodového pásma např. 20% P resp. K ($N=0,8$), je tato hranice představována na obr. 8.5.1 přímkou LT-P.

Popsanou analýzou posuvů a vypínání lze objektivně posoudit vzájemný vztah mezi výliskem, nástrojem a technologickými podmínkami tažení :

- ☐ změny technologických podmínek ovlivňují zejména %T
- ☐ změny vlastností plechu ovlivňují LT
- ☐ změny tvaru výlisku ovlivňují PT

Popsaná analýza tak vhodně doplňuje analýzu přetvoření s využitím diagramů mezních přetvoření v souřadnicích $\phi_2 - \phi_1$, a představuje tak cenný nástroj pro účelné mapování přetvoření výlisků nepravidelných tvarů plně využitelný v rámci komplexní analýzy přetvoření. V případě složitějšího výlisku, kde nelze předpokládat proporcionální přetvoření, je při výkladu výsledků nutno uvažovat i vliv historie přetvoření. Konkrétní aplikace tvarové analýzy je stručně demonstrována v kap. 9.3.

9. PŘÍKLADY KOMPLEXNÍ ANALÝZY PŘETVOŘENÍ VÝLISKŮ NEPRAVIDELNÝCH TVARŮ

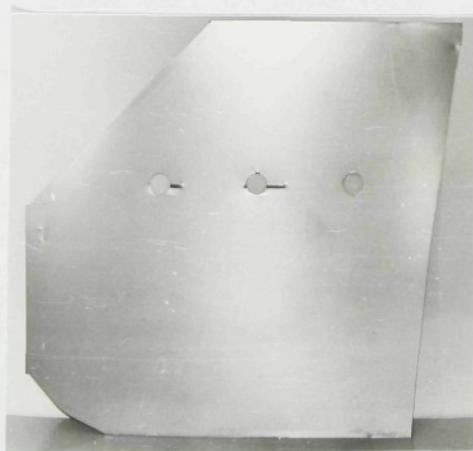
Komplexní analýza přetvoření byla realizována na výlisku vnitřních bočních předních dveří (kap. 9.1 a 9.2) a spodního víka motoru osobního automobilu, na němž byla realizována i analýza posuvů a vypínání (kap. 9.3) [74,84,86,87,100,115].

9.1 CHARAKTERISTIKA VÝLISKU VNITŘNÍCH DVEŘÍ

Výlisek je nepravidelného, zhruba lichoběžníkového půdorysu jak je patrné již z obr. 2.1.1. Je lisován z lichoběžníkového nástřihu rozměrů 0,75 x 1180 x 1250 mm, viz. obr. 9.1.1, z plechu kvality Fe PO5 (V), směr válcování je ve směru většího rozměru, tedy ve směru spodní hrany dveří.

Technologický postup tažení výlisku vnitřních dveří spočívá v pěti operacích. První je tažná operace (označená jako "I.TAH"), kde je vylisován základní tvar a je předlisována většina prolisů. Druhá operace nazvaná jako "II.TAH" dokončuje tvarování. Pak, ve třetí operaci, následuje částečné ostřížení obvodu výlisku a děrování. Ve čtvrté operaci je provedeno dostřížení obvodového tvaru a jsou vyděrovány boční otvory. Konečně v páté operaci dochází k přesnému dotvarování obvodových stojin a jsou děrovány výtokové otvory dveří (ve spodní části výlisku). Pak následuje vizuální kontrola a další kontrolní operace. Úspěšné lisování je pak zabezpečováno přimazáváním kritických míst nástřihu mazadlem VEFOS.

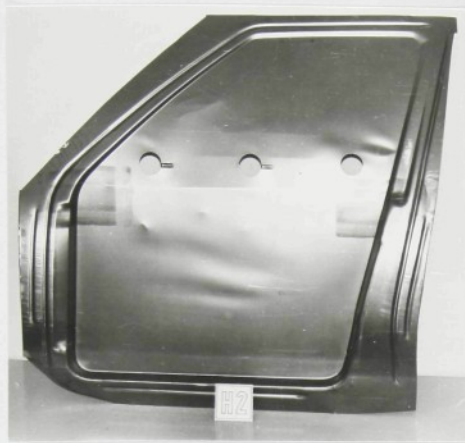
Technický stav tažného nástroje a lisu nebyl blíže mapován. V rámci prováděné analýzy byly odlisovány i výlisky s odstupňovanou hloubkou, které umožní stanovit deformační stopu v analyzovaných kritických místech. Odstupňování tahů bylo na hloubky zhruba 50% a 75% celkové hloubky výlisku, označeny jako "H 1" resp. "H 2". Celý postup vzniku výlisku vnitřních předních dveří od nástřihu až ke kompletnímu tvaru je zachycen na následujících obrázcích, obr. 9.1.1 až 9.1.6.



Obr. 9.1.1 Nástřih výlisku vnitřních dveří



Obr. 9.1.2 50 % hloubky tažení, "H 1"



Obr. 9.1.3 75 % hloubky tažení, "H 2"



Obr. 9.1.4 Dokončen první tah, "I. TAH"

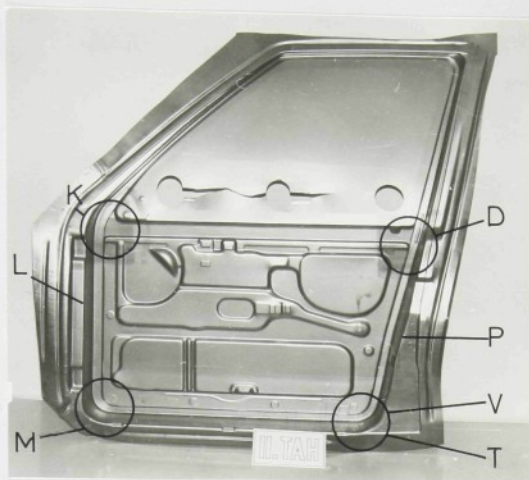


Obr. 9.1.5 Dokončen druhý tah, "II. TAH"



Obr. 9.1.6 Dokončený výlisek vnitřních předních dveří (po páté operaci)

Nejzávažnější příčinou zmetkovitosti je výskyt neopravitelných vad, trhlin. Na výlisku byly zjištěny oblasti výskytu těchto vad, které jsou zřejmé z obr. 9.1.7. Tyto oblasti lze rozdělit do tří základních skupin. Oblast dolních rohů výlisku, tj. oblasti "M" a "V", dále je to oblast prolisů, zejména ve střední části výlisku, tj. oblasti "K" a "D" a konečně oblast "T" v dolní části výlisku u lokality "V". Třetí oblastí výskytu trhlin jsou pak oblasti bočních stojin výlisku (levé-L a pravé-P), tj. oblasti "L" a "P". Při změně technologických podmínek, kdy nebylo přimazáváno nebo tažení probíhalo při větší síle přidržení příruby nástřihu přidržovačem, vznikaly trhliny i v oblastech levé i pravé stojiny výlisku.



Obr. 9.1.7 Kritické oblasti výlisku s možným výskytem trhlin

9.2 ANALÝZA PŘETVOŘENÍ VÝLISKU VNITŘNÍCH DVEŘÍ

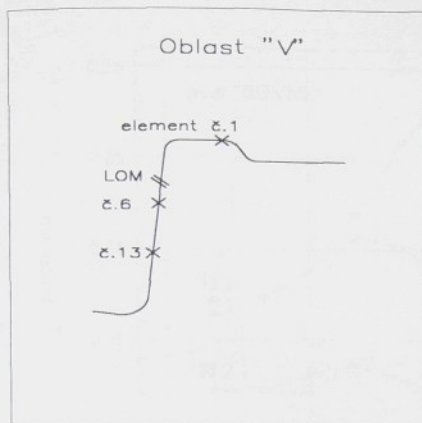
V kap. 9.1 je zachycen průběh lisování výlisku vnitřních předních dveří až ke kompletnímu tvaru. Nejzávažnější příčinou zmetkovitosti, na kterou je prováděná analýza zaměřena, je výskyt neopravitelných vad - trhlin. Na výlisku byly zjištěny oblasti výskytu těchto vad, které jsou zřejmé z obr. 9.1.7. Vzhledem k značnému rozsahu těchto experimentálních prací jsou v rámci této kapitoly uvedeny jen některé výsledky, které vlastní metodiku analýzy stručně ilustrují. Větší šíře problematiky je zachycena v literatuře uvedené v úvodu kapitoly.

9.2.1 Analýza přetvoření v oblasti "V"

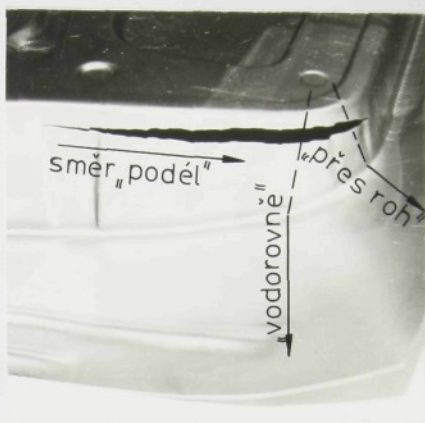
Nejprve byla pozornost zaměřena na místo stojiny v oblasti rohu "V" (obr. 9.1.7), kde došlo ke vzniku lomu. Charakter profilu místa, kde jsou přetvoření měřena, je zřejmý z obr.9.2.1. Na obr. 9.2.2 je detail této oblasti s trhlinou a zároveň jsou zde popsány směry, v nichž bylo provedeno měření. Jedná se o směry kolmo vůči vzniklé trhlíně, které jsou označeny jako směr "vodorovně" a směr "přes roh", a rovnoběžně se směrem šíření trhliny označené jako směr "podél". "Vodorovně" znamená rovnoběžně se spodní stranou výlisku, a tedy ve směru válcování a "přes roh" představuje směr přes střed rohu výlisku, čili ve směru 45° vůči směru válcování. Přetvoření ve směru šíření trhliny (označení "podél") představuje většinou směr kolmo na směr válcování.

Přetvoření v uvažovaných povrchkách byla měřena jak na úspěšně vytaženém výlisku (po páté operaci), označen jako "DOBŘÝ", tak na výlisku s trhlinou, který je na grafu rozložení přetvoření označen jako "LOM". Proměřovaná površka směru "vodorovně" a "přes roh" začíná na horní ploše spodní hrany výlisku (element deformační sítě č.1), jde přes trhlinu (mezni přetvoření v této oblasti představuje element č.6) a končí ve stěně stojiny, element č.13.

Výsledky měření přetvoření $[\varphi_2, \varphi_1]$ v těchto povrchkách jsou pro oba směry zachyceny na obr. 9.2.3 resp. 9.2.4. Z obou těchto grafů je zřejmé, že se přetvoření φ_2 na



Obr. 9.2.1 Profil kritické oblasti "V"



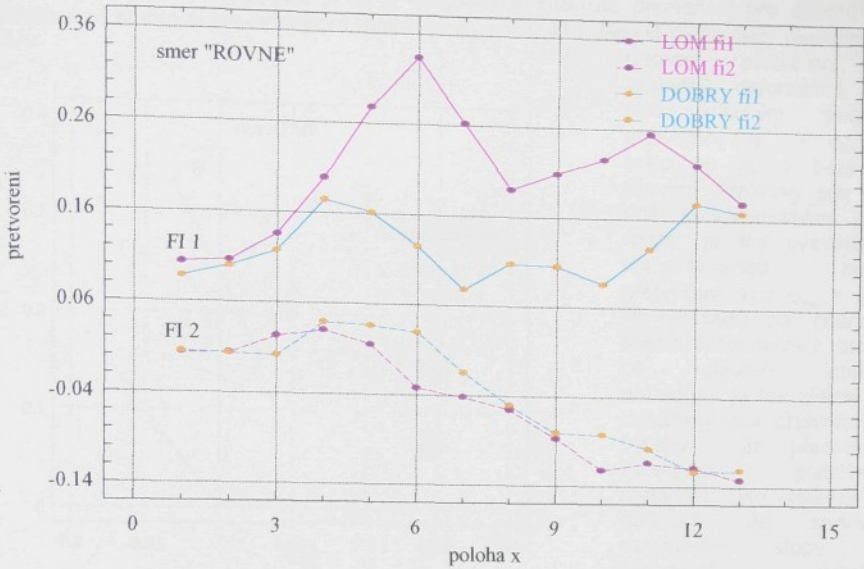
Obr. 9.2.2 Detail oblasti "V" z obr. 9.1.7 s popisem proměřovaných směrů

výlisku dobrém i zmetkovém příliš neliší. Rozdíl je patrný na přetvořeních φ_1 , kdy hladina deformací je u zmetkového výlisku výrazně posunuta k vyšším hodnotám, zejména pak u směru "vodorovně". Tento nárůst, jehož výsledkem byl nakonec vznik lomu, byl způsoben změnou technologických podmínek tažení (změna podmínek mazání). Maxima přetvoření je dosaženo v místě (element sítě č.6), kde při dané lisovací poloze přechází rádius zaoblení dna do svislé stojiny. Čili výlisek praská v místě jako u klasicky hluboce taženého dílu.

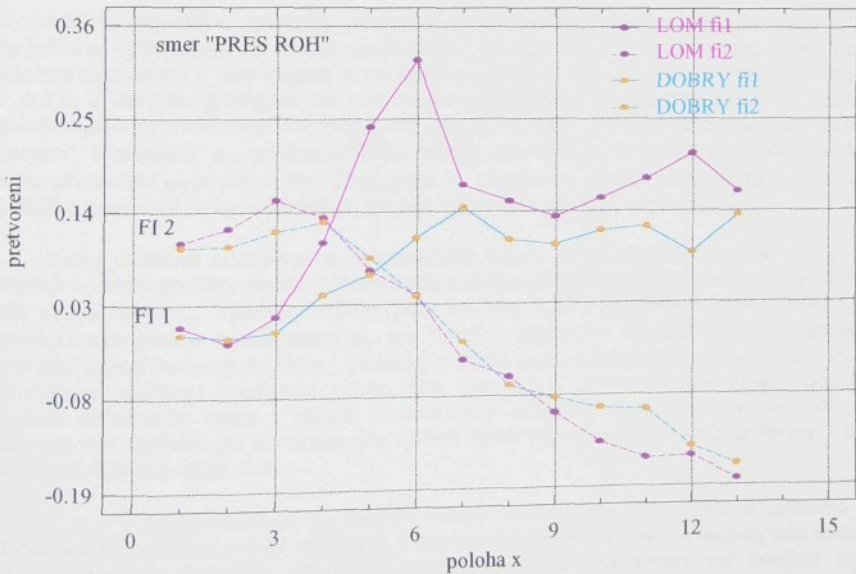
V místě "přes roh" je dále zajímavé rozložení přetvoření v části povrsky na horní plošce spodní hrany výlisku (elementy č.1 až 5). V tomto místě došlo při dané orientaci elementů deformační sítě, kdy je větší přetvoření φ_1 ve směru podél této povrsky, ke změně. V tomto místě je, při dané orientaci elementu sítě, přetvoření φ_1 menší než φ_2 , čili $\varphi_1 < \varphi_2$. To je zapříčiněno větším vypínáním plechu v této oblasti přes roh tažníku v obvodovém směru než ve směru radiálním při větší hloubce tažení.

Tato skutečnost významně ovlivní i charakter deformační stopy v této oblasti, jak je dokumentováno na obr. 9.2.5. Zde je zachycena historie přetvoření dvou míst obou měřených povrsek. Jedná se v obou případech o místa v těsném sousedství trhliny (shodně pro oba směry elementy deformační sítě č.6), která představují dosažený mezní stav na výlisku. Pro stanovení historie přetvoření byl výlisek odlisován v odstupňovaných hloubkách (viz. obr. 9.1.2. až 9.1.6). Změny tvaru výlisku v těchto etapách tažení znesnadňují vybrání právě jednoho a pokud možno přesně téhož místa na všech postupně tažených výliscích. Spolehlivá orientace v deformační síti v kritické oblasti musí být zabezpečena vhodným rastrem vytvořeným již na výchozím nástřihu.

Mezní stav materiálu je zde zachycen v podobě spodní křivky pásma mezních přetvoření (PMP) z obr. 6.5.3. Trhlina je však orientována kolmo, event. ve směru 45° vůči směru válcování. V tom případě by měl být použit diagram mezních přetvoření pro orientaci $\alpha=0^\circ$, resp. $\alpha=45^\circ$. Pro materiál Fe PO5 (V) je však k dispozici pouze orientace $\alpha=90^\circ$ vůči směru válcování. Jiné orientace než tato nebyly, vzhledem k velké pracnosti těchto experimentálních prací, realizovány. Přestože mezní přetvoření výlisku leží pod PMP pro daný experimentálních prací, realizovány. Přestože mezní přetvoření výlisku leží pod PMP pro daný materiál, došlo na výlisku ke vzniku trhliny. Tento zdánlivý rozpor, kdy přetvoření sice leží v "přechodovém pásmu", ale ke vzniku lomu by ještě nemělo docházet, je možné vysvětlit komplikovaným tvarem deformační stopy, viz. kap. 6.4.



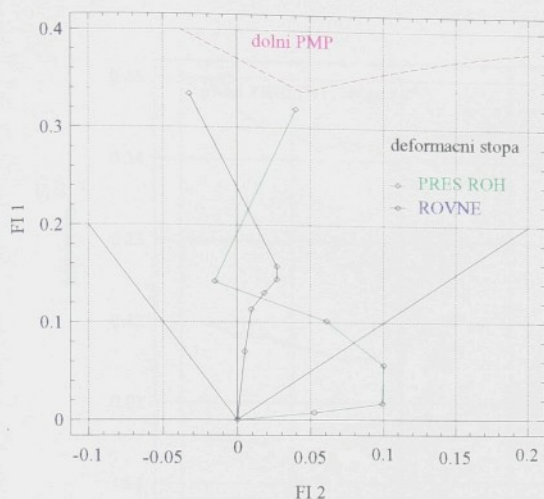
Obr. 9.2.3 Rozložení přetvoření v oblasti rohu "V", směr "vodorovně"



Obr. 9.2.4 Rozložení přetvoření v oblasti rohu "V", směr "přes roh"

Intenzita přetvoření daná deformační stopou "PŘES ROH" je $\varphi_{\text{lin}} = 0,540$ (uvažujeme-li jen počáteční a koncový bod, pak je $\varphi_{\text{lin}} = 0,394$) a intenzita přetvoření pro spodní část PMP(lineární stopa) v odpovídajícím místě je $\varphi_{\text{PMP}} = 0,411$. Pokud by se tedy neuvažovala

historie přetvoření, je výsledný deformační stav pod kritickým pásmem přetvoření ($\varphi_{\text{lin}} < \varphi_{\text{PMP}}$) a mělo by jít o bezpečné lisování. Prakticky zde však došlo ke vzniku trhliny. Tento rozpor je tak vysvětlitelný komplikovanou historií přetvoření, kdy $\varphi_{\text{nelin}} > \varphi_{\text{PMP}}$. Při pohledu na charakter těchto deformačních stop a při vyjádření intenzity přetvoření je tak zřejmé, že dosažený stav přetvoření na výlisku již představuje vyčerpání plasticity materiálu. Tyto výsledky pak potvrzují, že charakter deformační stopy tak významně ovlivňuje dosažený mezní stav.



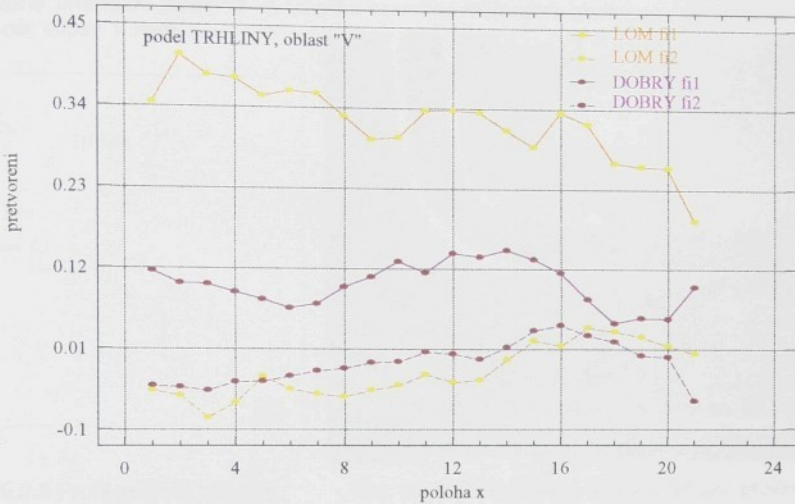
Obr. 9.2.5 Deformační stopy pro místa elementů č.6 z obr. 9.2.1 (v místě trhliny oblasti "V")

Pro získání co největšího množství informací o deformačním stavu v kritické oblasti "V" byla dále měřena i přetvoření ve směru podél trhliny, na obr. 9.2.2 označeno jako směr "podél". Rozložení přetvoření v této oblasti je na výlisku úspěšně taženém i na výlisku s trhlinou na obr. 9.2.6. Z obrázku je zřejmé, že i ve směru podél trhliny je obdobná situace v rozložení přetvoření jako ve směru napříč k trhlíně, viz. obr. 9.2.3 resp. 9.2.4, ve vztahu výlisků "dobrý" a s "lomem". Přetvoření φ_2 nevyskytují velké rozdíly, ale výrazný je nárůst přetvoření φ_1 . Vyšší hladina přetvoření φ_1 je pak v levé části grafu, tj. zhruba ve střední části trhliny v místě jejího největšího rozevření. V těchto místech lze předpokládat i počátek vzniku lomu.

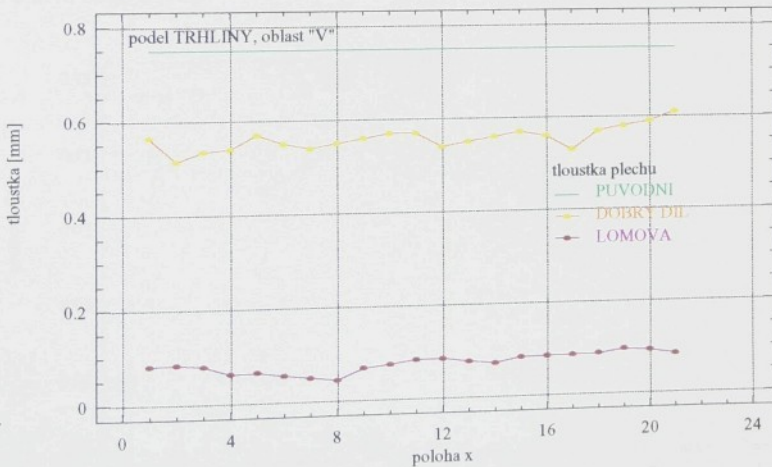
Velmi užitečné informace o deformačním stavu ve zkoumaném místě poskytnou i příslušné hodnoty tloušťky plechu. V tomto případě byla měřena tloušťka plechu podél trhliny v místě vzniklého lomu. Výsledky měření jsou na obr. 9.2.7. Průběh tloušťky podél trhliny prakticky koresponduje s hodnotami φ_1 pro "lom" na obr. 9.2.6. Větším hodnotám přetvoření odpovídají menší hodnoty tloušťky. Tloušťky v místě lomu odpovídající šířce lomové plochy, byly měřeny metodou popsanou v kap. 6.6, obr. 6.6.7. Zaznamenané změny tloušťky i charakter deformační stopy v oblasti minima DMP dokládají nepříznivou skutečnost, že k deformaci zde dochází při rovinném přetvoření, které představuje z hlediska lisování právě nejnejpříznivější stav (kap. 6.4).

V této souvislosti se nabízí otázka o definici mezního stavu a způsobů jeho kvantitativního vyjádření právě ve vztahu k analýze přetvoření výlisků. Všechny zde uvedené diagramy mezních přetvoření jsou určeny pro mezní stav definovaný pro počátek vzniku lokálního ztenčení. Způsob kvantitativního určování tohoto mezního stavu pomocí deformační sítě předpokládá měření elementů sítě již částečně zasažených lokálním ztenčením. Míra zasažení mezního elementu deformační sítě lokálním ztenčením může ovlivnit výslednou hodnotu takto určeného mezního stavu. Jinými autory je doporučován postup měření mezních

elementů zcela nezasážených lokálním ztenčením, tedy ve větší vzdálenosti od vzniklé trhliny [7]. Je otázka, do jaké míry gradienty rozložení přetvoření v měřené oblasti umožní vybrat právě ten "správný" mezní element deformační sítě, který popisuje mezní stav dle přijaté definice. Či v této souvislosti nevyužit pro určení mezních přetvoření i lomových deformací určených z tloušťky plechu v místě lomu.



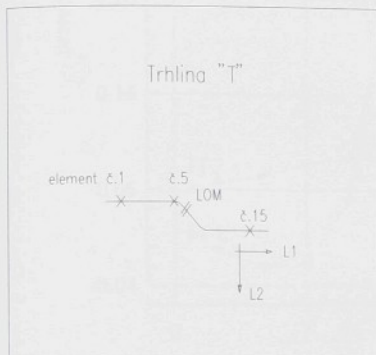
Obr. 9.2.6 Rozložení přetvoření podél trhliny v oblasti rohu "V".



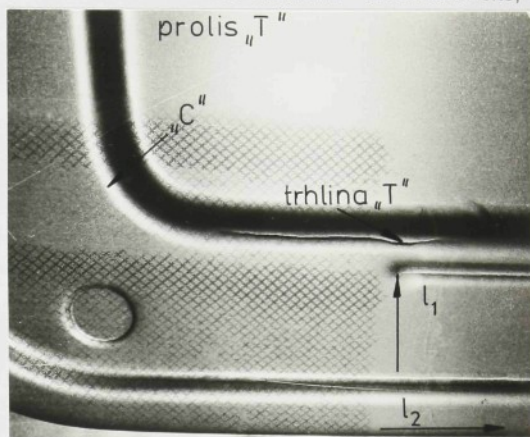
Obr. 9.2.7 Průběh tlouštěk plechu v místě lomu podél trhliny v oblasti rohu "V"

9.2.2 Analýza přetvoření v oblasti vnitřního prolisu "T"

Vedle místa hlavní trhliny v oblasti rohu "V", která byla proměřována v kap. 9.2.1, byla "mapována" i další místa sousedící s touto oblastí. Jedná se o místo vnitřního prolisu, jehož profil je na obr. 9.2.8. Měřená oblast je zachycena na obr. 9.2.9. Pozornost byla zaměřena zejména na trhlinu v místě rádiusu prolisu (označená jako trhlina "T") a historie přetvoření v tomto místě byla porovnána s místem sousedním (označeno jako "C"). Na obrázku je také naznačena orientace menšího a většího rozměru měřeného elementu deformační sítě, tj. hlavní osy elipsy l_2 resp. l_1 .

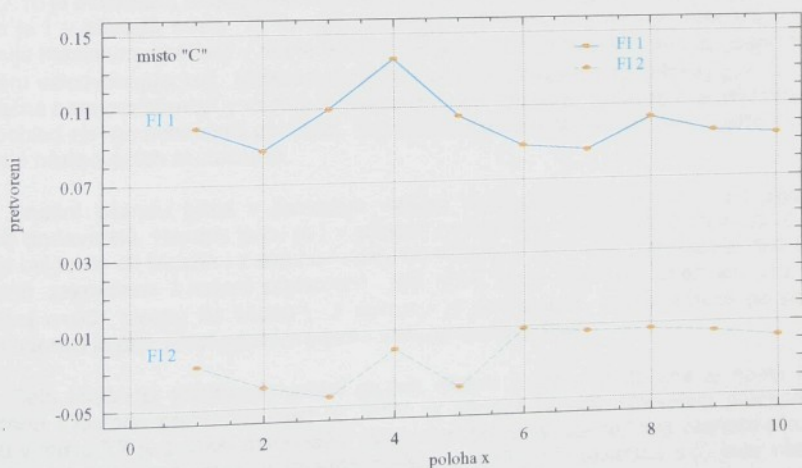


Obr. 9.2.8 Profil měřené povrchy prolisu v místě trhliny "T"

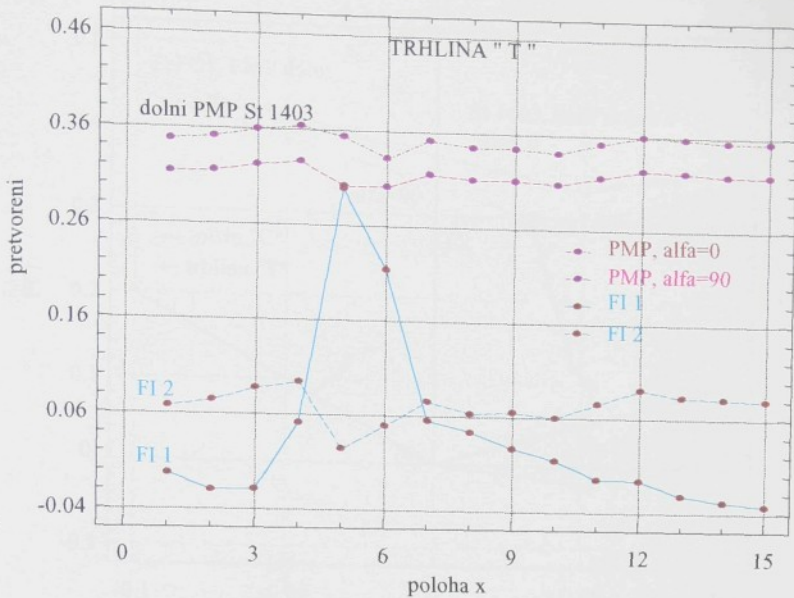


Obr. 9.2.9 Analyzovaná oblast vnitřního prolisu "T"

Změřená přetvoření v obou površkách míst "C" a "T" dle obr. 9.2.9 jsou zobrazena v grafech na obr. 9.2.10 resp. 9.2.11.



Obr. 9.2.10 Rozložení přetvoření v místě "C" vnitřního prolisu

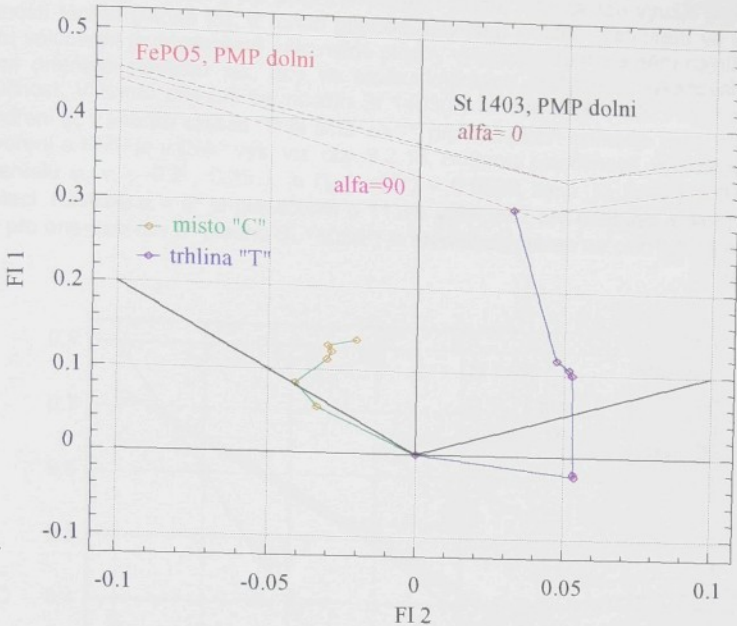


Obr. 9.2.11 Rozložení přetvoření v oblasti trhliny "T"

V měřeném místě "C" prolisu nedošlo ke vzniku trhliny, celková úroveň deformací je nízká. Na obr. 9.2.10 je maximální hodnota přetvoření zaznamenána na přechodovém rádiu. Obdobná situace je i v případě místa "T" na obr. 9.2.11. Z celkově nízké úrovně deformací výrazně vystupuje maximum změřené v těsné blízkosti trhliny na přechodovém rádiu (směr trhliny je ve směru válcování plechu). Velikost přetvoření však dosahuje pouze hodnoty $\varphi_i \approx 0,3$. I když tak značná nerovnoměrnost v rozložení přetvoření není příznivá, nesignalizuje tato situace na první pohled zjevné nebezpečí porušení. Kritičnost tohoto přetvoření se však naplno objeví až ve světle následujících skutečností.

Dnešní běžnou praxí v lisovnách větších automobilek je zpracovávání plechu od různých dodavatelů. Nejinak tomu je i v případě uvedeného výlisku vnitřních dveří. Z tohoto důvodu byl tento díl lisován i z plechu kvality St1403(P), tl. 0,71 mm [74]. Na obr. 9.2.11 jsou současně zakreslena i mezní přetvoření pro dolní okraj PMP pro orientaci vůči směru válcování $\alpha=90^\circ$ plechu St 1403(P). Z obrázku je pak zřejmé, že deformace po poslední tvářecí operaci je již v přechodovém pásu v těsné blízkosti PMP.

Celá kritičnost tohoto přetvoření je pak zřejmá z obr. 9.2.12, kde je spolu s PMP zachycena i historie přetvoření míst "C" i "T". V případě historie přetvoření přechodového rádiu v místě "C" je průběh deformační stopy sice zajímavý, ale celková intenzita přetvoření nedosahuje kritických hodnot. V případě měření u trhliny "T" (element č.5) jsou však tvar deformační stopy i dosažená konečná hodnota přetvoření nepříznivá (kap. 6.4), $\varphi_{i, \text{nelin}} = 0,398 < \varphi_{i, \text{PMP}} = 0,410$. Praktickým projevem této skutečnosti byla zvýšená zmetkovitost při lisování. Pro její snížení se nabízí řada možností [87], jako např.:



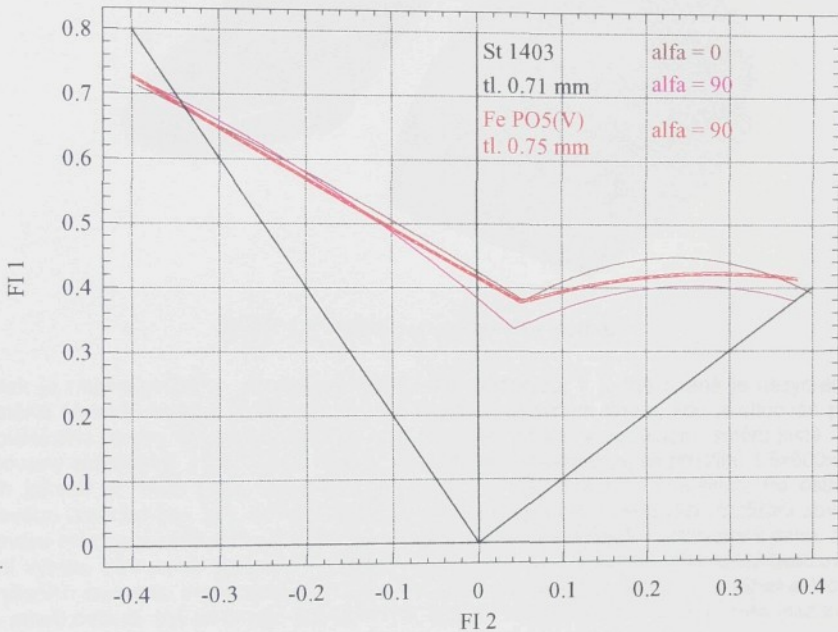
Obr. 9.2.12 Historie přetvoření pro místa prolisu "C" a trhliny "T".

- 1. Úprava zaoblení rádiusů tažníku i tažnice
- 2. Změna poměru posuvů a vypínání
 - a) zásahy týkající se brzdných listů, velikosti a tvaru nástřihu
 - b) změna podmínek tření (zásah do mechanismu mazání spolu s použitím kvalitnějšího maziva, použití plechu s vhodnějším charakterem povrchu)
- 3. Hledat další možnosti přeseřizování nástroje a přidržovacího beranu lisu
- 4. Použít plech větší tloušťky nebo konečně i vyšší kvality

Zásahy do nástroje (lišty, rádiusy), jakož i tvarové a rozměrové změny nástřihu (nový nástřihový nástroj) je nutné v této fázi zamítnout jako náročné a drahé. Neustálé přeseřizování nástroje a přidržovacího beranu lisu nepřináší v sériovém lisování potřebný efekt. Přimazávání kvalitnějším mazivem v kritických oblastech sice obvykle vede k úspěchu, ale zvýší se náklady (cena maziva, obsluha provádějící mazání, náročnější odmaštění po lisování a v neposlední řadě zhoršení ekologie výroby). Použití silnějšího plechu by sice zvýšilo úroveň mezních přetvoření [91] (kritická přetvoření výlisku se tak přesunou do oblasti bezpečného lisování), ale toto řešení je nutné zamítnout s ohledem na nutnost spíše snižovat váhu dílu, než naopak.

Obdobný efekt posunutí KMP k vyšším hodnotám přetvoření lze docílit i použitím plechu vyšší jakostní třídy (bez nepříznivého dopadu na hmotnost dílu) [116]. V tomto případě se nabízí plech jakosti Fe PO5 (V), viz. obr. 9.2.13. Takové řešení vede prakticky vždy k úspěchu, ale za cenu vyšších výrobních nákladů.

Realizovaná analýza přetvoření však nabídla i další možné řešení. Zvýšení úrovně mezních přetvoření aniž by byl použit kvalitnější plech, a to cestou využití plošné anizotropie vlastností těchto plechů [6]. V tomto případě, kdy jsou kritická přetvoření ve směru 90° vůči směru válcování (jednosměrně válcované plechy vykazují v tomto směru nejnižší tažnost), lze změnit orientaci náštíhu tak, aby ve směru kritických přetvoření vykazoval materiál lepší plastičnost. V tomto případě byl nástřih St 1403(P) otočen o 90° , takže ve směru největších přetvoření φ_1 v kritické oblasti "T" je směr $\alpha=0^\circ$, pro nějž plech vykazuje vyšší hodnoty mezních přetvoření a KMP je v DMP výš, viz. obr. 9.2.13. Hodnota plastičnosti, vyjádřená dle obr. 6.3.2 v intervalu $\varphi_2 \in \langle -0.2, 0.25 \rangle$, je $\Pi_{\text{m}}(\alpha=90^\circ) = 0.0829$, resp. $\Pi_{\text{m}}(\alpha=0^\circ) = 0.0923$. Čili pro orientaci náštíhu $\alpha = 0^\circ$ je plastičnost o 11.3% větší, než pro orientaci $\alpha=90^\circ$ [87]. Dolní okraj PMP pro orientaci $\alpha = 0^\circ$ plechu St 1403(P) je rovněž zakreslen na obr. 9.2.11 a 9.2.12.

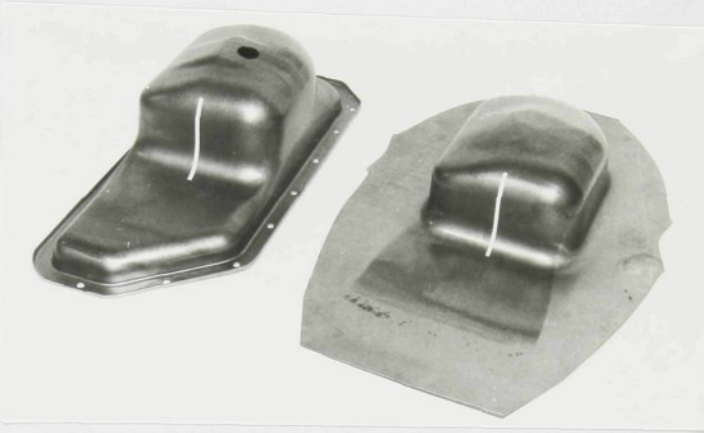


Obr. 9.2.13 Křivky mezních přetvoření pro plechů St 1403 (P) pro dvě orientace vůči směru válcování ($\alpha=0^\circ$, resp. $\alpha=90^\circ$) a Fe PO5 (V) ($\alpha=90^\circ$)

Výkyvy v rozložení deformací zachycených v grafech na obr. 9.2.10 a 9.2.11 jsou dány hlavně nerovnoměrností rozložení přetvoření na výlisku. Jejich velikost však může být ovlivněna i určitou nepřesností použité deformační sítě (kap. 7) a i v důsledku gradientu přetvoření ve směru kolmo na trhlínu (kap. 6.2). Těsně u trhlíny nebylo možno vybrat měřitelné elementy, a tak byly měřeny elementy sítě více vzdálené od trhlíny. Tato skutečnost rovněž dokumentuje důležitost výběru vhodných elementů deformační sítě pro příslušná měření (zkušenost obsluhy). Optimální výběr elementů dle přijatých kritérií pak umožní pouze dobře čitelná, dostatečně přesná a "hustá" deformační síť. Ve smyslu této úvahy pak nabývá na důležitosti i možnost měření lomových přetvoření dle kap. 6.6 a kap. 9.2.1.

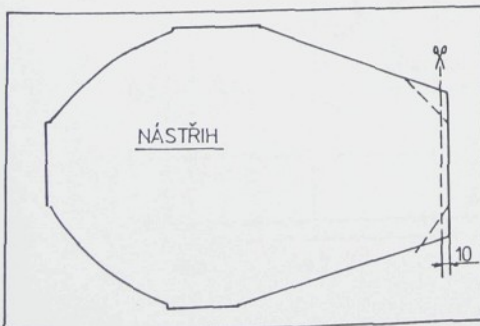
9.3 ANALÝZA PŘETVOŘENÍ VÝLISKU SPODNÍHO VÍKA MOTORU

Analýzovaný problémový výlisek spodního víka motoru je patrný z obr. 9.3.1. V pravo je výlisek po první tažné operaci, vlevo pak výlisek kompletní. Bílým proužkem je vyznačena kritická oblast, ve které dochází nejčastěji ke vzniku trhliny [100].



Obr. 9.3.1 Výlisek spodního víka motoru

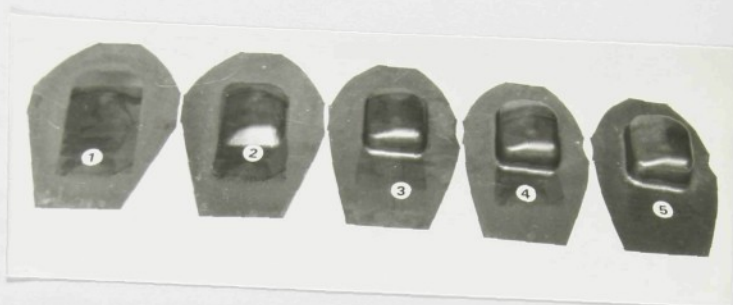
Výlisek je nepravidelného, zhruba obdélníkového půdorysu, k jedné straně je nesymetricky umístěná hluboce tažená čtvercová olejová nádrž s nerovným dnem, kde je situován prolis vypouštěcího otvoru. Do olemované příruby přechází nádrž v podélném směru ještě přes vylisovaný hloubkový mezistupeň. Výlisek je vyráběn z obdélníkových přístřihů 1.5x600x425, plech jakosti St 1403 [100], na postupovém lisu v následujících operacích. Po ostřížení tvarového nástřihu (viz. obr. 9.3.2) následuje první a druhý tah, kalibrování, ostřížení obvodu, lemování příruby a děrování vypouštěcího otvoru a otvorů v přírubě. Vzhledem k tomu, že k trhání výlisků docházelo pouze při tažných operacích, byla analýza přetvoření realizována na výliscích zejména po těchto operacích. Při komplexní analýze přetvoření v rámci snižování jeho zmetkovitosti byl sledován zejména vliv změny tvaru nástřihu a podmínek mazání na lisovatelnost tohoto dílu.



Zvolená úprava nástřihu spočívala ve zkrácení jeho délky v podélném směru, a to v místě, kde je delší příruba, tj. před kritickým místem, spolu s odstříháním rohů nástřihu v tomtéž místě. Popsané úpravy nástřihu jsou zřejmé z obr. 9.3.2. Jejich cílem bylo usnadnit posuvy plechu do kritického místa a tím snížit hodnoty realizovaných přetvoření v podélném směru. Velikost zkrácení byla samozřejmě limitována podmínkou vylisování celistvého výlisku po konečné operaci lemování v souladu s výkresem dílu.

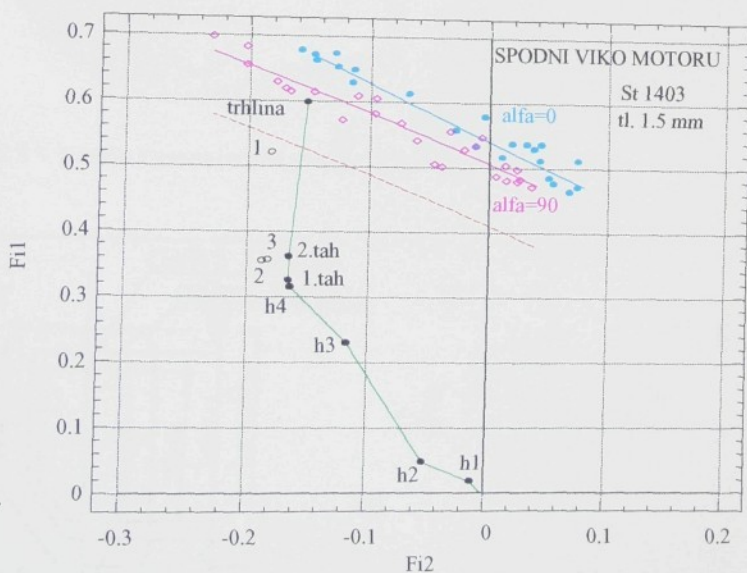
Obr. 9.3.2 Základní tvaru nástřihu spolu s dvěma pokusně realizovanými změnami

Pro demonstraci vlivu podmínek mazání na dosažené hodnoty přetvoření bylo provedeno jednak lisování nástřihu bez maziva (stav povrchu plechu ve stavu dodání), jednak byly zkoušeny další dvě varianty mazání (ředěný resp. neředěný Vefos). Součástí analýzy bylo i stanovení historie přetvoření v kritické oblasti. Za tím účelem byly odlisovány čtyři nástřihy na různé hloubky tažení, h_1 až h_4 . Hloubka h_5 pak odpovídá hodnotě 1. tahu. Odstupňované tahy jsou patrné na obr. 9.3.3.



Obr. 9.3.3 Odstupňované tahy pro určení deformační stopy

Deformační stopa pro kritické místo přechodu dolního rádiusu do svislé stěny výlisku (viz. obr. 9.3.1) je zřejmá z diagramu na obr. 9.3.4. V oblasti záporných přetvoření φ_2 narůstá deformace obvykle jako u případů hlubokého tažení. Nepříznivá změna se pak objevuje na konci 1. tahu a zejména po 2. tahu (nenamazaný původní nástřih), kdy narůstá přetvoření φ_1 při konstantní hodnotě φ_2 (nepříznivý případ kombinace přetvoření, viz. kap. 6.4) se hodnota přetvoření φ_1 posouvá až do oblasti kritických přetvoření, a to znamená vznik trhliny.



Obr. 9.3.4 Historie přetvoření v kritickém místě výlisku

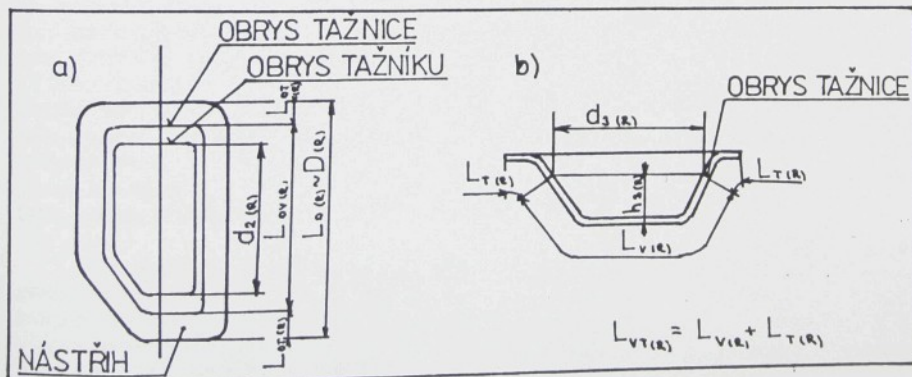
Po namazání nástřihu ředěným vefosem se kritické přetvoření přesune do bodu č.1 na obr. 9.3.4. To sice představuje oblast bezpečného lisování, ale v těsném sousedství přechodového pásma. Zde stále trvá nebezpečí, že již při malých výkyvech podmínek lisování dojde opět k posunu tohoto bodu do kritického pásma. Teprve za podmínek dodatečného přimazání nefeděným mazivem se bod č.1 posune do dostatečné vzdálenosti od kritických přetvoření, představováno bodem s označením "2.tah".

Do DMP na obr. 9.3.4 byly rovněž vyneseny hodnoty přetvoření upravených nástřihů. Bod č. 3 představuje nástřih zkrácený (dle schématu na obr. 9.3.1), bod č.2 pak zkrácený s ustřiženými rohy. Z polohy těchto bodů je zřejmé, že provedená možná úprava nástřihu nemá významný vliv na hodnoty přetvoření v kritické oblasti. Pro daný výlisek (při stávajícím, z hlediska technologie tažení velmi náročném tvaru) se tak ukázal dominantní vliv podmínek mazání oproti možné změně rozměru nástřihu.

Hodnoty mezních přetvoření představované jen příslušnou částí pásma mezních přetvoření odpovídající m_p v kritické oblasti jsou určeny postupem dle kap. 6.1. V této souvislosti byla uvažována i možnost změny orientace nástřihu za účelem využití plošné anizotropie mechanických vlastností plechu. Z obr. 9.3.4 je zřejmé, že provedená změna orientace nástřihu poskytuje vyšší hodnoty mezních přetvoření a tím i možnost oddálení vzniku trhliny, ovšem stále za podmínek intenzivního přimazávání. Právě s ohledem na ekologii výroby však bylo následně přijato řešení v použití plechu vyšší jakostní třídy (FePO5), které eliminovalo nesnadné přimazávání a zároveň zabezpečilo lisování při minimální zmetkovitosti.

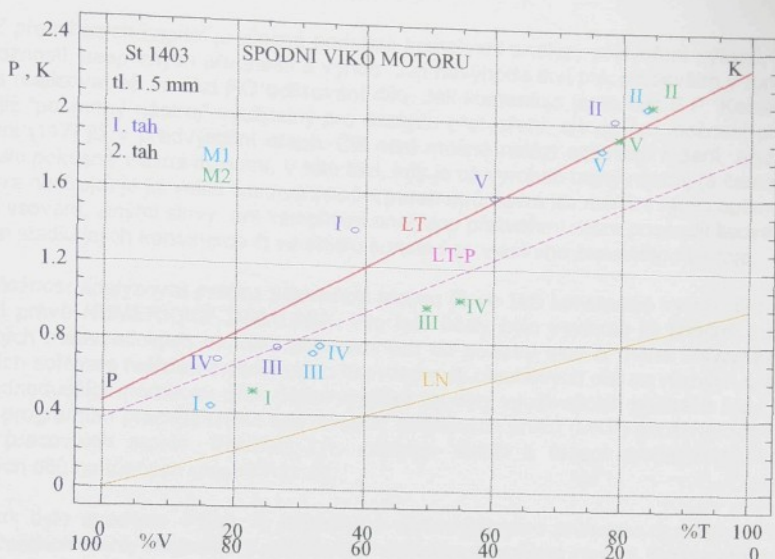
Komplexní analýza přetvoření výlisku byla v tomto případě doplněna i analýzou posuvů a vypínání ve smyslu kap. 8.5. Na obr. 9.3.5 jsou na nástřihu nakresleny analyzované površky. Na obr. 9.3.6 je pak v návaznosti na obr. 8.5.2 zachycen způsob proměřování příslušných úseků površek potřebných k následného stanovení celkového poměru tažení PT dle vztahů (8.5.4) až (8.5.6).

Obr. 9.3.5 Nástřih s vyznačenými analyzovanými površkami



Obr. 9.3.6 Schéma měření úseků površek na : a) nástřihu , b) výlisku

Získané výsledky jsou souhrnně zachyceny v diagramu analýzy posuvů a vypínání na obr.9.3.7.



Obr. 9.3.7 Diagram analýzy posuvů a vypínání (DPV) spodního víka motoru

Z diagramu je evidentní nebezpečí trhání plechu již při prvním tahu (nenamazané nástřihy) zejména v podélném směru I. To se dá, vzhledem ke složitému tvaru výlisku a tím i obtížnému posuvu plechu v tomto směru, očekávat. Směry napříč výlisku (II. resp. V.) vykazují rovněž celková přetvoření nad hranici kritického přetvoření LT. Směry přes rohy (III. resp. IV.) jsou sice pod LT-liníí, ale stále v přechodovém pásmu. Celkově lze konstatovat, že u výlisku tohoto tvaru a za těchto podmínek mazání, se dosahuje kritických přetvoření ve všech analyzovaných směrech a analýza potvrdila problémovost lisování.

Po nanesení maziva na nástřih (emulze, označena v DPV na obr. 9.3.7 jako M1, resp. koncentrované mazivo, M2) byl výlisek tažen z upravených nástřihů (obr. 9.3.2) i ve druhém tahu. Z DPV je patrné, že hladina deformací v analyzovaných površkách klesá pod kritickou LT-liníí v podélném směru (I.) a přes rohy (III., IV.). V příčném směru (II., V.) je však stále kritická. Ve směru I. se zvýšil podíl vypínání v důsledku zlepšeného mazání i ze strany tažníku, neboť posuv je v tomto směru obtížný i po určitém zkrácení nástřihu. Ve všech ostatních směrech se podíl posuvu plechu z oblasti přidržovače zvýšil. Je zaznamenán i výraznější posuv s kvalitnějším mazivem. V příčném směru (II., V.) by další zlepšení, při dosavadním tvaru výlisku, mohlo přinést jen další zmenšení šířky nástřihu.

Z provedené tvarové analýzy vyplývá, že tento tvar výlisku je i při použití silnějšího plechu na hranici možností technologie tažení. To, že některé povrchy vykazaly přetvoření nad kritickou liníí přetvoření LT a nedošlo ke vzniku lomu je možné vysvětlit tím, že čtvercový výlisek dovoluje poněkud vyšší stupeň tažení (dle poměru zaoblení rohů k délce rovné stěny mezi nimi). V rámci této kapitoly byly jen v krátkosti naznačeny možnosti analýzy posuvů a vypínání. Vzhledem k dosavadním poměrům malým zkušenostem s tímto druhem analýzy se jeví jako vhodné i další detailnější zpracování této metodiky.

10. NUMERICKÉ SIMULACE TAŽENÍ VÝLISKŮ

Z předchozích kapitol je zřejmá podstata komplexní analýzy přetvoření výlisků, včetně jejich možností, nesporných předností a výhod. Její nevýhoda tkví pak především v tom, že je možné ji realizovat až ve fázi PO odlisování dílu. Jak komentuje tento fakt S.P. Keeler, je to vlastně již "posmrtný nástroj" využitelný pro analýzu přetvoření, ale ne pro možnost predikce přetvoření [117] již v předvýrobní etapě. Čili není možné nalézt optimální řešení, aniž by se realizovalo pokusně vlastní lisování. V této fázi, kdy je už vyroben tažený nástroj (a často i další postupové nástroje) je již velmi limitován počet parametrů, které lze měnit v rámci optimalizace průběhu lisování. Jinými slovy, ani komplexní analýzou přetvoření nelze posoudit lisovatelnost dílů již ve stádiu jejich konstrukce či ve stádiu konstrukce vlastního lisovacího nástroje.

Možnost analyzovat proces přetvoření plechu již ve fázi konstrukce výlisku či nástroje umožňují právě NUMERICKÉ SIMULACE. Pro tyto účely bylo vyvinuto již značné množství rozmanitých matematických modelů zpracovaných do podoby více či méně univerzálních či speciálních software řešících problematiku lisovatelnosti plechových dílů na různých úrovních. Od nejjednodušších pomůcek přes poloanalytické modely využívajících počítačů řady PC ke složitým programům pracujícím na bázi metody konečných prvků (MKP) používajících ke své činnosti pracovních stanic. Všechny tyto nástroje slouží k řešení problematiky lisování plechových dílů na různých úrovních [118].

Jak bylo uvedeno v kap. 1, zejména v automobilovém průmyslu se objevují výlisky stále složitějších tvarů, s vysokými požadavky na kvalitu a rychlost inovací. Dosavadní metody práce v předvýrobních etapách, často tzv. "metoda pokusu a omylu" jsou však v podstatě stále založeny na zkušenostech a znalostech získaných řešením předešlých případů. Jak však rostou nároky na tvarovou složitost výlisků a používají se stále nově druhy materiálů, je rovněž nezbytné provádět i drahé a časově náročné úpravy nástrojů a pokusně určovat technologické parametry procesu tažení. Tento postup je vynucen požadavky kladenými na kvalitu a spolehlivost výroby, která je představována přijatelnou mírou zmetkovitosti v sériovém lisování. Rovněž je v současné době kladen důraz nejen na minimalizaci nákladů výroby, ale i na její ekologičnost (otázka používaných maziv apod.).

Při řešení těchto úkolů jsou v současné době již nezastupitelným pomocníkem numerické simulace procesu tažení. Simulace poskytne již v předvýrobní etapě (ještě dříve, než je tažený nástroj zhotoven) cenné informace o plastickém toku materiálu, nebezpečí vzniku trhlin, zvlnění, velikosti odpružení a celkové možné kvalitě lisovaného dílu. To umožní realizovat vhodné zásahy a změny v technologii výroby již ve fázi její přípravy a včas optimalizovat tvar výlisku, tvar nástřihu a jeho orientaci, technologické podmínky tažení, technologické zásahy do konstrukce nástroje apod. Takový postup vede k významnému poklesu nákladů při náběhu lisování, zlepšení možnosti řízení a kvality procesu lisování, časovým úsporám při inovacích a ve svých důsledcích i k významnému zvýšení konkurenceschopnosti finálního produktu. Tyto skutečnosti, opírající se o úspěšnou aplikaci numerických simulací, kladou i odpovídající požadavky na příslušné softwarové vybavení, jakými jsou zejména:

- **jednoduchost použití** ; to znamená možnost realizovat simulace přímo v technologických či konstrukčních odděleních bez speciálních znalostí MKP,
- **přesnost** ; výsledky simulace musí s dostatečnou přesností, a to i v případě velkorozměrných složitých výlisků s četnými tvarovými detaily, předpovědět základní tendence i konkrétní hodnoty všech pro lisování důležitých veličin (změny tloušťky plechu, rozložení přetvoření, přetvoření v kritických místech apod.)
- **výpočetní výkonnost** ; provedení simulace na relativně levných počítačích, jež jsou běžně dosažitelná v TPV odděleních. Aby bylo možné simulovat více variant řešení, čas simulace, včetně přípravy vstupních dat a vyhodnocení výsledků, by neměl být delší než řádově desítky minut.

V současné době existuje celá řada programů na bázi MKP, které lze využít k řešení nelineárních úloh, jaké představuje i tažení plechů [119,120]. Tato technologie zahrnuje v podstatě kombinaci tří typů nelineárního chování, jako je nelinearita :

- ☐ geometrická (velké tvarové změny),
- ☐ materiálu (nelineární zpevňování plechu při plastickém přetvoření),
- ☐ okrajových podmínek (proměnný kontakt plechu s nástrojem).

V těchto úlohách není napětí přímo úměrné ani deformaci ani zatěžování. Závislost síly na dráze nástroje je také nelineární. Rovněž zde nelze uplatnit princip superpozice. Řešení těchto úloh je tak nesrovnatelně složitější než běžných úloh lineárních. Dále je nutné vzít v úvahu, že numerické simulace, vzhledem k podstatě metody konečných prvků, jsou vlastně jen metody přibližné analýzy, které poskytnou jen tak přesný výsledek, jak kvalitní se podaří určit či vytvořit základní prvky řešení, jako je :

- ☐ model úlohy (vhodný popis MKP elementy (diskretizace) pro daný problém)
- ☐ model chování materiálu (včetně přijatých předpokladů)
- ☐ popis zatěžování a specifikace okrajových podmínek
- ☐ algoritmus vlastního řešení

V případě takto složitých úloh pak jejich úspěšné řešení také velmi závisí i na znalostech a zkušenostech vlastního realizačního týmu. Skutečností je, že současně *obecné* programy na bázi metody konečných prvků nejsou schopny uspokojivě řešit úlohy tažení plechových výlisků. S ohledem na výše stanovená simulační kritéria, je zřejmé, že úspěšná simulace je zajištěna pouze použitím speciálních programů. V těchto případech je proto nutné použít programů speciálně vyvinutých pro tyto úlohy jako je např. ABAQUS, DYNA-3D, OPTRIS, PAM-STAMP, AUTOFORM, apod. Uvedené programy, ač určené pro stejnou problematiku, se navzájem liší vlastní metodou výpočtu. Při nelineární simulaci metodou konečných prvků je deformační stav obecně popsán rovnicí (10.1)

$$\mathbf{K}(\mathbf{u})\Delta\mathbf{u} = \Delta\mathbf{F} \quad (10.1)$$

kde $\Delta\mathbf{u}$ je matice posunutí, $\Delta\mathbf{F}$ je matice sil a $\mathbf{K}(\mathbf{u})$ je matice tuhosti.

Pro řešení je možné použít explicitní nebo implicitní metodu. Obě metody mají své přednosti i nevýhody. Při explicitním postupu se přírůstek zatížení volí tak malý, že se matice tuhosti v kroku "i" může vypočítat, aniž se dopustíme velké chyby, pomocí veličin předcházejícího stavu "i-1" [121]. Nevýhodou explicitního programu je závislost časového inkrementu na velikosti konečných prvků. Časový inkrement je proto často velmi malý, okolo 10^{-5} sec. Pak je nutné reálný proces při výpočtu uměle zrychlit (např. umělé zvýšení hmotnosti o dva řády zrychlí výpočet o jeden řád, přičemž zavedením "hmotnostního" členu se získá dobře podmíněná soustava a zlepší se stabilita řešení). Explicitní výpočty jsou neustále ve statické nerovnováze. Zatímco první faktor znemožňuje, bez extrémního vlivu na výpočetní čas, adaptivní zjemnění sítě, druhá skutečnost vyžaduje velkou zkušenost obsluhy pro odhadnutí dynamických vlivů na výsledek. Při implicitním postupu se volí větší krok, výpočet je časově stabilnější i když složitější (větší počet iterací). Výpočet je proto v tomto případě iterativním postupem tak dlouho vylepšovat, dokud se na konci kroku nedosáhne dostatečné přesnosti.

Následující kapitola je zaměřena na orientační seznámení s programem AUTOFORM (IFU, ETH, Zürich) určenému pro numerickou simulaci tažení výlisků zejména karosářského typu. Jako příklad praktického použití AUTOFORMU je naznačena úloha numerické simulace tažení karosářského výlisku sledující optimalizaci tohoto dílu z hlediska jeho kvality a podmínek tažení.

10.1 PROGRAM AUTOFORM A PŘÍKLAD JEHO VYUŽITÍ

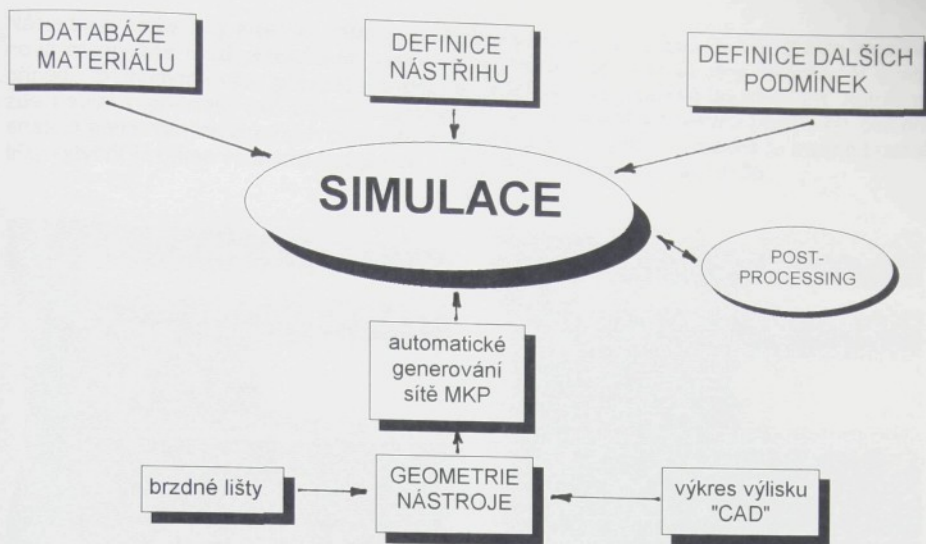
AUTOFORM je založen na implicitním způsobu integrace [122,123]. Obejde se tak bez zavádění umělých setrvačných sil, což umožní volit mnohem větší časový krok při zajištění statické rovnováhy, i když nevýhodou je nutnost více iterací v každém kroku. Pro každou iteraci je nezbytné vyřešit soustavu lineárních rovnic, jejichž počet odpovídá počtu stupňů volnosti daného problému. Takové řešení je buď přímé (např. Gauss - Jordan) nebo iteraci (např. metoda konjugovaných gradientů). V případě přímé metody jsou velké nároky na kapacitu paměti a řešení je poměrně pomalé. V případě iteračního řešení však musí být zase soustava dobře podmíněná. Na plechové výlisky je pohlíženo jako na skořepiny, takže výsledná soustava rovnic bude asi těžko dobře podmíněná. To je dáno tím, že tuhost membrány, plechu, se podstatně liší je-li uvažována v rovině plechu či kolmo na ni. Z těchto důvodů bylo zvoleno pro AUTOFORM netradiční řešení, které by splňovalo požadavky kladené na technicky i komerčně úspěšně využitelný software formulované v předchozí kapitole.

Algoritmus pracuje tak, že v každém novém časovém kroku je nejprve hledán tvar výlisku, který vyhovuje okrajovým podmínkám daných nástrojem v okamžité poloze. V kontaktních oblastech je tento tvar definován tvarem nástroje. Pro ostatní oblasti výlisku může být pak určen jen přibližně některým jednoduchým postupem (např. jako rovnoměrně zatížená membrána). Pro většinu výlisků je totiž výsledný tvar na konci tažení stejně již plně dán tvarem nástroje. Následně je pak pro tento tvar řešen vlastní nelineární tok materiálu. V tomto okamžiku to představuje realizaci konkrétních iteračních výpočtů. Toto vzájemně nesvázané řešení mezi určením tvaru a výpočtem nelineárního toku materiálu v rámci tohoto tvaru, má značné výhody. Během iteračního výpočtu nelineárního toku materiálu se berou v úvahu pouze dva stupně volnosti pro každý uzel MKP-sítě, tj. dvě posunutí v rovině plechu. V obecném případě má však pro uvažovanou skořepinu každý uzel šest stupňů volnosti. V případě přímého řešení soustavy lineárních rovnic je výpočetní čas přímo úměrný třetí mocnině tohoto čísla. Tak lze při porovnání obou zmíněných postupů dospět ke zkrácení výpočetního času v poměru 216 : 8. Výsledkem vzájemného oddělení obou fází řešení pak je, že nejsou směřovány "nízko-tuhé" stupně volnosti (při ohýbání plechu) s "vysoko-tuhými" stupni volnosti v rovině plechu a vzájemně nespojené soustavy rovnic pak tvoří dobře podmíněné soustavy. Pak lze využít iteračního postupu pro řešení nelineárního toku materiálu, což vede k malým nárokům na paměť počítače a docílí se velkých výpočetních výkonů.

Vlastní program je tvořen třemi základními bloky: AFIGES (pro načtení dat z CAD prostředí, nejlépe pomocí IGES interface), XAF (zabezpečuje interaktivní práci - pre a post processing) a AF (výpočetní blok).

Vzhledem k tomu, že AUTOFORM je určen k použití přímo v konstrukčně technologických odděleních, je zadávání vstupních dat maximálně zjednodušeno. Souhrnný přehled vstupních údajů je zřejmý z následujícího popisu a schématu na obr. 10.1.

- ☐ Definice nástřihu (tloušťka plechu, rozměry, tvar, poloha, orientace vůči směru válcování, osy symetrie)
- ☐ Definice materiálových charakteristik (modul pružnosti, poissonovo číslo, mez kluzu, křivka zpevnění " $\sigma - \varphi$ " a její korekce dle citlivosti materiálu na rychlost deformace, plošná anizotropie normálové anizotropie, křivka mezích přetvoření)
- ☐ Definice kontaktních tření (součinitel tření a místo jeho působení)
- ☐ Definice nástroje (tažník, tažnice, přidržovač, brzdící lišty)
- ☐ Definice brzdících lišt (nejsou-li uvažovány jako součást nástroje, lze brzdící účinek modelovat zadáním jejich parametrů)
- ☐ Definice dalších podmínek (pohyblivá část nástroje, síla přidržovače, tuhost přidržovače, "CCF" soubor (Control Cards File) umožňující bližší specifikaci dalších téměř padesáti parametrů výpočtu)

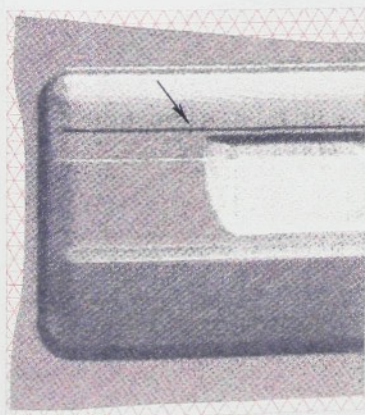


Obr. 10.1 Blokové schéma základních prvků programu AUTOFORM

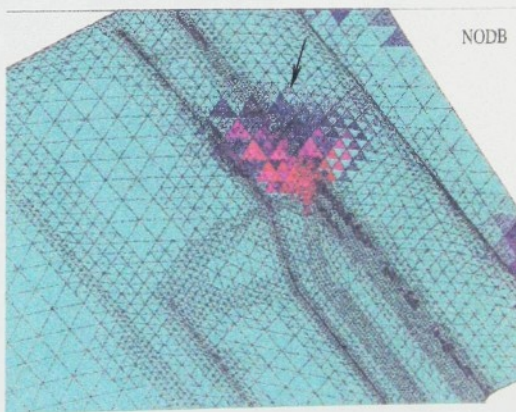
Příklad využití numerické simulace programem Autoform lze demonstrovat na úloze optimalizace výlisku zadního čela automobilu třídy "pick-up", řešenou v rámci projektu lisování [124-126].

Uvedený výlisek je tažen z obdélníkového nástřihu rozměrů 0.7x750x1540 mm z plechu jakosti FePO4. Tvar výlisku je zřejmý z obr. 10.2a.

Numerická simulace tažení odhalila kritické oblasti výlisku z hlediska možných ztrát stability procesu plastického přetvoření. Jedná se jak o oblasti ohrožené vznikem tvárných lomů tak i o oblasti s nebezpečím zvlnění. Nejkritičtější oblasti z hlediska vzniku vln jsou oblasti v okolí hlubokého prolisu ve střední části výlisku, viz. obr. 10.2b.



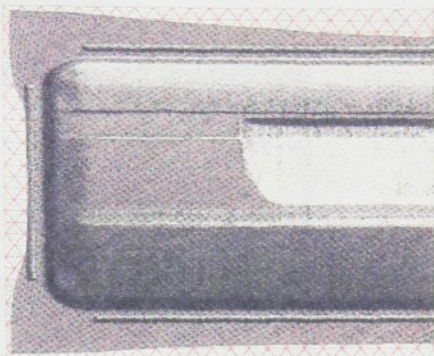
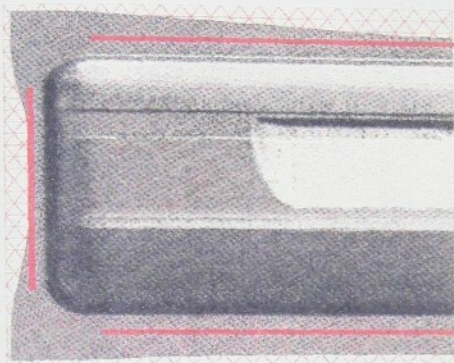
a)



b)

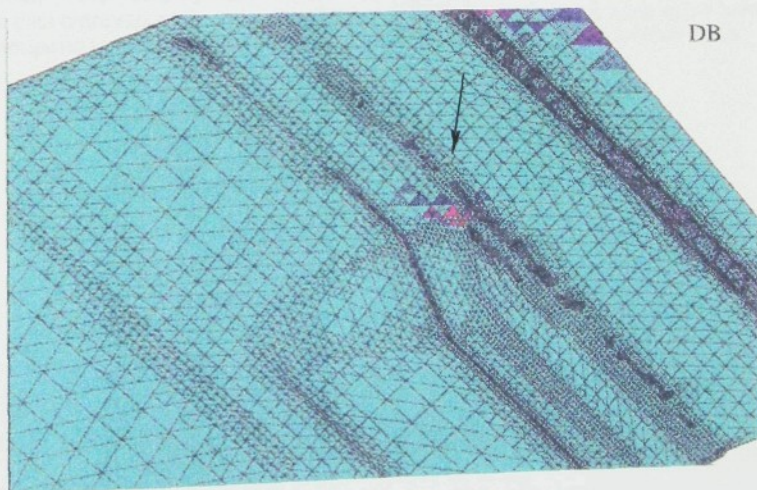
Obr. 10.2 První varianta simulace tažení výlisku zadního čela (a) a oblasti nejvíce ohrožené vznikem vln (b)

Následující kroky byly proto zaměřeny na eliminaci zvlnění. V souladu s kap. 8 byla hledána nová rovnováha mezi přetvořením posuvy a vypínáním tak, aby se vlny netvořily. V tomto případě to znamená větší přibrzdění plechu v oblasti příruby použitím brzdných lišt. Autoform zde nabízí v podstatě dvě základní možnosti. Nejprve simulovat brzdný účinek lišt pomocí snadno definovaných brzdných ploch jak je zřejmé z obr. 10.3a, a následně je možné brzdné lišty vytvořit již přímo v nástroji (rozumí se v jeho CAD datech), viz. obr. 10.3b.

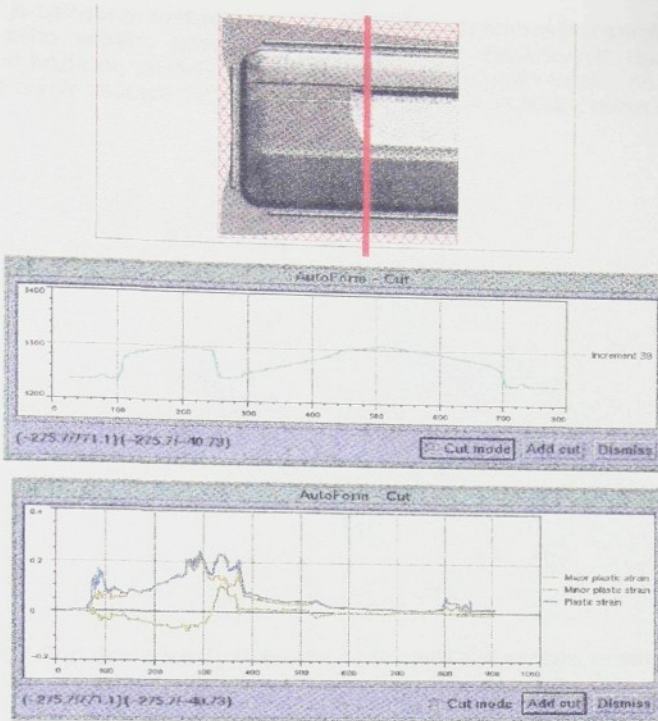


a) b)
Obr. 10.3 Dvě možné varianty simulace činnosti brzdných lišt v Autoformu

Výsledkem použití brzdných lišt je podstatné snížení rizika zvlnění v okolí prolisu, tak jak je dokumentováno na obr. 10.4. Nicméně je z tohoto obrázku zřejmé, že určité riziko vzniku viditelných vln zde stále přetrvává. Zvyšovat brzdící účinek lišt však nelze neomezeně, tak aby došlo k úplnému vyhlazení zvlnění, neboť tu naopak vzrůstá nebezpečí vzniku trhlin. Jak bylo konstatováno již v kap. 7, pro zhotovení kvalitního vylisku zde musí být optimální rovnováha mezi přetvořením posuvy a vypínáním.

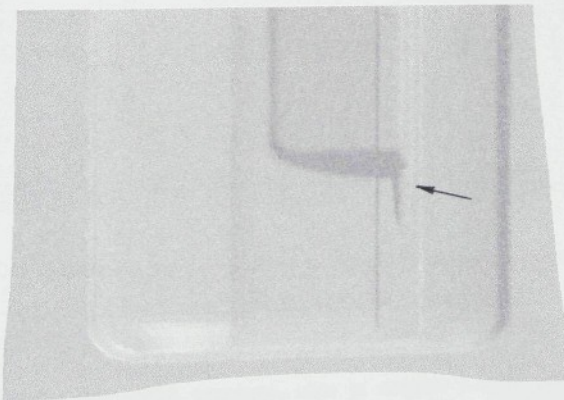


Obr. 10.4 Podstatné omezení vzniku vln v kritickém místě použitím brzdných lišt



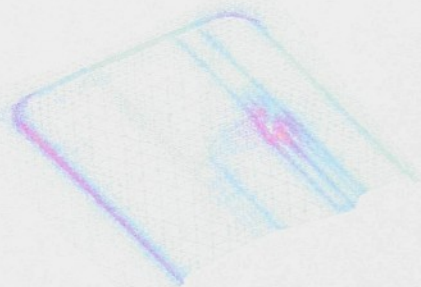
Obr. 10.5 Geometrie výlisku a rozložení deformací ve zvoleném řezu dané varianty řešení

Při požadavku na maximální kvalitu výlisku a po zvážení simulací získaných výsledků bylo nakonec přistoupeno k dílčí změně tvaru výlisku. A sice v místě s kritickými tlakovými napětími vytvořit malý prolis, který by absorboval přebytečný materiál a tím zcela eliminovat vznik vln. Výlisk s dílčí tvarovou změnou je patrný na obr. 10.6. Po příslušných změnách v tvaru výlisku bylo přistoupeno k nové simulaci, aby byla opět odhalena nová možná kritická místa.

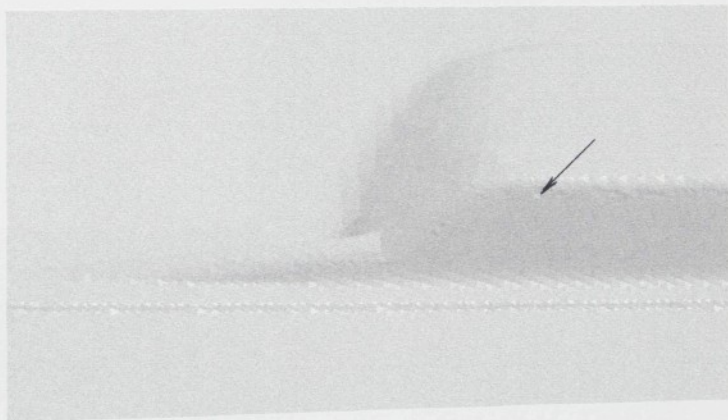


Obr. 10.6 Výlisk s realizovanou tvarovou změnou v podobě prolisu v kritické oblasti

Na obr. 10.7 je zachyceno rozložení intenzity přetvoření, které ukazuje maximální hodnoty ve stěně původního velkého prolisu právě v sousedství provedených tvarových úprav. Intenzivnějším brzděním plechu v oblasti příruby se snížilo riziko vzniku vln, ale na druhé straně se tím zvýšilo nebezpečí vzniku trhlin. Pohled na novou kritickou oblast stěny prolisu je na obr. 10.8.

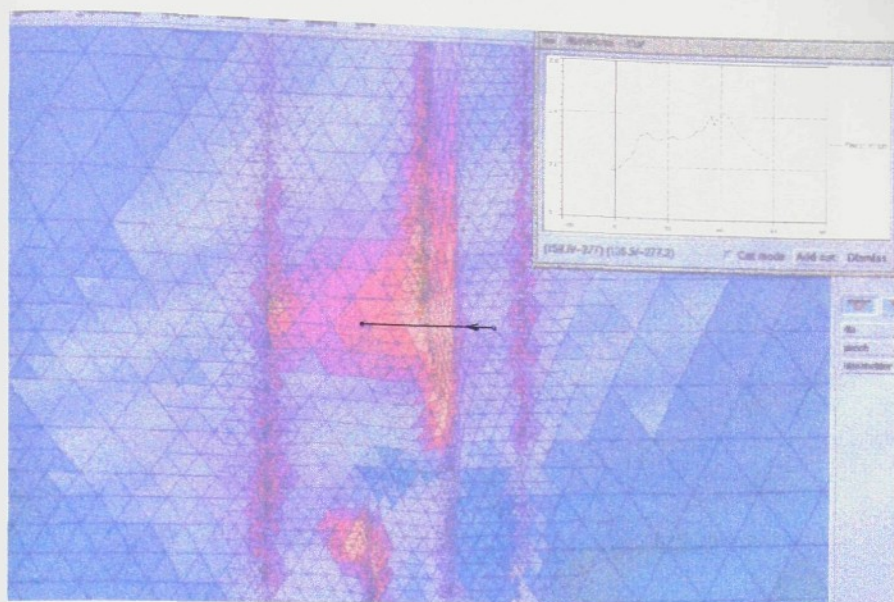


Obr. 10.7 Rozložení intenzity přetvoření s maximálními hodnotami ve stěně prolisu

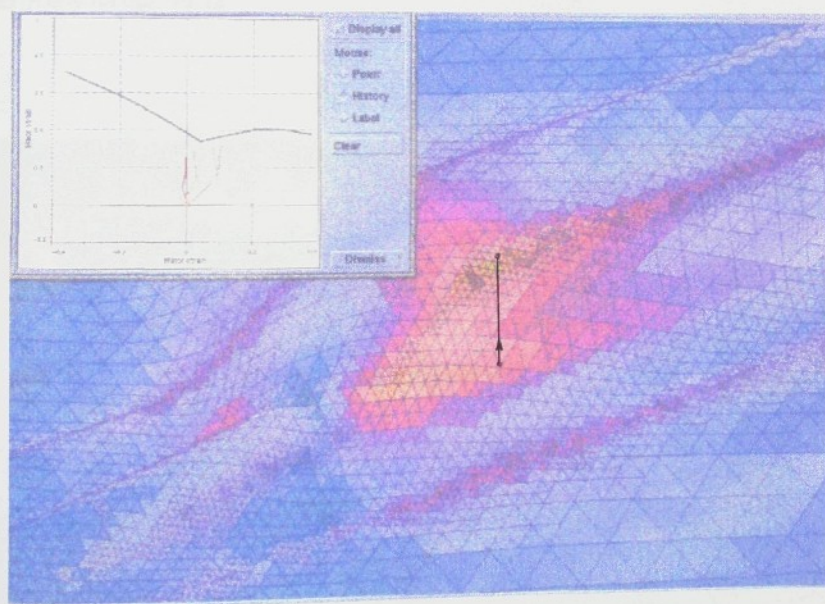


Obr. 10.8 Pohled na novou kritickou oblast (vznik trhlin) ve stěně prolisu.

Některé další výsledky numerické simulace, jako je detailní pohled na rozložení intenzity přetvoření, výběr deformačních stop a rozložení tloušťky plechu v kritické oblasti dle obr. 10.8, jsou zachyceny jako příklady na následujících obrázcích.



Obr. 10.9 Řez kritickou oblastí zachycující rozložení intenzity přetvoření

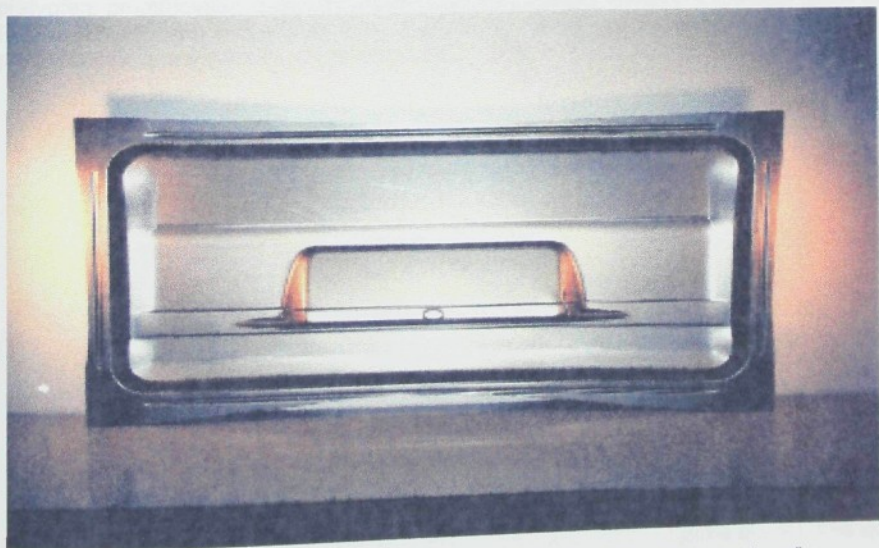


Obr. 10.10 Některé deformační stopy z kritické oblasti. V DMP směrem zleva doprava představuje stopy z míst z dolní části stěny prolisu směrem k hornímu zaoblení.



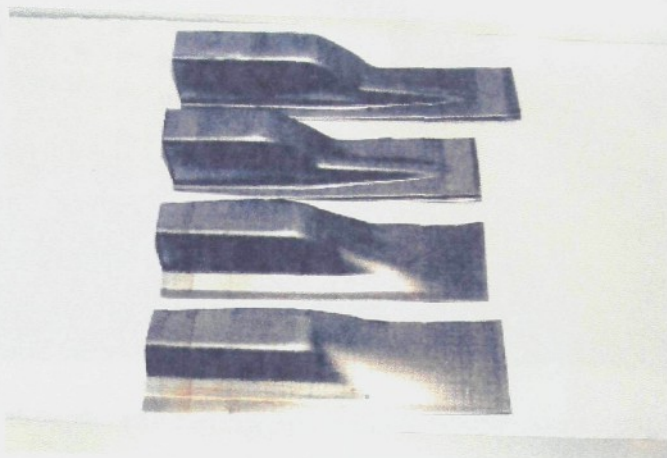
Obr. 10.11 Ukázka rozložení tloušťky plechu v kritické oblasti přetvoření

Po provedeném rozboru a optimalizaci procesu tažení daného výlisku následovala fáze výroby vlastního nástroje. V tomto okamžiku, dříve než byl nástroj předán k sériovému lisování, byly provedeny ještě v nástrojárně některé dílčí analýzy přetvoření, aby mohly být následně využity alespoň k orientačnímu ověření některých aspektů simulace. Reálně vytážený výlisek je zachycený na obr. 10.12.



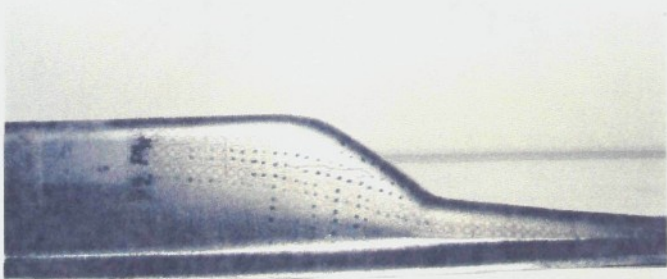
Obr. 10.12 Reálně vytážený výlisek zadního čela automobilu "pick-up"

V rámci prováděné analýzy byly odlisovány i výlisky s odstupňovanou hloubkou, které umožní stanovit deformační stopu v analyzovaných kritických místech. Odstupňování tahů bylo přibližně na 1/3 celkové hloubky výlisku, 2/3 hloubky a plný tah. Odlisování zmetkového výlisku bylo zabezpečeno zvětšením síly přidržovače. Celý postup vzniku výlisku představovaný pouze vyjmutou dílčí kritickou částí prolisu je zachycený na obr. 10.13.

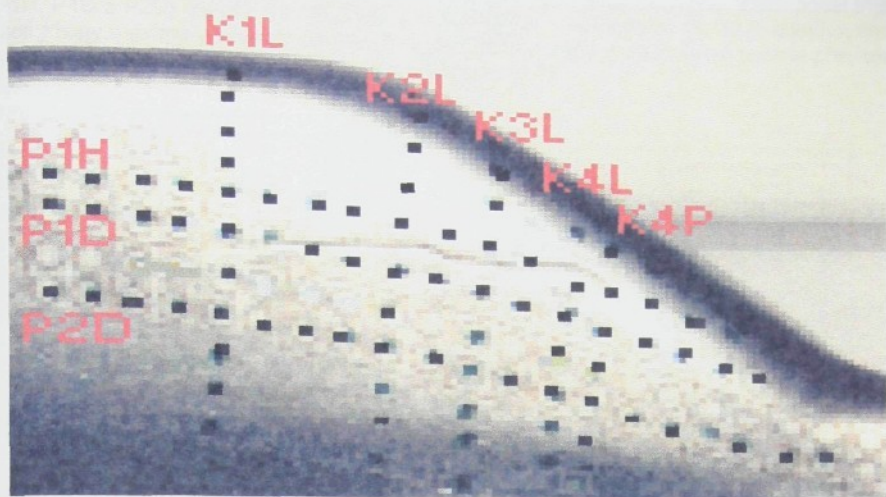


Obr. 10.13 Postupně tažené výřezy kritické oblasti výlisku zachycující historii deformace

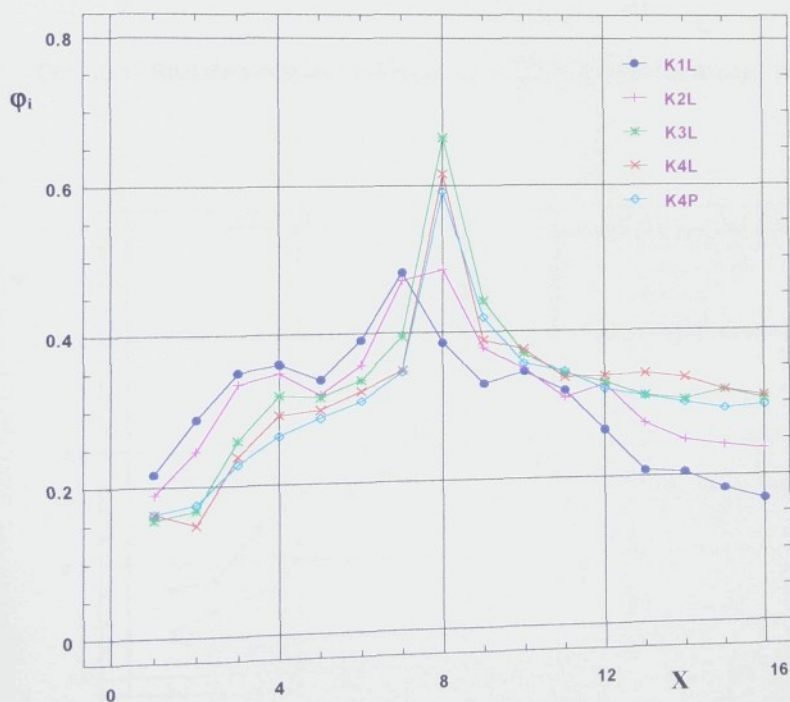
Na obr. 10.14 je opět pohled na kritickou oblast prolisu z obr. 10.8. V tomto případě je to ta část, která odpovídá zmetkovému výlisku s jasně patrnou trhlinou. Na obr. 10.15 je detailní pohled na trhlinu spolu s vyznačenými elementy deformační sítě, které byly v rámci analýzy přetvoření proměřovány. Jsou zde rovněž označeny měřené površky, a to podél trhliny (P1H, P1D, P2D) a kolmo k trhlině (K1L až K4L). Obr. 10.16 pak zachycuje rozložení intenzity přetvoření ve vybraných pěti površkách dle obr. 10.15.



Obr. 10.14 Pohled na kritickou oblast prolisu zmetkového výlisku s jasně patrnou trhlinou.

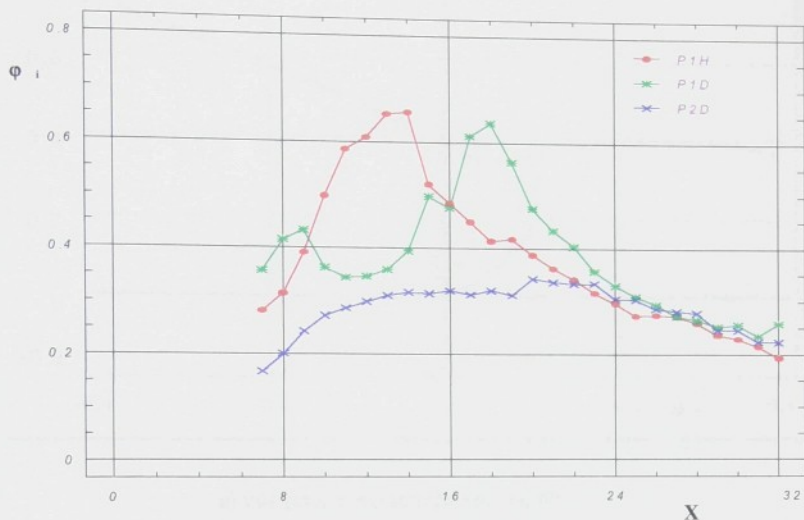


Obr. 10.15 Detailní pohled na trhlinu spolu s proměřovanými elementy deformační sítě

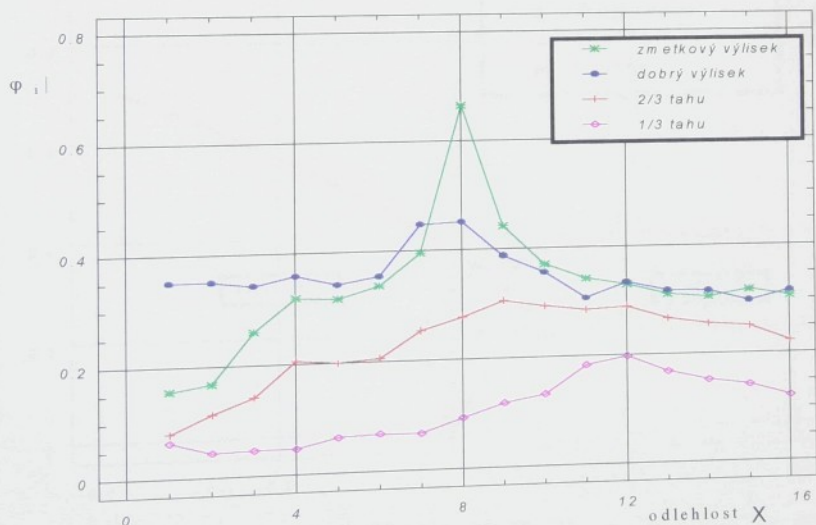


Obr. 10.16 Rozložení intenzity přetvoření ve vybraných pěti površkách dle obr. 10.15.

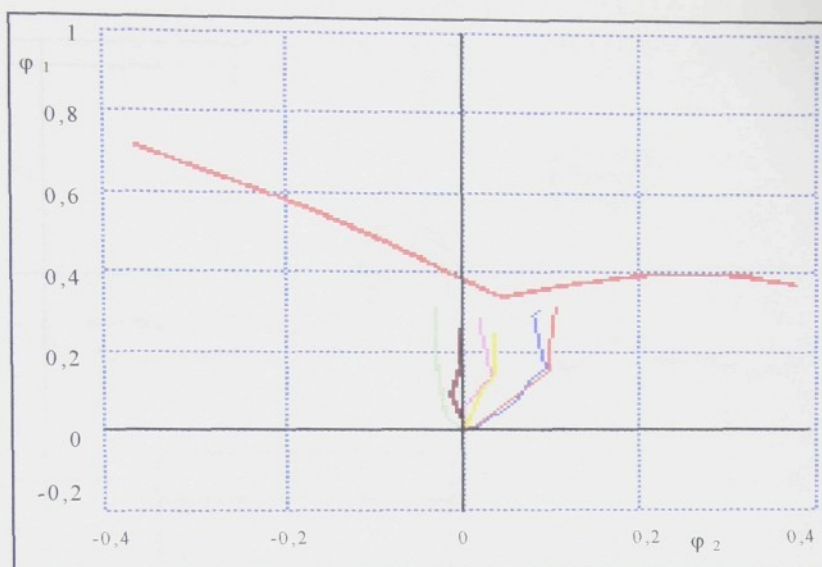
Obr. 10.17 zachycuje rozložení intenzity přetvoření ve vybraných třech povrchách podél trhliny (P1H, P1D a P2D) dle obr. 10.15. Z pěti povrchů kolmo k trhlině (obr. 10.16) je dosahováno v okolí trhliny maxima v případě povrchu K3L. Pro tuto povrchku je zachycena historie přetvoření pro dané čtyři odstupňované hloubky tažení na obr. 10.18.



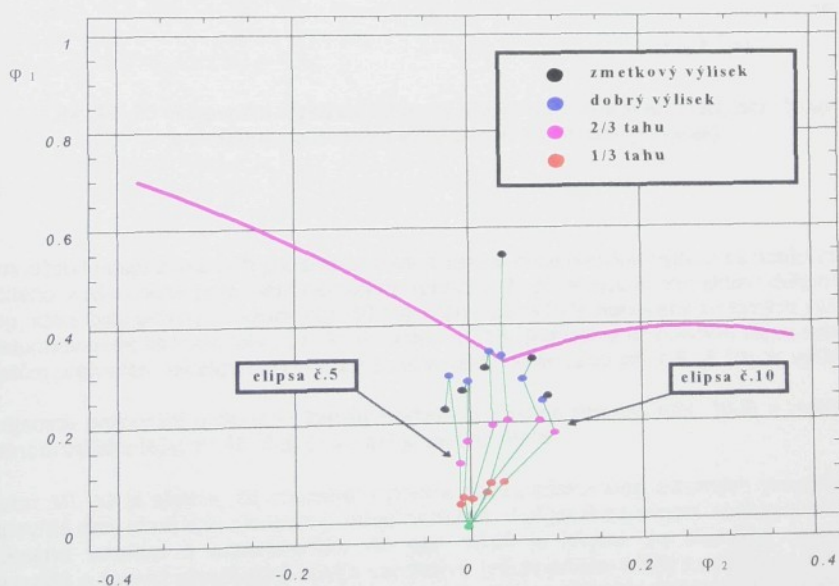
Obr. 10.17 Rozložení intenzity přetvoření v povrchách podél trhliny dle obr. 10.15



Obr. 10.18 Historie přetvoření odpovídající povrchu K3L

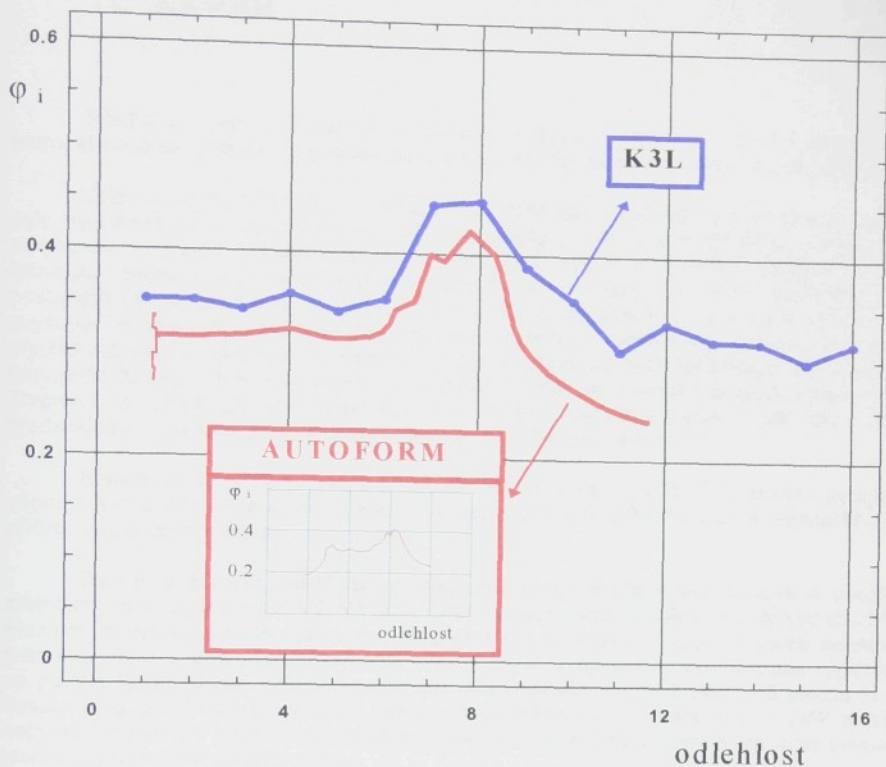


a) výsledky simulace dle obr. 10.10



b) výsledky experimentu

Obr. 10. 19 Porovnání charakteru deformačních stop určených simulací (a) s experimentálně stanovenými (b) (odstupňované tažení dle obr. 10.13)



Obr. 10. 20 Porovnání rozložení intenzity přetvoření získané simulací (obr. 10.9) a změřené na reálném výlisku (obr. 10.18, dobrý výlisk)

Z množství údajů získaných jak simulací, tak z reálně odlisovaného výlisku se nabízí možnost určitého vzájemného porovnání některých výsledků. Např. srovnání charakteru deformačních stop, které byly určeny simulací (obr. 10.10) s těmi, které byly stanoveny z reálných výlisků po odstupňovaném lisování (obr. 10.13) je na obr. 10.19. Jednotlivé deformační stopy odpovídají místům přetvoření ležicím na povrchu K3L (elementy deformační sítě č.5 až 10) na výlisku.

Vzájemné porovnání rozložení intenzity přetvoření získané simulací (obr. 10.9) a změřené na reálném výlisku (obr. 10.18, dobrý výlisk) je na obr. 10.20.

Z obr. 10. 19 je zřejmé, že charakter i poloha deformačních stop získaných simulací dobře odpovídá těm, které byly stanoveny experimentálně. V případě porovnání rozložení přetvoření určeného simulací a experimentem dle obr. 10.20 je zřejmé, že charakter rozložení si odpovídá a rovněž simulovaná křivka uspokojivě určuje polohu místa s maximem deformací. Na druhé straně simulovaná křivka je posunuta k nižším hodnotám deformaci přibližně o 12%. Vzhledem k složitosti procesu tažení výlisků karosářského typu a množství faktorů vstupujících do reálného procesu lisování lze tuto shodu považovat za výbornou. To celkem odpovídá i tvůrci programu [122] proponované přesnosti, kde by měly být odchylky řešení okolo 10%.

11. ZÁVĚR

Předložená práce se zabývá komplexní analýzou přetvoření výlisků nepravidelných tvarů, která je součástí široké problematiky hodnocení lisovatelnosti karosářských výlisků.

Jejím cílem bylo rozšíření teoretických i praktických poznatků z této oblasti, které by byly využitelné jak v předvýrobních etapách přípravy výroby karosářských výlisků, tak v samotném sériovém lisování. Jejím smyslem je i urychlit a usnadnit ožívování nových lisovacích nástrojů, zvýšení spolehlivosti jejich funkce po celou dobu jejich životnosti jakož i poskytnutí účinné metodiky umožňující řešení nejen zmetkovitosti ve výrobě výlisků, ale i zvyšování kvality lisovaných dílů a její udržení v celém výrobním cyklu. Zpětnou vazbou pak urychlit a zkvalitnit i fázi technické přípravy výroby výlisků od jejich konstrukce přes konstrukci lisovacího nástroje až po jeho výrobu a uvedení do provozu, k vlastní sériové výrobě výlisků. Zrychlení a zkvalitnění technické práce v celém uvedeném řetězci pak dává reálné předpoklady ke zvýšení konkurenceschopnosti finálního produktu na trhu.

Komplexní analýza přetvoření je pak pojata v celé její šíři. Pozornost je nejprve věnována charakteristice výlisků nepravidelných tvarů karosářského typu a nejrozšířenějším příčinám jejich zmetkovitosti.

Dále je pozornost zaměřena na diagramy mezních přetvoření stanovené početními metodami spolu s přehledem vývoje teorii ztrát stability. Jsou popsány metody výpočtu křivek mezních přetvoření pro tři významné definice mezních stavů (v rozmezí meze pevnosti a tvárného lomu). Z provedených výpočtů KMP a jejich vzájemného srovnání pak vyplývá, že se poloha těchto křivek v DMP značně liší. Maximálního využití plasticity plechu je pak dosahováno pro KMP dle Ghoshe (kritérium tvárného lomu), která leží v DMP nejvýše, nejmenšího pak pro teoretickou Goodwin-Keelerovu KMP (ztráta stability na mezi pevnosti), která zaujímá v DMP nejnižší polohu.

Z rozboru věnovaného nejdůležitějším materiálovým charakteristikám pro výpočet KMP stanovených zejména zkouškou tahem vyplývá, že metodika jejich stanovení, i když je často zachycena v různých normách, není jednoznačná ve vztahu k jejich využití pro výpočet křivek mezních přetvoření. Ve smyslu příslušných norem jsou některé tyto parametry sice stanoveny jako určitým způsobem definované materiálové charakteristiky (zejména exponent deformačního zpevnění), ale toto stanovení nemusí být nejvhodnější pro využití k výpočtům křivek mezních přetvoření. Přičteme-li k tomu určitou benevolenci v metodice stanovení jiných charakteristik (normálová anizotropie), a to, že stanovení dalších charakteristik není normalizováno vůbec, pak to ve svých důsledcích vede k výpočtům mezních přetvoření, které se navzájem významně liší. Tím lze i vysvětlit omezené možnosti praktické využitelnosti početně stanovených diagramů mezních přetvoření. Výše uvedené skutečnosti pak vedou jednak k hledání vhodných postupů praktického ověřování početně stanovených KMP, jak je uvedeno např. v kap. 6.6, jednak k další snaze o rozvoj početních metod stanovení DMP, které by umožnily výpočet mezních přetvoření v co nejlepší shodě s realitou [127-129]. Všechny tyto uvedené skutečnosti pak často vedou k upřednostnění praktického využití experimentálně stanovených diagramů mezních přetvoření, i když jejich stanovení je výrazně pracnější.

V práci je tak dále uvedena efektivní metoda experimentálního určování DMP v laboratorních podmínkách. V této souvislosti je věnována pozornost definici mezního stavu, možnostem stanovení mezních deformací, jakož i hranic přetvoření v DMP ve vztahu k analýze přetvoření reálných výlisků. Dále je popsán i vliv takových významných faktorů ovlivňujících experimentální KMP, jako jsou rychlost deformace, podmínky tření při vypínání vzorku a historie přetvoření.

V souvislosti s analýzou přetvoření je věnována samozřejmě pozornost i problematice vytváření povrchových deformačních sítí, možnostem jejich efektivního proměřování a celkového vyhodnocení. Jednoznačně se ukazuje nutnost využít pro měření deformací více či méně automatizované systémy s počítačovou podporou, které jsou schopny výrazně zlepšit komfort měření i produktivitu práce při proměřování rozsáhlých oblastí výlisku.

Podrobně je zde popsána vlastní metodika analýzy přetvoření výlisků nepravidelných tvarů a konfrontace zjištěných přetvoření s mezními v podobě DMP, včetně popisu nejdůležitějších faktorů, které mají zásadní vliv na úspěšnost lisování. Pozornost je věnována nejen využití analýzy deformací a posouzení jejich kritičnosti ve vztahu k vlastnímu výlisku, ale je zaměřena i na oblast s touto problematikou úzce související, a to k využití analýzy přetvoření ve vztahu k oživování nově vyrobených lisovacích nástrojů. Zde jsou rovněž orientačně naznačeny i některé možnosti zásahů směřujících k odstranění potíží při lisování.

Zevrubně popsaná metodika komplexní analýzy přetvoření je prakticky aplikována na výlisku vnitřních dveří a na výlisku spodního víka motoru, na němž je provedena i analýza posuvů a vypínání. Analýza přetvoření založená na využití povrchových deformačních sítí umožňuje studium procesu přetvoření plechu v dílčích omezených oblastech výlisků. Naproti tomu analýza posuvů a vypínání umožní studium procesu přetvoření nikoli jen v některé omezené lokalitě výlisku, ale naopak určitým způsobem posuzuje deformace ve velkých oblastech výlisků. Myšlenými řezy (metodou měření povrsek) přes rozsáhlé oblasti výlisku analyzuje jednotlivé podíly přetvoření posuvy či vypínáním, a tak vhodně doplňuje lokální analýzu deformačními sítěmi o informace o globálním přetvoření v souvislosti s daným tvarem výlisku, resp. tvarem nástřihu a technologickými podmínkami tažení.

Možnosti komplexní analýzy přetvoření jsou v současné době významně rozšířeny i dalším mocným nástrojem pro možnou optimalizaci veškerých konstrukčních i technologických parametrů výroby, a sice numerickými simulacemi procesu tažení výlisků. Tyto simulace umožňují optimalizovat vlastní výrobní technologii ještě ve "stádiu výkresu", tj. již na úrovni předvýrobních etap. V práci je tak naznačena metodika využití poznatků numerické simulace pro optimalizaci výrobního postupu při náběhu výroby nového typu výlisku. Výsledky simulace jsou konfrontovány s výsledky získanými pomocí analýzy přetvoření z následně reálně vytaženého výlisku.

Předložená práce neřeší problematiku hodnocení lisovatelnosti karosářských dílů v celé její šíři a složitosti, ale je cílena na analýzu přetvoření a s ní související skutečnosti. Vhodným využitím komplexní analýzy přetvoření spolu s numerickými simulacemi je možné významně urychlit náběh výroby nových výlisků a včas optimalizovat jak konstrukci výlisku a nástroje, tak technologické podmínky výroby. Konkrétní ověřování výsledků analýzy přetvoření v praxi ukázalo na široké možnosti uplatnění této metodiky jak v předvýrobních etapách v rámci technické přípravy výroby karosářských výlisků, přes výrobu lisovacího nástroje tak i ve vlastním sériovém lisování.

12. LITERATURA

1. DINDA, S. - JAMES, K.F. - KEELER, S.P. - STINE, P.A.: How to Use Circle Grid Analysis for Die Tryout. ASM, USA, 1981
2. KEELER, S. P.: Sheet Metal Stamping Technology - Need for Fundamental Understanding. In: Proc. of GMR Symp. "Mechanics of Sheet Metal Forming", USA, 1978
3. LANGERAK, N.A.J.: The Application of Computer Models and Automated Strain Measurements in the Solving of Sheet Metal Forming Problems. In: Proc. of 18th Biennial Congress of IDDRG "Recent Developments in Sheet Metal Forming Technology". Lisbon, Portugal, May 1994
4. MIKEŠ, V.: Příspěvek k problematice určování mezních hodnot velkých plastických přetvoření při tažení výlisků karosářského typu. [Kandidátská disertační práce], VŠST, Liberec 1969.
5. TMĚJ, J. - MIKEŠ, V. - BUCHAR, Z.: Mezní stavy při tažení výlisků. Strojírenská výroba, sv. 37, 1989.
6. BUCHAR, Z.: Diagramy mezních přetvoření tenkých hlubokotažných plechů. [kandidátská disertace], Liberec, VŠST, 1987
7. STORY, J.M. - JARVIS, G.W. - ZONKER, H.R. - MURTHA, S.J. : Issues and Trends in Automotive Aluminum Sheet Forming. In : Sheet Metal and Stamping Symposium, International Congress and Exposition, Detroit, March 1993
8. TOMLENOV, A.D.: Plastičeskoe napražennoe sostojanie i ustojčivost' processa vytazhki detalej sloznoj formy. In: Voprosy obrabotki metallov davleniem, AN SSSR 1959
9. KOBAYASHI, H.: Shear Localization and Fracture in Torsion of Metals. [Ph.D. Thesis], Dept. of Engineering, University of Reading, GB, 1987
10. SAKA, K. - PAINTER, M. J. - PEARCE, R. : The Uniaxial Strain-Hardening Behaviour of Sheet Metal from Zero Strain to Failure. In : Sheet Metal Forming and Formability. Proc. IDDRG, Warwick, 1978
11. KEELER, S. P. - BACKOFEN, W. A. : Plastic Instability and Fracture in Sheets Stretched Over Rigid Punches. TRANS. QUART. ASM, Vol. 56, No.1, March, 1963
12. SWIFT, H. W. : Plastic Instability under Plane Stress. J. MECH. PHYS. SOLIDS., Vol. 1, 1952
13. HILL, R.: Matematičeskaja teorija plastičnosti. Moskva, GITTL, 1959
14. HILL, R. : On Discontinuous Plastic States, with Special Reference to Localized Necking in Thin Sheets. J. MECH. PHYS. SOLIDS., Vol. 1, 1952
15. DODD, B.- BAY, Y.: Ductile Fracture and Ductility with Applications to Metalworking. Academic Press inc., 1987, GB
16. SAKA, K. - PAINTER, M. J. - PEARCE, R. : The Uniaxial Strain-Hardening Behaviour of Sheet Metal from Zero Strain to Failure. In : Sheet Metal Forming and Formability. Proc. IDDRG, Warwick, 1978
17. HASEK, V. : Untersuchung und Theoretische Beschreibung Wichtiger Einflussgrößen auf das Grenzformänderungsschaubild. Blech-Rohre-Profile, 25, No. 5, 6, 10, 12, 1978
18. GHOSH, A. K. : Strain Localization in the Diffuse Neck in Sheet Metal. Metallurg. Trans. A, July, 1974
19. HILL, R. - HUTCHINSON, J.W.: Bifurcation Phenomena in the Plane tension Test. J. Mech. Phys. Solids, Vol.23, 1975, pp. 239-264
20. RUDNICKI, J.W. - RICE, J.R.: Conditions for the Localization of Deformation in Pressure-Sensitive Dilatant Materials. J. Mech. Phys. Solids, Vol.23, 1975, pp. 371-394
21. CHAU, K.-T. - RUDNICKI, J.W.: Bifurcations of Compressible Pressure - Sensitive Materials in Plane Strain Tension and Compression. J. Mech. Phys. Solids, Vol.38, No. 6, 1990, pp. 875-898

22. HILL, R.: A Theoretical Perspective on In-Plane Forming of Sheet Metal. *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.39, No. 2, 1991, pp. 295-307
23. HILL, R.: On Intrinsic Eigenstates in Plasticity with Generalized Variables. *Math. Proc. Camb. Phil. Soc.*, Vol. 93, 1983, pp. 177-189
24. HILL, R.: Path Sensitivity of Material Response at Intrinsic Eigenstates in Classical Plasticity. *Math. Proc. Camb. Phil. Soc.*, Vol. 103, 1988, pp. 371-381
25. BAY, Y. - DODD, B.: *Adiabatic Shear Localization*. Pergamon Press, 1992, GB
26. PRIMUS, F.: Tváriteľnosť hlbokotažných plechů. *Strojírenství*, 26, č.8, 1976
27. PRIMUS, F.: Nomogramy pro určení zásoby plasticity anizotropních hlbokotažných plechů. *Strojírenská výroba*, 26, č.2, 1978
28. VENTER, R. D. - DE MALHERBE, M. C.: Theoretical Estimate of the Keeler - Goodwin Formability Curve. *SH. METAL. IND.*, Vol.48, 1971
29. RUZANOV, F. I.: Ustojčivosť processa deformacii ortotropnogo metalla v uslovijach ploskogo naprižennoho sostojanija. In: *Plastičeskoje formoizmenenie metallov*, Moskva, AN SSSR, 1967
30. RUZANOV, F. I.: Predelnye deformacii pro formoobrazovanii rastaženiem ortotropnogo listovogo metalla. *Mašinivedenie*, č.5, 1969
31. RUZANOV, F. I.: Lokalnaja ustojčivosť processa deformacii ortotropnogo listovogo metalla v uslovijach složnogo nagraždenia. *Mašinivedenie*, č.4, 1973
32. RUZANOV, F. I.: Opredelenie kritičeskich deformacij pri formoobrazovanii detali iz anizotropnogo listovogo metalla. *Mašinivedenie*, č.2, 1974
33. MARCINIAK, Z. - KUCZYŃSKI, K.: Limit Strains in the Process of Stretch forming Sheet Metal. *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.9, 1967
34. SOWERBY, R. - DUNCAN, J.L.: Failure in Sheet Metal in Biaxial Tension. *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.13, 1971
35. PARMAR, A. - MELLOR, P.B. - CHAKRABARTY, J.: A New Model for the Prediction of Instability and Limit Strains in Thin Sheet Metal. *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.19, 1977
36. VENTER, R. - JOHNSON, W. - DE MALHERBE, M.C.: The Limit Strains of Inhomogeneous Sheet Metal in Biaxial Tension. *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.13, 1971
37. KIM, K. H. - KIM, D. W.: The Effect of Void Growth on the Limit Strains of Steel Sheets. *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 25, 1983
38. YAMAGUCHI, K. - MELLOR, P.B.: Thickness and Grain Size Dependence of Limit Strains in Sheet Metal Stretching. *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.18, 1976
39. MARCINIAK, Z. - KUCZYŃSKI, K. - POKORA, T.: Influence of the Plastic Properties of a Material on the Forming Limit Diagram for Sheet Metal in Tension. *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.15, 1973
40. GRAF, A. - HOSFORD, W. F.: Calculations of Forming Limit Diagrams. *METALLURG. TRANS. A*, Vol. 21A, January, 1990
41. JIANG, J. - SUN, Z. Y.: A Research of Sheet Metal Forming Limit. *Journal of the Beijing Polytechnic University*, Vol. 11, No.3, 1985
42. MARCINIAK, Z.: Sheet Metal Forming Limits. In: *Mechanics of Sheet Metal Forming, Material Behavior and Deformation Analysis*, GMR symp., New-York, 1978
43. GHOSH, A. K.: A Criterion for Ductile Fracture in Sheet under Biaxial Loading. *Metallurg. Trans. A*, April, 1976
44. ŠTEFAN, B. - ŠLESAR, M. - BOBROVÁ, E. - LUŠTÍK, J.: Mechanizmy tvárného lomu. In: *Predikce mechanických vlastností kovových materiálů na základě strukturálních charakteristik*, Nové Město na Moravě, 1985
45. BUCHAR, Z.: Verification Of Input Data For Simulation Of The Thin Sheet Metals Drawing. 1st International Conference THER TECH FORM '96, Tale - Low Tatras, April 1996, Slovakia
46. BUCHAR, Z.: A Discussion On Input Data Determination For Better Application Of FEM Calculation In Sheet Metal Forming. In: *Proc. of CSME Forum 96 "Mechanics in Design"*, The University of Toronto, May 1996, Canada

47. BUCHAR, Z.: Numeric Simulation In Sheet Metal Forming. In: Proc. of the 18th International Conference on Science and Technology Development, Hanoi, Vietnam, October 96
48. ČSN 42 0436 Skúška exponenta deformačného spevnenia. ÚNM, Praha, 1986
49. ASTM E 646 - 78 : Standard Test Method for Tensile Strain - Hardening Exponents (n-Values) of Metallic Sheet Materials. 1984
50. EN 10130 : 1991 : Cold Rolled Low Carbon Steel Flat Products for Cold Forming: Technical Delivery Conditions
51. RUZANOV, F.I. : Opredelenie šampujemosti tonkolistovoj stali po veličině rovnoměrného udliněníja. KUZ. ŠTAMP. PROIZ., č. 3, 1966
52. HEYER, R.H. - NEWBY, J.R. : Measurement of Strain Hardening and Plastic Strain Ratio Using the Circle-Arc Specimen. SH. METAL. IND., 43, 1966
53. BUCHAR, Z.: The Plastic Properties Of Aluminium Alloy Sheet In Comparison With Steel Sheet. In : Proc. of "IDDRG Working Groups Meeting '96", Eger, June 1996, Hungary
54. BUCHAR, Z. A Discussion On Some Measuring Modes Of Plastic Strain Ratio "r". In: Proc. of "IDDRG Working Groups Meeting '96", Eger, June 1996, Hungary
55. BUCHAR, Z.- JUNGWIRT, J.- MIKEŠ, V.: Komplexní hodnocení tvářitelnosti nově vyvíjených karosářských plechů. [výzkumná zpráva projektového úkolu P 3/1 "vývoj plechov pre karosériové účely", VSÚ OCEĽ VŠZ, s.r.o., Košice, [HČ č. 04 049 / 350], Liberec, VŠST, KPŤ, 1994, 47 stran
56. ČSN 42 0435 Skúška súčiniteľa normálovej anizotropie. ÚNM, Praha, 1986
57. ASTM E 517 - 81 : Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal. 1987
58. ČSN 01 0250, 52, 53 : Statistické metody v průmyslové praxi, 1972
59. BUCHAR, Z. : "The Statistical Evaluation of the Experimental Forming Limit Diagrams", In: IDDRG Working Group Meeting, Linz, Austria, 1993.
60. HONSKUS, I.: Vliv velikosti součinitele normálové anizotropie tenkých plechů na hodnoty mezních přetvoření. [Diplomová práce], VŠST, 1987
61. BUCHAR, Z.: Diagramy mezních přetvoření. [písemná část k odborné kandidátské zkoušce], Liberec, VŠST, 1982
62. PEARCE, R.: Sheet Metal Forming. IOP Publishing Ltd, England, 1991
63. HUTCHINSON, J.W.-NEALE, K.W.-NEEDLEMAN, A.: Sheet Necking-I. Validity of Plane Stress Assumption of the Long-Wavelength Approximation. In: Mechanics of Sheet Metal Forming, Material Behavior and Deformation Analysis, GMR symposium, New-York, 1978
64. NEEDLEMAN, A.-RICE, J.R.: Limits to Ductility Set by Plastic Flow Localization. In: Mechanics of Sheet Metal Forming, Material Behavior and Deformation Analysis, GMR symposium, New-York, 1978
65. RASMUSSEN, S.N.: Theoretical Prediction of Strainpath Dependence of Limit Strains in Sheet Materials. Annals of the CIRP, Vol.30/1/1981
66. HECKER, S.S.: Simple Technique for Determining Forming Limit Curves. SH. METAL IND., 52, No.11, 1975
67. HECKER, S.S. : A Simple Forming Limit Curve Technique and Results on Aluminium Alloys. In: Sheet Metal Forming and Formability, Congress IDDRG, 1972
68. KEELER, S.P. : Forming Limit Criteria - Sheets, chapter 4. In: Advances in Deformation Processing, Army Materials Research Center, 1978
69. BUCHAR, Z.: Některé aspekty experimentálního ověřování křivek mezních přetvoření stanovených početními metodami. In: Technológia 93, Bratislava, 1993
70. BLÁHA, P.- BUCHAR, Z.-PRŮŠEK, A.: Ausnützung der akustischen Emission für die Verfolgung von Rissen bei Bewertung der Umformfähigkeit dünner Blechen. X. Gemeinsames Wissenschaftliches Symposium, TU Drezden, September 1995
71. WILSON, D.V.- ACSELRAD, O.: Effects of Microstructure on Forming Limits in Biaxial Stretching. SH. METAL. IND., Vol. 56, No. 5, 1979

72. MIKEŠ, V.- BUCHAR, Z.: Diagramy mezních přetvoření tenkých plechů. In: Proc. of Int. Conference "FORMABILITY 94", Ostrava, 1994
73. BUCHAR, Z.- MIKEŠ, V.: A New Approach To Sheet Metal Formability Expression. In: International Conference "IDDRG Working Group Meeting", Colmar, France, 1995.
74. BUCHAR, Z.: Komplexní hodnocení tvářitelnosti plechů určených pro nejnáročnější karosářské výlisky. [výzkumná zpráva dle HS č. 04 021/350 "Optimalizace podmínek lisování" pro ŠKODA, a. s., Mladá Boleslav], VŠST, KPT, Liberec, 1994, 38 stran
75. KLEEMOLA, H. - KORHONEN, A. - RANTA-ESKOLA, A.: Effect of Strain Rate and Deformation Heating on the Strain-Hardening of Sheet Metals. In: Congress IDDRG, 1978
76. PERCY, J.H. : Vlivie skorosti deformacii na diagramu predelnogo formoizmenenia listovogo metallu. EI-TO KUZN. ŠTAMP. PROIZ., č.3, 1981
77. BLAŠČÍK, F. - POLÁK, K. : Teória tvárnenia. ALFA - SNTL, 1985
78. BUCHAR, Z.: Vliv rychlosti deformace na křivky mezních přetvoření. In: Mezinárodní konference "Form '92", Brno, 1992
79. BUCHAR, Z.: Effect Of The Technological Conditions On The Forming Limit Curves. In : Proc. of "IDDRG Working Groups Meeting '96", Eger, June 1996, Hungary
80. VEERMAN, C.CH. : The Determination and Application of the FLC-onset of Localised Necking. In: Sheet Metal Forming and Formability, Congress IDDRG, 1972
81. HABERFIELD, A. B. - BOYLES, M.W. : Laboratory Determined Forming Limit Diagrams. SH. METAL. IND., č.7, 1973
82. DEVEDŽIČ, B. - STEFANOVIČ, M. : Formänderungsverteilung beim blechziehen, ihre auswertung und ihr einfluss auf die technologische sicherheit. In: Industrielle fertigung auf dem wege zur automatisierung, Dresden, 1982
83. BUCHAR, Z.: The Friction Effect upon the Forming Limit Diagram. In: Proc. of int. conference "FORMABILITY 94", Ostrava, 1994
84. BUCHAR, Z.: Through A Circle Grid Analysis To Reduction Of The Scrap In The Press Shops. In : Proc. of International Conference on "Advances in Materials and Processing Technologies", Dublin, Ireland, August 1995
85. BUCHAR, Z.: Vliv historie přetvoření na mezní stavy tenkých plechů. In: Mezinárodní konferencia "TECHNOLÓGIA 95", FS STU Bratislava, September 1995, Slovenská republika.
86. BUCHAR, Z.: Analýza přetvoření výlisku vnitřních bočních dveří . [Výzkumná zpráva pro ŠKODA, automobilová a.s. Mladá Boleslav, HS č. 04 021/350, podkapitola 1.1 "Analýza vnitřních dveří"], VŠST Liberec, 1994.
87. BUCHAR, Z.: Circle Grid Analysis Applied To The Production Problems Of The Car Body Panel. In: Proc. of the 6th International Conference "Metal Forming '96", Kraków, June 1996, Poland
88. MÜSCHENBORN, W. - SONNE, H.M. : Influence of the Strain Path on the Forming Limits of Sheet Metal. Arch. Eisenhüttenwes. 46, No.9.
91. BUCHAR, Z.- TMĚJ, J.: Vliv tloušťky plechu na hodnoty mezních přetvoření. In: Sborník prací VŠST, Liberec, 1986
90. MARCINIAK, Z. : Teorie tváření plechů. SNTL, Praha, 1964.
91. MARCINIAK, Z.-DUNCAN, J.L : Mechanics of Sheet Metal Forming. Published by E.Arnold, London, 1992
92. POČTA, B. : Základy teorie tváření kovů. SNTL, Praha, 1966
93. VAN MINH, H. - SOWERBY, R. - DUNCAN, J.L. : Variability of Forming Limit Curves. INT. J. MECH. SCI., Vol.16, 1974
94. ČSN EN 10002-1 (42 0310) Zkouška tahem za okolní teploty, ČNI, Praha 1994

95. DRASTÍK, F. - ELFMARK, J.: *Plastometry a tvařitelnost kovů*. SNTL, Praha, 1977
96. kolektiv autorů : *Lisování*. SNTL, Praha, 1971
97. KEELER, S.P.: *Visible Strain Patterns. Understanding Sheet metal Formability*, part 2. SH. METAL IND., 48, No 6, 1971
98. BUCHAR, Z.: *Metodika vytváření deformačních sítí kombinací metod fotografické s elektrolytickým leptáním*. [Výzkumná zpráva č. 61154/350 pro VSÚ OCEĽ VSŽ, s.r.o. Košice], VŠST, Liberec, 1991
99. SANZ, G.: *Graniczne krzywe tlocznosci. Obróbka plastyczna*, tom XIV, zeszyt 1, 1975
100. BUCHAR, Z. - MIKEŠ, V.: *Analýza podmínek tažení spodního výka motoru (dílič úkol č.1)*. [Výzkumná zpráva č. 62035/350 pro ŠKODA, a.a.s. Mladá Boleslav], VŠST, Liberec, 1993
101. McCLEAN, W. - McCANDLESS, A.J.: *A Strain Measurement System for Sheet-Metal Forming*. SH. METAL IND., Vol.55. No.5, 1978
102. kol. : *The Optical Grid Analyzer. The Magazine of Testing and Simulation Technology*, Spring 1986
103. SAWADA, T. - SAKAMOTO, M. : *Measurement of Incremental Strain Using Overlapped Circles*. Journal of JSTP, Vol.32, No.369, 1991
104. DAUBY, B. - KERGEN, R.: *Strain Measurement on Stamped Parts: Analysis of the precision Obtained with an Automatic Measurement System*. In: Proc. of IDDRG Working Groups Meeting 95, 22 - 24 May, Colmar, France, 1995
105. firemní prospekty CamSys-TechLab, Francie, 1996
106. JENČÍK, J. - KHUN, L.: *Technická měření ve strojnictví*. SNTL, Praha, 1982
107. RAMAEKERS, J.A.H. - JANS, W.M.: *A Criterion for Failure in the Hole Expansion Test*. In: Proc. of "IDDRG Working Groups Meeting '96", Eger, June 1996, Hungary
108. HAYASHI, H. - URABE, T. - HISAMATSU, S. - NAGAI, Y.: *Investigation for Standardizing Hole-Expanding Test for Evaluating Stretch Flangeability*. In: Proc. of "IDDRG Working Groups Meeting '96", Eger, June 1996, Hungary
109. YANG, D.Y. - LEE, D.W. - JUNG, D.W.: *Influence of Blankholding Boundary Conditions on the Deformation of Deep Drawn Cups*. In: Proc. of "IDDRG Working Groups Meeting '96", Eger, June 1996, Hungary
110. KERGEN, R. - DAUBY, B.: *Computerised Control of the Blank Holder Force in Deep Drawing: a system allowing independent closed loop control of the blank holder force on several zones of the blank holder*. In: Proc. of IDDRG Working Groups Meeting 95, 22 - 24 May, Colmar, France, 1995
111. KERGEN, R.: *A Comparison of Different Blank-Holder Force Control Principles Based on the Cup Test*. In: Proc. of "IDDRG Working Groups Meeting '96", Eger, June 1996, Hungary
112. KASPER, A.S.: *How we will Predict Sheet Metal Formability*. Metal Progress, October, 1969
113. KASPER, A.S.: *How Steels and Dies Interact in Forming Shapes*. Metal Progress, May, 1971
114. KASPER, A.S. - VANDERVEEN, P.J. : *Stretch-Draw Shape Analysis for Predictions of Formability*. In: Proc. of IDDRG, Amsterdam, 1972
115. BUCHAR, Z. - ROLEČEK, L.: *Analýza přetvoření kritického místa výlisku*. In: Mezinárodní konference " FORM 95 ", VUT - FS Brno, září 1995
116. BUCHAR, Z. - MIKEŠ, V.: *Hodnocení tvařitelnosti plechů určených pro problémové výlisky [výzkumná zpráva dle HS č. 5073 / 350 "Optimalizace podmínek lisování problémových výlisků vozu A02" (dílič úkol č.1) pro ŠKODA, automobilová a.s., Mladá Boleslav], TU, KPT, Liberec, 1995*
117. KEELER, S.P.: *Formability - the Basics and Beyond*. American Machinist, January 1982
118. KONIECZNY, A. : *Sheet Metal Stampings, Designing and Forming*. FTI, inc., MAY 1996, Toronto, Canada

119. EL KHALDI, F.-AITA, S.-PENAZZI, L.-TAMADA, T.-OGAWA, T.-TASAKA, S.-HORIE, O.: Industrial Validation of CAE Finite Element Simulation of a Stretch-draw Autobody Part (front fender case). Mazda research laboratories, 1992
120. kol. : How to Spot a Nonlinear Problem. MARC Analysis Research Corporation, 1990
121. KOSTKA, P.: Použitie metódy konečných prvkov pre riešenie zložitých úloh tvárnenia plechov. In: TECHNOLÓGIA 95, Bratislava, 1995
122. KUBLI, W.-STEININGER, V.-ANDERHEGGEN, E.-REISSNER, J.-DREWES, F.-LENZE, J.: AUTOFORM: A New Simulation System for Deep Drawing Processes - Concept and Application. In: Proc. WGSM IDDRG '93, Linz, Austria, 1993
123. HORA, P.: Numer. Simulationsverfahren in der Umformtechnik II, IFU, ETH Zürich, 1993.
124. HORA, P.: Autoform in Škoda, car inc., MB. AF - Benchmark 1, 1994
125. BUCHAR, Z.-CHALOUPECKÝ, P.: Utilisation Of Computer Simulation In Skoda Car Factory. In: Proc. of 19th Biennial IDDRG Congress "Advanced Sheet Metal Forming", Eger, June 1996, Hungary
126. KLAUZ, J.: Počítačové simulace tažení výlisků nepravidelných tvarů. [Diplomová práce], TU v Liberci, 1996
127. HORA, P.-LONGCHAN, T.-REISSNER, J.: Prediction Methods for Ductile Sheet Metal Failure Using FE-Simulation. In: Proc. of 18th Biennial Congress IDDRG, "Recent Developments in Sheet Metal Forming Technology, Lisbon, Portugal, May 1994
128. HORA, P.-TONG, L.-REISSNER, J.: A Prediction Method of Strain Path Dependent Failures for Quadratic and Non-Quadratic Yield-Loci. In: Proc. of "IDDRG Working Groups Meeting '96", Eger, June 1996, Hungary
129. HORA, P.-TONG, L.-REISSNER, J.: A Prediction Method for Ductile Sheet Metal Failure in FE - Simulation. In: Proc. of NUMISHEET '96, Dearborn, USA, 1996