

Vysoká škola strojní a textilní v Liberci
nositelka Řádu práce
fakulta strojní
katedra tváření a plastů

Ing. Zdeněk B u c h a r

DIAGRAMY MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ
TENKÝCH HLUBOKOTAŽNÝCH PLECHŮ

kandidátská disertační práce

odborné vedení: Doc. Ing. Jaroslav Tměj, CSc.

Liberec
červen 1987

	OBSAH	
	SEZNAM POUŽITÝCH HLAVNÍCH ZNAČEK	4
1.	ÚVOD	6
2.	PROBLEMATIKA LISOVATELNOSTI VÝLISKŮ NEPRAVIDELNÝCH TVARŮ	10
2.1	Charakteristika výlisků nepravidelných tvarů a jejich zmetkovitosti	10
2.2	Lisovatelnost plechových dílů	13
2.3	Vztah plastičnosti, tváritelnosti a lisovatelnosti	14
3.	HODNOCENÍ VLASTNOSTÍ PLECHU Z HLEDISKA TAŽENÍ VÝLISKŮ	16
3.1	Zkouška tahem	17
3.2	Napodobňující zkoušky	19
4.	DEFINOVÁNÍ DIAGRAMŮ MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ	22
5.	POČETNÍ METODY URČOVÁNÍ DIAGRAMŮ MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ	27
5.1	Metody vycházející z kritéria ztráty stability na mezi pevnosti	27
5.2	Metoda vycházející z kritéria lokálního stenčení plechu	33
5.2.1	Ztráty stability v oblasti velkých plastických přetvoření	33
5.2.1.1	Kvazistabilní přetvoření	35
5.2.1.2	Faktory ovlivňující kvazistabilní tok	36
5.2.1.3	Ztráta stability materiálu	33
5.2.2	Matematická formulace vztahů pro výpočet mezních přetvoření	38
5.3	Metoda vycházející z teorie tvárného lomu	40
5.3.1	Základy teorie tvárného lomu	40
5.3.2	Matematická formulace vztahů pro výpočet mezních přetvoření	41
5.4	Dílčí závěr	43
6.	PŘEHLED ZÁKLADNÍCH EXPERIMENTÁLNÍCH METOD URČOVÁNÍ DIAGRAMŮ MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ	47
6.1	Zkouška tahem zkušebních tyčí opatřených vruby	47

6.2	Hydraulická zkouška	48
6.3	Vypínání zkušebních těles proměnné šíře polokulovým tažníkem	51
6.3.1	Vypínání zkušebních těles v podobě pruhů proměnné šíře	51
6.3.2	Vypínání tvarově upravených zkušebních těles proměnné šíře	52
6.4	Dílčí závěr	53
7.	CÍL PŘEDLOŽENÉ PRÁCE A JEJÍ ZAMĚŘENÍ	55
8.	NAVRŽENÁ METODA EXPERIMENTÁLNÍHO URČOVÁNÍ DIAGRAMŮ MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ	57
8.1	Stanovení optimálního tvaru zkušebních těles a způsobu jejich přípravy	58
8.2	Zkušební zařízení pro experimentální určování mezních stavů přetvoření	63
9.	POVRCHOVÉ DEFORMAČNÍ SÍTĚ	70
9.1	Použitá metoda a zařízení pro vytváření deformační sítě	70
9.2	Volba parametru sítě a stanovení hodnot hlavních normálních přetvoření	72
10.	URČOVÁNÍ MEZNÍHO STUPNĚ PŘETVOŘENÍ	76
10.1	Přehled některých metod určování mezního přetvoření	76
10.2	Navržený postup stanovení mezního přetvoření	80
11.	OVĚŘENÍ NAVRŽENÉ METODIKY URČOVÁNÍ DIAGRAMŮ MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ	84
11.1	Statistické vyhodnocení zjednodušeného diagramu mezních přetvoření	85
11.1.1	Testování normality rozdělení pravděpodobnosti	90
11.2	Statistické vyhodnocení úplného diagramu mezních přetvoření	95
12.	FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ DIAGRAM MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ	102
12.1	Posouzení vlivu hutní výroby na mezní přetvoření	102
12.1.1	Posouzení rozdílu mezi jednotlivými tavbami	103
12.1.2	Posouzení rozdílu mezi svitky plechu	105
12.1.3	Posouzení rozdílu mezi tabulemi plechu	107
12.1.4	Posouzení plošné anizotropie vlastností plechu	110

12.2	Porovnání mezních přetvoření dvou výrazně odlišných materiálů	112
12.3	Vliv tloušťky plechu na hodnoty mezních přetvoření	115
12.4	Vliv technologických podmínek provádění zkoušky na mezní přetvoření	117
12.4.1	Vliv rychlosti přetvoření	118
12.4.2	Vliv podmínek tření	120
12.4.3	Vliv historie přetvoření	124
13.	MOŽNOSTI APLIKACE A DALŠÍHO VYUŽITÍ NAVRŽENÉ METODIKY EXPERIMENTÁLNÍHO URČENÍ D M P	128
13.1	Hodnocení plastičnosti plechů prostřednictvím diagramů mezních přetvoření	128
13.1.1	Definice křivky mezních přetvoření jako křivky plastičnosti	128
13.1.2	Posouzení plastičnosti plechů vyráběných novými hutními technologickými postupy	133
13.1.3	Posouzení plastičnosti nových druhů plechů s vyššími pevnostními hodnotami	136
13.1.4	Hodnocení tvárných vlastností plechů napodobňujícími zkouškami	139
13.2	Využití navržené experimentální metody k ověření početně stanových KMP	142
13.3	Využití diagramů mezních přetvoření ve vztahu k analýze přetvoření na výlisku	147
14.	DOPORUČENÍ PRO PRAKTICKOU APLIKACI A DALŠÍ VÝZKUM	154
15.	ZÁVĚR	157
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	159
	PŘÍLOHY	

SEZNAM POUŽITÝCH HLAVNÍCH ZNAČEK

- $R_{p0.2}$, R_m smluvní mez kluzu, resp. pevnost v tahu dle ČSN 42 0310
 A_x tažnost dle ČSN 42 0310
 ϵ_R rovnoměrná poměrná deformace /při dosažení R_m /
 ZP zásoba plastičnosti
 σ, σ_i hlavní normální napětí/skutečné/, resp. intenzita napětí
 φ, φ_i hlavní normální přetvoření /logaritmické/, resp. intenzita přetvoření
 $\dot{\varphi}$ rychlost přetvoření
 φ_0 počáteční přetvoření
 C, C' měřítko přetvárné pevnosti
 n exponent /součinitel/ deformačního zpevnění
celkový počet bodů představujících mezni přetvoření v DMP
 r součinitel normálové anizotropie
 α směr hlavního normálního přetvoření φ_1 vůči směru válcování
hladina významnosti dle ČSN 01 0250
 rn index tvářitelnosti
 m exponent zpevnění vlivem rychlosti přetvoření
 K_{max} mezni stupeň tažení
 IE prohloubení při zkoušce hloubením dle Erichsena ČSN 42 0406
 T přirozený stupeň hlubokotažnosti
 m_n, m_t ukazatelé stavu rovinné napjatosti
 m_φ ukazatel stavu přetvoření
 DMP, KMP diagram resp. křivka mezních přetvoření
 $\sigma_{pq}, d\varphi_{ij}$ složky tenzorů napětí a přírůstků přetvoření
 $\bar{A}_{ijpq}$ složky tenzoru anizotropie
 T_0 parametr zeslabení tloušťky plechu
 u parametr určující dosažení rovinného přetvoření
 K_{cr} modifikovaná forma parametru lomového napětí
 $\varphi_{2L}, \varphi_{1L}$ menší resp. větší lomové přetvoření v rovině plechu
 b šířka zkušebního tělesa v jeho střední části
 r_{xy} korelační koeficient
 s/s_R výběrová směrodatná /reziduální/ odchylka

- b** vektor odhadů regresních koeficientů
- $N / \mu, \sigma^2$ normální rozdělení s parametry μ a σ^2
- $\sigma^2 / \mathbf{X}^T \mathbf{X} /^{-1}$ kovarianční matice
- X** matice známých funkcí proměnné φ_2
- L_0, L_2, l parametr elementu deformační sítě před přetvořením, resp. jeho rozměry po přetvoření
- $t_\alpha / n - 1$ α -kritická hodnota t -rozdělení /Studentova/ s $n-1$ stupni volnosti
- k_1 konstanta použitá pro výpočet tolerančních mezí
- n_L počet zkušebních těles pro stanovení mezního přetvoření se zvolenou přesností e v % délky dané deformační stopy
- RN** relativní vyjádření normy funkce
- D_α / n_L α -kritická hodnota Kolmogorova-Smirnova testu
- $N / \varphi /, S / \varphi /$ hustota pravděpodobnosti normálního, resp. skutečného rozdělení pravděpodobností
- $F_n / \varphi_k /, F_s / \varphi_k /$ hodnota distribuční funkce normálního, resp. skutečného rozdělení pravděpodobností
- F** testová charakteristika hypotézy $\kappa = \lambda$
- κ, λ** vektory regresních koeficientů KMP dvou datových souborů
- α_σ poměrné oktaedrické normálné napětí
- v_σ ukazatel stavu obecné napjatosti /Lodeho parametr/
- Π** hodnota celkové plastičnosti plechu stanovená pomocí DMP
- η míra využití plastičnosti plechu pro danou napjatost
- T, U, P, V** označení oblastí na výlisku, kde byla provedena analýza přetvoření
- R_a střední aritmetická úchylka nerovnosti povrchu
- R_{max} maximální výška nerovnosti povrchu plechu

1. ÚVOD

Rozvoji československého strojírenství je v 80. letech věnována značná pozornost. V souvislosti s náhlým vývojem cen energií, surovin a materiálů na světových trzích stojí před naší ekonomikou naléhavý úkol zefektivnění a zkvalitnění výroby. To představuje hlavně pronikavé snížení surovinových, energetických a materiálových nároků našich výrobků.

Růst výroby bude nutno v souladu s požadavky intenzifikace zajišťovat v podstatě vyšším zhodnocováním energetických a materiálových zdrojů, zejména kovů, zvyšovat výkonnost a využití existujících základních fondů. Na XVII. sjezdu KSČ byla zdůrazněna nezastupitelná úloha vědeckotechnického rozvoje jako rozhodujícího činitele intenzifikace ekonomiky. Rovněž bylo konstatováno, že je nutné se vši rozhodností racionalizovat výrobu, uplatňovat materiálově i energeticky méně náročné technologie, urychlovat inovace, zlepšovat technicko-ekonomickou úroveň výrobků a výroby, snižovat zmetkovitost a ztráty ve všech etapách výrobního procesu. K důležitým momentům na tomto poli patří zajištění těsného spojení výzkumu s vlastní technologickou přípravou výroby, plné docenění významu a celkového zvýšení účinnosti práce předvýrobních etap jako podmínky rychlého převodu výsledků výzkumu a vývoje i dalších inovačních zdrojů do výroby.

Je rovněž nezbytné širší zavádění a zdokonaľování progresivních technologií. Jednou z nejprogresivnějších technologií ve strojírenství, která zajišťuje pronikavý růst produktivity práce při současných úsporách materiálu, energie a výrobních ploch, je tváření. V této oblasti zpracování kovů hraje významnou úlohu p l o š n é t v á ř e n í . Z rozborů součástkové základny v podnicích čsl. průmyslu vyplynulo [1], že z celkového objemu tváření je 46,5 % součástí tvářených plošně. U součástí vyráběných z plechu činí podíl tvářecích operací téměř 76 %. Výtažky z plechu jsou díly, které vyhovují výše uvedeným trendům dokonalého využití materiálu, neboť při vlastní malé hmotnosti vykazují potřebné pevnostní a tuhostní parametry, a tím velmi dobré užitné vlastnosti. Předností těchto dílů se ještě zvýrazní při jejich aplikaci na motorových vozidlech [2], kde např. mimo jiné tvoří v podstatě i celou samonosnou karoserii osobního automobilu.

Jednotlivé díly karoserie představují v převážné míře velkorozměrné výlisky nepravidelných tvarů, které jsou z hlediska jejich výroby /lisování/ dosti náročné. V hromadné výrobě může jejich eventuální zmetkovitost způsobit značné ekonomické ztráty. Z dostupných firemních materiálů zahraničních automobilek vyplývá skutečnost, že využití materiálu-plechu při výrobě karoserie osobního automobilu se pohybuje v rozmezí 40-65 %. Značné množství kvalitního plechu se vrací zpět do hutí ve formě technologického odpadu a zmetků. Např. jenom při lisování rámu dveří vozu typu Š 742 při zmetkovitosti pravého a levého rámu 9,9 % resp. 8,8 % /údaje z r. 1984/ vzniknou finanční ztráty během jednoho roku ve výši prakticky čtyř milionů Kčs [3].

Problematika hodnocení lisovatelnosti plechových dílů je stále v popředí zájmu zpracovatelů i výrobců plechu, ale i výzkumných pracovišť. Je to dáné 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. Jako důležitý pomocník při řešení otázek lisovatelnosti je využívána analýza přetvoření na výlisku pomocí deformačních sítí. Tu lze provádět v souvislosti s respektováním mezních stavů přetvoření, které v širokém rozsahu stavů napjatosti a přetvoření, jež se u výlisků uplatňují, zachycují *d i a g r a m y m e z n í c h p ř e t v o ř e n í / D M P /*. Taková analýza se zřetelem na působení dalších důležitých faktorů při lisování je vhodným a účinným prostředkem diagnostiky výrobních problémů a jejich odstranění [4,5].

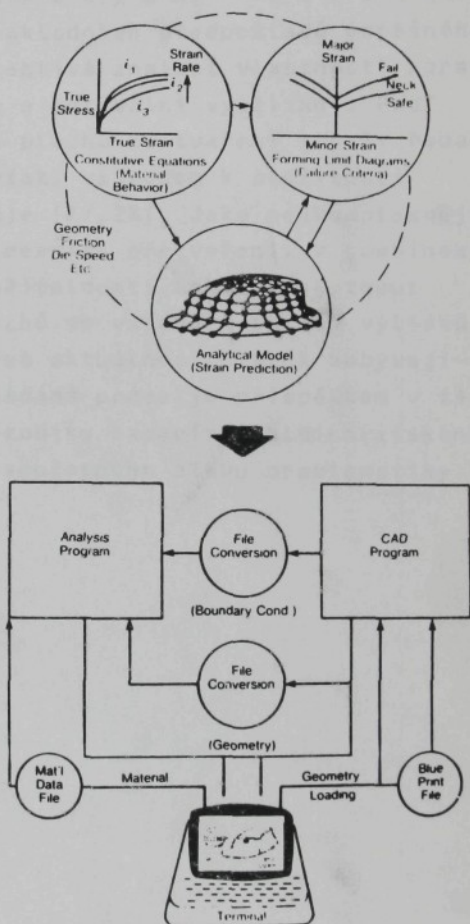
Tento přístup je dnes široce používán ve většině světových automobilek, ale i v ostatních provozech zabývajících se výrobou výlisků nepravidelných tvarů. Svědčí o tom řada publikací např. ze SSSR [6,7,8,9,10], kde se již hojně využívá spolupráce mezi výrobními podniky, výzkumnými ústavy a vysokými školami, která přináší značné ekonomické úspory. Dokladem toho je i spolupráce pracovníků katedry strojů a technologie tváření MAMI s automobilovým průmyslem. Systematická analýza všech výlisků spolu s cílevědomou aplikací DMP přinesla během roku 1985 při řešení problémů lisovatelnosti v podmínkách hromadné výroby úspory více než 40 milionů rublů. Tato efektivní činnost pracovníků katedry byla v témže roce oceněna vysokým resortním vyznamenáním. Analýzy přetvoření spolu s DMP je využíváno i v dalších zemích, což dokládá značné množství publikací, např. [11 až 20]. Rovněž u nás byl

uvedený postup aplikován, např. [21,22,23].

Četné inovace v předních světových automobilkách a z toho plynoucí snahy urychlit a zefektivnit náběh výroby nových typů automobilů vedou k širokému využití moderní výpočetní techniky. Počítače se uplatňují již při návrhu nové karoserie a jednotlivých jejích komponent, při výrobě nástrojů v přípravě výroby. Je snaha využít analýzy přetvoření nejen ve výrobě, ale již ve stádiu návrhu nového výlisku ve fázi technické přípravy výroby.

To znamená už ve "stádiu výkresu" najít optimální tvar výlisku s ohledem na technologii lisování a daný materiál. Tím by šlo předejít četným problémům při náběhu výroby nových výlisků a při zkoušení nových nástrojů. Zmíněné systémy CAD/CAM se dnes intenzivně vyvíjí a v krátké době by měly být připraveny k použití [24, 25,26]. Také tyto systémy předpokládají existenci a praktickou aplikaci analýzy přetvoření spolu s DMP pro konkrétní použitý plech, viz obr. 1.1.

Diagramy mezních přetvoření lze v podstatě získat dvěma způsoby. Výpočtem pomocí vztahů odvozených z teorie plasticity, jsou-li známy jejich základní charakteristiky, nebo prakticky experimentálním modelováním rozličných stavů napjatosti. První způsob se při současné úrovni výpočetní techniky jeví jako snadnější, rychlejší a ekonomičtější. Ovšem



Obr. 1.1 Schema zachycující hlavní složky počítačového systému využívaného při řešení lisovatelnosti výlisků v předvýrobní etapě [24]

v důsledku nutného zavedení určitých zjednodušujících předpokladů do řešení mohou být získané výsledky dost vzdáleny realitě. Z tohoto pohledu vystupuje do popředí význam experimentální metody. Experimentálně získaných DMP lze pak využít nejen v souvislosti s analýzou přetvoření na výliscích, ale i k ověření různých teorií, na základě nichž se odvozují vztahy pro výpočet DMP, tedy k ověření příslušného matematického modelu. V neposlední řadě mohou získané experimentální DMP posloužit k hodnocení plastických vlastností plechů, neboť jedním ze základních předpokladů úspěšného řešení výrobních problémů je spolehlivá znalost vlastností zpracovávaného plechu a jejich vhodné a optimální využívání. Pro kvantitativní vyjádření vhodnosti plechů ke tváření slouží řada kritérií. Univerzální kritérium však, vzhledem k složitosti celé problematiky, dosud neexistuje [27,28]. Jako nejkomplexnější se v tomto případě jeví diagramy mezních přetvoření. V kombinaci s některými dalšími ukazateli tvářitelnosti mohou poskytnout dostatek údajů o vlastnostech plechů ve vztahu k tažení výlisků.

Z předchozího přehledu vyplývá aktuálnost otázek zabývajících se problematikou DMP. Předkládaná práce je příspěvkem v této oblasti zaměřeným především na metodiku experimentálního získání DMP a na jejich analýzu. Přehled současného stavu problematiky je v kapitolách 2 až 6.

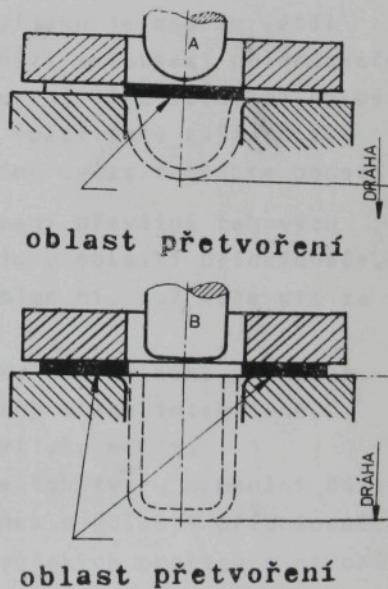
2. PROBLEMATIKA LISOVATELNOSTI VÝLISKŮ NEPRAVIDELNÝCH TVARŮ

S ohledem na složitost celé problematiky je vhodné tyto výlisky nejprve charakterizovat.

2.1 Charakteristika výlisků nepravidelných tvarů a jejich zmetkovitosti

Tažení výlisků nepravidelných tvarů karosářského typu představuje z technologického hlediska širokou problematiku výrazně se odlišující od problematiky hlubokého tažení např. rotačních nádob. Protože se jedná o výlisky, jejichž tvar se mění v závislosti na konstrukci a tvaru karoserie, je nutno vždy znovu řešit i základní otázky technologie tažení daného dílu. Jde v převážné většině případů o výlisky složitých prostorových tvarů, které nedovolují zhotovení jejich výkresu, na nichž by byly zakótovány všechny body jejich povrchu. Důležitým podkladem pro řešení technologie tažení takového dílu je, vedle výkresu se zakótovanými hlavními rozměry a některými důležitými řezy, i rozkládací model. Výlisky karosářského typu je možno z hlediska jejich prostorového tvaru rozdělit do dvou skupin:

- a/ ploché díly karoserie, při jejichž vzniku se hlavně uplatní vypínání /obr. 2.1 a/
- b/ výlisky se složitým a hlubokým prostorovým tvarem, při jejichž vzniku se uplatní hlavně hluboké tažení /obr. 2.1 b/.



Obr. 2.1 Schema vypínání /a/,
a hlubokého tažení
/b/ |38|

Obrys výtažku je ve většině případů nepravidelný a složitý. Složitými křivočarými plochami je tvořena nejen pracovní část tažníku a tažnice, ale i přidržovače. Stavby napjatosti a přetvoření jsou na výlisku nerovnoměrné. Při výrobě takových dílů je materiál podroben komplexním přetvořením, které v sobě zahrnují jak hluboké tažení a vypínání, tak i ohýbání a narovnávání. Obecné požadavky kladené na výrobky karosářského typu lze formulovat následně. Technologičnost konstrukce zaručující minimální pracnost a spotřebu materiálu, zhotovení výlisku bez trhlin, viditelné a nosné díly karoserie bez míst se zřetelným ztenčením tloušťky, bez povrchových vrásek, zvlnění či stop po zadírání, s dodržením tvarové a rozměrové přesnosti dílu při jeho dostatečně tuhosti. V současné době jsou diktovány další požadavky, a to snížení hmotnosti a zvýšení tuhosti karoserie, její větší bezpečnost a možnost snadnější opravy poškozených dílů, zlepšení korozní odolnosti spolu s prodloužením její životnosti /u nového typu na 14 let s garancí na 5 let [29]/, odolnost vnějších povrchových dílů proti promáčknutí a konečně se očekává i další zvýšení tvarové a rozměrové přesnosti [26].

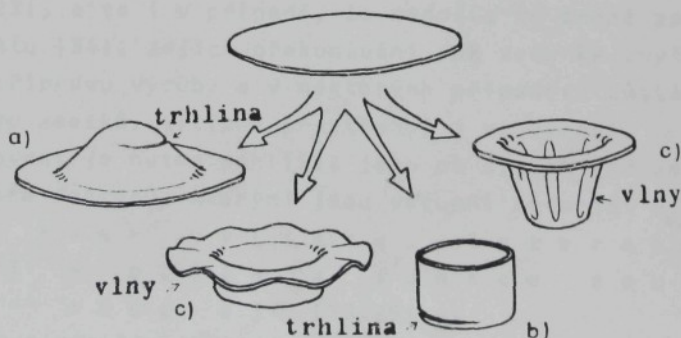
K technologickým zvláštnostem tažení výlisků karosářského typu patří i to, že plocha vlastního výlisku je mnohem větší než plocha té jeho části, která se nachází v oblasti přidržovače. Tuto skutečnost je možno považovat za určující z hlediska volby technologických podmínek tažení. Další specifické zvláštnosti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

- 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 ní, 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 výtažků a členitost jejich tvaru neumožní často ovlivnit průběh tažení změnou podmínek v oblasti přidržovače. Pak je nutno použít různých technologických prolisů a otvorů v nástřihu.
- 4/ Úspěšné tažení lze zajistit i vhodným tvarem plochy přidržovače, orientací výlisku 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 tvar a rozměr nástřihu, včetně konečné volby jakosti zpracovávaného plechu [30,31].

Množství působících faktorů v různých etapách tažení může negativně ovlivnit vznik kvalitního výlisku. Zárodek neúspěchu při tažení je možné často hledat již v předvýrobní etapě. Je důležité správně navrhnout tvar výlisku v souladu s možnostmi zvolené technologie a ve vztahu k vlastnostem použitého plechu a optimálně navrhnout a vyrobit tažný nástroj. Neméně důležitým momentem je správná funkce soustavy stroj-nástroj. Při všech předchozích etapách se vyplatí i do určité míry respektovat některé zvláštnosti a tradice příslušné lisovny. Nerespektování zmíněných faktorů, které ve svých důsledcích může vést k narušení zdárného průběhu či výsledku tažení, a tím k možnému vzniku zmetků, se projeví v následujících podobách:

- 1/ lokalizace přetvoření, která vede v nejvíce přetvořené oblasti výlisku k tvárnému lomu v důsledku vyčerpání plasticity materiálu /případ /a/ na obr. 2.2/
- 2/ porušení výlisku, vznik trhliny, způsobené překročením pevnosti plechu v tahu mimo oblast vlastního přetvoření /případ /b/ na obr. 2.2/
- 3/ zvlnění plechu jako projev nestability při působení tlakových napětí /případ /c/ na obr. 2.2/



Obr. 2.2 Některé projevy narušení zdárného průběhu přetvoření při tažení

4/ výskyt povrchových vrásek

5/ zadírání při styku plechu s nástrojem

6/ nedodržení tvarové a rozměrové přesnosti [30,32].

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.

2.2 Lisovatelnost plechových dílů

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. ve všech automobilkách světa stále uplatňuje především dlouholetá praxe, zkušenost a dovednost konstruktérů, technologů a nástrojařů. Úspěšný chod výroby lisovaných dílů je tak dnes zajištěn hlavně díky zkušenému kádru pracovníků, jejich kvalifikaci a citu projev, jež jsou vlastně odvozeny z dlouhodobé aplikace metody pokusu a omylu [33]. Využití této metody však bude problematické, vstoupí-li do hry zcela nové parametry jako např. nový druh plechu, úplně nový tvar výlisku nebo značná změna v technologii výroby. Takže ani dlouhodobě získávané zkušenosti nejsou ve všech případech dostatečnou zárukou úspěchu. Problémy se objevují např. i při řešení lisovatelnosti dílů, které se tvarově velmi málo liší od těch, jejichž výroba byla v minulosti zvládnuta [23], a to i v případě, že nedošlo ke změně zpracovávaného materiálu [34]. Jejich překonávání pak vede ke zvyšování nákladů na přípravu výroby a v některých případech zůstává, z hlediska výskytu zmetků, výlisek problémový i ve výrobě.

Na lisování je nutno pohlížet jako na systém vzájemného působení mnoha faktorů, kterými jsou vstupní materiál - plech, tvar výlisku, interakce nástroj - plech a funkce soustavy stroj - nástroj [33,35].

Složitost přeměny rovinného polotovaru v prostorový díl a množství existujících vazeb vede nakonec k představě tohoto

interaktivního systému v podobě jakési "černé schránky" s příslušným vstupem /plech/ a výstupem /výlisek/.

Z tohoto stručného přehledu je zřejmé, že otázku **l i s o v a - t e l n o s t i** příslušného dílu lze řešit pouze komplexním přístupem. I když lisovatelnost je dosud nejednotně chápaným termínem a nemá přesnou definici, zahrnuje působení zmíněných faktorů a obecně se ve vztahu ke zpracování plechů používá. Zmetkovitost při výrobě může být např. dána obtížně lisovatelným celkovým tvarem výlisku nebo jeho dílčími tvarovými prvky, nedostatečnou plastičností plechu způsobenou i značným rozptylem jeho vlastností, značně kolísající tolerancí tloušťky plechu nebo příliš opotřebovaným povrchem nástroje či vedením beranu lisu atd. I když pouze 5 % výlisků způsobuje 95 % problémů ve výrobě, jsou již v současné době z ekonomického hlediska těžko únosné. Připočteme-li k tomu i stále se měnící podmínky výroby diktované vývojem /počínající nedostatek vysoce kvalifikovaných pracovníků, dlouhá doba nutná k získání špičkové kvalifikace, nedostatek času plynoucí z častých inovací, zavádění nových materiálů doprovázené nedostatkem spolehlivých údajů o jejich vlastnostech, důraz na vyšší efektivnost výroby, rostoucí složitost výlisků a stálé zvyšování jejich funkční způsobilosti atd.../, nelze již dnes vystačit pouze s více či méně úspěšnou metodou pokusu a omylu [33].

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 [31]. Efektivnost takové analýzy, jež s úspěchem využívá deformačních sítí, je dále umocněna dostatečnou znalostí a vhodným využíváním vlastností zpracovávaného plechu, zejména jeho plastičnosti.

2.3 Vztah plastičnosti tvářitelnosti a lisovatelnosti

Schopnost kovových těles měnit trvale svůj tvar a rozměry závisí především na jejich plastických vlastnostech. Tyto vlastnosti se mění s chemickým složením a fyzikálním stavem kovů, ale jsou ovlivnitelné též vnějšími podmínkami tváření. **P l a s t i c - n o s t** /tvárnost/, která je předpokladem tvarových změn, lze

definovat jako schopnost k trvalým změnám tvaru tělesa pod účinkem vnějších sil. Je třeba ji chápat jako určitý fyzikální stav látky, tedy podmíněnou vlastnost závislou na mnoha činitelích. Těmi jsou chemické složení a struktura materiálu, teplota, rychlost přetvoření a stav napjatosti [37]. Základním požadavkem je, aby při tvarových a rozměrových změnách nebylo dosaženo porušení soudržnosti tvářeného materiálu či jiným způsobem definovaného mezního stavu. V technické praxi se často schopnost k plastické deformaci kovů spojuje s jejich upotřebitelností pro zpracování daným technologickým tvářecím pochodem. V takovém případě vystupuje další důležitý faktor, jakým je velikost odporu proti přetvoření. Tento ovlivňuje velikost tvářecí síly potřebné na tváření a rovněž spoluurčuje energetickou náročnost operace, nutný výkon stroje, životnost nástroje atd. Hodnotí-li se chování materiálu z hlediska jeho plastičnosti a současně i odporu proti přetvoření, lze hovořit o jeho **t v á ř i t e l n o s t i**. Daný materiál může být výborně plastický tj. snese velké trvalé změny tvaru bez porušení soudržnosti, ale zároveň při tváření klade takový odpor proti působení tvářecího nástroje, že z hlediska praktických možností dané technologie je jeho tvářitelnost špatná. Naopak dobrá plastičnost např. v důsledku nízké meze kluzu materiálu může vést k zadírání v nástroji, takže i tvářitelnost takového materiálu je špatná.

V souvislosti s předchozí kapitolou lze shrnout, že lisovatelnost je nejširším pojmem, který v sobě zahrnuje jak tvářitelnost, tak plastičnost plechu. Z rozsáhlé problematiky lisovatelnosti tak bude nadále zaměřena pozornost na faktor zpracovávaného materiálu-plechu, na hodnocení jeho tvárných vlastností.

3. HODNOCENÍ VLASTNOSTÍ PLECHU Z HLEDISKA TAŽENÍ VÝLISKŮ

Technolog nebo konstruktér nástrojů pro plošné tváření potřebuje znát takové charakteristiky plechů, s jejichž pomocí by mohl stanovit meze tvářitelnosti výlisku při daném materiálu, technologii a tvaru výlisku. Volba plechu musí zajistit nejen požadované vlastnosti hotového výrobku, ale i spolehlivý chod jeho výroby. Proto je důležité znát jeho vlastnosti a charakteristiky dané hutní výrobou [27]. Hodnocení vlastností tenkých plechů ve vztahu k jejich upotřebitelnosti při tažení výlisků je věnována celosvětově stále velká pozornost. Snahou je najít takové metody zkoušení, jež by poskytly co nejvěrnější obraz o chování materiálu za situaci, které jsou rozhodující pro vznik výlisků – zvláště složitých a nepravidelných tvarů. Právě v rozmanitosti mechanických schémat napětí a přetvoření u těchto dílů je třeba hledat hlavní těžkosti pro objektivní posouzení vhodnosti určitého plechu pro daný typ výlisku. V praxi se proto tvářitelnost hodnotí na základě ukazatelů, jež se stanoví z výsledků zkoušek, více či méně napodobujících vlastní tvářecí pochod a mohou dát do určité míry objektivní představu o praktických vlastnostech plechů. Za kritérium tvářitelnosti se použijí ty ukazatele, které ji charakterizují. Tyto ukazatele mohou být jednoduché /prosté/, stanovené na základě základních mechanických zkoušek, nebo porovnávací stanovené na podkladě zkoušek přizpůsobených podmínkám tvářecího pochodu [37]. Existující zkoušky lze tak rozdělit do dvou základních skupin [38]:

- 1/ základní
- 2/ napodobňující.

Mezi základní zkoušky, které jsou normalizovány, patří především tahová zkouška, zkoušky tvrdosti, velikosti a tvaru zrna, struktury, obsahu nekovových vměstků, drsnosti povrchu, chemický rozbor, dále rentgenografická difrakce a řada dalších.

Mezi napodobňující patří např. zkouška hloubením dle Erichsena, kalíškovací, Engelhardta-Grosse /TZP/, hydraulická [30], klínová [39], Fukuiho, Siebela-Pompa atd.

Uvedené zkoušky mohou úspěšně hodnotit vlastnosti plechu ve vztahu k jeho použití zejména podle toho, jak stav a podmínky

přetvoření při dané zkoušce odpovídají stavu přetvoření konkrétního výlisku. Z kap. 2.3 vyplývá, že např. plastičnost je vlastnost podmíněná. Při zkoušce tahem /zejména v oblasti rovnoměrného přetvoření/ lze zjistit plastičnost zahrnující vliv pouze jednoho jednoznačně definovaného stavu napjatosti [40], pomocí jednoduchého ukazatele plastičnosti jakým je rovnoměrné přetvoření ϵ_R . Charakter napjatosti u výlisků si ale spíše žádá určení plastičnosti za podmínek blízkých příslušné technologii, tedy ve vztahu ke složitým podmínkám napjatosti. Pak je nutné ji vyjadřovat pomocí složitějších ukazatelů. Jde v podstatě o klasifikaci dle souhrnu různých jednoduchých ukazatelů plastičnosti /doplňených často i vzhledem lomové plochy/.

Uvedené tvrzení neznámá, že zkouška tahem nemá pro hodnocení vlastností plechů opodstatnění, a to zejména v těch případech, kdy se porovnávají materiály ve vztahu ke konkrétnímu typu výlisku /např. tažení válcových či jiných výlisků pravidelných tvarů/ a nebo určení materiálových charakteristik potřebných při početním určování mezních přetvoření /viz. kap. 5/.

3.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem je nejrozšířenější ze skupiny základních zkoušek. Lze jí zjistit běžné charakteristiky, jako je mez kluzu [$R_{p0.2}$], pevnost v tahu [R_m], kontrakce [Z], tažnost [A_x], eventuálně maximální rovnoměrnou deformaci [ϵ_R]. Tyto hodnoty samy o sobě nedávají žádnou informaci o tvářitelnosti plechu a mohou být posuzovány jen společně [27]. Velký rozdíl meze kluzu a pevnosti je důležitý pro hluboké tažení. Obvykle je vyjádřen jejím poměrem, nebo v podobě informativní charakteristiky $ZP = k[R_m - R_{p0.2}]\epsilon_R$, takzvané zásoby plasticity [41,42]. Uvedené charakteristiky však dávají pro praktické použití jen velmi orientační údaje. Výhodnější jsou ukazatelé, jež jsou bezprostředněji ve vztahu k tvářitelnosti plechu, které dosud nejsou v ČSN, ale návrh normy pro jejich určování je připraven [43]. Takovou důležitou charakteristikou tvářitelnosti plechu je exponent /součinitel/ deformačního zpevnění, n [44,45]. Získáme ho aproximací diagramu skutečných napětí v závislosti na přetvoření ve tvaru

$$\sigma = \epsilon \varphi^n \quad /3.1/$$

Tato takzvaná nepřímá metoda jeho určování je popsána např. v [38,46,47,48,49]. Vysoká hodnota součinitele deformačního zpevnění způsobuje rovnoměrnější rozložení přetvoření při dvoj- osé tahové napjatosti a tím přispívá k dosažení větší hodnoty celkového přetvoření.

Při rovinných stavech napjatosti hrají důležitou roli hodnoty součinitele normálové anizotropie plastického toku, jež se určují při zkoušce tahem pomocí vztahu [31,38,44,50],

$$r_n = \frac{\varphi_b}{\varphi_a} \quad /3.2/$$

kde φ_a , resp. φ_b jsou logaritmická přetvoření ve směru šířky, resp. tloušťky zkušební tyče. Čím větší je hodnota normálové anizotropie, tím je vyšší schopnost plechu odolávat místnímu ztenčení tloušťky. Význam obou charakteristik n, r záleží v tom, že umožní stejnoměrnější rozdělení plastických přetvoření v nejvíce namáhaných místech výlisku v důsledku přemístění deformací z míst s vysokým počátečním napětím do míst s nižším počátečním napětím. Jejich souhrnný vliv zachycuje takzvaný index tváritelnosti, $nr1000$ [44]. Uvedené charakteristiky vykazují i značnou plošnou anizotropii v závislosti na úhlu α odebrání zkušební tyče vůči směru válcování plechu. Hodnoty r_n / r_s , n_n / n_s , uvedené v přílo- hách, jsou určovány v souladu s návrhem nové normy [43], dle vzta- hu

$$X_s = \frac{1}{4} / X_0 + X_{90} + 2X_{45} / \quad /3.3/$$

kde X představuje např. r nebo n .

Hodnotu n_n lze získat i tzv. přímou metodou [30,43,51,52,53], kdy představuje maximální rovnoměrné přetvoření $/n \sim \varphi_R/$. Dalším ukazatelem, který je možno získat zkouškou tahem při mě- nících se rychlostech zatěžování je součinitel zpevnění vlivem rychlosti přetvoření m [45]. Charakterizuje citlivost materiálu na rychlost přetvoření a určuje se ze vztahu

$$\sigma = C' \dot{\varphi}^m \quad /3.4/$$

S rostoucí hodnotou m se zlepšuje plastická stabilita při tvá- ření za studena.

Na plastičnost materiálu lze do určité míry usuzovat i z charakteru lomové plochy přetržené zkušební tyče. Přesněji z hloubky resp. tvaru jamek. Mělké jamky signalizují nízkou plastičnost, hluboké naopak [54].

Výsledky zkoušky tahem sice nejsou sporné, ale sporné je jejich aplikování na tažení výlisků v důsledku odlišných podmínek přetvoření. Proto vedle zkoušky tahem vznikla celá řada jiných zkoušek, jež více či méně napodobují konkrétní podmínky při tažení.

3.2 Napodobňující zkoušky

Pro optimální využití materiálu je důležité přiřadit plech určitých vlastností k určitému typu výlisku. Vzhledem k rozmanitým stavům napjatosti a přetvoření, jímž je plech podroben při tažení, neumíme dnes pro tento případ vyjádřit jeho tvářitelnost jedním univerzálním ukazatelem. Je však možno ji posuzovat ve dvou krajních polohách komplexního procesu plastického přetvoření, při vypínání /a/ a při vlastním hlubokém tažení /b/ dle obr. 2.1. Za tím účelem byla vyvinuta celá řada zkoušek, většinou simulativního charakteru, napodobující buď některou konkrétní technologii nebo modelující určité stavy napjatosti vyskytující se při tažení, které odpovídají oběma zmíněným krajním polohám či jejich kombinaci v různém poměru. Dle dominantní napjatosti, při níž dochází k přetvoření. Lze zkoušky rozdělit do dvou základních skupin:

1/ zkoušky pro modelování napjatosti typu tah-tah

2/ zkoušky pro modelování napjatosti typu tah-tlak.

Obě skupiny zkoušek jsou v podstatě založeny na principu fungování tzv. bezpečnostního technologického faktoru. Ten je definován jako poměr mezi silou F_B , která musí a může být přenesena oblastí nejvíce ohroženou ztrátou stability do oblasti přetvoření a silou F_A potřebnou pro přetvoření, jež je podmíněna velikostí přetvárného odporu. Přetvoření úspěšně probíhá, platí-li

$F_B > F_A$ [55]. V oblasti B může být stejný typ napjatosti jako v oblasti A /1. skupina zkoušek/ nebo jiný než v oblasti A

/2. skupina zkoušek/. Narušení procesu plastického přetvoření se projeví v některé z podob popsanych v kapitole 2.1. Tímto způsobem lze tvářitelnost určit ve vztahu ke konkrétní napjatosti.

zkouškami z první skupiny se zjistí schopnost plechu k vypínání /stretch-formability, stretchability-plastičnost/ a zkouškami z druhé skupiny k hlubokému tažení /deep-drawability, hlubokotažnost/ [46,50,56,57,58,59].

Na obr. 3.1 jsou zachyceny některé u nás nejpoužívanější napodobňující zkoušky. Hloubení dle Erichsena [1], hydraulická [2], obě z první skupiny, kališkovací [3] a kališkovací dle Engelhartha [4] jako představitelky druhé skupiny. Spolu se sch-

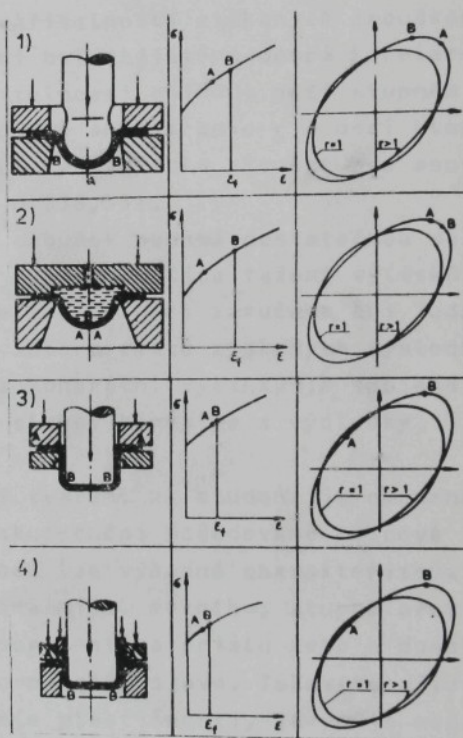
ematem zkoušky jsou uvedeny křivky přetvárné pevnosti /křivky zpevnění/ a elipsy odpovídající podmínce plasticity HMM pro různý typ normálové anizotropie. A, B označují oblasti působení sil F_A, F_B . Kriteriem plasticity u zkoušky hloubení dle Erichsena je velikost dosaženého prohloubení IE [mm] v okamžiku vytvoření trhliny. Přestože hodnoty IE leží v poměrně úzkém intervalu pro různé jakosti plechu a jsou zatíženy, vzhledem k tomuto intervalu, větším rozptylem /daným i subjektem obsluhy/, je to zkouška jednoduchá, rychlá a nenáročná na přípravu vzorků. To jsou z hlediska praxe důležité skutečnosti, které hovoří pro využívání této zkoušky i v budoucnu.

U kališkovací zkoušky je kriteriem hlubokotažnosti mezí stupeň tažení

$$K_{\max} = \frac{D}{d}$$

[3.5]

Kde D je průměr výchozího nástřihu
d je průměr tažníku [4,56].



Obr. 3.1 Některé napodobňující zkoušky [55]

A-oblast přetvoření

B-oblast porušení

U zkoušky dle Engelhardta je to tzv. přirozený stupeň hlubokotažnosti T [60] spočtený dle vztahu

$$T = \frac{F_{\max} - F_{\text{taž.}}}{F_{\max}} \cdot 100 \quad [\%] \quad /3.6/$$

kde $F_{\text{taž.}}$ je maximální tažná síla, při níž dojde k pevnému sevření příruby kalíšku přidržovačem

$F_{\max}$ je síla, při které dojde k odtržení dna kalíšku.

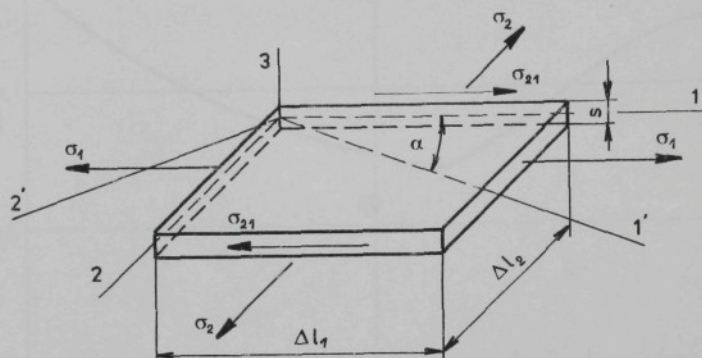
Při porovnávání ukazatelů tvářitelnosti získaných zkouškou tahem a zkouškami napodobňujícími byla zjištěna dobrá korelace mezi hodnotou IE a indexem tvářitelnosti rn_{1000} , mezi stupněm tažení $K_{\max}$ a součinitelem normálové anizotropie r a mezi hloubkou vydutí zkušebního tělesa při hydraulické zkoušce h a součinitelem deformačního zpevnění n [38,55].

Ani značné množství naznačených zkoušek nedává dostatečnou možnost hodnotit tvářitelnost ve vztahu k problematice tažení výlisků nepravidelných tvarů, nehledě na to, že není zaručena ani jednotná metodika provádění zkoušek a interpretace získaných výsledků. Jejich bezprostřední aplikace na konkrétní výlisky je spojena s řadou těžkostí a ukazuje se i slabší korelace s výsledky praktického lisování [31].

Vyčerpáním plastičnosti při tváření za studena je omezena velikost přetvoření nutného k uskutečnění požadované tvarové a rozměrové změny. Z těchto důvodů lze výhodně charakterizovat plastičnost prostřednictvím maximálního, mezního, stupně přetvoření, při němž ještě nedojde k porušení materiálu nebo k dosažení určitým způsobem definovaného mezního stavu. Takovému přístupu by vyhovovalo použití ukazatele plastičnosti, jakým je např. tažnost. Ale podmínky, za kterých je při zkoušce tahem zjišťována, se značně liší od podmínek tažení výlisků. Těm se zase více přibližují podmínky napodobňujících zkoušek, ale jimi zjištěné ukazatele nevypovídají bezprostředně nic o přípustných přetvořeních v limitujících oblastech. S ohledem na tyto skutečnosti je výhodné posuzovat plastičnost plechu prostřednictvím mezních přetvoření zjišťovaných za podmínek blízkých vlastního tažení a v příslušném rozsahu napjatosti. Takový způsob hodnocení plastičnosti plechu, využitelný i ve vztahu k analýze přetvoření na výlisku, umožňují **d i a g r a m y m e z n í c h p ř e t v o ř e n í / D M P /**, jejichž problematikou se blíže zabývá předložená práce.

4. DEFINOVANÍ DIAGRAMŮ MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ

Při lisování souvisí ztráta stability procesu přetvoření s vyčerpáním schopnosti libovolného elementu součásti /obr. 4.1/ přinášet tvářecí sílu.



Obr. 4.1 Vytknutý element na výlisku /1,2 - rovina plechu/

Vesmyslu definice plastičnosti /kap. 2.3/ závisí mezní stupeň přetvoření daného plechu i nastavu napjatosti v průběhu tažení. Označme hlavní normálová napětí v rovině plechu $\sigma_1, \sigma_2 / \sigma_3 = 0 /$, přičemž $|\sigma_1| > |\sigma_2|$ a odpovídající přetvoření $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ jsou definována jako logaritmické deformace

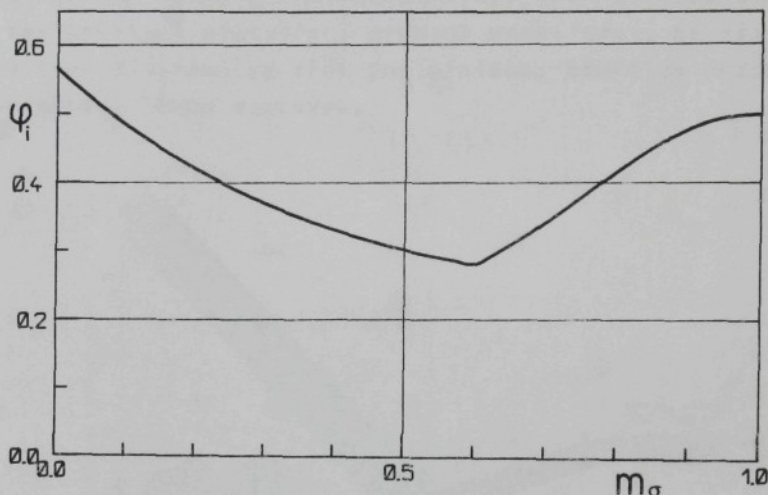
$$d\varphi = \frac{dl}{l} \quad /4.1/$$

Rovinnou napjatost lze vyjádřit

$$\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 1 : m_\sigma : 0, \quad m_\sigma = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}, \quad m_\tau = \frac{\sigma_{21}}{\sigma_1} \quad /4.2/$$

V takovém případě ukazatel stavu rovinné napjatosti m_σ nabývá hodnot z intervalu $m_\sigma \in \langle -1, 1 \rangle$. V souladu s předešlou kapitolou je žádoucí vyjadřovat mezní stavy přetvoření materiálu v závislosti na napjatosti za daných teplotně-rychlostních podmínek. Sledování závislosti tří hodnot přetvoření φ_{1-3} by bylo dost nepřehledné. V tom případě je výhodné vyjádřit přetvoření jednou veličinou - intenzitou přetvoření, která charakterizuje velikost

přetvoření v daném místě. Tímto přístupem uplatněným např. Tomlenovem [61,62] získáme diagram mezních přetvoření v souřadnicích $m_\sigma - \varphi_i$ /diagram 1. typu/, viz. obr. 4.2 /k výpočtu na počítači EC-1033 a kreslení grafu použito programu P01/.

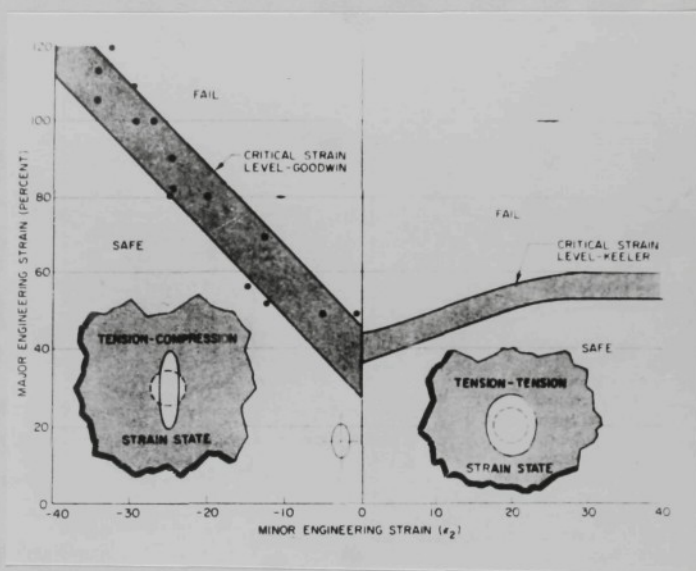


Obr. 4.2 Diagram mezních přetvoření představující závislost intenzity přetvoření na stavu napjatosti

Velikost intenzity přetvoření lze spočítat ze známých hodnot hlavních normálních přetvoření φ_{1-3} zjištěných pomocí deformačních sítí např. na konkrétním výlisku. Obdobně lze spočítat ze vztahu mezi tenzory napětí a přetvoření i hodnotu m_σ [63]. Naskýtá se otázka, zda by nebylo výhodnější vyhnout se těmto výpočtům a k získání DMP bezprostředně využít zjištěné hodnoty hlavních normálních přetvoření. S touto myšlenkou přišli poprvé Keeler s Goodwinem [64] v r. 1965 v návaznosti na [65]. Navrhli sestavit diagram mezních přetvoření jako závislost většího přetvoření $\varphi_1 / \varepsilon_1$ na menším přetvoření $\varphi_2 / \varepsilon_2$ v rovině plechu. V tomto případě hodnoty poměrných deformací ε_2 a ε_1 zjistili pomocí deformačních sítí na rozmanitých výliscích. Takto získaný diagram je na obr. 4.3.

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 /diagram 2. typu/ vyjadřuje závislost velikosti mezních přetvoření na napjatosti. Křivka /pásmo/ mezních přetvoření /KMP/ vymezuje v diagramech obou typů 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 křivkách u obou typů diagramů je zřetelné minimum, které je rozděluje na dvě větve, levou a pravou.



Obr. 4.3 Původní Keeler-Goodwinův diagram mezních přetvoření [65]

Při tažení výlisků se obecně uplatňují rovinné stavy napjatosti patrné na obr. 4.4. Jednotlivé případy se postupně vyskytují v oblasti přidržovače /1/, v okrajových oblastech výlisku se mohou vyskytovat i stavy blízké jednoosému tahu /2/, ale na převážné části povrchu výlisku je dvojosá tahová napjatost /3/, přičemž /4/ lze považovat za hraniční případ stavu /3/, vypínání dle obr. 2.1a. Na výlisku nelze určit přímo velikost napětí. Je však možné pomocí deformační sítě bezprostředně změřit hodnoty přetvoření jako následek působící napjatosti. Pak je výhodné pro prosté zatěžování definovat ukazatel stavu přetvoření

m_φ vztahem

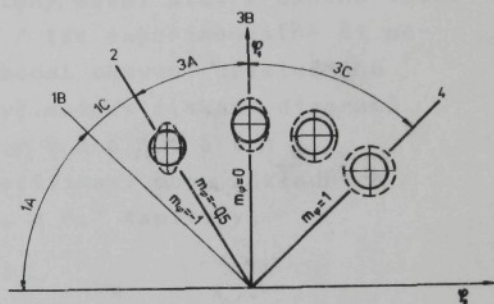
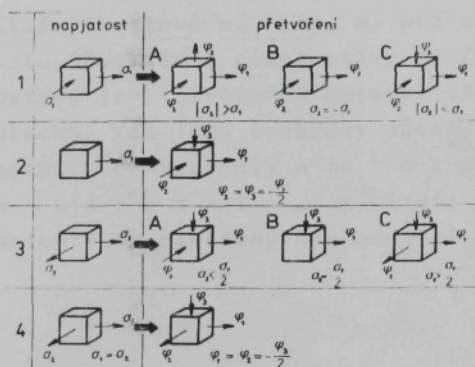
$$m_\varphi = \frac{\varphi_2}{\varphi_1}$$

/4.3/

Za předpokladu kvaziizotropního materiálu lze na základě teorie tečení jednoduše vyjádřit vztah mezi napjatostí a přetvořením jako

$$m_\varphi = \frac{1 - 2m_\sigma}{m_\sigma - 2}$$

/4.4/



Obr. 4.4 Stavy napjatosti a přetvoření, které se vyskytují při tažení výlisků [66]

Obr. 4.5 Stavy přetvoření na výliscích charakterizované ukazatelem m_φ [66]

Je zřejmé, že ukazatel stavu přetvoření m_φ je ve stejném intervalu jako ukazatel m_σ , čili $m_\varphi \in \langle -1, 1 \rangle$. 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 uvedeným skutečnostem je nejen výhodnější používat DMP 2. typu v souřadnicích $\varphi_2 - \varphi_1$, ale i místo ukazatele m_σ používat přímo ukazatele stavu přetvoření m_φ . Stavy přetvoření znázorněné na obr. 4.4 je možné charakterizovat v těchto digramech příslušnými deformačními stopami podle obr. 4.5. 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 ohraničných hodnotami $m_\varphi = -0,5$ a

$m_\phi = 1$, $/m_\sigma \in \langle 0,1 \rangle /$. V tomto rozsahu /sektory 3 A a 3 C na obr. 4.5/ je nutno při sestavování diagramů mezních přetvoření modelovat stavy napjatosti m_σ a z nich plynoucí stavy přetvoření m_ϕ .

Velikost mezních přetvoření je dána nejen plastičností 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 až porušení soudržnosti plechu tvárným lomem. K určení diagramu mezních přetvoření je proto nutné získat množství hodnot mezních přetvoření v rozsahu příslušných stavů m_σ resp. m_ϕ pro zvolený mezní stav z daného intervalu. Modelovat různé stavy m_σ / m_ϕ / lze experimentálně či počítaně, je-li vytvořen matematický model chování příslušného plechu. Tím jsou vymezeny obecně dvě metody získání diagramů mezních přetvoření, a to **e x p e r i m e n t á l n í** a **p o č í t n í**. K bližší specifikaci obou základních metod jsou zaměřeny následující /5. a 6./ kapitoly.

5. POČETNÍ METODY URČOVANÍ DIAGRAMŮ MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ

Při využití početních metod lze křivky mezních přetvoření získat na základě teoretického rozboru vlastností plechů. Tyto metody se jeví při současné úrovni výpočetní techniky jako cesta rychlá, poměrně jednoduchá a ekonomická. Hodnoty mezních přetvoření jsou vypočteny, při zavedení určitých zjednodušujících předpokladů, pomocí vztahů odvozených z teorie plasticity. Jsou vyjádřeny jako funkce materiálových charakteristik zjišťovaných zkouškou tahem a stavu napjatosti m_α , přičemž se vychází z různých definic mezního stavu.

5.1 Metody vycházející z kritéria ztráty stability na mezi pevnosti

V předchozích kapitolách bylo uvedeno, že ztráta stability souvisí s vyčerpáním schopnosti libovolného elementu výlisku přenášet tvářecí sílu. To vede ke vzniku nepřipustných lokálních přetvoření. Podmínkou stability [61,62]

$$dF_1 > 0, \quad dF_2 > 0 \quad /5.1/$$

musí proto splňovat každý element výlisku /obr. 4.1/. Dosažení lokálního nestabilního stavu se projeví v podobě tenkého pruhu /tzv. Krčku/ tekoucího materiálu skloněného pod určitým úhlem k hlavnímu normálnímu napětí σ_1 . Nezbytnou podmínkou pro lokální ztenčení pak je, že v materiálu přiléhajícimu k oblasti tečení nedochází k přetvoření, a že ve směru krčku nedojde k žádnému prodloužení /tedy jde o rovinné přetvoření při $d\varphi_2 = 0$ / [65]. Lokální nestabilní stav při napjatosti $\sigma_1 > \sigma_2 > 0$ vznikne, je-li přírůstek přetvárné síly ve směru největšího hlavního přetvoření φ_1 roven nule / $dF_1 = 0$ /, tedy podmínka ztráty stability je ve tvaru [62]

$$\frac{d\sigma_1}{d\varphi_1} = \sigma_1 \quad /5.2/$$

a odpovídá pravé větvi křivky mezních přetvoření.

K lokálnímu nestabilnímu stavu při napjatosti $\sigma_1 > 0$, $\sigma_2 < 0$ dochází v okrajových částech výlisku u tažné hrany tažnice, kde v určitém místě dojde k rovinnému přetvoření při $d\varphi_2 = 0$. Pak je podmínka ztráty stability ve tvaru [62]

$$\frac{d\sigma_1}{d\varphi_3} = -\sigma_1 \quad /5.3/$$

a odpovídá levé větvi křivky mezních přetvoření.

Podmínek /5.2/ a /5.3/ spolu s teorií plastického tečení použil Tomlenov k odvození vztahů pro výpočet mezních-kritických hodnot přetvoření v souřadnicích 1. typu. Po odvození získáme z podmínky /5.2/

$$\varphi_{ik} = \frac{2\sqrt{1 - m_\sigma + m_\sigma^2}}{2 - m_\sigma} n \quad /5.4/$$

z podmínky /5.3/

$$\varphi_{ik} = \frac{2\sqrt{1 - m_\sigma + m_\sigma^2}}{m_\sigma + 1} n \quad /5.5/$$

Do tohoto výpočtu však ještě není zahrnuta taková důležitá charakteristika, jakou je normálová anizotropie. Ta se objevuje ve vztazích publikovaných Ruzanovem [67], který vycházel při odvození mimo jiné i z prací Hilla [68,69]. Řešení vychází z mnoha zjednodušujících předpokladů uvedených např. v citované literatuře, z nichž nejzávažnější jsou:

1/ předpoklad prostého zatěžování $m_\sigma = \text{konst.}$

2/ součinitel deformačního zpevnění $n = \text{konst.}$ a je nezávislý na m_σ

3/ součinitel normálové anizotropie $r = \text{konst.}$

Z podmínky /5.2/ pak vychází

$$\varphi_{ik} = \frac{\left\{ \frac{2}{3} \left(1 + r_0 + \frac{r_0}{r_{90}} \right) \left[(1 + r_0) - 2 r_0 m_\sigma + \left(r_0 + \frac{r_0}{r_{90}} \right) m_\sigma^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}}{(1 + r_0) - r_0 m_\sigma} n \quad /5.6/$$

a z /5.3/

$$\varphi_{ik} = \frac{\left\{ \frac{2}{3} \left(1 + r_0 + \frac{r_0}{r_{90}} \right) \left[(1 + r_0) - 2 r_0 m_\sigma + \left(r_0 + \frac{r_0}{r_{90}} \right) m_\sigma^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}}{1 + \frac{r_0}{r_{90}} m_\sigma} n \quad /5.7/$$

kde r_0, r_{90} jsou hodnoty součinitele normálové anizotropie zjišťované ve směru $\alpha = 0^\circ$ a 90° vůči směru válcování. Až dosud byla uvažována shoda směrů hlavních os tenzorů napětí a anizotropie. V naprosté většině případů konkrétního řešení na výliscích však tato podmínka není splněna. Z podmínky invariantnosti plastické práce k pootočení hlavních os tenzorů napětí o úhel α /obr. 4.1/ vůči hlavním osám tenzorů anizotropie v rovině plechu odvodil Ruzanov [70,71] vztahy pro výpočet kritické intenzity přetvoření pro libovolný směr daný úhlem α . Součástí tohoto řešení, navazujícího na práce Golovleva [72,73] je i odvození vztahu pro výpočet hodnoty součinitele normálové anizotropie v libovolném směru v rovině plechu, $r_\alpha = f(r_0, r_{45}, r_{90}, \alpha)$. Podmínku plasticity sdruženou se zákonem tečení lze vyjádřit ve tvaru [74]

$$d\varphi_{ij} = \frac{d\varphi_i}{\bar{A}\sigma_i} \bar{A}_{ijpq} \sigma_{pq} \quad /5.8/$$

kde značí σ_i intenzitu napětí

φ_i intenzitu přetvoření

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

$\bar{A}_{ijpq}$ složky tenzoru anizotropie

Hlavní osy tenzoru anizotropie jsou na obr. 4.1 označeny $1', 2', 3'$ /osa $1'$ je totožná se směrem válcování/. Rovinná napjatost vyjádřená /4.2/ je charakterizována ve vztahu k přetvoření čtyřmi nezávislými složkami tenzoru anizotropie $\bar{A}'_{nmrs}$: $\bar{A}'_{1111}, \bar{A}'_{2222}, \bar{A}'_{1122}, \bar{A}'_{1212}$. Pro složky tenzoru anizotropie $\bar{A}_{ijpq}$ v pootočeném souřadném systému os $1, 2, 3$ v souladu se zákonem transformace tenzoru 4. řádu, platí

$$\bar{A}_{ijpq} = a_{in} a_{jm} a_{pr} a_{qs} \bar{A}'_{nmrs} \quad /5.9/$$

Po odvození získáme z podmínky /5.2/

$$\varphi_{ik} = \frac{A^{\frac{1}{2}} D^{\frac{1}{2}}}{D_1} n \quad /5.10/$$

a z podmínky /5.3/

$$\varphi_{ik} = \frac{A^{\frac{1}{2}} D^{\frac{1}{2}}}{D_1 + D_2} n \quad /5.11/$$

$$\begin{aligned} \text{kde } A &= \frac{1}{3} / A_{1111} + A_{2222} + A_{3333} / \\ D &= A_{1111} - 2A_{1122} m_\alpha + A_{2222} m_\alpha^2 + 4A_{1212} m_\tau^2 + 4A_{1112} m_\tau + 4A_{2212} m_\alpha m_\tau \\ D_1 &= A_{1111} - A_{1122} m_\alpha + 2A_{1112} m_\tau \\ D_2 &= A_{2222} m_\alpha - A_{1122} + 2A_{2212} m_\tau \\ D_3 &= 2A_{1212} m_\tau + A_{1112} + A_{2212} m_\alpha \end{aligned} \quad /5.12/$$

$$A_{ijpq} = \frac{\bar{A}_{ijpq}}{A_{1122}} = f/r_0, r_{45}, r_{90}, \alpha / |74, 75|.$$

Porovnáním vypočtených hodnot mezních přetvoření s experimentálně zjištěnými byla zřejmá jejich vzájemná odlišnost, zejména v pravé větvi KMP. Lepší shody s experimentálními údaji dosahují v této oblasti spočtené křivky pro tzv. difúzní nestabilní stav [65, 76, 77, 78, 79], který je pro libovolnou rovinnou napjatost charakterizován rovnicemi

$$dF_1 = 0, \quad dF_2 = 0 \quad /5.13/$$

V tomto případě, kdy obě hlavní přetvoření jsou kladná, by se nemělo, ve smyslu uvedených podmínek, vyskytnout lokalizované ztenčení a plastická nestabilita se projeví jako difúzní /rozšířené/ ztenčení. Tento nestabilní tok materiálu je široce a symetricky rozložen podél směrů zatěžování [65]. Odtud vyplývají podmínky ztráty stability

$$\frac{d\sigma_1}{d\varphi_1} = \sigma_1, \quad \frac{d\sigma_2}{d\varphi_2} = \sigma_2 \quad /5.14/$$

Z podmínky /5.14/ po odvození /např. [44]/ získáme

$$\varphi_{ik} = \frac{\left(\frac{2}{3} (1 + r_0 + \frac{r_0}{r_{90}}) \right)^{\frac{1}{2}} [(1 + r_0) - 2r_0 m_\alpha + (r_0 + \frac{r_0}{r_{90}}) m_\alpha^2]^{\frac{3}{2}}}{[(1 + r_0) - r_0 m_\alpha^2 + [(r_0 + \frac{r_0}{r_{90}}) m_\alpha - r_0]^2 m_\alpha} n} \quad /5.15/$$

a pro libovolný směr v rovině plechu daný úhlem α dle [74]

$$\varphi_{1k} = \frac{A^{\frac{1}{2}} D^{\frac{3}{2}} A_{1212}}{(A_{1212} D_1 - D_3 A_{1112}) D_1 + (A_{1212} D_2 - D_3 A_{2212}) D_2 m_\sigma} n \quad /5.16/$$

Pro porovnání přetvoření dosažených vrůzných místech výlis-
ku s mezními hodnotami danými v DMP jsou, jak již bylo uvedeno
v kap. 4, diagramy 1. typu méně výhodné. Budou mít větší význam
spíše pro teorii plasticity, ale z praktického hlediska je vý-
hodnější diagram 2. typu se souřadnými osami $\varphi_2 - \varphi_1$.

Vztahy pro výpočet hodnot mezních přetvoření v těchto souřadni-
cích odvodil Tomlenov z podmínky /5.2/

$$\varphi_{1k} = n$$

/5.17/

$$\varphi_{2k} = \frac{2m_\sigma - 1}{2 - m_\sigma} n$$

a z /5.3/

$$\varphi_{1k} = \frac{2 - m_\sigma}{m_\sigma + 1} n$$

/5.18/

$$\varphi_{2k} = \frac{2m_\sigma - 1}{m_\sigma + 1} n$$

a opět z ohledem na lepší shodu vypočtené KMP s experimentem
/obr. 4.3/ je levá větev křivky mezních přetvoření spočtena
z podmínky /5.3/ a pravá z /5.14/. Zahrnutím součinitele
normálové anizotropie získáme vztahy [44,80]; z podmínky
/5.3/

$$\varphi_{1k} = \frac{1 + \frac{1}{r_0} - m_\sigma}{\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_{90}} m_\sigma} n \quad /5.19/$$

$$\varphi_{2k} = \frac{(1 + \frac{1}{r_{90}}) m_{\alpha}^{-1}}{\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_{90}} m_{\alpha}} n \quad /5.19/$$

a z podmínky /5.14/

$$\varphi_{1k} = \frac{1 + r_0 - r_0 m_{\alpha}}{\left\{ \frac{2}{3} (1 + r_0 + \frac{r_0}{r_{90}}) [(1 + r_0) - 2 r_0 m_{\alpha} + (r_0 + \frac{r_0}{r_{90}}) m_{\alpha}^2] \right\}^{\frac{1}{2}}} \varphi_{ik} \quad /5.20/$$

$$\varphi_{2k} = \frac{(r_0 + \frac{r_0}{r_{90}}) m_{\alpha} - r_0}{\left\{ \frac{2}{3} (1 + r_0 + \frac{r_0}{r_{90}}) [(1 + r_0) - 2 r_0 m_{\alpha} + (r_0 + \frac{r_0}{r_{90}}) m_{\alpha}^2] \right\}^{\frac{1}{2}}} \varphi_{ik}$$

Kde φ_i je určena vztahem /5.15/.

Křivky spočtené ze vztahů /5.19/ a /5.20/ představují tzv. teoretické Keeler-Goodwinovi křivky mezních přetvoření pro anizotropní materiál.

S použitím podmínky /5.14/ odvodil dále Ruzanov [81] vztahy $\varphi_2, \varphi_1 = f / m_{\alpha}, r_0, r_{45}, r_{90}, n, \alpha /$, ale pouze s uvažováním podmínek lokální ztráty stability /i v pravé větvi KMP/.

Shrnutím dosavadních poznatků byly sestaveny vztahy, jež umožňují spočítat hodnoty mezních přetvoření jako funkce m_{α}, r, n, α , v souřadnicích $\varphi_2 - \varphi_1$ i s uvažováním podmínky /5.14/ pro pravou /5.22/ větev KMP [75, 82].

Při výpočtu křivky mezních přetvoření použijeme pro levou větev kritéria lokální ztráty stability /5.3/, pak

$$\varphi_{1k} = \frac{D_1}{D_1 + D_2} n \quad /5.21/$$

$$\varphi_{2k} = \frac{D_2}{D_1 + D_2} n$$

Pro pravou větev platí kritérium difúzní ztráty stability /5.14/, pak

$$\varphi_{1k} = \frac{D_1}{\frac{1}{A} \frac{1}{D}} \varphi_{ik}$$

/5.22/

$$\varphi_{2k} = \frac{D_2}{\frac{1}{A} \frac{1}{D}} \varphi_{ik}$$

kde φ_{ik} je určeno vztahem /5.16/.

Problematika výpočtu hodnot mezních přetvoření s uvažováním kritéria ztráty stability na mezi pevnosti je širěji rozebrána např. v [75] a zejména v pracích Primuse [44,80].

5.2 Metoda vycházející z kritéria lokálního ztenčení plechu

Tuto metodu výpočtu mezních přetvoření plechu v podmínkách rovinné napjatosti v důsledku lokálního ztenčení vytvořili Marciniak a Kuczyński - tzv. MK teorie [83]. V souvislosti s ní se Marciniak hlouběji zabýval i otázkami ztráty stability při tváření plechu. Jeho teoretické pojetí celé problematiky má velice blízko k realitě plastického přetvoření skutečného plechu. Z těchto důvodů bude jeho přístupu ke ztrátám stability věnována pozornost v následujících kapitolách.

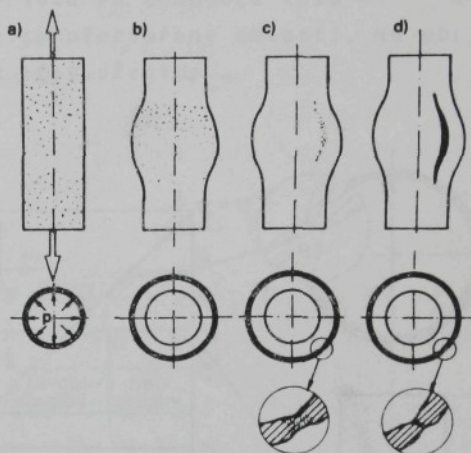
5.2.1 Ztráty stability v oblasti velkých plastických přetvoření [32]

Následující rozbor je založen na předpokladu, že změny přetvárné pevnosti materiálu jsou způsobeny v podstatě dvěma protichůdnými ději. První můžeme kvantitativně vyjádřit prostřednictvím zpevňování proti němuž působí "odpevňování" způsobené růstem a spojováním vnitřních necelistvostí. Jeho velikost je závislá především na poměru působících tlakových a tahových napětí. Průběh přetvárné pevnosti v závislosti na přetvoření závisí tedy nejen na vlastnostech materiálu, ale i na podmínkách přetvoření. Pro snadnější vysvětlení celé záležitosti lze použít modelu v po-

době tenkostěnné trubky, obr. 5.1. Ta je namáhána vnitřním přetlakem a axiální tahovou silou, jejíž velikost je volena tak, aby prodloužení trubky bylo nulové. Pak jde o rovinné přetvoření při $\varphi_2 = 0$.

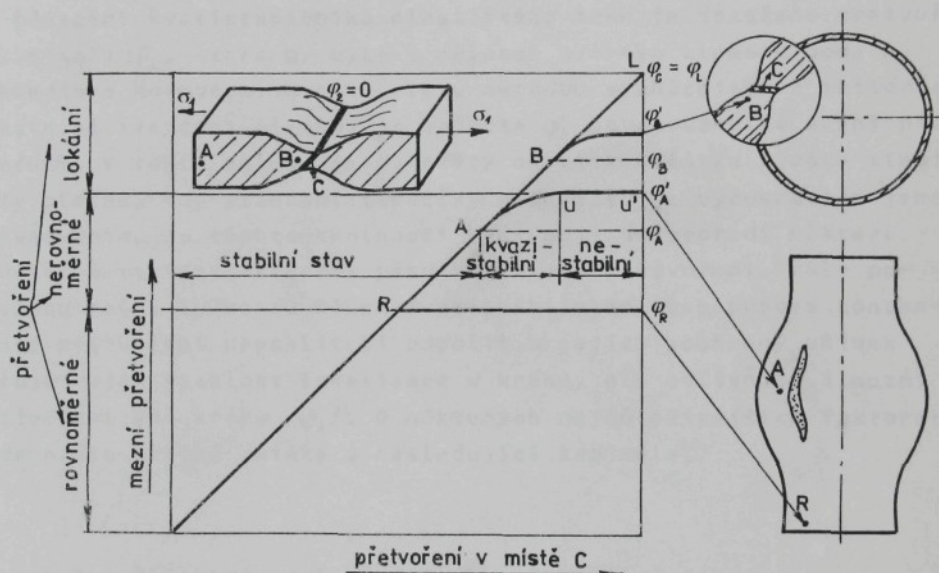
Proces plastického přetvoření trubky lze charakterizovat následujícími fázemi:

- a/ rovnoměrné přetvoření je zabezpečeno intenzivním zpevňováním, jež kompenzuje zmenšující se tloušťku stěny
- b/ vznik vyboulení znamená ztrátu stability trubky /the loss of the tube stability/ a vede k nerovnoměrnému rozložení přetvoření. /Obdoba difúzní ztráty stability v kap. 5.1/. Tento okamžik je představován bodem R na obr. 5.2 a odpovídá mu dosažené přetvoření φ_R . Části mimo vyboulenou oblast jsou opět v pružném stavu. Délka vyboulení závisí na průměru trubky, nikoli na tloušťce její stěny
- c/ při dalším přetváření vyboulené části se objeví lokalizované ztenčení, tzv. krček ve směru tloušťky. Znamená to zvětšení nerovnoměrnosti rozložení deformace, přičemž šířka krčku závisí na tloušťce plechu. Tento okamžik představuje počátek ztráty stability plechu /the onset of instability of the sheet metal/ a odpovídá mu bod A na obr. 5.2.
- d/ pokračující přetvoření je soustředěno do středu lokalizované oblasti a vyvolá vznik pásu lokalizovaných smykových deformací vedoucích napříč tloušťkou plechu. Tento okamžik znamená ztrátu stability materiálu /the loss of stability of the material/. Dochází k ní v důsledku ztráty schopnosti materiálu k defor-



Obr. 5.1 Model zobrazující různé typy ztrát stability [32]
 a-rovnoměrné přetvoření
 vznik b-vyboulení
 c-lokalizovaného ztenčení
 d-smykových pásů

mačnickému zpevnění. Tloušťka vrstvy do níž je přetvoření soustředěno nezávisí ani na průměru trubky ani na tloušťce její stěny. Na obr. 5.2 této ztrátě stability odpovídá bod B, který leží uprostřed lokalizované oblasti, ale mimo zónu smykového pásu. Přetvoření v této fázi je již doprovázeno nekontrolovatelným růstem a spojováním vnitřních dutin, jež ve svých důsledcích vede k porušení soudržnosti materiálu /a complete loss of cohesion of the material/ v nejvíce přetvořené oblasti. Na obr. 5.2 tomu odpovídá bod L a lomové přetvoření φ_L .



Obr. 5.2 Velikost deformací odpovídající jednotlivým fázím plastického přetvoření

Popsaný proces postupné lokalizace přetvoření a zužování plasticky přetvářených oblastí platí obecně pro jakýkoli výlisek a doprovází ho uvedené tři základní podoby ztrát stability.

5.2.1.1 Kvazistabilní přetvoření

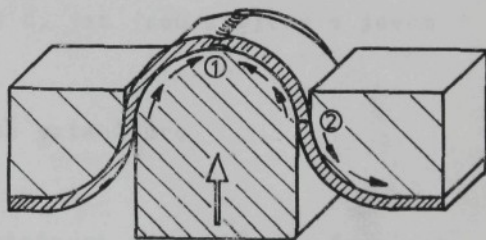
Náhla změna ze stabilního do nestabilního stavu /bod A na obr. 5.2/ může nastat jen v tom případě, když nepůsobí další faktory zpomalující či urychlující proces lokalizace. Z těchto

důvodů není hranice této ztráty stability ostrá. K popsanému jevu dochází postupně, plynule a za ne zcela objasněných okolností [31]. Na čáře zobrazující průběh přetvoření není v bodě A ostrý zlom, ale je zde určitá přechodová část, kterou lze nazvat kvazistabilním stavem /oblouk $\widehat{AU}$ na obr. 5.2/. V něm je proces koncentrace přetvoření do jakési prohlubně tj. krčku /zóna B/ doprovázen dalším pomalejším přetvářením materiálu v oblastech vně vznikající prohlubně /zóna A/. Celý tento pozvolný proces je ukončen soustředěním přetvoření pouze do vzniklé prohlubně /lokálního krčku/, zatímco materiál vně ní je odlehčen a je v pružném stavu /čára UU' /. Tedy za přispění kvazistabilního plastického toku je dosaženo přetvoření φ'_A , nikoli φ_A , které by bylo v případě ostrého zlomu v bodě A. Z hlediska hodnocení mezních stavů metodou vycházející z kritéria lokálního ztenčení plechu, je hodnota φ'_A považována za mezní přetvoření. V tomto ohledu je důležitý okamžik počátku ztráty stability plechu, kdy ztenčení tloušťky materiálu je vyrovnáváno jeho zpevňováním. Za těchto okolností vystupují do popředí některé dodatečné faktory, které v předchozí fázi přetvoření hrály podružnou roli. Ty mohou během kvazistabilního toku proces koncentrace přetvoření urychlit či oddálit a jejich souhrnný účinek určuje nejen rychlost lokalizace v krčku, ale ovlivňuje i mezní přetvoření vně krčku / φ'_A /. O některých nejdůležitějších faktorech bude proto krátká zmínka v následující kapitole.

5.2.1.2 Faktory ovlivňující kvazistabilní tok

Nehomogenity_v_plechu mohou být geometrického charakteru /nerovnoměrná tloušťka, drsnost povrchu/ nebo jsou to inkluze či dutiny, hranice zrn, specifické orientace krystalografických rovin atd. Tyto nehomogenity způsobí již na začátku tváření nerovnoměrné rozložení přetvoření a jeho koncentraci v "nejslabších" místech plechu. Jejich účinek je eliminován intenzivním zpevňováním. Se snižující se schopností zpevňovat rychle vzrůstají rozdíly přetvoření v místě / φ_B / a vně / φ_A / budoucího krčku. Nastane-li během přetvoření při $m_0 \rightarrow 1$ stav, kdy je splněna podmínka vzniku lokálního ztenčení $\varphi_2 = 0$ /kap. 5.1/, dojde ve vznikajícím krčku ke změně napjatosti, $m_0 \rightarrow 0,5$. To vede při uvažování podmínky plasticity HMM ke zvýšení přetvárné pevnosti

v krčku ve směru σ_1 , tj. kolmo na jeho podélnou osu. Taková změna působí jako stabilizující faktor, oddaluje lokalizaci a zvětšuje mezní přetvoření v oblasti A. Geometrické změny tvaru krčku zapříčiní i vznik trojosé napjatosti, přičemž další tahové napětí ve směru normály působí rovněž jako stabilizující faktor /relativně se zvýší přetvárná pevnost v zóně B oproti A/. Důležitá je i hodnota normálové anizotropie, ovlivňující významně tvar křivky plasticity HHM. Větší citlivost na rychlost přetvoření rovněž oddaluje lokalizaci větším zpevněním a zvyšuje tak mezní přetvoření v zóně A. Gradient přetvoření podél krčku způsobuje vznik dodatečných smykových napětí působících směrem ke krčku a působí tak jako stabilizující faktor zvyšující celkovou úroveň přetvoření v jeho okolí /zóna A/. Snížení tlaku nástroje na plech v oblasti vzniku krčku /oblast 1 na obr. 5.3/, způsobí v těchto místech vzrůst přetvárné pevnosti ve srovnání s okolím. To opět oddálí proces koncentrace přetvoření. Popsaný efekt závisí především na poměru tloušťky plechu k poloměru tažníku a mimo jiné vysvětluje skutečnost růstu mezních přetvoření s tloušťkou plechu. Naopak působení nástroje ve velmi malé oblasti /malý poloměr nástroje/ urychlí zvětšením tlaku lokalizaci přetvoření. Působí-li třecí síly po obou stranách vznikajícího krčku ve směru k němu /okolí oblasti 1 na obr. 5.3/, je opět proces lokalizace oddálen. Třecí síly však mohou svým působením lokalizaci i významně urychlit, oblast 2 na obr. 5.3.



Kumulovaný účinek zmíněných faktorů významně působí na proces lokalizace přetvoření v krčku během kvazistabilního toku, a tím ovlivňuje i velikost mezního přetvoření. Hodnoty mezních přetvoření tak závisí nejen na vlastnostech plechu, ale i na podmínkách tváření.

Obr. 5.3 Působení tlaku nástroje a třecích sil na vývoj lokálního ztenčení

5.2.1.3 Ztráta stability materiálu

Podmínky ztráty stability materiálu byly analyzovány v mnoha pracích. Pro ideální tuhoplastický, izotropní, na rychlost přetvoření necitlivý materiál vyhovující sdruženému zákonu tečení je okamžik této ztráty stability spojován s maximem na křivce zpevnění při zkoušce tahem. Po jeho překročení nastává náhle nestabilní fáze plastického toku. Na reálné materiály při určitých podmínkách tváření působí řada stabilizujících faktorů, které přispívají k větší rovnoměrnosti rozložení přetvoření, tak jak bylo uvedeno v předcházející kapitole. Obdobně tomu bude i v případě ztráty stability materiálu. Z těchto důvodů nedojde k ztrátě stability náhle, ale je zde opět určitá kvazistabilní fáze, která posune hodnotu přetvoření této oblasti k vyšším hodnotám, tj. dle obr. 5.2 $\varphi_B \rightarrow \varphi'_B$. Při extrémně intenzivním působení stabilizujících faktorů může přetvoření v oblasti B dosáhnout hodnoty lomového přetvoření, tj. $\varphi_B = \varphi_L$. Velikost φ'_B je obtížné stanovit, neboť je obtížné i přesné určení podmínek tváření a z nich plynoucí působení stabilizujících faktorů. Je však zřejmá vzájemná interakce jevů ztrát stability plechu a materiálu, z níž plyne vzájemné ovlivňování deformací vně i uvnitř krčku. Hodnota mezního přetvoření φ'_A , tak nezávisí pouze na procesu formování krčku, ale i na jevech v oblastech B a C, jež jsou spojeny s jevem ztráty stability materiálu.

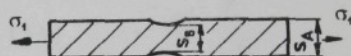
5.2.2 Matematická formulace vztahů pro výpočet přetvoření

Výpočet vychází z dříve zmíněných předpokladů, že plech vykazuje počáteční nerovnoměrnosti tloušťky, nebo jiné nehomogenity, které během tváření zapříčiňují vznik ztenčených oblastí. Vliv těchto faktorů lze popsat chováním jakési počáteční "rýhy", obr. 5.4 [83], jejíž směr je kolmý na směr největšího hlavního normálního přetvoření $/\varphi_1/$ a je charakterizován parametrem zeslabení

$$T_0 = \frac{s_B}{s_A} \quad /5.23/$$

kde s_B je počáteční tloušťka plechu uvnitř rýhy
 s_A je počáteční tloušťka plechu v okolí rýhy

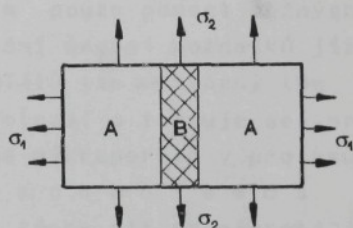
s rostoucím stupněm přetvoření klesá rychlost zpevnění /v oblasti B rychleji/, stoupá rozdíl přetvoření ve směru φ_1 pro obě oblasti A a B / $\varphi_B > \varphi_A$ / a poměr přírůstků přetvoření $d\varphi_2/d\varphi_1$ se zmenšuje k nule, tj. ke stavu rovinného přetvoření / $d\varphi_2 = 0$, $d\varphi_1 = -d\varphi_3$ /, až 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 porušení v zóně B. MK teorie rovněž vychází z celé řady zjednodušujících předpokladů. 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 $u = 1$.



$$u = \frac{\sigma_{1B}}{\sigma_{iB}} \frac{\sqrt[4]{3(2r_s + 1)}}{\sqrt{2(r_s + 1)}} \quad /5.24/$$

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

σ_{iB} je intenzita napětí tamtéž
Nakonec byla odvozena diferenciálně - integrální rovnice, která představuje funkční závislost mezi hodnotou přetvoření φ_2 , jenž je chápána jako nezávislý parametr procesu přetvoření a hodnotou "u"



Obr. 5.4 Element plechu s nerovnoměrnou tloušťkou [83]

$$\frac{du}{u} = \left[\frac{1}{A + \frac{1}{n}\varphi_2} + \left(Cu - \frac{1}{D + \frac{1}{n} \int \frac{d\varphi_2}{\sqrt{1-u^2}}} \right) \frac{1}{\sqrt{1-u^2}} + E \right] d\varphi_2 \quad /5.25/$$

kde $A, C, D, E = f(\varphi_0, \frac{\varphi_{3A}}{\varphi_{2A}}, r_s)$ [83]

φ_0 je počáteční přetvoření ze vztahu $\sigma_i = \sigma_0(\varphi_0 + \varphi_i)^n$

$\varphi_{2A}, \varphi_{3A}$ je přetvoření podél rýhy a ve směru tloušťky v A

Přínos MK teorie je hlavně v tom, že ukazuje na příčiny vývoje lokalizovaného ztenčení /působením mechanismu koncentrace přetvoření/ v podmínkách /v oblasti $\varphi_2 > 0$ /, ve kterých předcházejí-

ci početní metoda tento typ ztráty stability neuvažuje, ale ke kterému při praktickém lisování skutečně dochází. Ukazuje i na důležitost poměru velikosti vnitřních a povrchových vad k tloušťce plechu. MK teorii je od jejího vzniku věnována značná pozornost a je četnými autory dále rozvíjena, např. [84,85].

5.3 Metoda vycházející z teorie tvárného lomu

Tato metoda vychází z druhé krajní polohy definice mezního stavu - dosažení tvárného lomu, oproti první, kterou je dosažení meze pevnosti /kap. 5.1/.

5.3.1 Základy teorie tvárného lomu [54]

Vymezení pojmu **t v á r n ý l o m** pouze pomocí běžných kritérií plastičnosti by bylo při dnešní úrovni poznatků již nedostatečné. U nejpoužívanějších materiálů lze za tvárný lom pokládat takový, který má jamkovou morfologii a formuje se prostřednictvím vzniku, růstu a koalescence mikroporuch v procesu plastické deformace. Při pohledu na **m e c h a n i s m u s t v á r n é h o p o r u š e n í** je třeba mít na zřeteli jeho základní princip - při nukleaci mikroporuch jde o vznik nových volných povrchů v objemu porušovaného tělesa. Prováděné rozborů vedly k specifikaci mechanismu porušení různými klasifikačními kritérii. Jedno z nejdůležitějších je kritérium hodnocení dle způsobu nukleace mikroporuch. V tom případě rozlišujeme dvě základní kategorie. Lomy bez iniciace defektů uvnitř porušovaného tělesa, k nimž dochází u vysoce čistých materiálů se 100% kontrakcí a lomy způsobené vznikem a rozvojem mikroporuch uvnitř porušovaného tělesa. K nim patří:

- a/ Lomy kontrolované apriorními defekty /póry či jiné necelistvosti/, kdy je etapa nukleace zpočátku vyloučena, ale při dalším rozvoji tvárného lomu, v procesu plastické deformace, hraje důležitou roli, neboť póry narůstají zákonitostí růstu dutin.
- b/ Lomy kontrolované praskáním a oddělováním částic sekundárních fází, se kterými se v technické praxi střetáváme nejčastěji. Zde dochází ke koalescenci poruch nukleovaných prasknutím částic. Je to např. oddělování strukturně volného cementitu

od feritu při tváření nízkouhlikové oceli. K vytváření jamkové morfologie dochází způsobem úplného kontrahování můstků mezi dutinami.

- c/ Tvárné lomy kontrolované štěpením matrice. Štěpné trhliny jsou lokalizované do jednotlivých zrn jednofázového polyedrického materiálu a štěpným mechanismem se dále nešíří, tzn. každá z trhlín má svoje nukleační centrum a napěťo-deformační podmínky nedovolují její štafetový způsob šíření reiniciací nebo přímým přechodem. Z hlediska štěpení je každá taková trhlina podkritická, avšak je způsobila k dalšímu růstu dutinovým mechanismem. Koalescence je obdobná jako v případě b/, dochází k úplnému kontrahování můstků mezi paralelními plochami štěpné trhliny. Z mikroskopického hlediska je určitá část lomového povrchu vytvořená štěpením nebo interkrystalickým oddělením, i když podíl štěpných prvků na lomové ploše je malý.
- d/ Tvárné lomy kontrolované lokální dekohezí na hranicích zrn matrice. Je to alternativa tzv. "bezvměstkové nukleace" mikro-poruch. V jamkách v tom případě nejsou pozorované samostatně vyloučené částice sekundární fáze. K takovému případu může dojít tehdy, jsou-li na hranicích nespojitě vysegregované povrchově aktivní příměsi.
- e/ Kombinované mechanismy nukleace jsou na lomech technických materiálů poměrně častým jevem. Zatím pro ně nejsou definované obecné zákonitosti. Pro různé materiály a způsoby namáhání je uplatnění mechanismů rozdílné. Někdy stačí jen změna orientace zkušebního tělesa a dojde k zásadní změně porušování, jak je tomu např. u v jednom směru válcovaných nízkouhlikových ocelí. Obecně lze říci, že růst mikroporuch spočívá ve vyústování skluzových dislokací do defektu. Vlastní mechanismus koalescence, tj. úplné kontrahování můstků mezi dutinkami, je v teorii tvárného lomu poměrně jasný. Ne zcela jasná je však příčina tohoto jevu. Zda jde o nutný výsledek příčného růstu mikroporuch, nebo o ztrátu plastické stability můstků mezi dutinkami či o obě příčiny působící současně.

5.3.2 Matematická formulace vztahů pro výpočet mezních přetvoření

S ohledem na současné poznatky o mechanismech vzniku tvárných lomů v procesu plastické deformace, je věnována pozornost metodě

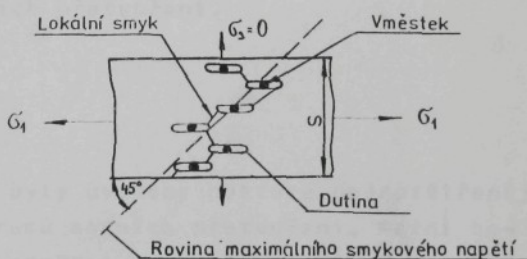
výpočtu mezních hodnot přetvoření, kterou publikoval A.K.Ghosh [86]. Jím navržený způsob výpočtu vychází z vlastností tvárného lomu. Kritériem mezního stavu je tedy porušení materiálu, čili okamžik, kdy soustava ztrácí svou termodynamickou stabilitu. Lomové kritérium v podstatě vymezuje mezní /kritické/ hodnoty vnitřních parametrů /rozsáhlá koalescence dutin v celém průřezu materiálu [87]. Vlastní způsob výpočtu se rovněž opírá o řadu předpokladů a v podstatě vychází z mechanismu tvárného porušení /kap. 5.3.1/. Ke spojování mikrodutin dochází nejprve vytvářením lokalizovaných smykových pásů ve směru maximálních smykových napětí a jejich propojením vznikne smykový pás napříč tloušťkou plechu, viz. obr. 5.5. Ghosh na základě zmíněných úvah odvodil tzv. zjednodušenou podmínku lomu, která je dána výrazem

$$K_{cr} = (1 + m_\sigma) \sigma_1^2 \quad /5.26/$$

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 veli-

kosti dutiny apod., ale která je vyjádřena charakteristikami vnějšího chování materiálu. Mezní hodnoty přetvoření jsou v tomto případě dány vztahy.



Obr. 5.5 Schematický pohled na smykové zřetězení [86]

$$\varphi_{1k} = \frac{\{A^2 K_{cr} (1 + m_\sigma^2 - P m_\sigma) / [C^2 (1 + m_\sigma)]\}^{\frac{1}{2n}}}{B (1 + m_\varphi^2 + P m_\varphi)^{\frac{1}{2}}} \quad /5.27/$$

$$\varphi_{2k} = m_\varphi \varphi_{1k}$$

kde A , B a P jsou konstanty určené hodnotami normálové anizotropie C , n jsou materiálové charakteristiky, viz. /3.1/ [86]

Pomocí těchto konstant, známých hodnot lomových přetvoření φ_{2L} , φ_{1L} zjištěných např. zkouškou tahem a pro tuto zkoušku modifiko-

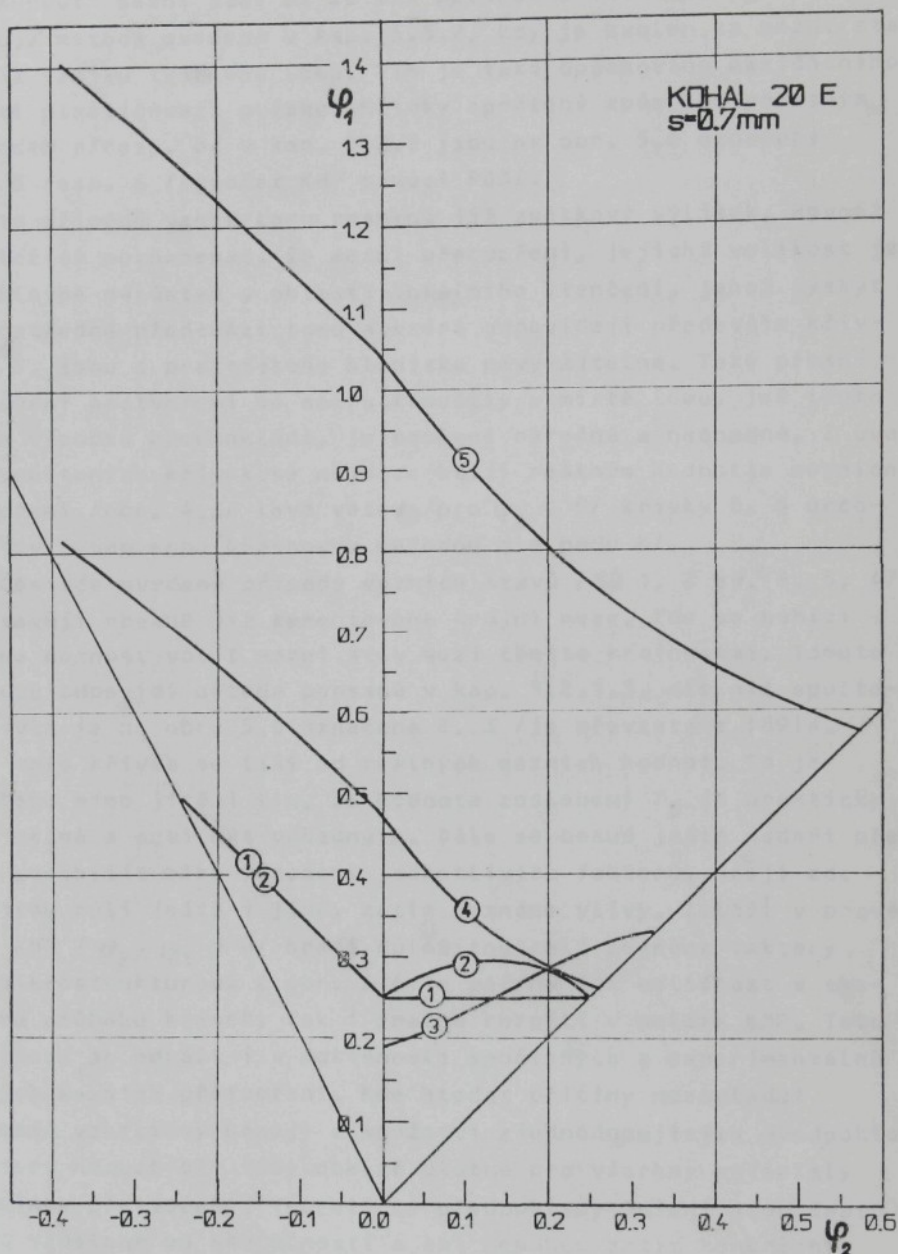
vaného výrazu /5.27/ je vypočtena velikost K_{cr} . Jsou-li takto známy všechny vstupní hodnoty, lze ze vztahů /5.27/ spočítat mezní hodnoty přetvoření pro různé stavy napjatosti. Důležitým momentem v uvedeném postupu je určení zmíněných lomových přetvoření, hlavně pak hodnoty většího lomového přetvoření φ_{1L} , které prostřednictvím K_{cr} nejvýrazněji ovlivňuje polohu vypočtené KMP. Tuto důležitou veličinu lze v podstatě určit dvěma způsoby:

- a/ podle Ghoshe nepřímou metodou z přetvoření ve směru tloušťky φ_{3L} a šířky φ_{2L} v místě lomu zkušební tyče,
- b/ stanovení φ_{1L} jako funkce vzdálenosti od místa lomu s použitím deformační sítě a následnou regresní analýzou a extrapolací známého průběhu přetvoření do místa lomu.

Různé způsoby zjišťování lomového přetvoření vedou k výpočtu značně rozdílných hodnot mezních přetvoření.

5.4 Dílčí závěr

V předchozích kapitolách byly uvedeny některé nejrozšířenější početní metody získávání diagramů mezních přetvoření. Mezní hodnoty mezních přetvoření jsou spočteny pomocí vztahů odvozených z teorií plasticity pro různě definované mezní stavy. Nejprve byly uvažovány případy tzv. lokálních ztrát stability na mezi pevnosti /kap. 5.1/. Jim příslušející křivka spočtená ze vztahů /5.17/ a /5.18/ je na obr. 5.6 označená číslem 1. Výpočet a kreslení křivky bylo provedeno pomocí programu P02. Pak bylo využito pro pravou větev KMP tzv. difúzní ztráty stability na mezi pevnosti. Odpovídající křivka spočtená ze vztahů /5.19/ a /5.20/ je na obr. 5.6 označena číslem 2 /program P02/. Charakterem průběhu se více blíží pásmu mezních přetvoření na obr. 4.3. Z pozorování KMP č. 1 a 2 s hodnotami mezních přetvoření na obr. 4.3 je zřejmé, že se mezní stavy představované oběma křivkami liší od mezních stavů experimentálně určených. Tyto odlišnosti mohou plynout z různě definovaných mezních stavů v obou případech. Kritérium ztráty stability na mezi pevnosti je nejnáročnější ve vztahu k funkční spolehlivosti výlisku. Ze závislosti $F - \Delta l'$ při zkoušce tahem pro jakostní ocelový plech /příloha 19/ je patrný velmi pozvolný pokles síly po dosažení meze pevnosti, což vede k myšlence využívat více zásobu plastičnosti materiálu



Obr. 5.6 Křivky mezních přetvoření získané početními metodami uvedenými v kapitolách 5.1, 5.2.1.3, 5.3.2

a "posunout" mezní stav až za mez pevnosti. Takovému přístupu vyhovuje metoda uvedená v kap. 5.3.2, kdy je zvolen za mezní stav okamžik vzniku tvárného lomu. Tím je také dosahováno maximálního využití plastičnosti plechu. Křivky spočtené způsobem popsaným pod bodem a/resp. b/ v kap. 5.3.2 jsou na obr. 5.6 označeny číslly 5 resp. 4 /výpočet KMP pomocí P03/.

V tomto případě vznik lomu znamená již zmetkový výlisek. Rovněž je důležité poznamenat, že mezní přetvoření, jejichž velikost je dána hlavně nárůstem v oblasti lokálního ztenčení, jehož výskyt bezprostředně předchází lomu a která odpovídají především křivce č. 5, jsou z praktického hlediska nevyužitelná. Také přesné zjišťování přetvoření ve směru tloušťky v místě lomu, jež tento způsob výpočtu předpokládá, je poměrně náročné a nesnadné. Z uvedených spočtených křivek se nejvíce blíží reálným hodnotám mezních přetvoření /obr. 4.3/ levá větev /pro $\varphi_2 < 0$ / křivky č. 4 určené tzv. upravenou Ghoshovou metodou dle bodu b/.

Oba zde uvedené případy mezních stavů /č. 1, 2 ev. č. 5, 4/ představují obecně již komentované krajní meze. Zde se nabízí výhodná možnost volit mezní stav mezi těmito krajnostmi. Tomuto přístupu odpovídá metoda popsaná v kap. 5.2.1.3, dle níž spočtená křivka je na obr. 5.6 označena č. 3 /je převzata z [89]/. Ale i tato křivka se liší od reálných mezních hodnot. To je způsobeno mimo jiné i tím, že hodnota zeslabení T_0 je prakticky neměřitelná a musí být odhadnuta. Dále se dosud ještě nedaří přesněji podchytit míru působení jednotlivých faktorů. Hrají zde důležitou roli ještě i jiné, zatím neznáme vlivy. Zvláště v pravé části KMP / $\varphi_2, \varphi_1 > 0$ / hrají důležitou roli zejména faktory dané mikrostrukturou. Z obr. 5.6 je patrná jak odlišnost v charakteru průběhu 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 v potřebné šíři. Z termodynamického hlediska plastická deformace a porušování materiálu patří mezi silně nerovnovážné disipativní děje, které jsou velmi závislé na teplotě. Obvykle méně než 10 % energie spojené s plastickým přetvořením

a porušením se vynakládá na mikroskopické strukturní změny, jež tyto děje doprovázejí. Zbytek energie se přemění v teplo. Při studiu makroskopických systémů bude nutno ve větší míře využívat poznatků o mikroskopických mechanismech jevů, jež by mohla poskytnout např. rozvíjející se nerovnovážná statistická termodynamika, a to zvláště v oblasti stability nerovnovážných dějů [87].

Odvozené vztahy neberou dále v úvahu ani 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 nejednotnosti metodik určování základních materiálových charakteristik. Nebere se rovněž v úvahu závislost těchto vstupních charakteristik na stupni přetvoření a na napjatosti.

To nutně vede k závěru, že vedle početních metod je nutno se zabývat i *e x p e r i m e n t á l n í m i* metodami získávání diagramů mezních přetvoření, a to jednoduššími způsoby, než je měření mezních přetvoření na různých typech reálných výlisků. Takové diagramy nejsou zatíženy zjednodušujícími předpoklady obvyklými u početních metod. Je možné je stanovit za podmínek blízkých praktickému lisování a mezní stav jednoznačně zvolit ve vztahu k výlisku. Při dodržení stejných podmínek experimentu jsou tyto diagramy navzájem srovnatelné. Lze je přímo využít k hodnocení plastičnosti různých materiálů /plechu/ a i ve vztahu k technologii tažení v souvislosti s analýzou přetvoření na výliscích.

6. PŘEHLED ZÁKLADNÍCH EXPERIMENTÁLNÍCH METOD URČOVÁNÍ DIAGRAMŮ MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ

K určení diagramu mezních přetvoření je nutné získat množství hodnot mezních přetvoření v rozsahu $m_{\phi} \in \langle 0,1 \rangle$ resp. $m_{\phi} \in \langle -0,5, 1 \rangle$ při daném kritériu mezního stavu /kap. 4/. Modelovat stavy m_{ϕ} lze nejen početně, ale i experimentálně. Původním postupem uplatněným Keelerem [64], totiž zjišťováním mezních přetvoření na různých typech výlisků, je získání KMP značně náročné, pracné a zdlouhavé. Mnohem výhodnější je experimentální modelování m_{ϕ} / m_n / v laboratorních podmínkách použitím některého z následujících způsobů. Popsané postupy se navzájem liší složitostí, nároky na zkušební zařízení, tvarem a provedením zkušebních těles a úplností výsledků, které poskytují.

6.1 Zkouška tahem zkušebních tyčí opatřených vruby

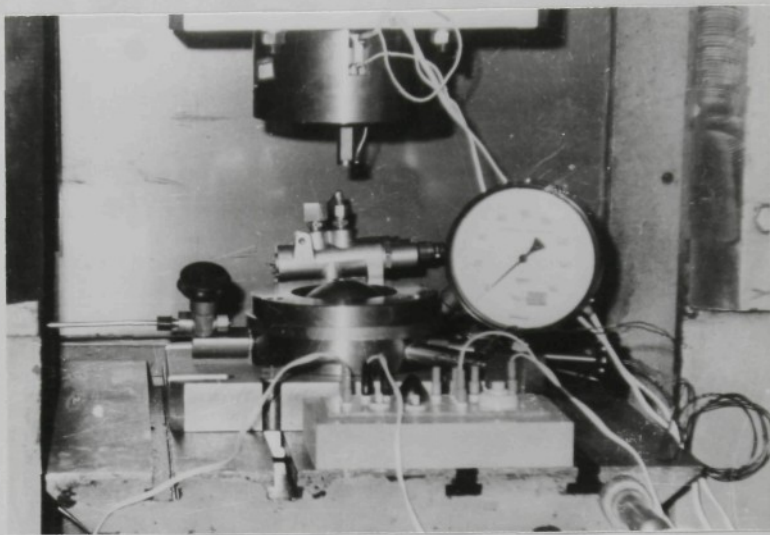
Různých stavů přetvoření se na zkušebních tyčích [14,89] dociluje rozličnými tvary vrubů, obr. 6.1. Rozsah stavů m_{ϕ} , kterého lze touto metodou docílit, je patrný na obr. 6.4. V oblasti vrubů je však plastická deformace omezena na velmi úzkou oblast, což má za následek velice strmý gradient přetvoření v podélném směru tyče. I při použití dostatečně husté deformační sítě /s překrývajícími se kruhovými elementy s poměrně malým parametrem cca 2,5 mm/ je obvykle obtížné vybrat právě ty elementy, které by spolehlivě určily hodnotu příslušného mezního přetvoření. Tyto problémy jsou tím větší, čím je poloměr vrubu menší. Podobný postup modelování byl ověřován např. i v [90].



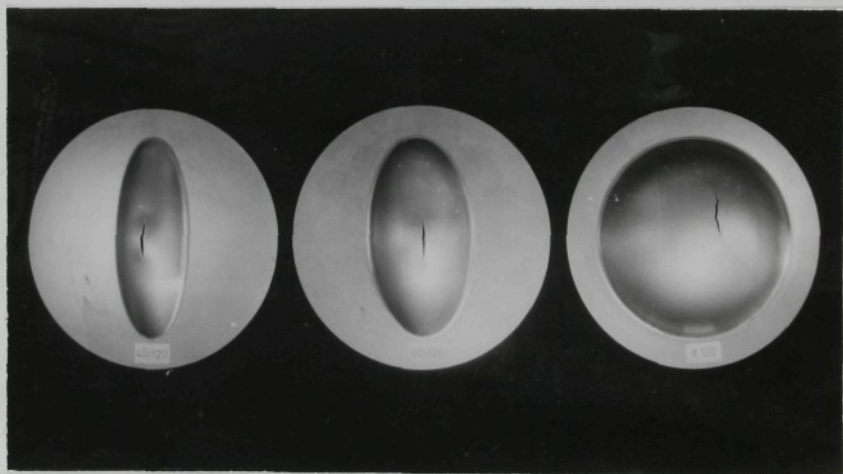
Obr. 6.1 Sada zkušebních tyčí s vruby, které byly použity na katedře tváření a plastů VŠST k experimentálnímu určení levé části DMP

6.2 Hydraulická zkouška

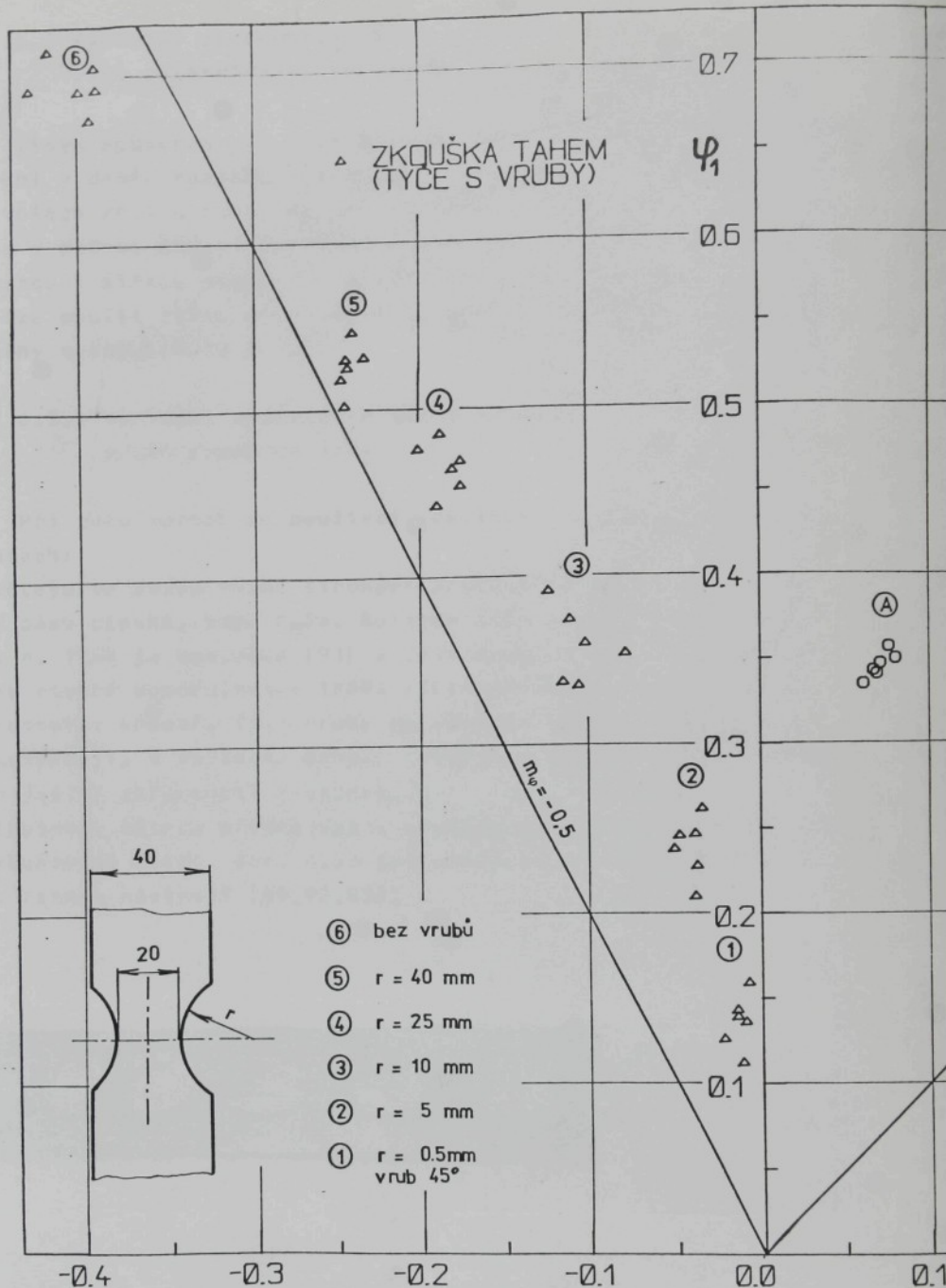
Princip zkoušky je patrný na obr. 3.1. Plech, pevně sevřený přidržovačem, je vypínán tlakem kapaliny. Proměnných stavů přetvoření se docílí použitím různých tvarů tažnic, od kruhové k eliptickým s různým poměrem os elips [30,14,89]. Vedle sady tažnic je k této zkoušce potřebné i příslušné zařízení, viz. obr. 6.2. Na obr. 6.3 jsou zkušební tělesa po přetvoření v kruhové tažnici $\varnothing 120\text{mm}$ a dvou eliptických s poměrem os 40/120 mm a 60/120 mm. Rozsah stavů m_ϕ , kterého lze touto metodou docílit je rovněž patrný z obr. 6.4. Možnosti hydraulického vypínání k modelování proměnných stavů přetvoření byly ověřovány pomocí zařízení, byť poněkud odlišné konstrukce, i v [90].



Obr. 6.2 Zařízení pro hydraulickou zkoušku umístěné na lisu CBA 300 [30] používané na katedře tváření a plastů VŠST



Obr. 6.3 Zkušební tělesa použitá při hydraulické zkoušce na katedře tváření a plastů VŠST



Obr. 6.4 Mezní stavy přetvoření dosahované metodami popsány
v kap. 6.1 a 6.2

6.3 Vypínání zkušebních těles proměnné šíře polokulovým tažníkem

Tímto způsobem lze snadněji modelovat rozmanité stavy přetvoření v daném rozsahu než způsoby uvedenými v předchozích dvou kapitolách /6.1 a 6.2/. Metoda spočívá ve vypínání zkušebních těles v podobě nástřihů proměnné šíře polokulovým tažníkem. S rostoucí šířkou nástřihu se zvětšuje poměr m_φ . Pro tuto zkoušku lze použít těles ve dvou základních provedeních, jak jsou popsány v kap.6.3.1a a 6.3.2.

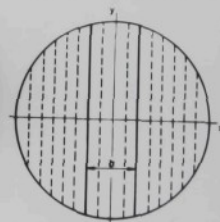
6.3.1 Vypínání zkušebních těles v podobě pruhů proměnné šíře

Při této metodě se používají zkušební tělesa ve dvou variantách:

- a/ Tělesa ve tvaru různě širokých pruhů připravená stříháním z pásu plechu, obr. 6.5a. Autorem této metody publikované v r. 1968 je Nakazima [91] a její použití pro určování DMP je rovněž doporučované IDDRG /International Deep Drawing Research Group/. Tyto pruhy se však na tažnici obtížně ustřeďují, v důsledku čehož, zvláště u malých šířek, dochází k jejich sklouznutí z tažníku.
- b/ Zkušební tělesa připravená z kruhových nástřihů odstřižením kruhových úsečí, obr. 6.5b jež umožňují přesné ustředění v tažném nástroji [89,92,93].



a/

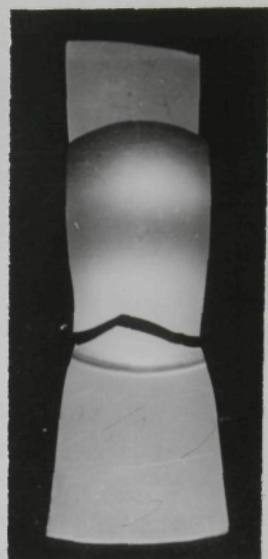


b/

Obr. 6.5 Zkušební tělesa v podobě pruhů proměnné šíře [91,93]

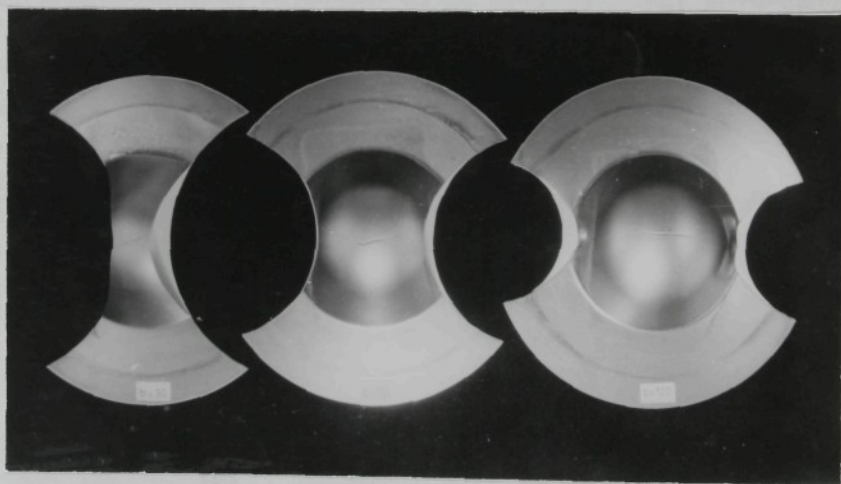
Takto získané stavy přetvoření pokrývají celý potřebný rozsah v DMP. Nevýhodou je, že hlavně u pruhů menší šířky dochází k porušení v jeho okrajových částech v těsné blízkosti tažné hrany, obr. 6.6. V těchto místech jsou však přetvořené elementy deformační sítě obtížně měřitelné. Tento nedostatek je možné odstranit použitím tvarově upravených zkušebních těles.

Obr. 6.6. Poloha lomu na zkušebním tělese v podobě pruhu malé šíře dle obr. 6.5b



6.3.2 Vypínání tvarově upravených zkušebních těles proměnné šíře

Uvedená metoda je obdobou předchozí /kap. 6.3.1/. Použitím těles dle obr. 6.7 se však odstraní její nedostatky, a to výskyt



Obr. 6.7 Tvarově upravené nástřihy vystřižením kruhových segmentů proměnného poloměru $/R = 90, 67,5 \text{ a } 45 \text{ mm}/$ použité na katedře tváření a plastů VŠST k ověření metody popsané v této kapitole

lomu v blízkosti tažné hrany. Zkušební tělesa jsou ze dvou stran kruhově vystřižena [89]. Vystřižením kruhových segmentů o různém poloměru se mění šířka nástřihu v jeho střední části. Tím je zajištěno dosažení různých stavů přetvoření a zároveň dojde k porušení tělesa na vrcholu vytaženého vrchliku, kde jsou přetvořené elementy deformační sítě snadno měřitelné.

6.4 Dílčí závěr

Z informativního přehledu v kap.6.1 až 6.3.2 vyplývá existence celé řady zkoušek modelujících různé stavy napjatosti a přetvoření. Navzájem se od sebe liší, jak různou složitostí přípravy zkušebních těles a nároky na zkušební zařízení, tak i rozsahem modelovaných stavů napjatosti a přetvoření. Na základě těchto hledisek je proto dále proveden jejich stručný rozbor.

Příprava zkušebních tyčí s vruby pro zkoušku tahem /kap. 6.1/ zahrnuje jednoduché nastřihání pruhů, které je však nutno na přesný rozměr a tvar přefrézovat a vyfrézovat různé tvary vrubů, včetně následného odstranění ostřin. To předpokládá existenci pomocných přípravků a použití frézky se sadou fréz rozlišných průměrů. Při větším rozsahu experimentů je příprava tyčí poměrně pracná. Naopak přetvoření lze jednoduše realizovat na trhačím stroji, které jsou pro svoji rozšířenost celkem snadno dostupné. Oblast modelovaného stavu napjatosti je však na tyči velice úzká a s ohledem na velikost parametru deformační sítě je dost obtížné objektivní stanovení skutečně dosaženého mezního přetvoření v důsledku velmi strmého gradientu přetvoření. Řešení např. této skutečnosti by vyžadovalo zmenšit parametr sítě /kap.10/. Navíc jsou dosažená přetvoření pouze v rozsahu levé části DMP /obr. 6.4/, $m_p \in \langle -0,5, 0 \rangle$.

Příprava zkušebních těles ve tvaru kruhových nástřihů pro hydraulické vypínání /kap. 6.2/, je-li k dispozici příslušný střižný nástroj, je velice jednoduchá. Mnohem větší nároky jsou kladeny na zhotovení eliptických tažnic a speciálního zkušebního nástroje. Vzhledem k tomu, že každá tažnice modeluje pouze malý rozsah m_p je jich potřeba vyrobit celou sadu. Nezbytnou součástí nástroje je i zařízení dodávající tlakovou kapalinu, včetně příslušného měřicího a ovládacího vybavení. V tomto smyslu je sice

jednodušší zařízení uvedené v [90], avšak zde použitý nástroj umožňuje provedení experimentů s mnohem menší pracností. Modelované stavy přetvoření jsou na rozdíl od předchozí metody pouze v rozsahu pravé části DMP, $m_{\varphi} \in (0, 1)$. Z uvedených skutečností je zřejmé, že pro alespoň přibližné pokrytí rozsahu $m_{\varphi} \in (-0,5, 1)$ by bylo potřeba obě předchozí metody zkombinovat.

V tomto světle se jeví výhodné používat pevně sevřených pruhů vypínaných polokulovým tažníkem /kap. 6.3.1/, jež modelují stavy přetvoření v celém žádaném rozsahu. Rovněž jejich příprava nastřiháním z pásů plechu v příslušném sortimentu šířek je velmi jednoduchá. Jejich nevýhody, lom u tažné hrany /obtížné proměňování/ eventuálně nepřesné středění v nástroji /sklouznutí z tažníku/, zejména u malých šířek, však významně znesnadňují provádění experimentů.

Tuto nevýhodu nemají tvarové nástřihy zhotovené vystřižením kruhových segmentů /kap. 6.3.2/ a vzhledem k tomu, že umožňují modelovat rovněž celý požadovaný rozsah stavů přetvoření, jeví se jako nejvýhodnější. Jejich výroba je ale značně komplikovaná, neboť je potřeba použít celé sady střižných nástrojů /dle sortimentu šířek tvarových nástřihů/. Navíc pak vystřižení poměrně malými poloměry způsobí u určitých šířek nástřihů v levé části DMP nežádoucí zvětšení gradientu přetvoření. Tato metoda rovněž vyžaduje použití tažného nástroje jako v předchozím případě.

Proměnných stavů přetvoření v omezeném rozsahu v pravé části DMP lze dosáhnout i vypínáním plných nástřihů tažníky tvarovými /různý poloměr zaoblení [89,94] či polokulovými, ale různého průměru [10]/. Potřebná sada tažníků a omezený rozsah m_{φ} však nehovoří ve prospěch použití této metody.

A konečně lze KMP získat i tzv. semiempirickou metodou, určující KMP s využitím matematické statistiky pomocí vybraných materiálových charakteristik. Její použití však předpokládá množství experimentálních výsledků a rovněž existenci experimentálně určené KMP, tj. jejího průběhu a tvaru. Pro plechy na bázi Al slitin je tato metoda použita v [95].

Z uvedeného rozboru jednoznačně vyplývá, že univerzálními metodami umožňujícími modelování stavů napjatosti a přetvoření v požadovaném rozsahu jednodušší cestou tvarových úprav zkušebních těles, jsou metody uvedené v kap. 6.3.1 /obr. 6.5b/ resp. v kap. 6.3.2. Za optimální by bylo možné považovat to řešení, kdy při zachování jejich výhod by došlo k odstranění jejich nedostatků, tj. porušení v blízkosti tažné hrany a pracná příprava nástřihů.

7. CÍL PŘEDLOŽENÉ PRÁCE A JEJÍ ZAMĚŘENÍ

Předložená práce se dotýká problematiky posuzování schopnosti tenkých plechů k velkým plastickým přetvořením a to v konfrontaci s podmínkami tažení výlisků nepravidelných tvarů. Takové znalosti jsou nezbytnou podmínkou k uskutečnění analýzy přetvoření prováděné s ohledem na respektování mezních stavů přetvoření plechu. Vzhledem k složitosti podmínek a k ne zcela objasněnému působení mnoha faktorů při tažení výlisků bude pozornost zaměřena na zjišťování mezních přetvoření experimentální metodou, která by obsáhla co nejvíce činitelů ovlivňujících za daných podmínek plastičnost plechu. Mezní stavy bude nutné určovat pro různou napjatost v okamžiku dosažení určitým způsobem definovaného mezního přetvoření, které budou zachyceny v podobě diagramů mezních přetvoření. Bude důležité, aby DMP pokrývaly takový rozsah stavů napjatosti m_σ a přetvoření m_φ , při kterých dochází na výliscích nepravidelných tvarů ke vzniku trhlin v oblasti velkých plastických přetvoření.

Experimentálně získané DMP budou dále nezbytným prostředkem k ověřování použitelnosti početních metod jejich stanovení ve smyslu 5. kapitoly. Poskytnou rovněž nový pohled na posuzování plastičnosti plechu a umožní porovnávat plastické vlastnosti různých plechů při rozmanitých stavech napjatosti nebo ve zvoleném rozsahu napjatostí. Soustavná konfrontace výsledků praktického lisování s DMP tak může umožnit optimalizaci volby zpracovávaného plechu i optimalizaci technologických podmínek procesu tažení.

V 5. a 6. kapitole je popsána celá řada metod určování DMP. V těchto diagramech se mezní hodnoty pohybují v různém rozsahu m_φ jak ve směru osy φ_2 , tak i ve značně širokém rozsahu ve směru osy φ_1 (obr. 6.4 a 5.6/). Pro praktickou využitelnost DMP nutně vyvstává požadavek zúžení rozsahu, v kterém se budou pohybovat mezní hodnoty ve směru osy φ_1 při současném zachování rozsahu $m_\varphi \in \langle -0,5, 1 \rangle$. Cílem práce bude proto vylepšit stávající metodiky experimentálního stanovení DMP tak, aby získané výsledky byly obecně co nejvíce využitelné ve smyslu dříve uvedených záměrů, při respektování požadavku na reprodukovatelnost výsledků.

Z těchto skutečností vyplývají i stanovené cíle. Na základě provedeného rozboru experimentálních metod vypracovat metodiku — umožňující modelovat stavy m ve stanoveném rozsahu s tím, že bude realizováno přetvoření až do okamžiku dosažení mezního stavu. V rámci této metodiky používat pouze jednoho typu zkoušky, která by v co největší míře zahrnovala výhody dosud diskutovaných řešení a současně měla i co nejméně jejich nevýhod. Rovněž v souladu s požadavky kladenými na experimentální metodu, především na požadavky dosahované přesností zjištěných mezních přetvoření, uspokojivě vyřešit otázku vytvoření povrchových deformačních sítí.

Metodika by měla umožnit:

- modelovat různé stavy přetvoření prostřednictvím změny tvaru zkušebních těles a nikoli výrobou nových tvarových částí zkušebního zařízení,
- poměrně jednoduchou a jednotnou přípravu zkušebních těles, které by dovolovaly spolehlivě měřit přetvoření v celém rozsahu modelovaných m ,
- stanovení mezních přetvoření pro libovolné hodnoty m z daného rozsahu tak, aby byl rovnoměrně pokryt interval $m_0 = -0,5$ až 1 ,
- dosažení mezního stavu při dodržení podmínky proporcionálního přetvoření /lineární deformační stopa/ a zároveň modelovat i některé charakteristické nelineární deformační stopy,
- co nejmenší pracnost při tažení danou jednoduchou manipulací se zkušebními tělesy i jednoduchým ovládáním zkušebního nástroje,
- přerušení zkoušky v okamžiku dosažení definovaného mezního stavu,
- studium různých faktorů a posouzení míry jejich vlivu na mezní přetvoření, jako je např. vliv anizotropie vlastností plechu, jeho tloušťky, rychlosti přetvoření, podmínek tření, historie přetvoření a pod.

Pro tuto metodiku navrhnout, zhotovit a ověřit funkci příslušných zařízení. K vyhodnocení výsledků využít metod matematické statistiky umožňující objektivní zpracování zjištěných přetvoření s možností určení výkyvů ve vlastnostech plechu daných hutní výrobou. Použít navržené metodiky jak k ověření platnosti KMP stanovených početními metodami, tak i k posouzení plastičnosti některých druhů plechů ze sortimentu VSŽ n.p. Košice, vyvíjených pro automobilový průmysl a ověřit možnost analýzy přetvoření na konkrétním výlisku. Zvolené metody řešení jsou uvedeny v následujících kapitolách.

8. NAVRŽENÁ METODA EXPERIMENTÁLNÍHO URČOVÁNÍ DIAGRAMŮ MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ

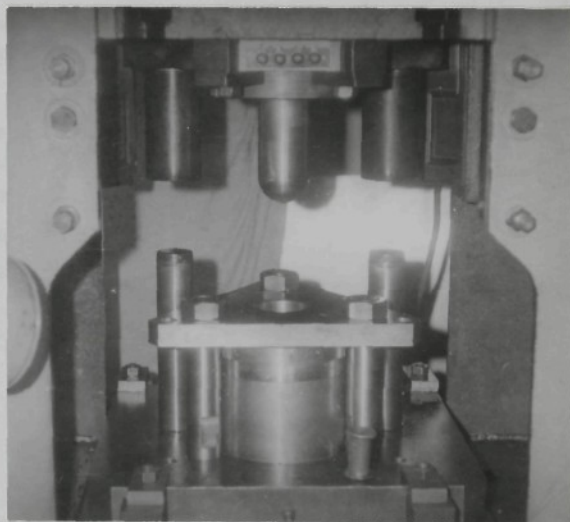
Ověření a hodnocení jednotlivých experimentálních metod určování DMP popsaných v kap. 6 bylo uskutečněno v rámci výzkumných úkolů R 57 - 124 - 006 a F - 2421 - 040 [92,93,96]. Pro řešení problematiky modelování různých stavů přetvoření byly výchozí úvahy formulované v kap. 6.4 a cíle stanovené v kap. 7. Na jejich základě byla hlavní pozornost věnována metodám, jejichž principem je modelování různých stavů přetvoření tažením /vypínáním/ nástřihů proměnné šířky polokulovým tažníkem.

Nejprve bylo zkoušeno vypínání pruhů popsaných v kap. 6.3.1 s využitím upraveného universálního nástroje pro hluboké tažení válcových nádob $\varnothing 80$ mm, konstruované ho pro klikový lis LU 160, obr. 8.1.

Úprava spočívala především v záměně tažníku s rovným čelem za tažník polokulový.

Aby bylo zabráněno vtahování pruhů do tažnice, byl plně využit maximální možný rozměr nástřihu dle rozměru nástroje, tj. 210 mm. Nedostatky této

metody /kap. 6.4/ vedly k použití tvarově upravených nástřihů dle obr. 6.7, jejichž pracovní příprava již byla komentována. Odstraněním nedostatků obou postupů logicky vede k úpravě tvaru stávajících zkušebních těles. Je výhodné nadále používat tvarově upravené nástřihy s vystřiženými kruhovými segmenty /trhlina v oblasti vrcholu/, ale úpravou tvaru zjednodušit jejich přípravu.



Obr. 8.1 Upravený tažný nástroj použitý pro experimentální určování DMP na lise LU 160

8.1 Stanovení optimálního tvaru zkušebních těles a způsobu jejich přípravy

Cílem optimalizace tvaru zkušebního tělesa, vzorku, je zajistit výskyt trhliny v oblasti vrcholu vytažené sféry a přitom jednoduchou přípravu tvarových nástřihů, např. cestou úpravy poloměru kruhového vybrání. Základem teoretického odvození vhodnějšího tvaru nástřihu je předpoklad, že posunutí trhliny lze docílit zvětšením nosného průřezu nástřihu v oblasti jeho styku s tažnou hrnou [97]. Tato úprava odpovídá principu fungování bezpečnostního technologického faktoru /kap. 3.2/. Odvození je provedeno v návaznosti na provedené experimenty s využitím teorie plasticity a podmínek plasticity anizotropního tělesa. Velikost rozšíření nástřihu byla stanovena rozбором stavu napjatosti na vrchlíku zkušebního tělesa a v oblasti výskytu trhliny u pruhů /obr. 6.5b/, a to zejména pro šířky modelující mezní stavy v levé části DMP, tj. menší než je průměr otvoru tažnice. Z těch byla vybrána šířka $b=75$ mm reprezentující mezní přetvoření odpovídající zhruba středu levé části DMP. Vyhodnocením přetvoření na zkušebních tělesech byla určena, ze vztahů mezi tenzory přetvoření a napjatosti, napjatost v obou sledovaných oblastech charakterizovaná ukazatelem m_σ

$$m_\sigma = \frac{\varphi_2 + \varphi_1 + \frac{\varphi_2}{\varepsilon_0}}{\varphi_2 + \varphi_1 + \frac{\varphi_1}{\varepsilon_0}} \quad /8.1/$$

Napjatost v blízkosti tažené hrany /oblast 1/ se blíží jednoosému tahu, $^1m_\sigma \rightarrow 0$, kdežto na vrcholu sféry vzorku /oblast 2/ je hodnota ukazatele stavu napjatosti větší $^2m_\sigma = 0,45$. Současné ocelové hlubokotažné plechy vykazují značnou anizotropii plastických vlastností. Takový materiál pak vykazuje i různé závislosti v pracovním diagramu pro různé stavy napjatosti. Pro dvě krajní napjatosti charakterizující modelovaný rozsah přetvoření jsou křivky zpevnění popsány [98] následujícími vztahy

$$\text{pro } m_\sigma = 0 \quad \sigma_i = 577 \varphi_i^{0,230} \quad /8.2/$$

$$m_\sigma = 1 \quad \sigma_i = 683 \varphi_i^{0,278} \quad /8.3/$$

Velikost zvětšení šířky u tažné hrany vyplýne z podmínky rovnováhy síly přenášené a potřebné k realizaci přetvoření

$$1_F > 2_F \quad /8.4/$$

Dosazením za $F = b\sigma_1$ získáme po úpravě vztah /8.5/ pro výpočet šířky b_1 nástřihu u tažné hrany

$$b_1 = \frac{2_{\sigma_1}}{1_{\sigma_1}} b_2 \quad /8.5/$$

Pro vlastní výpočet byla uvažována střední hodnota normálové anizotropie $r_s = 1,5$. Intenzitu přetvoření pro oblast u tažné hrany 1_{φ_i} spočteme pomocí vztahu /5.7/ a intenzitu napětí 1_{σ_i} z /8.2/. Pro oblast vrchlíku, kde $2_{m\sigma} \approx 0,5$, bude ležet křivka zpevnění mezi oběma předšlými a lze pro ni proto předpokládat rovnici

$$\sigma_i = \bar{C} \bar{n} \quad /8.6/$$

$$\text{kde } \bar{C} = \frac{C_1 + C_2}{2} = \frac{577 + 683}{2} = 630 \text{ [MPa]}$$

$$\bar{n} = \frac{n_1 + n_2}{2} = \frac{0,230 + 0,278}{2} = 0,254$$

čili po dosazení do /8.6/

$$\sigma_i = 630 \varphi_i^{0,254} \quad /8.7/$$

Pak 2_{φ_i} spočteme z /5.7/ a 2_{σ_i} z /8.7/. Velikost hlavního normálního napětí σ_1 vyjádříme z Hillovy podmínky plasticity pro zpevňující anizotropní materiál dle vztahu /8.8/

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_i}{\sqrt{\frac{3(r_s+1)}{2(r_s+2)} \left[1 - \frac{2r_s}{r_s+1} m_{\sigma} + m_{\sigma}^2\right]}} \quad /8.8/$$

Pomocí spočtených φ_i , σ_i a s využitím /8.8/ získáme pro

$$1_{m_{\sigma}} = 0 \quad 1_{\varphi_i} = 0,556 \quad 1_{\sigma_i} = 504,0 \text{ [MPa]} \quad 1_{\sigma_1} = 486,9 \text{ [MPa]}$$

$$2_{m_{\sigma}} = 0,45 \quad 2_{\varphi_i} = 0,344 \quad 2_{\sigma_i} = 480,4 \text{ [MPa]} \quad 2_{\sigma_1} = 570,3 \text{ [MPa]}$$

a z /8.5/ vyplyne šířka $b_1 = 1,17 \cdot 75 = 87,75 \text{ mm}$. Přírůstek šířky nástřihu u tažné hrany činí $b_1 = 12,75 \text{ mm}$. Pro předpokládaný průměr tažníku 100 mm je uvažováno toto zvětšení Δb_1 ve vzdálenosti 50 mm od středu nástřihu. Poloměr odstřiženého kruhového segmentu se spočte podle vztahu /8.9/

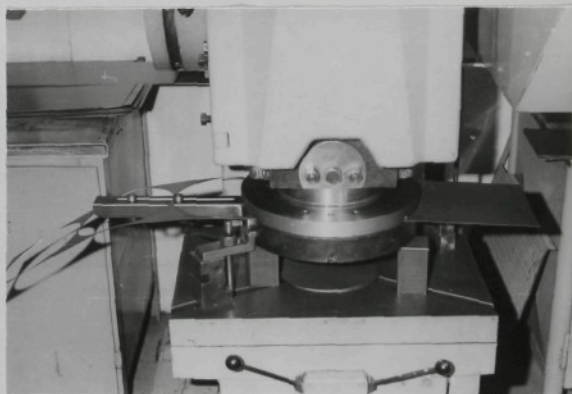
$$R = \frac{1}{4} \left(\frac{100^2}{\Delta b_1} + \Delta b_1 \right) \quad /8.9/$$

Čili $R = 199,3 \text{ mm}$. Uvažujme i nejnepříznivější možný případ, kdy u tažné hrany bude jednoosý tah, ale na vrcholu bude rovnoměrná dvojosá tahová napjatost, $m_x = 1$. Pak intenzitu pretvoření spočteme pomocí vztahu /5.15/, $\varphi_i = 0,601$ a intenzitu napětí z /8.3/, $\sigma_i = 592,7 \text{ /MPa/}$. Stejným postupem jako v předešlém případě dostaneme šířku b_1 tzv. horním odhadem, $b_1 = 1,31 \cdot 75 = 98,25 \text{ mm}$, čemuž odpovídá poloměr $R = 113,3 \text{ mm}$.

Pro přípravu zkušebních těles ve formě pruhů zakončených kruhovým obloukem /umožňujícím přesné středění na tažnici/ dle obr. 6.5b byl zhotoven střižný nástroj s průměrem střižníku $D = 210 \text{ mm}$, viz. obr. 8.2. Opakováním předchozího výpočtu pro různé šířky nástřihů bychom získali i různé hodnoty přírůstků Δb_1 a poloměrů vybrání R . Jejich velikost je však vždy větší než $R = D/2 = 105 \text{ mm}$.

Nabízí se tak možnost zjednotit volbu poloměru vybrání tak, aby byl pro všechny šířky nástřihů konstantní a přitom byla splněna podmínka minimálního přírůstku průřezu u tažné hrany.

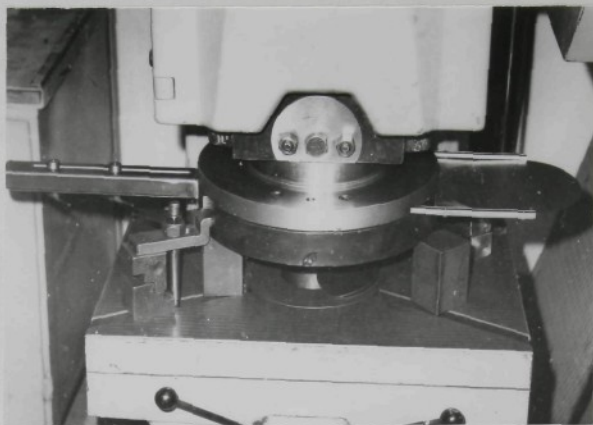
Této podmínce vyhovuje i poloměr $R = 105 \text{ mm}$. Kruhová vybrání všech zkušebních těles



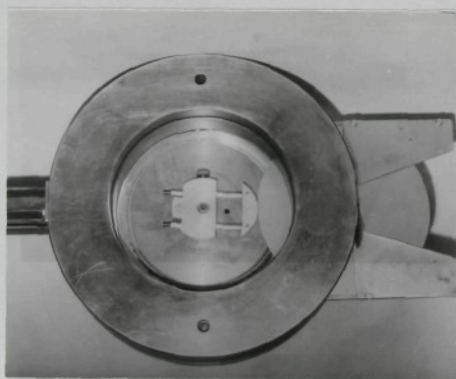
Obr. 8.2 Střižný nástroj umožňující stříhat kruhové nástřihy $\varnothing D = 210 \text{ mm}$ a následně na nich i kruhová vybrání /viz. obr. 8.3/

budou mít tedy stejný poloměr a budou se stříhat na zmíněném střižném nástroji, obr. 8.3. Různých stavů přetvoření se bude dosahovat na vrcholu vytažené sféry různými šířkami b ve střední části nástříhu $/b \equiv b_2 z / 8.5//$. K celé potřebě sortimentu zkušebních těles nutných

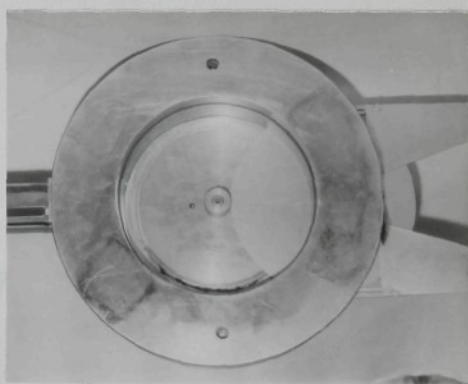
k určení diagramu mezních přetvoření bude tak stačit jediný střižný nástroj umístěný na výstředníkovém lisu LENP 40. Odstřížení kruhového segmentu tak, aby měl nástřih ve střední části požadovanou šířku b se zajistí pomocí dorazů umístěných na čele střižníku obr. 8.4 a 8.5.



Obr. 8.3 Odstřížení kruhových vybrání o poloměru $R = D/2 = 105 \text{ mm}$ na střižném nástroji dle obr. 8.2



Obr. 8.4 Čelní plocha střižníku s přestavitelným dorazem



Obr. 8.5 Čelní plocha střižníku s pevným dorazem

Zhotovení nástřihu s libovolnou šířkou b umožňující modelování libovolného poměru přetvoření z oboru $m_{\varphi} \in \langle -0,5, 1 \rangle$ umožní použití stavitelného dorazu dle obr. 8.4. Budou-li se používat jen určité zvolené standardní šířky, je výhodné použít výměnné pevné dorazy v podobě jednoduchých kotoučků dle obr. 8.5.

Příklad nástřihu při-
praveného popsaným
způsobem je na obr. 8.6.

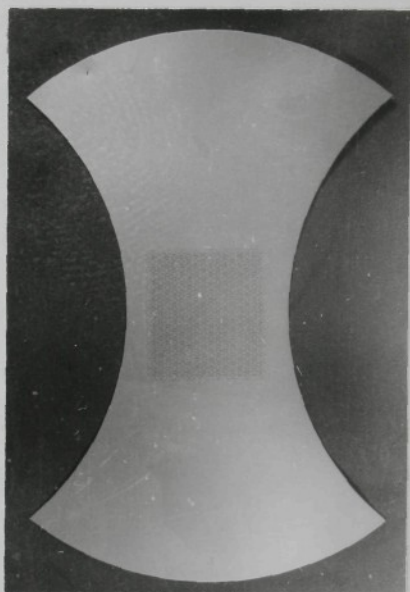
Různou orientací vý-
chozího kruhového ná-
střihu při odstřihová-
ní kruhových segmentů
lze zajistit i různý
směr podélné osy zku-
šebního tělesa /směr
hlavního normálního
přetvoření φ_1 / vůči
směru válcování daný
úhlem pootočení α .

To dává možnost zjis-
tit i vliv plošné ani-
zotropie vlastností
plechu na mezní hod-
noty přetvoření.

Praktickou použitel-
nost navrženého tvaru
zkušebních těles pro-
kázaly zkoušky na
zminěném nástroji pro
hluboké tažení

/Obr. 8.1/. Jeho šir-
ší uplatnění bylo
však problematické
z následujících
důvodů:

- namáhavá a časově
náročná manipulace
s přidržovačem, kterou
je nutno



Obr. 8.6 Příklad nástřihu
šířky $b = 60$ mm



Obr. 8.7 Charakter porušení zkušebního
tělesa taženého na lisu LU 160

- opakovat po každém zdvihu,
 - pro každou novou šířku nástřihu je nutné vždy nastavit znovu délku ojnice lisu /přestavením beranu/ tak, aby zaručeně došlo ke vzniku lomu v dolní úvratí, a to tažením i několika nástřihů bez možnosti jejich využití v DMP,
 - vzhledem k nutnosti nastavení beranu tak, aby vždy došlo k porušení všech zkušebních těles dané šíře, byla trhlina u většiny zkušebních těles příliš rozevřená a dlouhá, obr. 8.7. To ztěžovalo možnost určit místo iniciace lomu a u těles menší šíře b vedlo často k jejich úplnému přetržení, což značně zhoršovalo následné proměření na mikroskopu.
- Z uvedených důvodů bylo po realizaci ověřovacích zkoušek přistoupeno k vývoji a výrobě zkušebního zařízení, které by umožnilo odstranění zmíněných nedostatků.

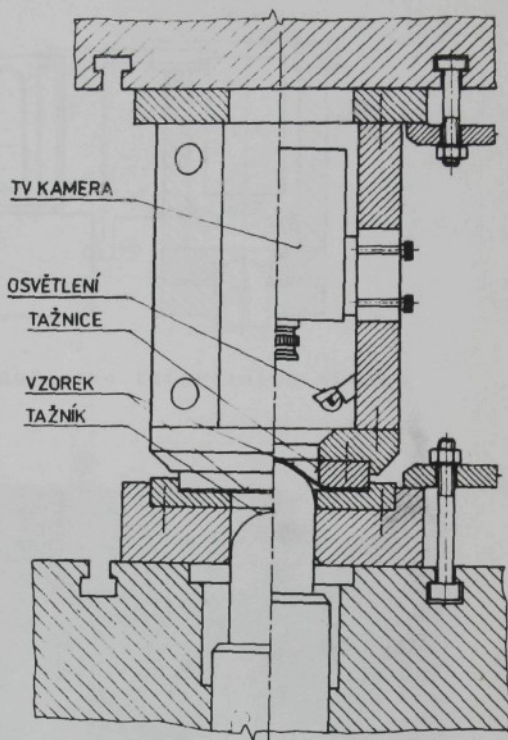
8. 2. Zkušební zařízení pro experimentální určování mezních stavů přetvoření

Pozitivní výsledky dosažené při ověřování navržené metodiky /kap. 8.1/ umožnily získání potřebných podkladů pro konstrukci a výrobu vhodného zařízení. Požadavky pro řešení jednoúčelového nástroje vyplynuly z diskuse v kap.6.4, ze zkušeností při použití předchozího tažného nástroje a z rozboru vlastní problematiky určování mezních stavů přetvoření, viz. kap.10.2. To vše při respektování možnosti strojního zařízení, které je k dispozici na katedře tváření a plastů VŠST. Na základě posledně uvedeného důvodu bylo rozhodnuto využít hydraulického dvoučinného lisu CBA 300/63. Systém jeho konstrukce umožňuje silové ovládání přidržení plechu mezi tažnicí a přidržovačem /beran ovládaný horním hydraulickým válcem/ a tažníku /spodní hydraulický válec/. Rychlost pohybu tažníku je 100mm s^{-1} , při zvětšení přetvárného odporu dojde k přepnutí na vysokotlaké čerpadlo a snížení rychlosti tažníku na 10mm s^{-1} . Dostatečná výška pracovního prostoru, která je u tohoto lisu při krajní poloze beranu 1050 mm a v dolní krajní poloze 450 mm, umožnila konstrukci nástroje se zabudovanou televizní kamerou, viz. obr. 8.8. Jejím prostřednictvím je možno na obrazovce televizoru přibližně při 5ti násobném zvětšení sledovat proces plastického přetvoření. Princip

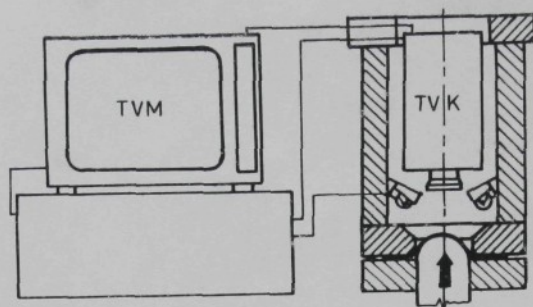
konstrukce vlastního nástroje se zabudovanou televizní kamerou /typ TFK 500/ je zřejmý z obr. 8.8. Spodní část nástroje se sestává pouze z upínací desky /zajišťující i možnost středění na tažník/ a přídržovače. V čelní ploše přídržovače je zabezpečeno osové založení nástřihů a středění tažnice. Ta je upevněna v opěrné desce. Mezi horní upínací deskou a opěrnou deskou jsou rozpěrky, které vytváří prostor pro umístění televizní kamery. Ta je upevněna na jednu z rozperek, s možností jejího výškového přestavení pro hrubé zaostření. Celý tento

prostor mezi opěrnou deskou tažnice a horní upínací deskou nástroje je uzavřen /z vnější strany opěrek/ krycími plechy opatřenými větracími otvory zabezpečujícími chlazení kamery. Pracovní prostor je osvětlován dvěma žárovkami /12 V, 45 W/. Součástí zařízení je i pojízdný blok. V jeho spodní části je zabudován rozvod 220 V pro napájení televize, TV kamery a transformátoru 220/12 V s usměrňovačem pro osvětlení. Dále je ve spodní části bloku prostor pro uložení dalšího potřebného vybavení pracoviště. V horní části tohoto pojízdného bloku je umístěn televizní přijímač.

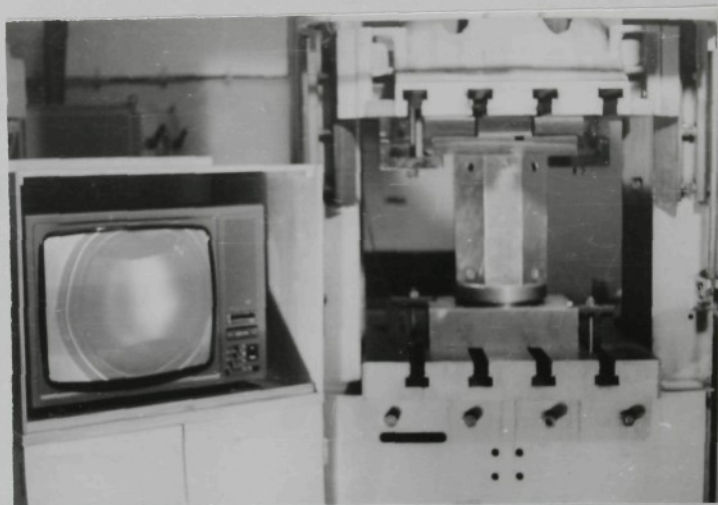
Na obr. 8.9 je schema uzavřeného okruhu v návaznosti na zkušební nástroj. Celkové uspořádání navrženého zařízení v provozních podmínkách je zřejmé z obr. 8.10.



Obr. 8.8 Konstrukční řešení zkušebního nástroje



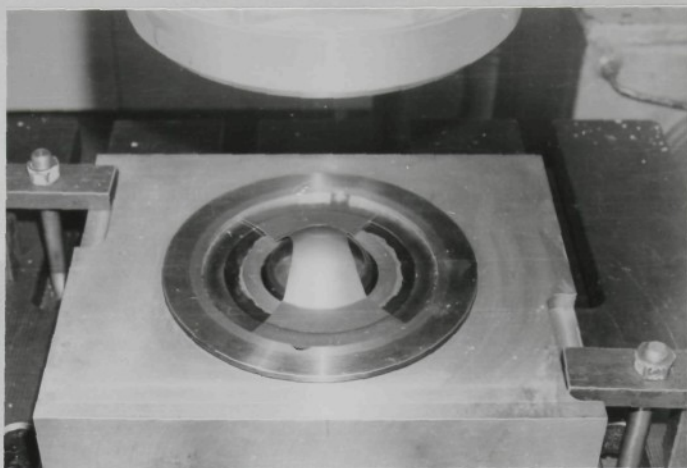
Obr. 8.9 Schema uzavřeného televizního okruhu



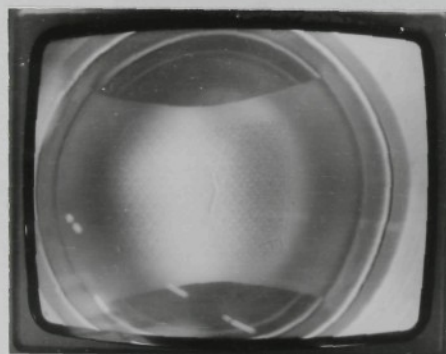
Obr. 8.10 Celkové uspořádání pracoviště umožňujícího modelování přetvoření v oboru $m_{\varphi} \in \langle -0,5, 1 \rangle$ a sledování jeho průběhu z hlediska mezních stavů

Na obr. 8.11 je fotografie otevřeného zkušebního nástroje po provedení zkoušky před vyjmutím zkušebního tělesa zatěžovaného do okamžiku vzniku tvárného lomu.

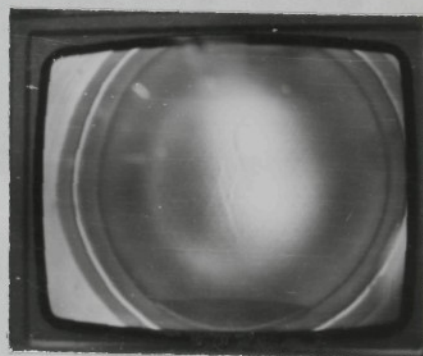
Možnosti navrženého a realizovaného řešení ve vztahu k problému makroskopického sledování plastického přetvoření v oblasti mezních stavů jsou zřejmé z obr. 8.12a a 8.12b.



Obr. 8.11 Pohled do otevřeného nástroje před vyjmutím deformovaného zkušebního tělesa, na jehož vrcholu ja začínající lom



a/

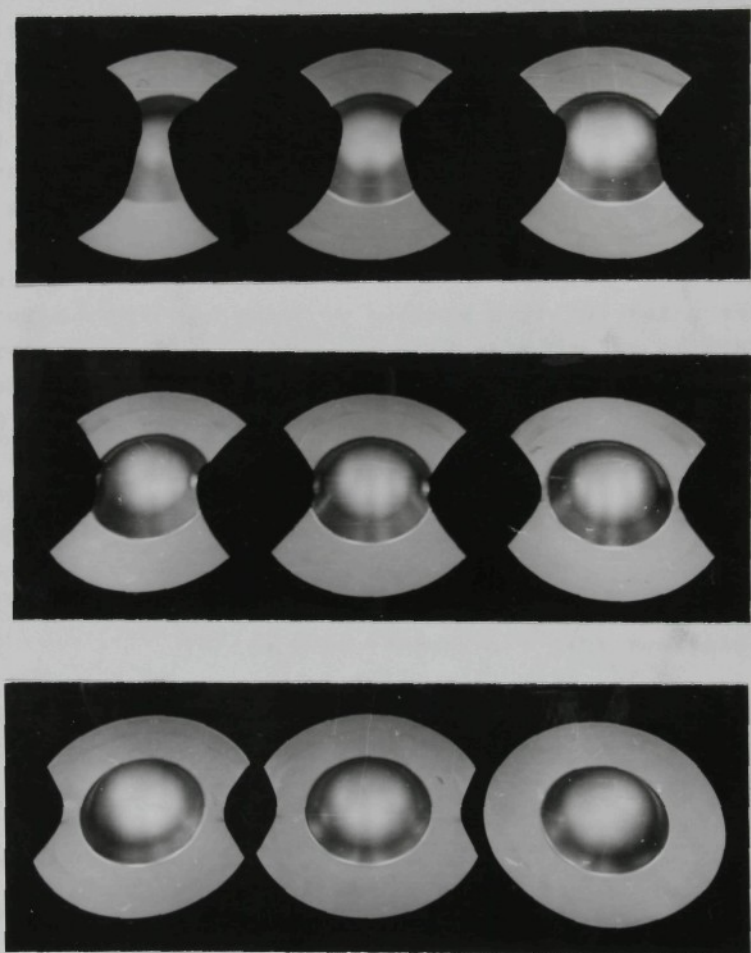


b/

Obr. 8.12 Lokální přetvoření a počátek vzniku lomu na vrcholu zkušebních těles pro a/ $m_\varphi < 0$
b/ $m_\varphi > 0$

Na obr. 8.12a je fotografie obrazovky televizoru v okamžiku vzniku lomu na zkušebním tělese pro $m_\varphi \in \langle -0,5, 0 \rangle$, na obr. 8.12b na tělese představujícím stavy $m_\varphi \in \langle 0, 1 \rangle$. V obou případech je velmi dobře vidět lokální ztenčení, které bezprostředně lomu předchází.

Na obr. 8.13 je příklad vybraných zkušebních těles po realizaci tažení, uskutečněného s použitím devíti výchozích šířek nástřihů a umožňujícího stanovení mezních hodnot přetvoření v celém rozsahu $m_\varphi \in \langle -0,5, 1 \rangle$, tj. v celém intervalu sektorů 3A a 3C na obr. 4.5



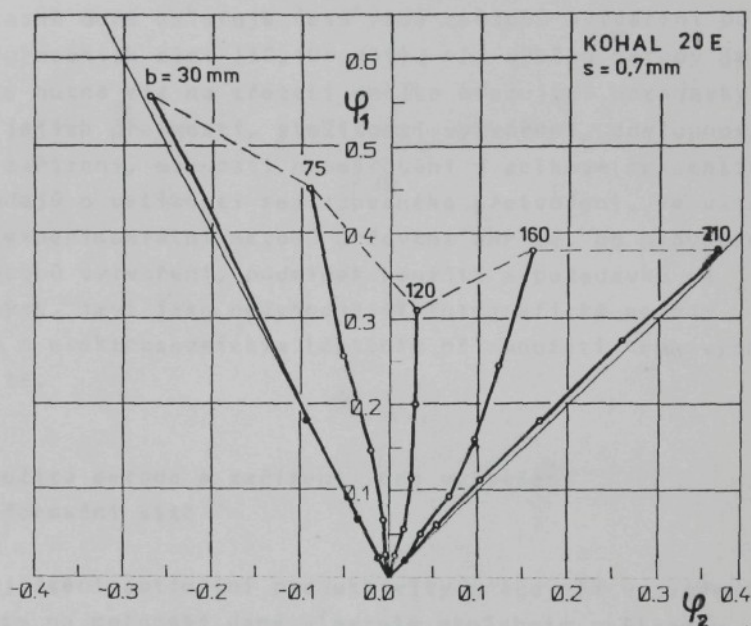
Obr. 8.13 Fotografie zkušebních těles umožňujících modelování stavů přetvoření pro $m_\varphi \in \langle -0,5, 1 \rangle$

K tažení je používáno tažníku s polokulovým zakončením a průměru $d=100\text{mm}$. Při poměru $d/2s \geq 20$, /s je tloušťka plechu/, kdy přetvoření zjištěná na povrchu plechu představují přetvoření v celém průřezu tvářeného materiálu [99], jím lze spolehlivě táhnout plechy do tloušťky $s = 2\text{ mm}$. Z důvodu zvýšení odolnosti proti nežádoucímu opotřebení /zhoršení kvality leštěného povrchu/ a snížení koeficientu tření je tažník nitrídován.

Praktické zkoušky na realizovaném zařízení splnily očekávání. Značně se zjednodušila práce při tažení. Sledování vývoje lokálního ztenčení i vzniku lomu na obrazovce umožnilo přerušit vypínání ve zvoleném okamžiku. Plně se potvrdila použitelnost tvarově upravených nástřihů dle kap. 8.1 i pro tento nástroj. Trhlina je spolehlivě v oblasti vrcholu vytažené sféry u všech zkušebních těles pro stavy přetvoření v levé části DMP. Při tažení polokulovým tažníkem je poloha trhliny významně ovlivněna třením. S rostoucí šířkou nástřihu vzrůstá potřebná tažná síla, a tedy se zvětšují i třecí síly. K jejich eliminaci a udržení trhliny v oblasti vrcholu sféry i u nástřihů větší šířky /hlavně pro $m_\phi \in \langle 0, 1 \rangle$ / byla použita polyetylenová /PE/ folie tloušťky $0,04\text{ mm}$ v několika vrstvách, mezi nimiž bylo plastické mazivo A 00. Se zvětšující se šířkou nástřihu, úměrně růstu tření, se zvětšuje i počet použitých PE folií. Způsobem provedení zkoušky i tvarem zkušebních těles je zajištěna poloha lomu na jeho vrcholu. Použije-li se tento postup pro určení DMP, je nutné vycházet z analýzy přetvoření v oblasti lomu /kap.10/. V této souvislosti je nutné použít metody deformačních sítí /kap. 9/.

K ověření předpokladu proporcionálního přetvoření /odpovídá mu lineární deformační stopa/ bylo provedeno postupné tažení zkušebních těles reprezentující význačné stavy přetvoření z daného rozsahu m_ϕ . Získané výsledky jsou na obr. 8.14.

K posouzení míry lineární korelace mezi hodnotami přetvoření / φ_2, φ_1 / dosaženými v jednotlivých etapách tažení zkušebních těles dané šíře, tedy linearitě deformační stopy, byl použit výběrový korelační koeficient r_{xy} [103]. S výjimkou stopy pro $b = 120\text{ mm}$, kdy $r_{xy} = 0,78$, nabýval korelační koeficient velikosti $0,970$ až $0,999$. Tyto hodnoty svědčí o velmi těsné korelační závislosti. Na jejich základě lze deformační stopy získané navrženou metodou považovat za lineární.



Obr. 8.14 Některé význačné deformační stopy získané postupným tažením zkušebních těles pomocí uvedeného zařízení

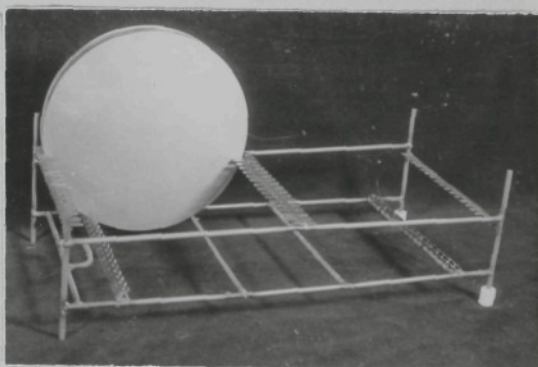
9. POVRCHOVÉ DEFORMAČNÍ SÍTĚ

V současné době existuje celá řada způsobů vytváření povrchových deformačních sítí [30,100,101]. Při výběru metody jejich vytváření je nutné mít na zřeteli určité omezující požadavky. Z hlediska jejich přesnosti, složitosti vytváření, dostupnosti potřebných zařízení, možnosti proměřování a celkové spolehlivosti získaných údajů o velikosti realizovaného přetvoření. Ve vztahu k navržené experimentální metodě určování DMP se, po provedeném rozboru způsobů vytváření, podmínek použití a požadavků na sítě kladených, jeví jako nejvhodnější fotografická metoda kombinovaná s elektrochemickým leptáním při použití kruhových elementů sítě.

9.1 Použitá metoda a zařízení pro vytváření deformační sítě

Pro zajištění optimální produktivity práce při vytváření sítě, s ohledem na možnosti dané vlastním zkušebním zařízením /kap. 8/, bylo nutné vyrobít některé další nezbytné pomůcky a příslušenství. Vlastní pracovní postup vytvoření sítě na zkušebním tělese je následující:

- odmaštění nástřihu
/benzín, líh/
- nanesení světlocitlivé emulze SCR 5
/Lachema n.p. Brno/
- její vysušení při teplotě 70° C po dobu 10 min., během něhož jsou nástřihy fixovány ve stojánu dle obr. 9.1



Obr. 9.1 Stojánek pro kruhové nástřihy

- přenesení obrazu sítě z filmové předlohy expozicí UV výbojek. Pro dosažení maximální věrnosti přenosu obrazu sítě z filmu na emulzi, je ve zvláštním rámu

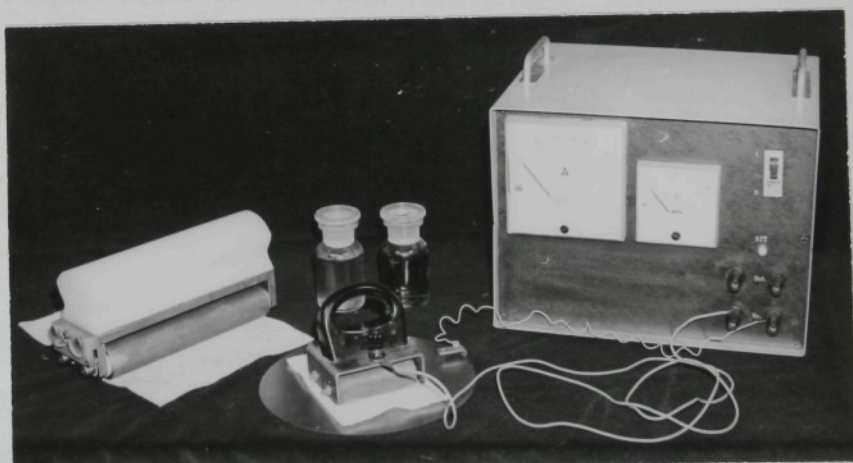
z prostoru mezi filmem
a plechem vývěvou odsát
vzduch, obr. 9.2

- vyvolání obrazu sítě zá-
saditou vývojkou /1% roz-
tok NaOH/
- vyleptání sítě lze pro-
vést 10% HNO_3 po dobu
max. 10 sec. Vhodnější
je elektrochemické leptá-
ní, kdy je na vyvolaný
obraz sítě položena plstě-
ná podložka nasáklá elek-
trolytem tvořeným roz-
toky kovových solí a ky-
selin spolu s dalšími
přísadami. Při přímém
průchodu elektrického
proudu dochází k vyleptá-
ní a zabarvení obrazu
sítě.

Zhotovené zařízení k ele-
ktrochemickému leptání je na obr. 9.3.



Obr. 9.2 Pracoviště pro osvětlo-
vání emulze UV výbojkami



Obr. 9.3 Zařízení pro elektrochemické leptání deformačních
sítí vyvinuté a vyrobené v rámci řešené problematiky

Po vyleptání je zbylý elektrolyt neutralizován, emulze smyta lihem a povrch plechu je nakonzervován olejem. Efektivnější a rychlejší postup při elektrochemickém leptání je s využitím předloh deformačních sítí v podobě sít z husté tkaniny. Vzhledem k jejich obtížné dostupnosti /originální od firmy Erichsen NSR/ a k mnohem horší dosahované přesnosti sítě vytvořené se sítí vlastní výroby, bylo od jejich použití prozatím upuštěno. Popsaný postup vytváření deformačních sítí je poměrně pracný. Z hlediska dosahované přesnosti vytvořené sítě /kap. 9.2/ , na kterou byl především kladen důraz, se však z možných dalších způsobů jeví zatím jako nejvhodnější.

9.2 Volba parametru sítě a stanovení hodnot hlavních normálních přetvoření

Využitelnost DMP ve vztahu k analýze přetvoření na výlisku předpokládá použití sítě se stejným elementem jak pro výlisek, tak pro zkušební těleso. To je důležité z důvodu existence gradientu přetvoření a výskytu lokálních ztenčení /kap. 10.2/. Čím menší bude parametr elementu sítě, tím víc bude procentuálně zasazen lokálním ztenčením a tím větší bude změřené mezní přetvoření a naopak [14]. Je to dáno tím, že pomocí sítě s elementem určité velikosti nelze změřit přetvoření v bodě, ale lze zjistit pouze "průměrné" přetvoření v ploše daného elementu. Tyto skutečnosti ovlivňují hlavně velikost většího mezního přetvoření φ_1 . Poměrná chyba měření se zmenšuje naopak s rostoucí velikostí elementu. Pro splnění podmínky rovnoměrnosti přetvoření v jím ohraničené oblasti je zase nezbytné použít elementu co nejmenšího. Parametr sítě je tak dán kompromisem mezi těmito protichůdnými požadavky. Prakticky nejmenší používaný rozměr elementu v podmínkách lisovny je udáván [14, 13] na 2,5 mm. Dále pro snížení vlivu gradientu přetvoření, který u polokulových tvarů je vždy, je doporučován poměr průměru tažníku k parametru sítě $d/L_0 \geq 40$ [102]. V případě použití tažníku $\varnothing 100$ mm je pro parametr sítě $L_0 = 2,5$ mm tato podmínka splněna. Z těchto důvodů byla zvolena deformační síť z překrývajících se kruhových elementů o průměru právě 2,5 mm. Pro výlisek je ji možné doplnit ortogonální sítí, která je výhodnější pro celkové sledování plastického toku materiálu. Použitá defor-



Obr. 9.4 Detailní fotografie použité deformační sítě

mační síť vytvořená postupem dle kap. 9.1 je patrná z obr. 9.4. Po realizaci plastického přetvoření nástřihu ve zkušebním nástroji jsou kruhové elementy sítě přetvořeny na "elipsy" s menší $/L_2/$ a větší $/L_1/$ hlavní osou. Pomocí hodnot $L_{2,1}$ vybraného elementu vyhovujícímu zvolené definici mezního stavu /kap. 10.2/ jsou spočtena hlavní normálná /mezní/ přetvoření φ_{2K} a φ_{1K} použitím vztahu /9.1/

$$\varphi_{2k,1k} = \ln \frac{L_{2,1}}{L_0} \quad /9.1/$$

kde L_0 je průměr výchozího elementu
 $L_{2,1}$ jsou jeho rozměry po přetvoření

Vlastní měření rozměrů $L_{2,1}$ je uskutečněno na dílenském mikroskopu dle obr. 9.5.

Přesnost spočtené hodnoty mezního přetvoření /9.1/ je dána přesností zjištěných hodnot použitých k jeho výpočtu. Velikost vyleptaného výchozího elementu L_0 je určena výběrovým průměrem z 41 měření náhodně vybraných kroužků celé sítě, $L_0 = 2,646$ mm s výběrovou směrodatnou odchylkou $s_{L_0} = 0,0081$. Konfidenční interval /95%/ stanovený pro L_0 dle /11.5/ [103] je $\pm 0,0026$ mm.

přesnost měření hodnot $L_{2,1}$ byla hodnocena prostřednictvím výběrové směrodatné odchylky stanovené ze 30ti měření kalibračního kroužku $\varnothing 2$ mm pro cejchování mikroskopu. Zjištěná odchylka je $s_{L_{2,1}} = 0,005$. Celkovou chybu při určování délkových rozměrů lze vyjádřit pomocí směrodatné odchylky

$$s = \sqrt{s_{L_0}^2 + s_{L_{2,1}}^2} \quad /9.2/$$

Po dosazení do /9.2/ získáme hodnotu $s = 0,0095$. Jestliže naměřené hodnoty $L_{2,1}$ a L_0 jsou zatíženy náhodnými chybami, pak jsou

jimi zatíženy i vypočtené hodnoty přetvoření $\varphi_{2k,1k}$

a přísluší jim směrodatné odchylky $|104|$



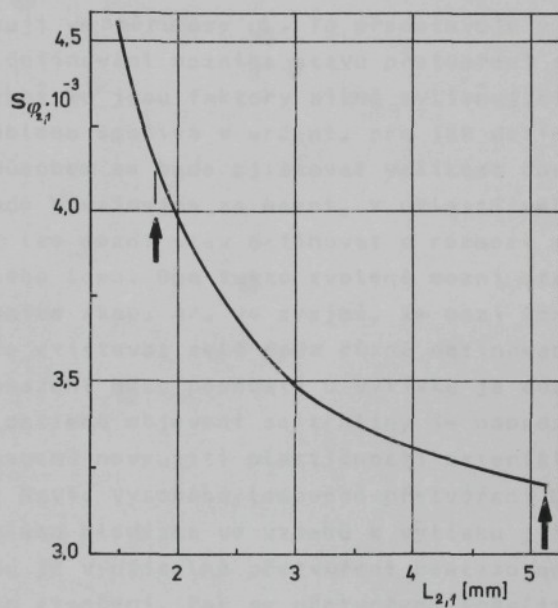
Obr. 9.5 Proměřování deformační sítě na dilenském mikroskopu

$$s_{\varphi_{2k,1k}} \approx \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi_{2k,1k}}{\partial L_0}\right)^2 s_{L_0}^2 + \left(\frac{\partial \varphi_{2k,1k}}{\partial L_{2,1}}\right)^2 s_{L_{2,1}}^2} \quad /9.3/$$

Po dosazení výrazu /9.1/ do /9.3/ získáme

$$s_{\varphi_{2k,1k}} \approx \sqrt{\left(\frac{s_{L_0}}{L_0}\right)^2 + \left(\frac{s_{L_{2,1}}}{L_{2,1}}\right)^2} \quad /9.4/$$

Velikost $s_{\varphi_{2k,1k}}$ v závislosti na měřené velikosti $L_{2,1}$ je na obr. 9.6.



Obr. 9.6 Graf závislosti směrodatné odchylky mezního přetvoření na měřené hodnotě $L_{2,1}$

10. URČOVÁNÍ MEZNÍHO STUPNĚ PŘETVOŘENÍ

S ohledem na praktickou využitelnost diagramů mezních přetvoření je přirozený požadavek zúžení rozmezí, v kterém se mezní křivky pohybují ve směru osy φ_1 . To představuje v první řadě jednoznačné definování mezního stavu přetvoření a způsobů jeho určování, neboť to jsou faktory silně ovlivňující polohu a tvar KMP. Řešení problému spočívá v určení, pro jak definovaný mezní stav a jakým způsobem se bude zjišťovat velikost dosaženého přetvoření, jež bude považována za mezní. V oblasti velkých plastických přetvoření lze mezní stav definovat v rozmezí meze pevnosti a vznikem tvárného lomu. Oba takto zvolené mezní stavy představují krajní hranice /kap. 4/. 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 znamená nevyužití plastičnosti materiálu, druhý znamená zmetek. Navíc vysokého lomového přetvoření φ_L /obr. 5.2/ nelze z praktického hlediska ve vztahu k výlisku již využít. Z tohoto pohledu je využitelné přetvoření realizované do okamžiku vzniku lokálního ztenčení. Pak se přetvoření lokalizuje pouze do úzkého krčku, kdy za stavu rovinného přetvoření dochází k prodloužení na úkor tloušťky plechu. V okolí krčku k přetvoření prakticky nedochází. Vzhledem k malé tloušťce plechu je přírůstek přetvoření $\Delta\varphi_1$ v tomto stádiu pro realizaci změny tvaru výlisku zanedbatelný.

Z těchto důvodů je obecně přijato za mezní přetvoření to, kterého je dosaženo v okamžiku vzniku lokálního ztenčení / φ'_A v kap. 5.2.1/ [99].

10.1 Přehled některých metod určování mezního přetvoření

Pro jeho určení je používáno různých metod. Objektivní vizuální určení takto definovaného mezního stavu je prakticky nemožné. Proto byly na základě experimentálních pozorování navrženy různé metody jeho stanovení.

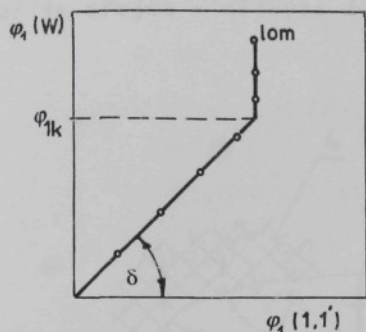
Je nutné vycházet ze skutečnosti, že vzhledem k původnímu využití, DMP v návaznosti na analýzu přetvoření, je nutno používat deformační síť. Tedy i mezní přetvoření u zkušebních těles určovat spolehlivě a co nejjednodušeji jejím prostřednictvím. Tomu odpovídají i metody jeho zjišťování. Mezní přetvoření lze určovat buď v počátku vzniku lokálního ztenčení, nebo jeho určování odvíjet od evidentního lomu, ovšem neuvažovat lomové přetvoření φ_L , ale měřit takové přetvoření v jeho těsném okolí, které odpovídá meznímu dle přijaté definice.

K určení velikosti přetvoření v počátku vzniku lokálního ztenčení lze použít např. metodu "ekvivalentního bodu" [102], kdy se na zkušebním tělese vyberou dvě, velikostí přetvoření si odpovídající oblasti. V okamžiku, kdy v jedné z nich vznikne lom, lze přetvoření v druhé pokládat za mezní dle přijaté definice. Tento způsob však velmi často vede k omylům a není příliš přesný. Ve snaze eliminovat subjektivní interpretaci tohoto postupu navrhl Veerman dvě jiné metody, a to grafickou a interpolační. [13,102,105], určené zejména pro stanovení φ_k .

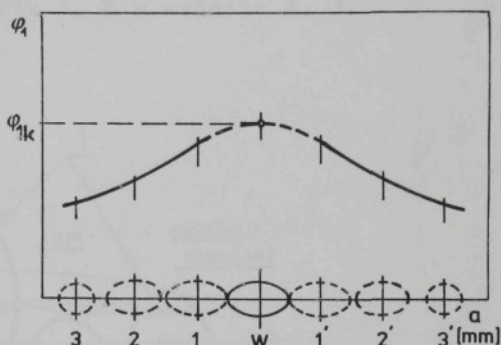
G r a f i c k á metoda je založena na zjišťování gradientu přetvoření. Bere v úvahu tři sousední přetvořené elementy deformační sítě, přičemž prostřední z nich je vybrán tak, aby jeho středem procházel budoucí lom. Je vynášena závislost přetvoření φ_1/w středního elementu v závislosti na φ_1 obou sousedních /1L, 1P/, obr. 10.1. V oblasti rovnoměrného přetvoření jde o lineární závislost s úhledm sklonu přímky $\delta = 45^\circ$. Po lokalizaci probíhá přetvoření pouze v oblasti středního elementu /W/ a úhel sklonu přímky se změní, $\delta \rightarrow 90^\circ$. Okamžik zlomu na této závislosti určí počátek lokálního ztenčení, a tedy hodnotu mezního přetvoření. Popsaná metoda, i když je velmi přesná, je zdoluhavá /nutné postupné tažení/ a i přesný výběr místa budoucího lomu je obtížný.

I n t e r p o l a č n í metoda je jednodušší a dává stejné výsledky jako předcházející. Mezní přetvoření je určováno pomocí interpolačního polynomu

$$\varphi_{1k} = \frac{3}{4} (\varphi_1^{1L} + \varphi_1^{1P}) - \frac{3}{10} (\varphi_1^{2L} + \varphi_1^{2P}) + \frac{1}{20} (\varphi_1^{3L} + \varphi_1^{3P}) \quad /10.1/$$



Obr. 10.1 Určení mezního přetvoření grafickou metodou



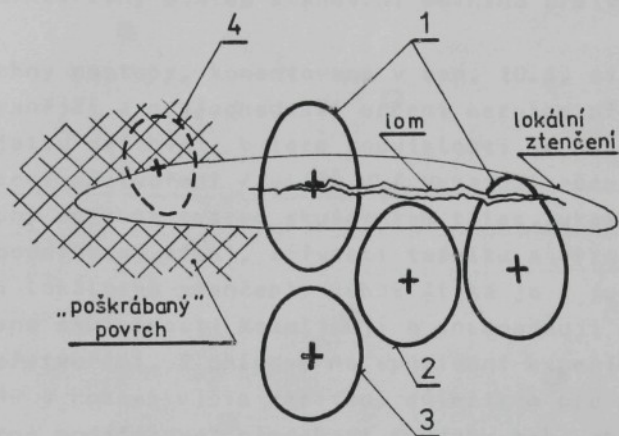
Obr. 10.2 Výběr elementů pro určení mezního přetvoření interpolací

výpočtem, k němuž je potřeba změřit v různé vzdálenosti po obou stranách lomu vždy tři bezprostředně sousedící elementy, obr.10.2. Obě metody vyžadují proměřit větší počet elementů sítě či provést navíc ještě výpočet.

Jednodušší je sestavit křivku mezních přetvoření pro okamžik vzniku lomu. Tento postup předpokládá změření pouze jednoho elementu, který ovšem musí být vybrán tak, aby lom procházel jeho středem a současně byl v místech počátku jeho vzniku. Splnění obou předpokladů nelze často dodržet a měření v případě příliš široké trhliny je obtížné a nepřesné. Takto získané křivky navíc zaujímají v DMP značně vyšší polohu. Je to dáno zahrnutím celého rozlehlého, vzhledem k malému měřenému úseku danému parametrem sítě, lokálního ztenčení, což způsobí značný nárůst přetvoření φ_1 . To zároveň potvrzuje značný vliv parametru sítě na polohu KMP. Tímto způsobem získané diagramy /fracture limit diagram - FrLD/ neodpovídají přijaté definici mezního stavu a je nutné je odlišit od diagramů stanovených pro počátek lokálního ztenčení /forming limit diagram - FoLD/ [99].

Možnost jednoduššího postupu při zjišťování mezního přetvoření, při současném respektování přijaté definice mezního stavu, poskytuje metoda použitá Heckerem [102,106], která vychází z výběru vhodných elementů z okolí lomu. Výběr zahrnuje elementy zasažené lomem /č. 1 na obr. 10.3/, lokálním ztenčením /č. 2/ a takové, které sousedí s místem porušení, ale nejsou zasaženy ani lo-

mem ani lokálním ztenčením /č. 3/. Poloha bodů v diagramu /bodů představujících přetvoření a odpovídajících jednotlivých elementům/ je zřejmá - nejvýše č. 1, pak č. 2 a nejniže č. 3.



Obr. 10.3 Výběr elementů vhodných pro určení mezního přetvoření

Křivka mezních přetvoření je vedena tak, aby ležela na a body určené elementy č. 3 a pod body z elementů č. 1 a č. 2. Popsaný postup je možné dále zjednodušit tím, že nebudou do výběru zahrnuty lomové elementy /č. 1/. V diagramu leží nejvýš, zahrnují největší podíl nevyužitelného lokálního přetvoření, nejvíce se vzdalují přijaté definici mezního stavu a svým charakterem odpovídají diagramům "FrLD" nikoli "FoLD". Potom křivka vedená tímto způsobem v podstatě odděluje v DMP dvě oblasti. Nad ní existuje krček, pod ní-nedošlo ještě k lokalizaci. KMP ležící na rozhraní obou oblastí tak může odpovídat počátku vzniku lokálního přetvoření a plně vyhovět dané definici mezního stavu. Zde se nabízí možnost dalšího zjednodušení této metody a sice měřit pouze jeden vhodně vybraný element sítě. Ten musí ležet v oblasti počátečního vzniku lokálního ztenčení, kterému odpovídá ještě malé prohloubení krčku. Uvedený předpoklad mohou splňovat elementy nacházející se v koutech lokálně zeslabené oblasti /element č. 4 na obr. 10.3/. Další podmínkou je, aby ležely svým středem na hranici lokálního ztenčení a vykazovaly tak 50 % rovnoměrného a 50 % lokálního přetvoření [107]. Rozhraní obou oblastí lze sice snadno zviditelnit

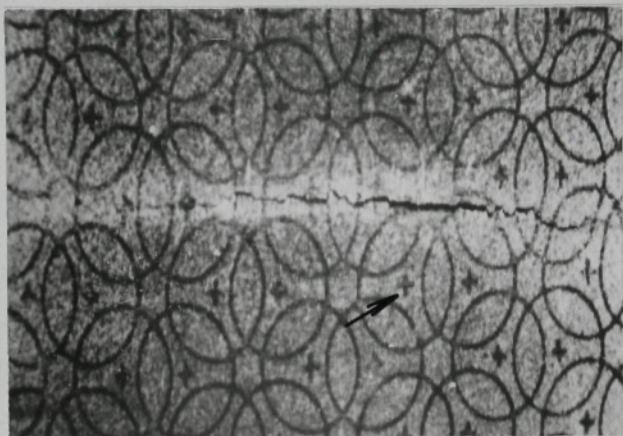
lehkým přebroušením /"poškrábáním"/ rovným brouskem, ale tato podmínka, s ohledem na parametr sítě a šířku lokálního ztenčení, je obtížně splnitelná.

10.2 Navržený postup stanovení mezního přetvoření

Všechny postupy, komentované v kap. 10.1, si kladou za cíl co nej přesnější a nejjednodušší určení mezního přetvoření v souladu s přijatou definicí. V této souvislosti je nutno si uvědomit, že rozložení přetvoření /zvláště φ_1 / vykazují různé velký gradient, daný zejména tvarem zkušebních těles, ukazatelem přetvoření m_φ , podmínkami tření, křivostí tažníku a významně se zvětšují v oblasti lokálního ztenčení, jehož šířka je i funkcí m_φ /příloha 7/. Uvedené skutečnosti komplikují a znesnadňují přesné určení mezního přetvoření. S ohledem na využívání experimentální metody určení DMP v rozsáhlejší měřítce, důležitém pro potřeby praxe, je nezbytné modifikovat předchozí způsoby tak, aby přijatá metoda určování mezního přetvoření byla rychlá, snadná, pokud možno jednoznačná a v souladu s jeho definicí. V přílohách 1, 2 a 3 jsou zachycena rozložení přetvoření v podélném směru zkušebního tělesa pro šířky $b = 30$ mm /levý okraj KMP/, $b = 120$ mm /minimum KMP/ a $b = 210$ mm /pravý okraj KMP/. Vybrané šířky tak reprezentují tři významné stavy přetvoření.

Vznik trhliny na výlisku je evidentní. V souladu s kap. 5.2 je výhodné odvíjet definice mezních stavů právě od vzniku lomu. Tedy základní podmínkou je počátek vzniku lomu. V souladu s dříve popsány metodami určení mezního přetvoření je obecně nutné /ve smyslu daných definic mezního stavu/ vhodně vybrat jednotlivé elementy sítě, a ty použít pro určení mezních přetvoření. Tažení až do okamžiku lomu nejen odpovídá realitě zmetkového výlisku, ale s ohledem na objektivní určení mezního stavu je i nutné. Je sice možné ukončit tažení zkušebního tělesa v okamžiku objevení lokálních ztenčení, ale v důsledku jejich rozvětvenosti /obr.8.12/ může lom vzniknout v kterémkoli místě jejich výskytu a není předejdem jasně, kde měřit mezní přetvoření. Čili dosažení lomu je potřebné, ale pro přesné určení mezního stavu je navíc nutno použít elementů v místě prvního vzniku lomu. Tažení je proto nezbytné v tomto okamžiku ukončit. Pak je potřeba vybrat vhodné ele-

menty v okolí lomu. Po vzniku lokálního ztenčení se přetvoření soustředí do vznikající úzké zóny a mimo ni ustává. Za mezní přetvoření je tedy podle přijaté definice považováno to, které z vnějšku bezprostředně sousedí s lokální zónou [99]. Tomu odpovídá střed elementu č. 4 na obr. 10.3 a jeho hodnota je na grafech v přílohách 1, 2, 3 označena $\blacktriangle$ a šipkou. Zbývá vyřešit otázku identifikace příslušného elementu. Je-li parametr sítě dán, pak výběr elementu je ovlivněn šířkou zóny lokálního ztenčení a ukazatelem m_0 . Z této skutečnosti vyplývá, že je problematické splnění stanoveného požadavku 50% zasažení zvoleného elementu lokálním ztenčením. Nejvíce se tomuto požadavku blíží element, který je těsně u trhliny. Jemu odpovídající přetvoření φ_1 /"průměrné" v rámci rozměru L_1 a vztažené k jeho středu/ je v grafech v přílohách 1, 2, 3 označeno písmenem M. Takto určené mezní přetvoření je nutně nižší než skutečná mezní hodnota podle dané definice, ale z možného výběru jiných elementů je jí nejblíže. Přestože je vybrán element nejtěsněji u trhliny, obr. 10.4, získané mezní přetvoření je nižší než proponované přijatou definicí.

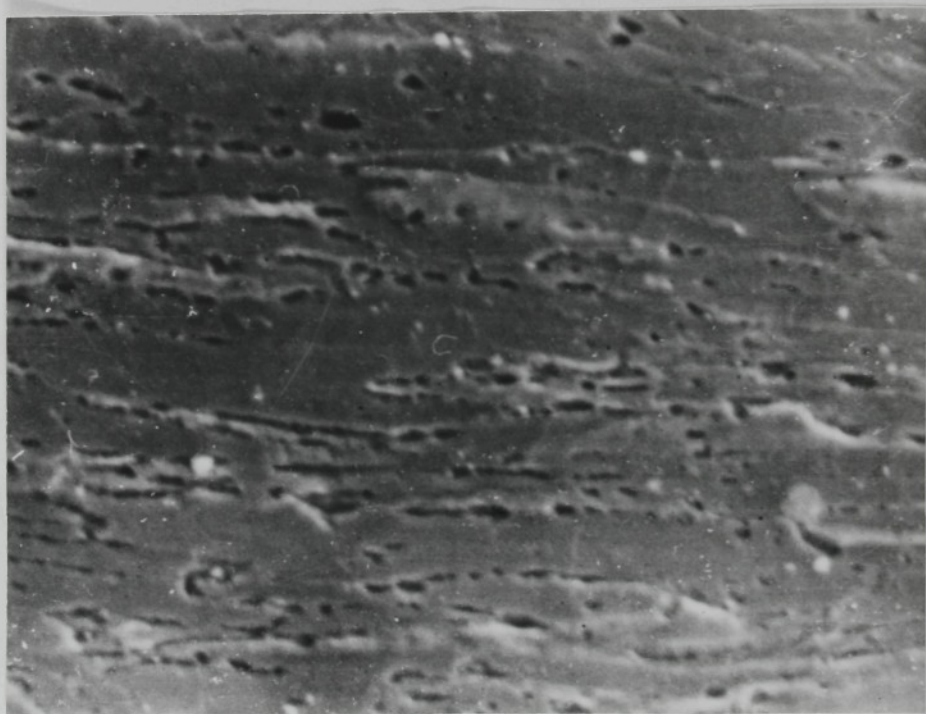


Obr. 10.4 Příklad výběru mezního elementu

Praktické zkušenosti ukazují, že i výběr stanoveného mezního elementu je subjektivní. Navíc i v důsledku určité nerovnoměrnosti rozložení přetvoření v okolí lomu /včetně větších či menších lokálních zón mimo hlavní lokalizovanou oblast/ může být vybrán element, u kterého nejsou zcela splněny stanovené předpoklady. To ve svém souhrnu zvyšuje rozptyl naměřených hod-

not v DMP. Pro odstranění uvedeného nedostatku je vhodné vybrat z jednoho zkušebního tělesa více elementů splňujících stanovené podmínky a vzít z nich pro výpočet mezního přetvoření průměrnou hodnotu. Tímto způsobem lze do určité míry eliminovat nepřesnosti vzniklé možným výběrem pouze jednoho mezního elementu, zúžit tak rozptyl bodů v DMP a zmenšit i celkový počet potřebných zkušebních těles.

Při použití tohoto kritéria mezního stavu je nutno mít na zřeteli jeho použitelnost s ohledem na funkční způsobilost výrobku, zejména ve vztahu k jeho silovému a únavovému namáhání. Proces plastického přetvoření a vznik tvárného lomu provází nukleace, růst a spojování vnitřních dutin, kap. 5.3.1. V této souvislosti mohou vyvstat i další otázky, např. do jaké vzdálenosti od lomu a v jakém množství se dutinové poruchy vyskytují.



Obr. 10.5 Výskyt dutinových poruch v oblasti lokálního ztenčení ve vzdálenosti 0,38 mm od lomu /nital, zvětšení 1500 x/ [109]

odpověď na ně si vyžaduje další hlubší rozbor. Takový přístup představuje celou složitou problematiku a nebyl součástí ani cílem předložené práce. Obecně je možno konstatovat [108], že vnitřní dutiny vznikají již při malé plastické deformaci, a to především působením inkluzí a globulárního cementitu. Jejich množství a velikost pravidelně rostou se zvětšujícím se přetvořením. Není pochyb o tom, že v okamžiku vzniku lokálního ztenčení dochází k náhlému prudkému vzrůstu jejich velikosti a počtu. Hlavně pak významně vzrůstá množství velkých dutin, zejména od hranice lokalizované zóny směrem k místu vzniku lomu. Na obr. 10.5 je ukázka výskytu dutin v oblasti lokálního ztenčení.

Z provedeného rozboru vyplývá využitelnost navrženého způsobu určování mezních přetvoření tenkých plechů, a to s uvedenými výhradami. Je reálný předpoklad, že navržená metodika vyhovuje ve vztahu k většině výlisků. V případě mimořádných požadavků na funkční způsobilost výlisků je možné přijaté kritérium i vhodným způsobem korigovat.

11. OVĚŘENÍ NAVRŽENÉ METODIKY URČOVÁNÍ DIAGRAMŮ MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ

K ověření navrhované metodiky určování DMP byl vybrán plech KOHAL 20 E tloušťky 0,7 mm. Svou kvalitou, objemem výroby a rozsahem zpracování na karosářské výlisky představuje určitý standard. V rámci spolupráce mezi katedrou tváření a plastů VŠST a AZNP Mladá Boleslav bylo dohodnuto dodání uvedeného plechu používaného na celou řadu výlisků vozu Š 742. Pro určení průměrných vlastností plechu a ke zjištění jejich výkyvů daných hutní výrobou byl vlastní odběr proveden formou náhodného výběru ve dvou etapách [66]:

- první odběr /únor 1984/ z tavby č. 26004 a sviteků č. 315986 /balíky č. 1, 2, 4/ a č. 315988 /balíky č. 1°, 3, 5/. Z každého balíku byly odebrány čtyři tabule /z č. 5 pouze jedna/,
- druhý odběr /září 1984/ z tavby č. 46646, svitek č. 323661 /z balíku č. 1 dvě tabule/, z tavby č. 58238, svitek č. 325135 /z balíku č. 4 odebráno pět tabulí/, z tavby č. 58220, svitek č. 335916/ z balíku č. 3 a 4 odebráno po pěti tabulích/.

Provedený odběr je možno charakterizovat následujícími průměrnými hodnotami charakteristik získanými zkouškou tahem /tab. 1/.

Tab. 1 Průměrné hodnoty charakteristik plechů
KOHAL 20 E tl. 0,7 mm z provedeného výběru

Směr α	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	r	n
0°	182,7	316,2	41,9	1,55	0,227
45°	188,7	325,4	39,4	1,17	0,222
90°	184,0	313,4	41,7	1,78	0,225
stř.	186,0	320,1	40,6	1,42	0,224

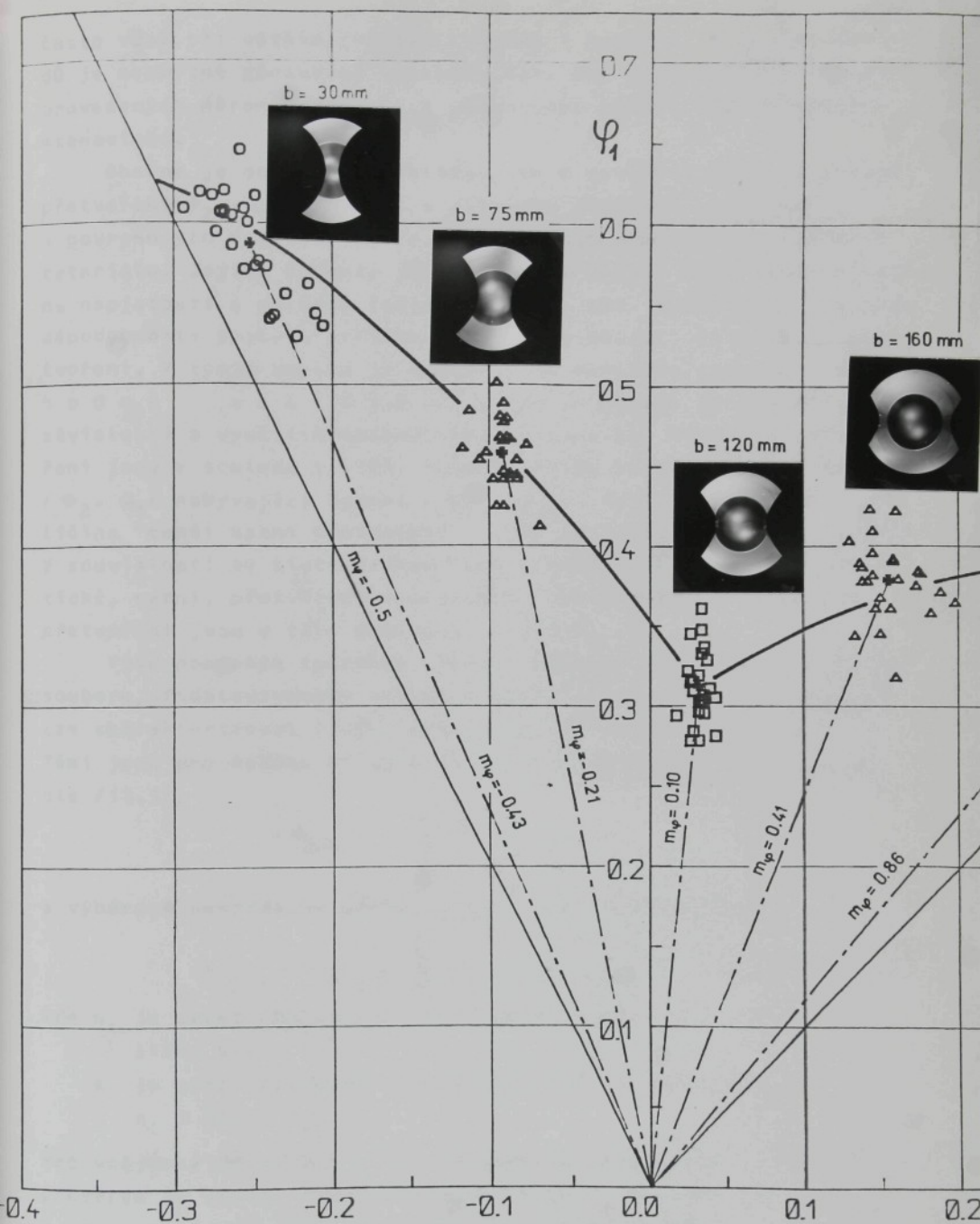
Drsnost povrchu byla $R_a = 0,93 \text{ } [\mu\text{m}]$, $/R_{\text{max}} = 5,7/$ hodnota prohloubení dle Erichsena $IE = 10,62 \text{ mm}$. Charakteristická struktura tohoto plechu je uvedena v příloze 12, pracovní diagram ze zkoušky tahem v příloze 19.

11.1 Statistické vyhodnocení zjednodušeného diagramu mezních přetvoření

S ohledem na poměrnou náročnost experimentálních prací byla v první fázi zaměřena pozornost nejprve na tzv. zjednodušený DMP daný jen některými stavy přetvoření z celkového rozsahu $m_\varphi \in \langle -0,5, 1 \rangle$. Tyto stavy přetvoření, charakterizované příslušnými deformačními stopami $/m_\varphi = \text{konst}/$, odpovídají určité zvolené šířce b zkušebních těles. Bylo zvoleno pět šířek nástřihů tak, aby získané stavy přetvoření rovnoměrně reprezentovaly příslušný interval. Při přiřazování zkušebních těles k jednotlivým deformačním stopám byla důsledně respektována zásada rovnoměrného zastoupení všech balíků a tabulí z obou odběrů v jednotlivých šířkách. Získaný DMP tak zahrnuje celkem 4 různé tavby, 5 svitků a 10 balíků plechu KOHAL 20 E. Každá zvolená šířka pak zahrnuje soubor 25 nástřihů. Z každého z nich byla získána jedna dvojice hodnot mezních přetvoření $/\varphi_{2k}, \varphi_{1k}/$ představovaná v DMP jedním bodem. Čili pro jednu šířku b je to 25 bodů. Podélná osa zkušebních těles /směr většího přetvoření $\varphi_{1k}/$ byla volena ve směru kolmém na směr válcování $/\alpha = 90^\circ$. Tento postup je používán i pro odběr zkušebních tyčí a hodnocení mechanických vlastností zkouškou tahem.

Základní formou zpracování výsledků experimentů do DMP je soubor bodů reprezentujících mezní hodnoty $\varphi_{2k}, \varphi_{1k}$ a určujících určitý obor kritických stavů v daných souřadnicích. Tímto postupem získaný DMP je na obr. 11.1. Zpracování výsledků bylo v tomto případě a v dalších fázích řešení prováděno s využitím počítače EC - 1033 a Digigrafu 1008 při použití dílčích programů dle interního značení P01 až P11 v jazyce FORTRAN IV, jejichž použití je v příslušných kapitolách uvedeno /zde zpracováno pomocí P04/.

Pět různých šířek nástřihů modelovalo pět různých stavů přetvoření představovaných příslušnými deformačními stopami. Výsledkem je pět souborů /skupin/ bodů představujících mezní přetvoření pro daný stav m_φ resp. m_σ . Vzhledem ke kolísání vlastností materiálu, náhodným chybám a působení i dalších vlivů, jsou body v DMP různě rozptýleny. Chceme-li posuzovat prostřednictvím DMP vlastnosti jednoho či více materiálů, pak vyhodnocení výsledků experimentu, získaných v této podobě, bude značně subjektivní,



Obr. 11.1 Zjednodušený DMP získaný zkušebními tělesy pěti různých šířek b

často však při větším rozsahu zkoušek i nemožné. Z těchto důvodů je nezbytné zpracovat výsledky tak, aby bylo možné na základě provedených měření zaujmout k hodnoceným materiálům objektivní stanovisko.

Obecně je možno předpokládat, že k dosažení mezních hodnot přetvoření φ_{2k} , φ_{1k} dochází v důsledku působení vnitřních a povrchových defektů, které jsou náhodně rozloženy v tvářeném materiálu. Jejich hodnoty jsou proto do určité míry závislé nejen na napjatosti a dalších faktorech /viz. kap. 2.3/, ale i na pravděpodobnosti výskytu určitého defektu v oblasti kritického přetvoření. V tomto smyslu je nutné na ně pohlízet jako na náhodné veličiny a lze je popsat jako statistické závislosti s využitím matematické statistiky. Mezní hodnoty přetvoření jsou v souladu s [103] dvourozměrnou náhodnou veličinou Φ_2, Φ_1 nabývající hodnot $\varphi_{2k}, \varphi_{1k}$, kde Φ_2 je náhodná veličina "menší mezní přetvoření" a Φ_1 je "větší mezní přetvoření". V souvislosti se statistickým zpracováním bude index "k" pro kritické, mezní, přetvoření vynecháván, neboť veškerá uvažovaná přetvoření jsou v této souvislosti mezní.

Výše popsaným způsobem získaný náhodný výběr ze základního souboru, představovaného celkovým množstvím příslušného plechu, lze charakterizovat [103] základními charakteristikami. Těmi jsou pro každou šířku b výběrové průměry $(\varphi_{2s})_l$ resp. $(\varphi_{1s})_l$ dle /11.1/.

$$(\varphi_{2s,1s})_l = \frac{1}{n_l} \sum_{i=1}^{n_l} (\varphi_{2,1})_{l,i} \quad /11.1/$$

a výběrové směrodatné odchylky s_{φ_2} resp. s_{φ_1} dle /11.2/

$$(s_{\varphi_{2,1}})_l = + \sqrt{\frac{1}{n_l-1} \sum_{i=1}^{n_l} [(\varphi_{2,1})_{l,i} - (\varphi_{2s,1s})_l]^2} \quad /11.2/$$

kde n_l je počet zkušebních těles /bodů v DMP/ pro danou šířku $b/l = 1$, k/

k je počet zvolených šířek nástřihů /v tomto případě $n_l = 25$, $k = 5$ /.

Pro vzájemné porovnání a i s ohledem na zpracování s využitím počítače je vhodné volit počet nástřihů n_l shodný, tj. $n_1 = n_2 = \dots = n_k$. Celkový počet použitých zkušebních těles je

$$n = \sum_{l=1}^k n_l \quad /11.3/$$

poloha střední deformační stopy pro každou skupinu bodů je určena počátkem souřadného systému /0, 0/ a střední hodnotou přetvoření příslušné skupiny bodů. Ta je určena výběrovými průměry $\varphi_{2s}, \varphi_{1s}$ a na obr. 11.1 ji představuje bod symbolizovaný maltézským křížem.

Výběrové charakteristiky jsou ovšem samy náhodnými veličinami. Odběrem jiného náhodného výběru téhož rozsahu lze dospět např. k jinému výběrovému průměru. Důležitou informací jsou především parametry vlastního základního souboru. Odhady parametrů základního souboru jsou právě výběrové charakteristiky, neboť rozdělení četností v náhodném výběru je odrazem rozdělení pravděpodobností v základním souboru. Nazývají se bodovými odhady, protože neznámý parametr odhadují jediným číslem, bodem. Protože výběrové charakteristiky jsou náhodné veličiny, je odhad parametru vždy zatížen chybou, jejíž velikost je nutné alespoň přibližně znát. Přesnost, s jakou bodový odhad odhaduje parametr základního souboru, popisuje **k o n f i d e n č n í i n t e r v a l**, který pokryje neznámý parametr s předem zvolenou vysokou pravděpodobností $1 - \alpha$ nazývanou konfidenční koeficient [103]. Hodnoty středních veličin $\varphi_{2s}, \varphi_{1s}$ pro danou šířku nástřihu/omezeného počtu naměřených mezních přetvoření s normálním rozdělením mající směrodatnou odchylku $s_{\varphi_2}, s_{\varphi_1}$ jsou rozloženy v souladu s t /Studentovým/ rozdělením. Pak je oboustranný konfidenční interval pro střední hodnoty $\varphi_{2s}, \varphi_{1s}$ a pravděpodobnostní hladinu $1 - \alpha$ dán výrazem

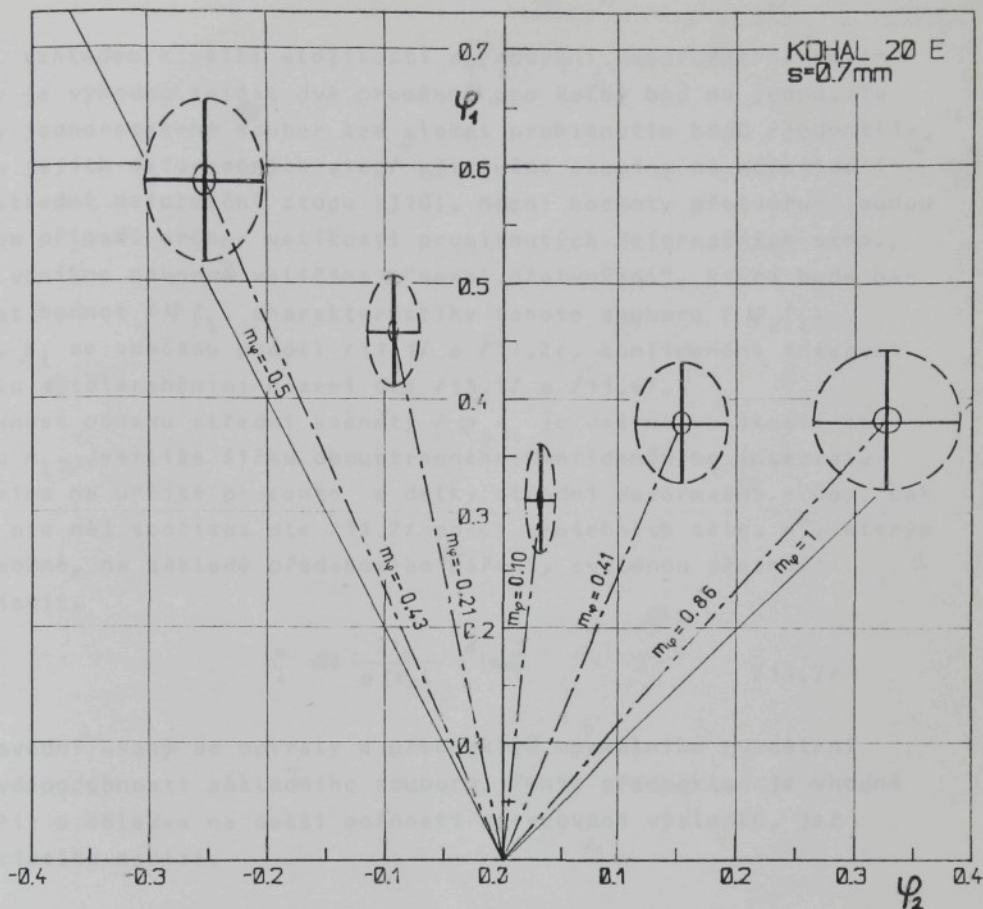
$$P \left[\left(\varphi_{2s,1s} \right)_l - t_{\alpha(n_l-1)} \frac{(s_{\varphi_{2,1}})_l}{\sqrt{n_l}} < \overline{\varphi}_{2s,1s} < \left(\varphi_{2s,1s} \right)_l + t_{\alpha(n_l-1)} \frac{(s_{\varphi_{2,1}})_l}{\sqrt{n_l}} \right] = 1 - \alpha \quad /11.4/$$

Rozsah, v kterém se střední hodnoty pohybují, je tak

$$\left(\varphi_{2s,1s} \right)_l \pm t_{\alpha(n_l-1)} \frac{(s_{\varphi_{2,1}})_l}{\sqrt{n_l}} \quad /11.5/$$

kde $t_{\alpha} / n_l - 1 /$ je α - kritická hodnota, t - rozdělení s $n_l - 1$ stupni volnosti, tabelovaná v [103].

V praxi je často důležité stanovit i oboustranné **t o l e r a n č n í m e z e**, které zahrnou podíl P% základního souboru se zvolenou vysokou pravděpodobností γ . Oboustranné toleranční meze založené na výběrových charakteristikách mají tvar [103]



Obr. 11.2 Statistické zpracování souborů bodů z obr. 11.1

$$(\varphi_{2s,1s})_l = \pm k_1 (s_{\varphi_{2,1}})_l \quad /11.6/$$

kde k_1 je konstanta tabelovaná v [103] v závislosti na n_l , P , γ . Zjištěná střední hodnota přetvoření pro danou šířku nástřihu $b / \varphi_{2s}, \varphi_{1s} / l$ se bude na základě provedených měření pohybovat při jiném náhodném výběru ve směru osy φ_2 a φ_1 v rozsahu daném oboustranným konfidenčním intervalem dle [11.5], který je na obr. 11.2 pro $\alpha = 0,05$ v příslušných směrech vymezen vnitřní menší elipsou. Pak i 90 % bodů, mezních stavů, ze základního souboru bude s pravděpodobností 95 % ležet v rozsahu daném oboustrannými tolerančními mezemi, které jsou na obr. 11.2 v příslušných směrech vymezeny vnější větší elipsou /program P05/.

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/ příslušné skupiny na odpovídající střední deformační stopu [110]. Mezní hodnoty přetvoření budou v tom případě určeny velikostí promítnutých deformačních stop. Tak vznikne náhodná veličina Φ "mezní přetvoření", která bude nabývat hodnot φ / l . Charakteristiky tohoto souboru φ_s / l , s_φ / l se spočtou pomocí /11.1/ a /11.2/, konfidenční interval spolu s tolerančními mezemi dle /11.5/ a /11.6/.

Přesnost odhadu střední hodnoty φ_s / l je úměrná velikosti souboru n_l . Jestliže šířku oboustranného konfidenčního intervalu omezíme na určité procento e délky střední deformační stopy, pak lze pro něj spočítat dle /11.7/ počet zkušebních těles n_l^* , kterým je možné, na základě předchozího měření, zvolenou přesnost zajistit,

$$n_l^* = \left(\frac{2 t_\alpha}{e (\varphi_s)_l} \right)^2 (s_\varphi)_l^2 \quad /11.7/$$

Dosavadní úvahy se opíraly o předpoklad normálního rozdělení pravděpodobností základního souboru. Tento předpoklad je vhodné ověřit s ohledem na další možnosti zpracování výsledků, jež statistika nabízí.

11.1.1 Testování normality rozdělení pravděpodobnosti

Při uvažování shody rozdělení základního souboru s náhodným výběrem lze stanovený předpoklad ověřit např. prostřednictvím získaného výběru některým z následujících způsobů.

Použitím pravděpodobnostního papíru pro normální rozdělení [111], který má tu vlastnost že vykazuje-li v něm sestavená experimentálně zjištěná funkce rozdělení přímkovou závislost, lze důvodně předpokládat, že množina, z níž pocházel náhodný výběr, má normální rozdělení. Výhoda tohoto postupu je v tom, že lze učinit příslušný závěr i bez znalosti parametrů předpokládaného rozdělení. V tomto případě byl předpoklad potvrzen, neboť získaná závislost byla lineární.

Jinou možností je využití Kolmogorova-Smirnova testu do-

bré shody rozdělení četností výběrových hodnot /experimentálně zjištěná rozdělení četností/ s předpokládaným normálním rozdělením pravděpodobností. Dle [103] je pro praxi adekvátní χ^2 - testu. Na rozdíl od něho však k němu postačí mnohem méně naměřených hodnot. Je založen na zjištění maximální /supremální/ odchylky D/n_L mezi experimentálně zjištěnou a předpokládanou distribuční funkcí, která je pak porovnávána s kritickou hodnotou D_α /n_L tabulovanou v [103]. Je-li $D/n_L < D_\alpha /n_L$ hypotéza o normálním rozdělení základního souboru, z něhož pochází zkoumaný náhodný výběr, se na dané hladině významnosti nezamítá. V testovaných případech /test je součástí programu P06/ bylo vždy $D/n_L < D_{0,05/25}$, viz. tab. 2.

Vzhledem k tomu, že Kolmogorův-Smirnovův test hodnotí jen maximální odchylku obou funkcí, může být zajímavá informace o jejich celkové vzdálenosti. Touto vzdáleností se rozumí norma funkce $N/\varphi - S/\varphi$ [112], které se často říká střední kvadratická odchylka. Výhodnější je její relativní vyjádření dle [11.8/

$$RN = \frac{\|N - S\|}{\|N\|} = \sqrt{\frac{\int_{a_1}^{a_2} |N(\varphi) - S(\varphi)|^2 d\varphi}{\int_{a_1}^{a_2} |N(\varphi)|^2 d\varphi}} \quad /11.8/$$

kde N/φ je hustota pravděpodobnosti normálního rozdělení dle [11.9/

$$N(\varphi) = \frac{1}{(s_\varphi)_l \sqrt{2\pi}} \exp - \frac{1}{2} \left[\frac{(\varphi)_l - (\varphi_s)_l}{(s_\varphi)_l} \right]^2 \quad /11.9/$$

S/φ je hustota pravděpodobností aproximovaného experimentálně zjištěného /skutečného/ rozdělení

Na shodnost rozdělení lze usuzovat, je-li /pro daný počet měření/ hodnota RN asi do 15 %. V uvažovaných případech dosažené hodnoty RN, viz. tab. 2, opět potvrzují stanovený předpoklad. Zbývá určit funkci S/φ . To lze pomocí třetího a čtvrtého centrálního momentu souboru dle vztahu [11.11/ [113]

$$M_3(\varphi) = \frac{1}{n_l} \sum_{i=1}^{n_l} [(\varphi)_{l,i} - (\varphi_s)_l]^3$$

/ 11.10/

$$M_4(\varphi) = \frac{1}{n_l} \sum_{i=1}^{n_l} [(\varphi)_{l,i} - (\varphi_s)_l]^4$$

$$S(\varphi) = \frac{1}{(s_\varphi)_l} [a(v) - \frac{1}{3!} \frac{M_3(\varphi)}{(s_\varphi)_l^3} a^{(3)}(v) + \frac{1}{4!} (\frac{M_4(\varphi)}{(s_\varphi)_l^4} - 3) a^{(4)}(v)] \quad / 11.11/$$

ve funkci $a(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}v^2}$

značí $v = \frac{(\varphi)_l - (\varphi_s)_l}{(s_\varphi)_l}$

a její n-tá derivace má tvar $\frac{d^n a(v)}{dv^n} = (-1)^n H_n(v) a(v)$

kde $H_n/v/$ je Čebyševův-Hermitův polynom n-tého stupně, který má pro $n = 3$ a 4 tvar

$$H_3/v/ = v^3 - 3v, \quad H_4/v/ = v^4 - 6v^2 + 3$$

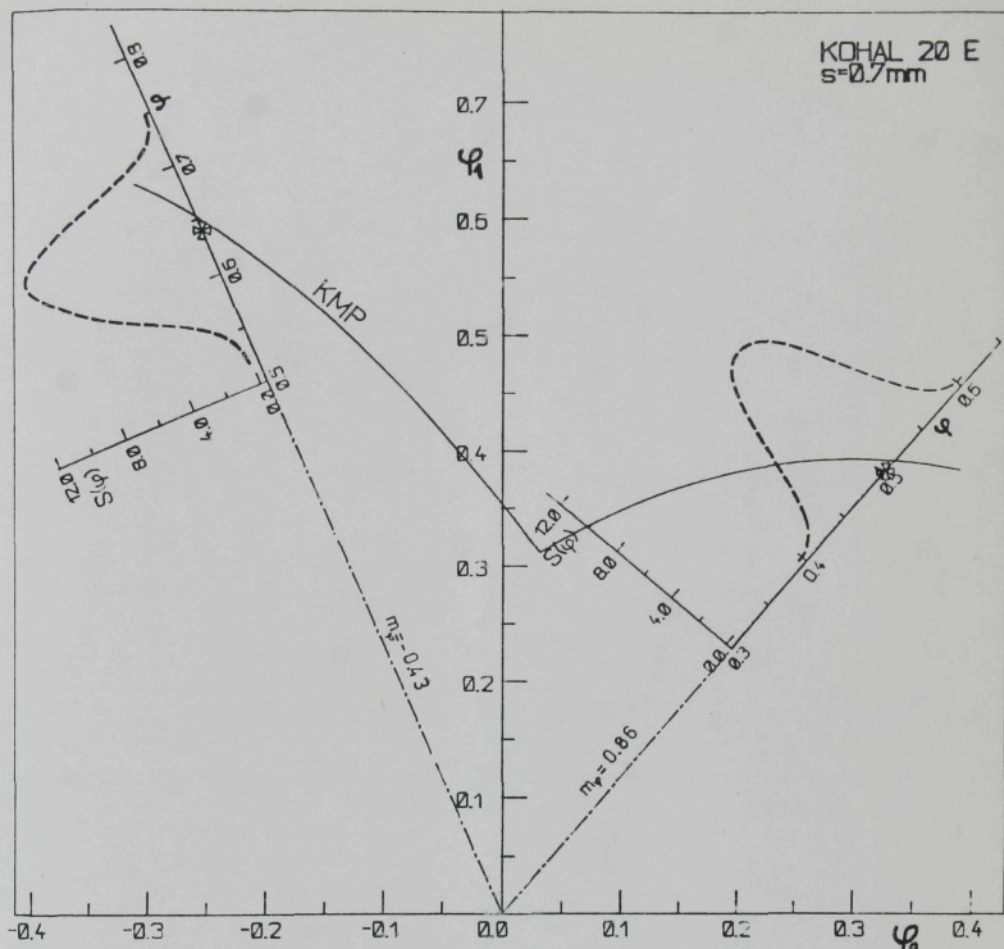
Náhodnou veličinu Φ charakterizují pravděpodobnosti, s nimiž se vyskytnou její hodnoty v předem zvolených mezích. Pro vyjádření této skutečnosti je zavedena distribuční funkce, jež je funkcí proměnné φ a její hodnota v bodě φ_k udává pravděpodobnost, že náhodná veličina nabude hodnoty menší nebo rovné φ_k , $F_n(\varphi) = P(\Phi \leq \varphi)$, čili

$$F_n(\varphi_k) = \int_a^{\varphi_k} N(\varphi) d\varphi \quad / 11.12/$$

nebo pro skutečné rozdělení

$$F_s(\varphi_k) = \int_a^{\varphi_k} S(\varphi) d\varphi \quad / 11.13/$$

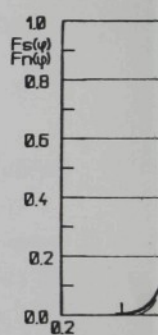
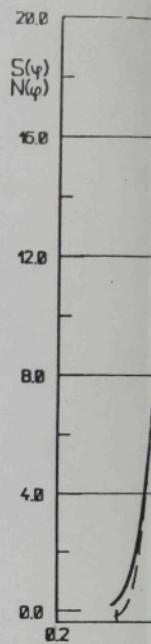
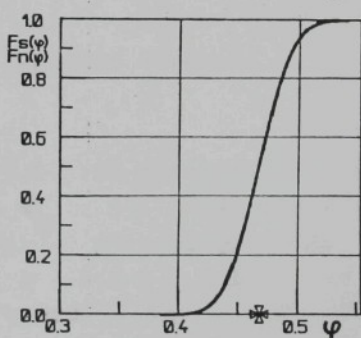
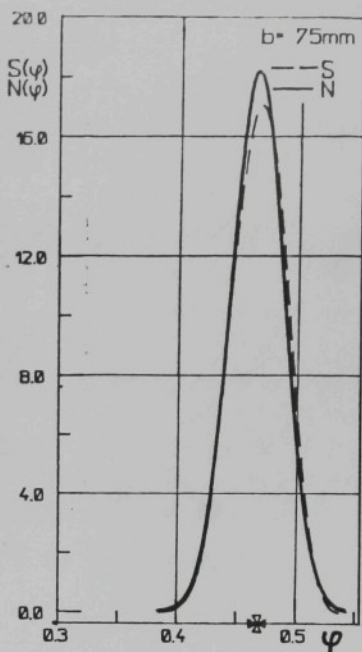
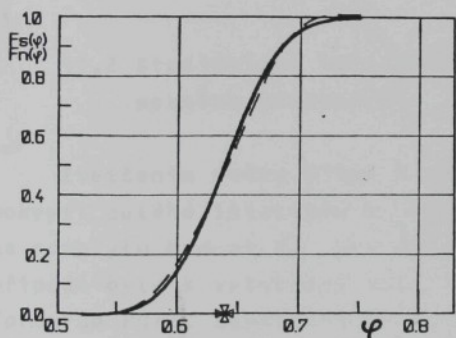
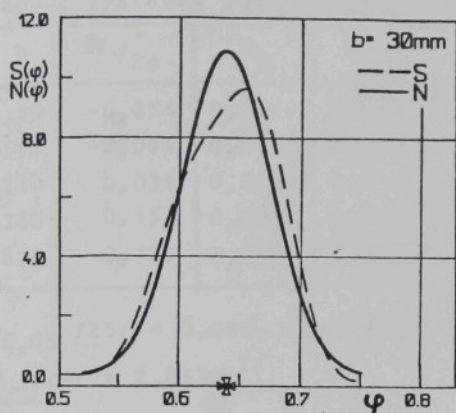
Význam zavedení distribuční funkce lze jednoduše vyjádřit následovně. Změřené mezní hodnoty přetvoření, představované v DMP koncovým bodem příslušné deformační stopy, se pohybují v určitém



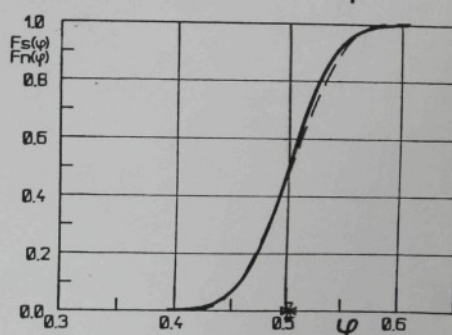
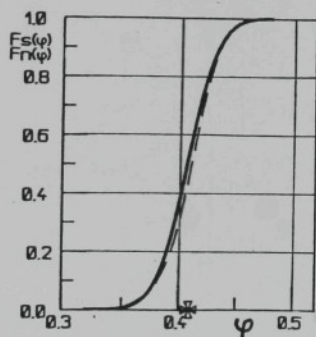
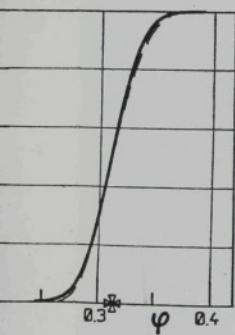
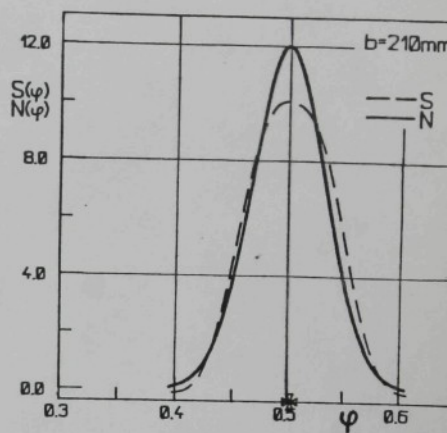
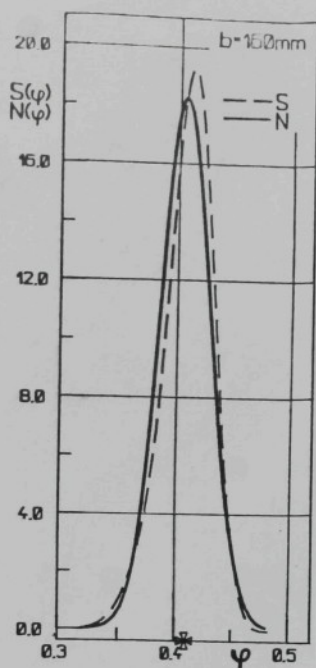
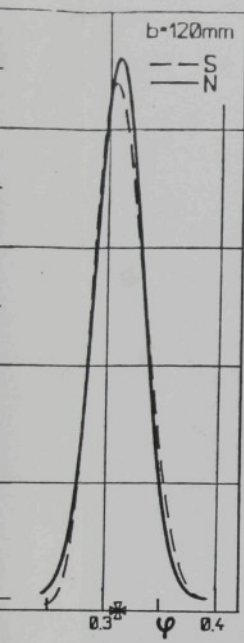
Obr. 11.3 Průběh funkce S/φ / dle /11.11/ pro dvě skupiny mezních přetvoření získané pomocí nástřihů šířek $b = 30\text{ mm}$ a $b = 210\text{ mm}$

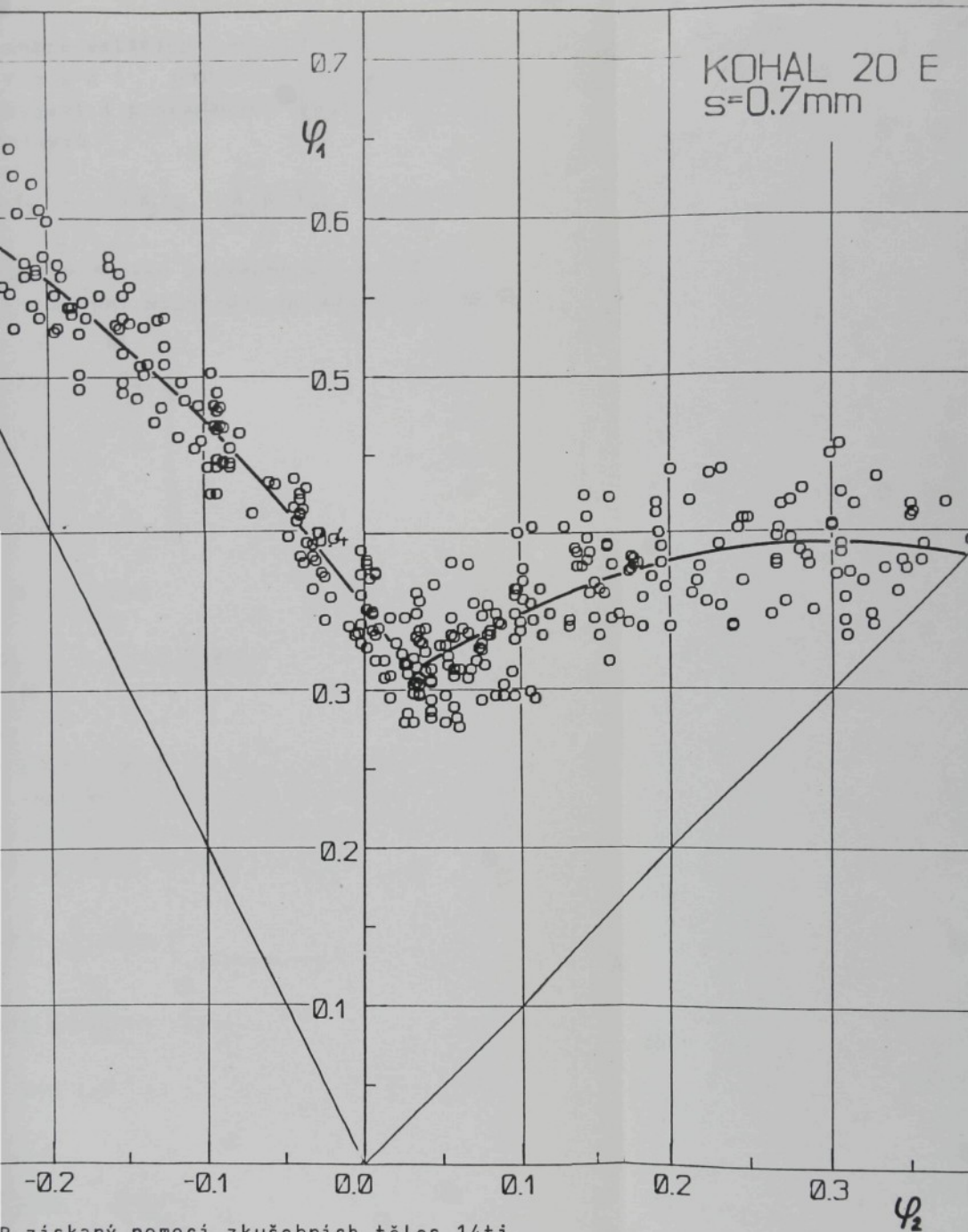
rozmezí. Toto rozmezí lze se zvolenou pravděpodobností vymezit oboustrannými tolerančními mezemi. Funkce F_n/φ_k / resp. F_s/φ_k / pak udává, s jakou pravděpodobností se budou určité mezní stavy vyskytovat v určitém místě nebo pásmu z udaného rozmezí ve směru deformační stopy.

Průběh funkce S/φ / dle /11.11/ pro dvě různé skupiny bodů určené pomocí nástřihů šířek $b = 30$ a 210 mm , je zřejmý z obr.11.3. Střední hodnota $|\varphi_s|/l$, která představuje délku střední deformační stopy, je opět označena maltézsckým křížem.



Obr. 11.4 Porovnání křivek hustot pravděpodobnosti normálního N/φ a skutečného S/φ rozdělení dle /11.9/ resp. /11.11/ a křivek distribučních funkcí F_n/φ_k dle /11.12/ a F_s/φ_k dle /11.13/





P získaný pomocí zkušebních těles 14ti
šířek b / n = 350 bodů /

na hodnotách φ_2 druhé známé veličiny Φ_2 . Tento vzájemný vztah lze popsat regresi funkcí /11.14/ |103,104|, v níž se vedle hodnot φ_2 objeví i p neznámých parametrů $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$, regresních koeficientů

$$E(\Phi_1 / \varphi_{2j}) = \beta_1 f_{1j} + \beta_2 f_{2j} + \dots + \beta_p f_{pj} = \sum_{m=1}^p \beta_m f_{mj} \quad /11.14/$$

kde $f_{mj} = f_m / \varphi_{2j}$ jsou známé funkce proměnné φ_2 , $m = 1, 2, \dots, p$ a $j = 1, 2, \dots, n$. Ty lze pro n měření uspořádat do matice X typu n, p dle /11.15/

$$X = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1p} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \dots & f_{np} \end{pmatrix} \quad /11.15/$$

Uvedený model lze vyjádřit ve tvaru

$$\varphi_{1j} = \beta_1 f_{1j} + \beta_2 f_{2j} + \dots + \beta_p f_{pj} + c_j \quad /11.16/$$

kde c_j jsou náhodné chyby.

Bodové odhady regresních koeficientů $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ dané hodnotami $b_1, b_2, \dots, b_p$, stanovené na základě náhodného výběru a nazvané výběrové regresní koeficienty, získáme použitím metody nejmenších čtverců. Při ní se hledá minimum výrazu

$$Q = \sum_{j=1}^n (\varphi_{1j} - \sum_{m=1}^p \beta_m f_{mj})^2 \quad /11.17/$$

Odhady se naleznou řešením soustavy rovnic

$$\frac{\partial Q}{\partial \beta_m} = 0 \quad \text{pro } m = 1, 2, \dots, p \quad /11.18/$$

které lze vyjádřit ve tvaru

$$X^T X b = X^T \varphi_1 \quad /11.19/$$

kde $\varphi_1^T = \parallel \varphi_{11}, \varphi_{12}, \dots, \varphi_{1n} \parallel$, $b^T = \parallel b_1, b_2, \dots, b_p \parallel$

žili pro vektor odhadů regresních koeficientů platí

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \boldsymbol{\varphi}_1 \quad /11.20/$$

v daném případě /ve vztahu k obr. 4.3/ lze doporučit použití regresní funkce ve tvaru /p = 3/

$$E(\Phi_1/\varphi_2) = \hat{\varphi}_1 = b_1 + b_2 \varphi_2 + b_3 \varphi_2^2 \quad /11.21/$$

Vzhledem k charakteru přetvoření při různých stavech napjatosti [115] 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 φ_1 . Průběh zjištěné KMP /pomocí programu P09/ je patrný z obr. 11.5. K posouzení rozptylu hodnot náhodné veličiny Φ_1 kolem regresní křivky se obvykle používá reziduální směrodatná odchylka s_R dle /11.22/

$$s_R = + \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\varphi_{1j} - \sum_{m=1}^p b_m f_{mj})^2}{n-p}} \quad /11.22/$$

Vedle znalosti rozptylu bodů kolem regresní křivky dle /11.22/ je zajímavá i informace o tom, jak úzce se k ní naměřené hodnoty přimykají. Takovým kritériem vhodnosti nelineární regresní funkce je index korelace I. Porovnává se v něm, jaký podíl rozptylů připadá na náhodné odchylky závisle proměnné od zvolené regresní funkce / $\varphi_{1j} - \hat{\varphi}_{1j}$ / ² z celkového rozptylu náhodně proměnných od střední hodnoty / $\varphi_{1j} - \bar{\varphi}_1$ / ²,

$$I = \sqrt{\frac{s_{\hat{\varphi}_1}^2}{s_{\varphi_1}^2}} \quad /11.23/$$

$$\text{kde } s_{\hat{\varphi}_1}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\hat{\varphi}_{1j} - \bar{\varphi}_1)^2 \quad \text{a} \quad s_{\varphi_1}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\varphi_{1j} - \bar{\varphi}_1)^2$$

$$\bar{\varphi}_1 \text{ je střední hodnota daná výrazem } \bar{\varphi}_1 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \varphi_{1j}$$

K určování $\mathbf{b}$, s_R , I pro obě větve KMP slouží program P08. Jejich hodnoty pro DMP z obr. 11.5 jsou v tab. 3.

Tab. 3 Výsledky statistického vyhodnocení
úplného DMP

KMP	b_1	b_2	b_3	s_R	I
L	0,3535	-1,3043	-1,3658	0,0235	0,9738
P	0,2910	0,6838	-1,1451	0,0274	0,7426

při způsobu určování $\mathbf{b}$ je obdobně jako v kap. 11. 1 odhad neznámého parametru $E/\Phi_1/\Phi_{2j}/$ zatížen příslušnou chybou. Přesnost odhadu, kterým je v tomto případě KMP /11.21/, i zde popisuje konfidenční interval. V souladu s /11.16/ lze hodnoty φ_{1j} vyjádřit ve tvaru

$$\varphi_1 = \mathbf{X}\mathbf{b} + \mathbf{c} \quad /11.24/$$

kde $\mathbf{b}$ je vektor regresních koeficientů $\beta_1, \beta_2 \dots \beta_p$

$\mathbf{c}$ je vektor náhodných chyb $c_1, c_2 \dots c_n$

Při použití metody nejmenších čtverců lze psát

$$(\varphi_1 - \mathbf{X}\mathbf{b})^T (\varphi_1 - \mathbf{X}\mathbf{b}) = \min \quad /11.25/$$

Regresní funkce je ve tvaru $\hat{\varphi}_{1j} = \mathbf{f}_j \mathbf{b}$, přičemž $\hat{\varphi}_{1j}$ bude mít normální rozdělení. Po odvození z 11.25 tak plyne

$$\hat{\varphi}_{1j} : N(\mathbf{f}_j \mathbf{b}, \sigma^2 \mathbf{f}_j (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{f}_j^T) \quad /11.26/$$

$$\text{kde } E(\Phi_1/\Phi_{2j}) = \mathbf{f}_j \mathbf{b}, \quad S = \mathbf{f}_j (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{f}_j^T$$

a $\mathbf{f}_j$ je vektor rovný j -tému řádku matice $\mathbf{X}$.

Pak lze pro náhodný výběr vyjádřit konfidenční interval ve tvaru

$$P(\hat{\varphi}_{1j} - t_{\alpha}(n-p) s_R \sqrt{S} < E(\Phi_1/\Phi_{2j}) < \hat{\varphi}_{1j} + t_{\alpha}(n-p) s_R \sqrt{S}) = 1 - \alpha \quad /11.27/$$

Pro praktické účely může často postačit pro orientační přehled i tzv. zjednodušený konfidenční interval ve tvaru

$$\hat{\phi}_{1j} \pm t_{\alpha} (n - p) s_R \sqrt{\frac{1}{n}}$$

/11.28/

šířka tohoto intervalu je podél regresní křivky konstantní a odpovídá šířce konfidenčního intervalu stanoveného pro střed /těžiště/ příslušné větve regresní křivky. K jeho stanovení postačí běžný kapesní kalkulátor. Vlastní výpočet a nakreslení konfidenčního intervalu dle /11.27/ bylo prováděno pomocí programu P10.

Vedle oboustranného konfidenčního intervalu lze stanovit obdobně jako v kap. 11.1 i oboustranné toleranční meze /toleranční pásmo/ dle vztahu

$$\hat{\phi}_1 \pm k_1 s_R$$

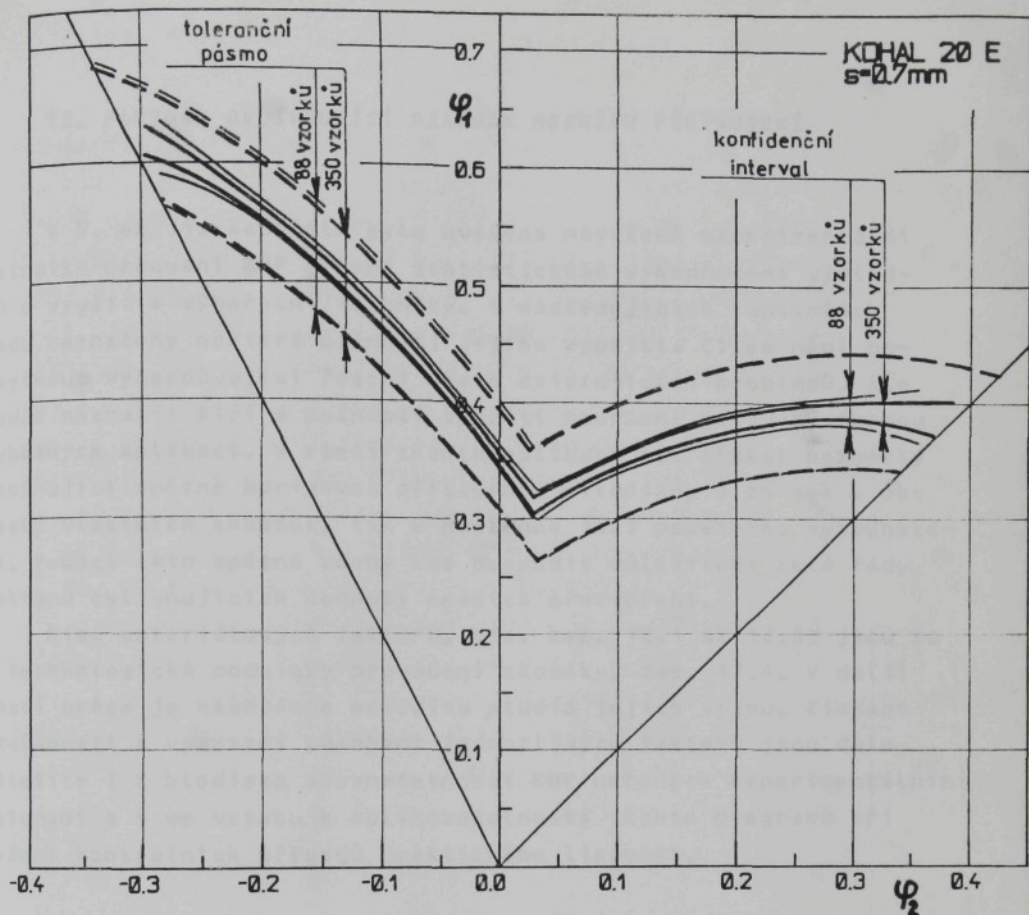
/11.29/

kde k_1 je tabelováno v [103] v závislosti na n , P a γ .

Oboustranný konfidenční interval spolu s tolerančním pásmem pro soubor 350ti bodů z obr. 11.5 jsou uvedeny na obr. 11.6 / $\alpha = 0,05$, $P = 90\%$, $\gamma = 95\%$ /. Oba zmíněné intervaly jsou mimo jiné závislé i na rozsahu měření. Vliv počtu naměřených hodnot na šířku obou pásem je zřejmý rovněž z obr. 11.6. Menší soubor 88mi bodů byl získán výběrem každého čtvrtého bodu z celého základního souboru 350ti bodů.

Výpočtem n_L^* z /11.7/ pro všech 14 šířek b / $e = 0,1$ / bylo zjištěno, že pro dodržení stanovené šířky konfidenčního intervalu by v průměru stačilo zhruba osm zkušebních těles pro každou šířku nástřihu. Pro takto stanovený celkový počet naměřených hodnot při dodržení přibližně stejného rozptylu jako u základního souboru 350 ti bodů /což lze na základě provedených experimentů již předpokládat/ budou konfidenční interval a toleranční meze ležet v rozmezí daném těmi, které jsou na obr. 11.6. Na základě provedeného rozboru se tak jeví jako optimální použití 130ti kusů zkušebních těles ve 13ti šířkách b / $b = 130$ vynechána/, tzn. $n_L = 10$, $k = 13$, $n = 130$.

Tento navržený postup statistického zpracování experimentálních výsledků je v různém rozsahu používán v dalším řešení.



Obr. 11. 6 Konfidenční intervaly spolu s tolerančními mezemi stanovenými dle /11.27/ a /11.29/ pro dva různě rozsáhlé datové soubory

12. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ DIAGRAM MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ

V 8. až 11. kapitole byla uvedena navržená experimentální metodika určování DMP včetně statistického vyhodnocení výsledků s využitím výpočetní techniky. V následujících kapitolách jsou naznačeny některé možnosti jejího využití. Cílem není poskytnout vyčerpávající řešení všech existujících problémů, ale pouze naznačit šíři a možnosti využití navržené metodiky formou vybraných aplikací. V rámci těchto aplikací lze získat poznatky umožňující zpětně korigovat příslušnou metodu, a to jak v oblasti vlastních zkoušek, tak v následné fázi početního vyhodnocení. Pomocí této zpětné vazby lze posoudit důležitost celé řady faktorů ovlivňujících hodnoty mezních přetvoření.

Mimo materiálových faktorů, viz. kap. 12.1 až 12.3, jsou to i technologické podmínky provádění zkoušky, kap. 12.4. V další části práce je naznačena metodika studia jejich vlivu. Získané zkušenosti a vymezení působení jednotlivých faktorů jsou dále důležité i z hlediska srovnatelnosti KMP určených experimentálními metodami a i ve vztahu k aplikovatelnosti těchto diagramů při řešení konkrétních případů praktického lisování.

12.1 Posouzení vlivu hutní výroby na mezní přetvoření

Tato skupina faktorů se bezprostředně dotýká vlastního materiálu /plechu/, zejména jeho chemického složení, struktury a jejího stavu, tloušťky a pod., tj. faktorů určených podmínkami hutní výroby. Kolísání chemického složení a nerovnoměrnosti struktury jsou dané jejím současným charakterem. Strukturu plechu a jeho vlastnosti určují především režimy válcování, tepelného zpracování a ostatní technologické podmínky. Na rozptyl vlastností má tak výrazný vliv míra optimálního dodržení komplexu technologických podmínek hutní výroby. Rozdíly se pak projevují nejen mezi jednotlivými tavbami, v rámci jedné tavby mezi jednotlivými svítky, ale i po délce svítku, čili mezi jednotlivými balíky i mezi jednotlivými tabulemi. Kvalita plechu je určována nejen absolutními hodnotami jednotlivých charakteristik, ale také jejich rozptylem [38,118].

12. 12.1.1 Posouzení rozdílu mezi jednotlivými tavbami

Pro toto posouzení byly vybrány hodnoty mezních přetvoření příslušející tavbě č. 26004 /2. svitek/ a tavbě č. 58238 /4. svitek/, viz. kap. 11. Materiálové charakteristiky obou souborů zezkouš - ky tahem jsou v tab. 1 a 2 přílohy 4. Vzhledem k rozhození bodů obou souborů v DMP obr. 12.1, je však posouzení obtížné. Rovněž po - souzení dle polohy a tvaru KMP nedává jednoznačnou odpověď. Od - lišnost obou KMP je možné provést i prostřednictvím konfidenčních intervalů. V tomto případě by se však do určité míry navzájem pro - línaly a situace je obdobná oběma předešlým. Takové vizuální po - souzení z DMP není vždy dostatečně průkazné. V těchto situacích vyvstává nutnost testovat odlišnost obou takových souborů nějakým jiným, objektivním pravidlem. To lze prostřednictvím formulace sta - tistické hypotézy, jejímž testem lze objektivně předepsat rozhod - nutí, zda má být ověřovaná hypotéza zamítnuta či nikoli.

Taková úloha testování odlišnosti dvou datových souborů je speciálním případem t e s t u o b e c n é l i n e á r n í h y p o t é z y [117]. Pro vzájemný vztah proměnných obou datových souborů platí regresní funkce ve tvaru /odborně jako 11.24/

$$\begin{aligned} Y_1 &= X_1 \kappa + c_1 \\ Y_2 &= X_2 \lambda + c_2 \end{aligned} \quad /12.1/$$

kte značí Y_1, Y_2 vektory hodnot závisle proměnných $\varphi_1,$

X_1, X_2 matice typu $/n_1, p/$ resp. $/n_2, p/$ funkcí

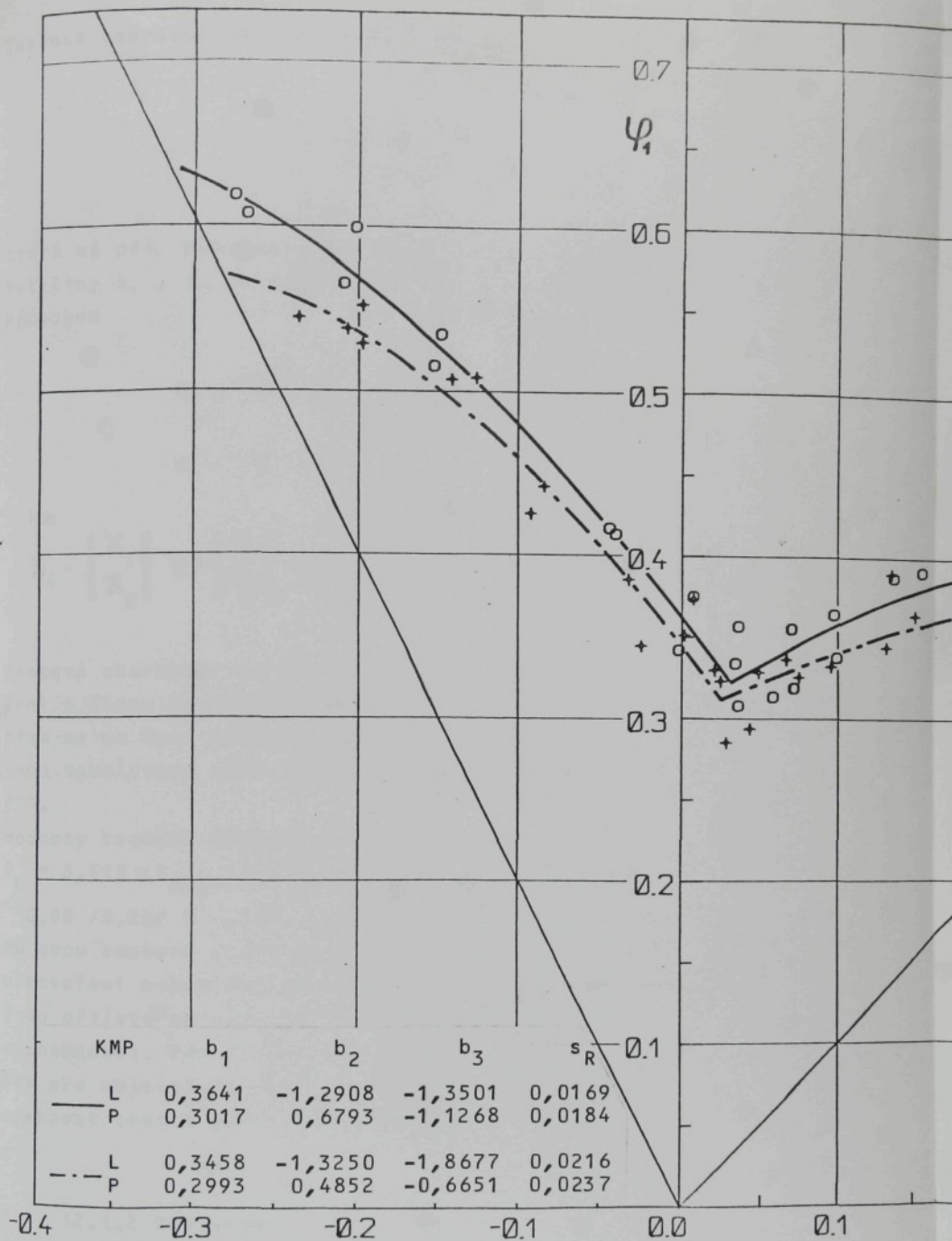
nezávisle proměnných φ_2 dle /11.15/,

κ, λ vektory regresních koeficientů prvního resp. druhého datového souboru,

c_1, c_2 vektory náhodných chyb.

V našem případě lze testovanou hypotézu formulovat větou: "Vektor regresních koeficientů KMP 1. souboru je roven vektoru regresních koeficientů 2. souboru", čili

$$\kappa = \lambda \quad /12.2/$$



Obr. 12.1 Diagram mezních přetvoření pro plechy odebrané ze dvou různých taveb

Testová charakteristika je ve tvaru

$$F = \frac{n_1 + n_2 - 2p}{p} \frac{S_w - S_\Omega}{S_\Omega} \quad /12.3/$$

kteřá má při platnosti hypotézy /12.2/ rozdělení $F/p, n_1+n_2-2p/$. Veličiny S_w, S_Ω ve vztahu /12.3/ jsou definované následujícím způsobem

$$S_\Omega = Y^T [E - X_3 (X_3^T X_3)^{-1} X_3^T] Y$$

$$S_w = Y^T [E - X_4 (X_4^T X_4)^{-1} X_4^T] Y \quad /12.4/$$

kde

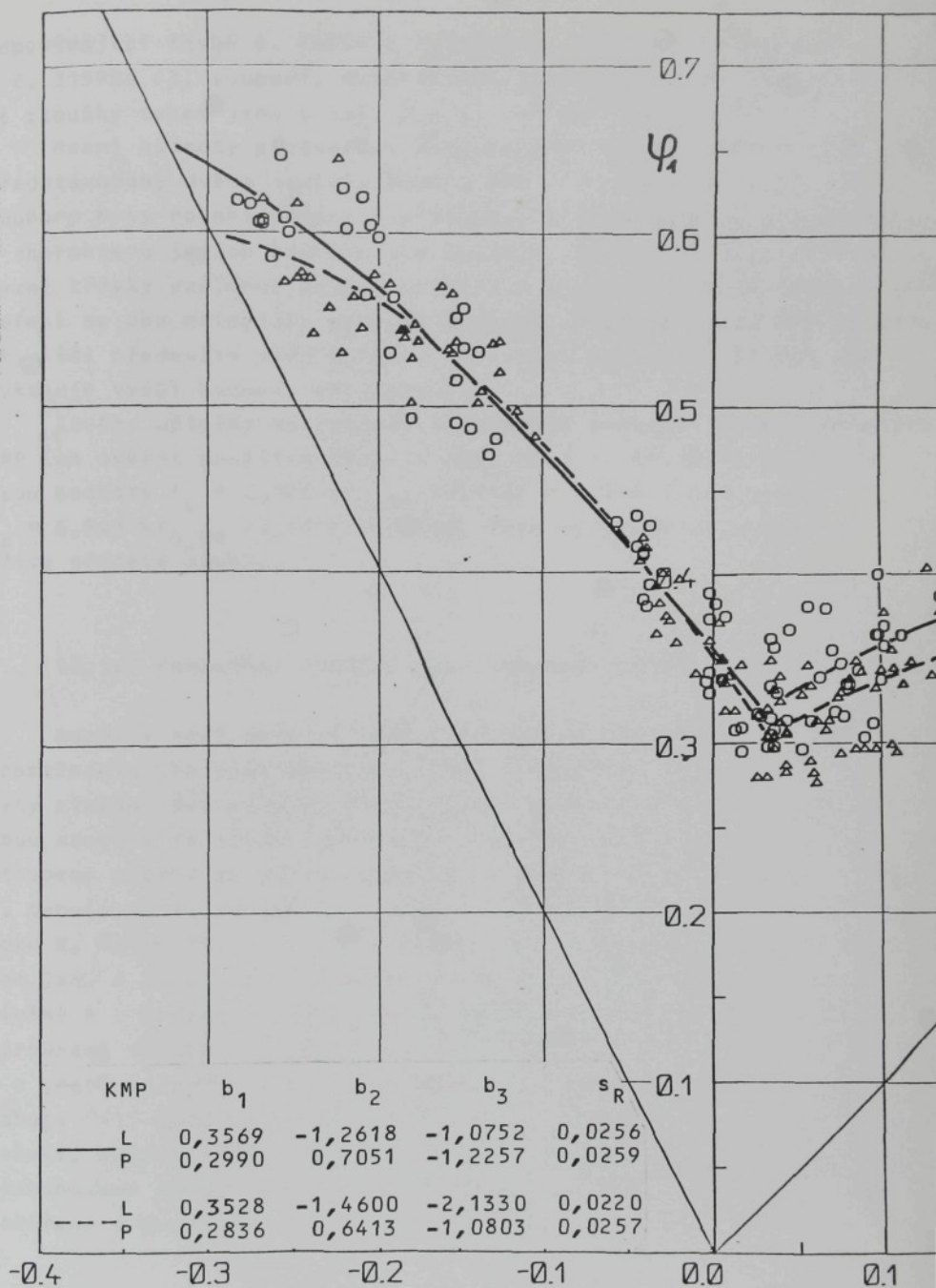
$$X_4 = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix}, Z = \begin{bmatrix} X_1 & 0 \\ 0 & X_2 \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} E & 0 \\ -E & E \end{bmatrix}, X_3 = ZT^{-1}$$

Testová charakteristika slouží jako míra nesouhlasu výsledků měření s danou hypotézou. Je-li $F > F_\alpha / v_1, v_2/$, testovaná hypotéza se na dané hladině významnosti α zamítá. Hodnoty $F_\alpha / v_1, v_2/$ jsou tabelovány např. [103]. K realizaci testu byl použit program P11.

Hodnoty testové charakteristiky F jsou pro levé větve KMP $F_L = 3,513 < F_{0.99 / 3,20/} = 4,938$ a pro pravé větve $F_p = 1,386 < F_{0.99 / 3,24/} = 4,718$. Z provedeného testu na základě rozložení bodů obou souborů v DMP plyne, že se v levé i pravé části DMP mezní přetvoření odpovídající oběma tavbám neliší. Tato rozhodnutí jsou přijata na základě daného počtu bodů a na dané hladině významnosti. Pro jinou její výši můžeme dospět i k jinému závěru. Pak pro objektivní soud z hlediska praktického využití je vhodné opakovat test s větším počtem bodů.

12.1.2 Posouzení rozdílu mezi svitky plechu

K realizaci tohoto záměru byl proveden výběr hodnot mezních přetvoření /bodů ze základního souboru uvedeného v kap. 11.1/,



Obr. 12.2 Diagram mezních přetvoření pro plechy
odebrané ze dvou svitků jedné tavby

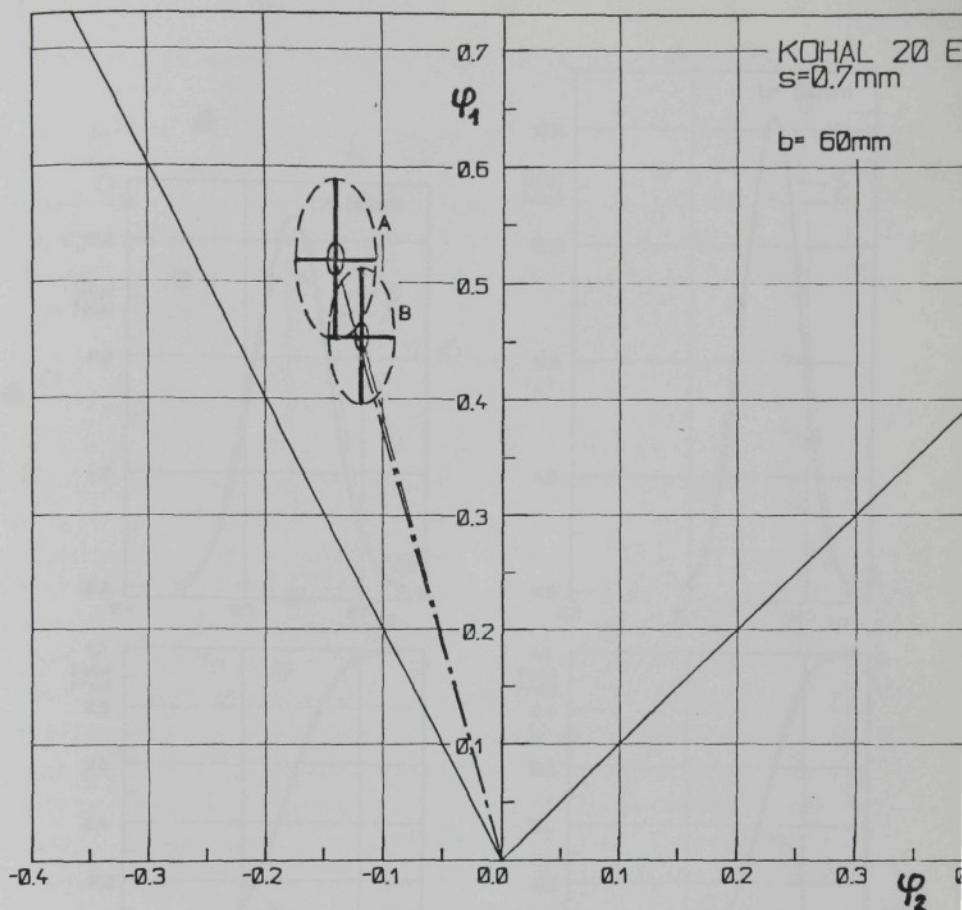
odpovídající tavbě č. 26004 a svitkům č. 315988 /1. soubor/ a č. 315986 /2. soubor/. Materiálové charakteristiky obou souborů ze zkoušky tahem jsou v tab. 3 a 1. v příloze 4.

Mezní hodnoty přetvoření příslušející oběma svitkům jsou představovány dvěma soubory bodů v DMP na obr. 12.2. Pro oba soubory byly rovněž určeny i příslušné křivky mezních přetvoření. Z charakteru jejich průběhu lze vyvodit, že v levé části DMP se mezní křivky vzájemně příliš neliší, a tedy při těchto stavech přetvoření se oba materiály chovají obdobně. V pravé části DMP se křivky liší především svou polohou. Plech ze svitku č. 315988 zde vykazuje vyšší hodnoty přetvoření.

Závěry učiněné na základě vizuálního srovnání prostřednictvím KMP lze ověřit použitím testu z kap. 12.1.1. Pro levé větve KMP jsou hodnoty $F_L = 2,123 < F_{0,99} / 3,114 / = 3,950$ a pro pravé $F_p = 6,841 > F_{0,99} / 3,134 / = 3,440$. Tyto výsledky potvrzují dříve přijaté závěry.

12.1.3 Posouzení rozdílu mezi tabulemi plechu

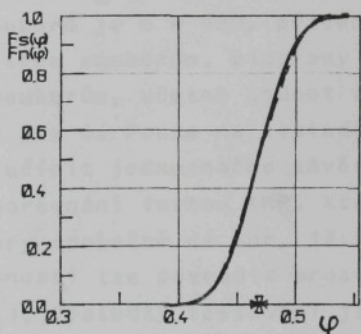
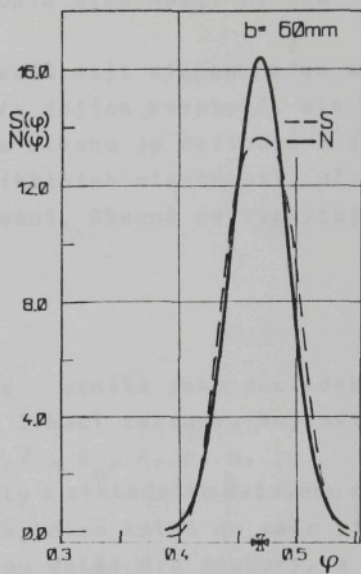
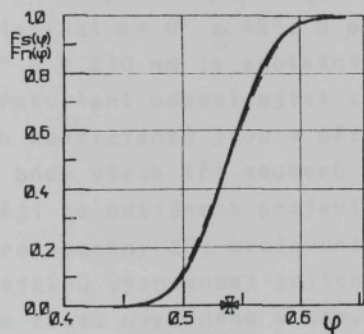
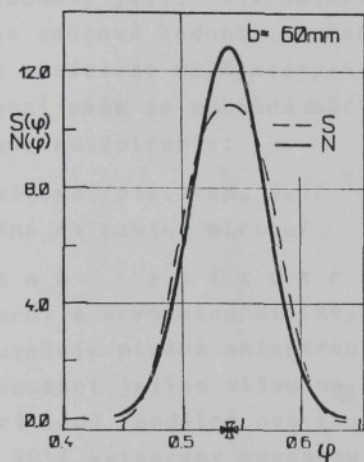
Rozdíly mezi jednotlivými tabulemi je možné demonstrovat prostřednictvím zjednodušeného DMP. Z nástřihů šíře $b = 60$ mm byly získány dva soubory /A,B/ hodnot mezních přetvoření. Rozsah obou souborů je stejný, 20 bodů. V souboru A jsou rovnoměrně zastoupeny plechy ze všech tabulí obou svitků tavby č. 26004, kromě 1. tabule ze 4. svitku č. 315986 /"41"/, z níž pochází hodnoty souboru B. Materiálové charakteristiky obou souborů ze zkoušky tahem jsou v tab. 4 a 5 přílohy 4. Mezní hodnoty přetvoření příslušné A i B byly vyhodnoceny způsobem popsáným v kap. 11.1. Porovnání výsledků je možné ze zjednodušeného DMP na obr. 12.3 a z grafů na obr. 12.4. Hodnoty mezních přetvoření odpovídající tabuli "41" jsou evidentně nižší, než činí průměr z ostatních tabulí. Naproti tomu, a to se dá předpokládat, rozptyl bodů pro kombinovaný soubor A je větší než pro soubor B z jedné tabule. Naměřené a spočtené hodnoty jsou v tab. 4.



Obr. 12.3 Konfidenční intervaly a toleranční meze pro dva různé soubory hodnot mezních přetvoření
 A - nástřihy ze všech tabulí tavby
 č. 26004 /kromě "41"/
 B - nástřihy z tabule "41"

Tab. 4 Výsledky statistického vyhodnocení obou souborů

	φ_{2s}	s_{φ_2}	φ_{1s}	s_{φ_1}	φ	s_{φ}
A	-0,141	0,0147	0,520	0,0297	0,539	0,0310
B	-0,119	0,0120	0,454	0,0254	0,469	0,0242



obr. 12.4 Křivky hustoty pravděpodobnosti a distribuční funkce pro dva soubory z obr. 12.3

12.1.4 Posouzení plošné anizotropie vlastností plechu

S ohledem na zpracovatelnost plechů mají význam nejen absolutní hodnoty jejich charakteristik /a jejich rozptyl/, ale i jejich směrové hodnoty. Anizotropie plechu je definována jako směrová závislost mechanických a fyzikálních vlastností, přičemž za výchozí směr se pokládá směr válcování. Obecně se vyskytují dva druhy anizotropie:

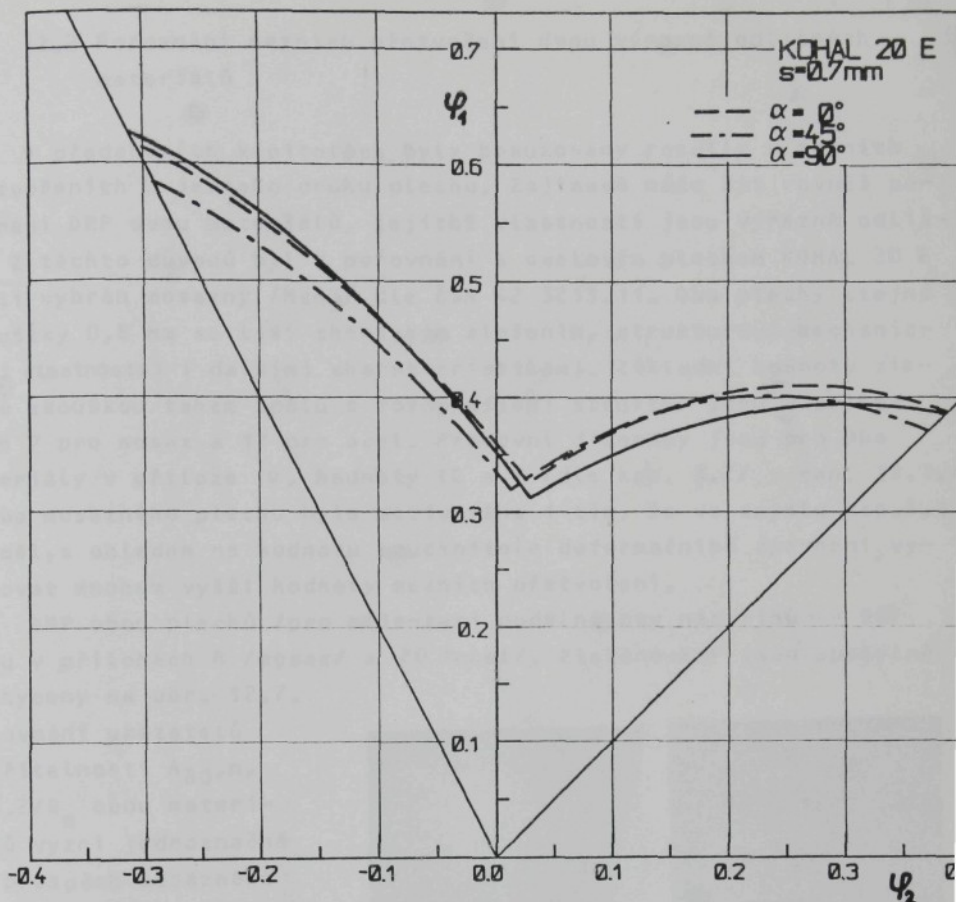
1/ normálová /viz. kap. 3.1/

2/ plošná /v rovině plechu/.

Plošná anizotropie vzniká jako důsledek strukturní a krystalografické, resp. žíhací textury. Nejčastěji se uvažuje plošná anizotropie $R_{p0,2}$, R_m , A , r , n . Pro posouzení jejího vlivu na DMP byly k základnímu datovému souboru 350ti bodů /podélná osa zkušebních těles kolmá na směr válcování, $\alpha = 90^\circ$ / vytvořeny popsanou metodou další dva soubory, a to pro orientaci $\alpha = 0^\circ$ a 45° . U obou souborů je $n = 120$, přičemž "šířka" $b = 210$ mm je společná všem třem souborům. Diagramy mezních přetvoření odpovídající těmto souborům, včetně hodnot regresních koeficientů jsou v přílohách 5 a 6. Pouze na základě rozložení bodů všech tří souborů nelze učinit jednoznačné závěry. Výrazněji se odlišnost projeví při porovnání formou KMP, které jsou pro všechny tři uvažované soubory společně na obr. 12.5. Statistickou významnost jejich odlišnosti lze posoudit prostřednictvím testu uvedeného v kap. 12.1.1. Výsledky testování jsou souhrnně v tab. 5.

tab. 5. Hodnoty testových charakteristik pro levé F_L /
a pravé F_p / větve KMP

α	F_L	F_p
$0^\circ-90^\circ$	$1,458 < F_{0,95} / 3,229 / = 2,605$ neliší se	$7,314 > F_{0,95} / 3,264 / = 2,605$ liší se
$0^\circ-45^\circ$	$11,027 > F_{0,95} / 3,114 / = 2,688$ liší se	$1,096 < F_{0,95} / 3,134 / = 2,605$ neliší se
$90^\circ-45^\circ$	$13,457 > F_{0,95} / 3,229 / = 2,605$ liší se	$7,458 > F_{0,95} / 3,264 / = 2,605$ liší se



Obr. 12.5 Křivky mezních přetvoření pro tři orientace vůči směru válcování v rovině plechu /materiálové charakteristiky souborů v tab. 1/

V levé části DMP jsou stejné hodnoty mezních přetvoření pro směry 0° a 90° a jsou vyšší než pro směr 45° . V pravé části jsou stejné hodnoty 0° a 45° a jsou výš než směr 90° .

L : $0^\circ = 90^\circ$ a $45^\circ \downarrow$, P : $0^\circ = 45^\circ$ a $90^\circ \downarrow$

Jinými slovy orientace $\alpha = 0^\circ$ vykazuje v DMP nejvyšší hodnoty mezních přetvoření a nejnižší jsou pak v levé části pro orientaci 45° a v pravé pro $\alpha = 90^\circ$.

12.2 Porovnání mezních přetvoření dvou výrazně odlišných materiálů

V předchozích kapitolách byly posuzovány rozdíly v mezních přetvořeních u jednoho druhu plechu. Zajímavé může být rovněž porovnání DMP dvou materiálů, jejichž vlastnosti jsou výrazně odlišné. Z těchto důvodů byl k porovnání s ocelovým plechem KOHAL 20 E konti vybrán mosazný /Ms63/ dle ČSN 42 3213.11. Oba plechy stejné tloušťky 0,8 mm se liší chemickým složením, strukturou, mechanickými vlastnostmi i dalšími charakteristikami. Základní hodnoty získané zkouškou tahem spolu s fotografiemi struktur jsou v přílohách 7 pro mosaz a 17 pro ocel. Pracovní diagramy jsou pro oba materiály v příloze 19, hodnoty IE a T /dle kap. 3.2/ v kap. 13.1.4. Volba mosazného plechu byla motivována i tím, že ve smyslu kap.5.1 by měl, s ohledem na hodnotu součinitele deformačního zpevnění, vykazovat mnohem vyšší hodnoty mezních přetvoření.

DMP obou plechů /pro orientaci podélné osy nástřihů $\alpha = 90^\circ$ / jsou v přílohách 8 /mosaz/ a 20 /ocel/. Získané KMP jsou společně zachyceny na obr. 12.7.

Porovnání ukazatelů tváritelnosti $A_{80,n}$, $R_{0,2}/R_m$ obou materiálů vyzní jednoznačně ve prospěch mosazného plechu. Této skutečnosti však neodpovídá poloha křivek mezních přetvoření. Ocelový plech vykazuje větší hodnoty mezních přetvoření, zejména pro $m_\phi > 0$. Poloha obou KMP koresponduje pouze s hodnotami součinitelů normálové anizotropie. U ocelového plechu jsou její hodnoty vyšší oproti mosaznému, viz. přílohy 7 a 17. Přestože hodnoty

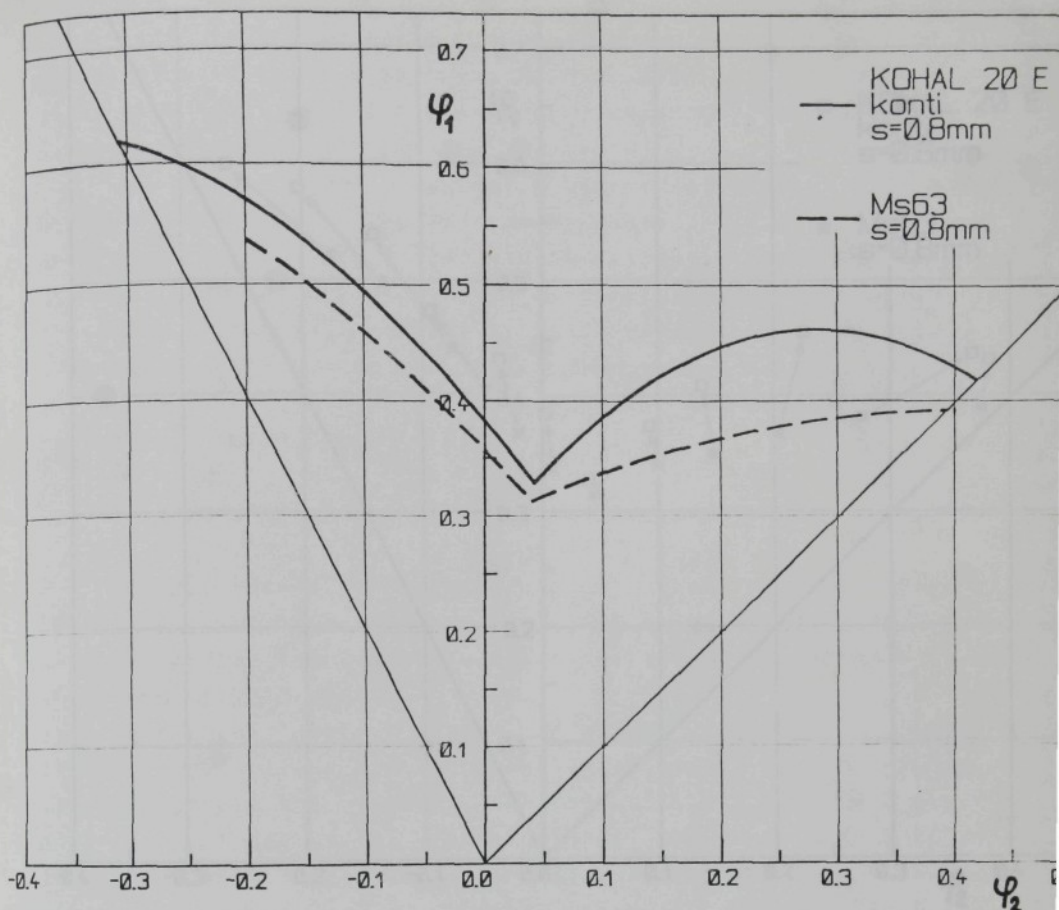


a/



b/

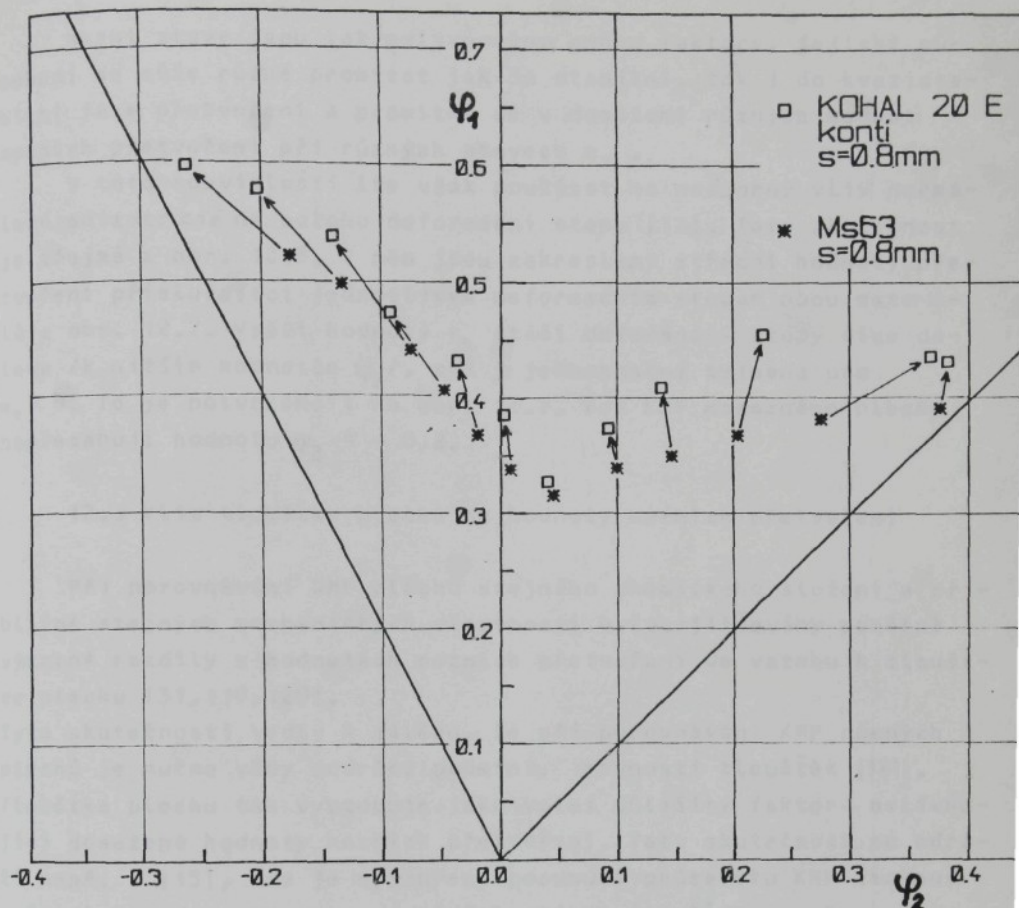
Obr. 12.6 Tvar lokálního ztenčení pro ocelový a/ a mosazný b/ plech /nástřih $b = 30$ mm/



Obr. 12.7 Porovnání křivek mezních přetvoření plechů tloušťky 0,8 mm s výrazně odlišnými vlastnostmi

r i n nebyly zjišťovány bezprostředně ve vztahu k DMP, na základě zjištěných skutečností lze dospět k obdobným závěrům jako např. v [13]. Problematika vztahu materiálových charakteristik k DMP je složitější a není stále uspokojivě vyřešena. Jejich působení není izolované, ale projevuje se v komplexu dalších významných faktorů. Jedním z nich je i citlivost materiálu na rychlost přetvoření, charakterizovaná součinitelem m dle [3.4], který je u oceli mnohem větší ($m = 0,02$) než u mosazi ($m \approx 0,0$) [118].

U mosazí je oproti oceli i mnohem větší stabilní tok materiálu a malý kvazistabilní. Tato skutečnost se projeví i v charakteru lokální zóny, obr. 12.6. U oceli je rozlehlejší, výraznější a tato fáze přetvoření trvá i mnohem déle než u mosazi. Vzhledem k její



Obr. 12.8 Vliv normálové anizotropie na polohu deformační stopy.
Střední hodnoty mezních přetvoření, reprezentované jednotlivými body spojenými šipkami, odpovídají vždy stejné šířce nástříhu

mu velice krátkému průběhu ji lze u mosazného plechu i obtížněji zachytit /ve smyslu kap. 10.2/. Stabilní tok u mosazi má klesající tendenci při růstu hodnoty m_φ a je málo vyrovnáván kvazistabilním tokem. Naopak stabilní tok u oceli při růstu m_φ oproti teoretickým předpovědím vzrůstá a v součtu s přetvořením při kvazistabilním toku je dosaženo vyšších hodnot mezních přetvoření. To mimo jiné vysvětluje i skutečnost, že při $m_\varphi = 0$ je průsečík KMP s osou φ_1 u oceli výš a u mosazi naopak níž, než odpovídá teoretickým předpokladům [99].

Mezní stavy jsou tak ovlivňovány mnoha faktory, jejichž působení se může různě promítat jak do stabilní, tak i do kvazistabilní fáze přetvoření a promítne se v dosažení různých hodnot mezních přetvoření při různých stavech m_ϕ .

V této souvislosti lze však poukázat na nesporný vliv normálové anizotropie na polohu deformační stopy [14]. Tato skutečnost je zřejmá z obr. 12.8. V něm jsou zakresleny střední hodnoty přetvoření příslušející jednotlivým deformačním stopám obou materiálů z obr. 12.7. Vyšší hodnoty r_n stáčí deformační stopy více doleva /k nižším hodnotám φ_2 /, což je jednoznačné zejména pro $m_\phi < 0$. To je potvrzeno i na obr. 12.7, kde KMP mosazného plechu nepřesahují hodnotu $\varphi_2 \hat{=} - 0,2$.

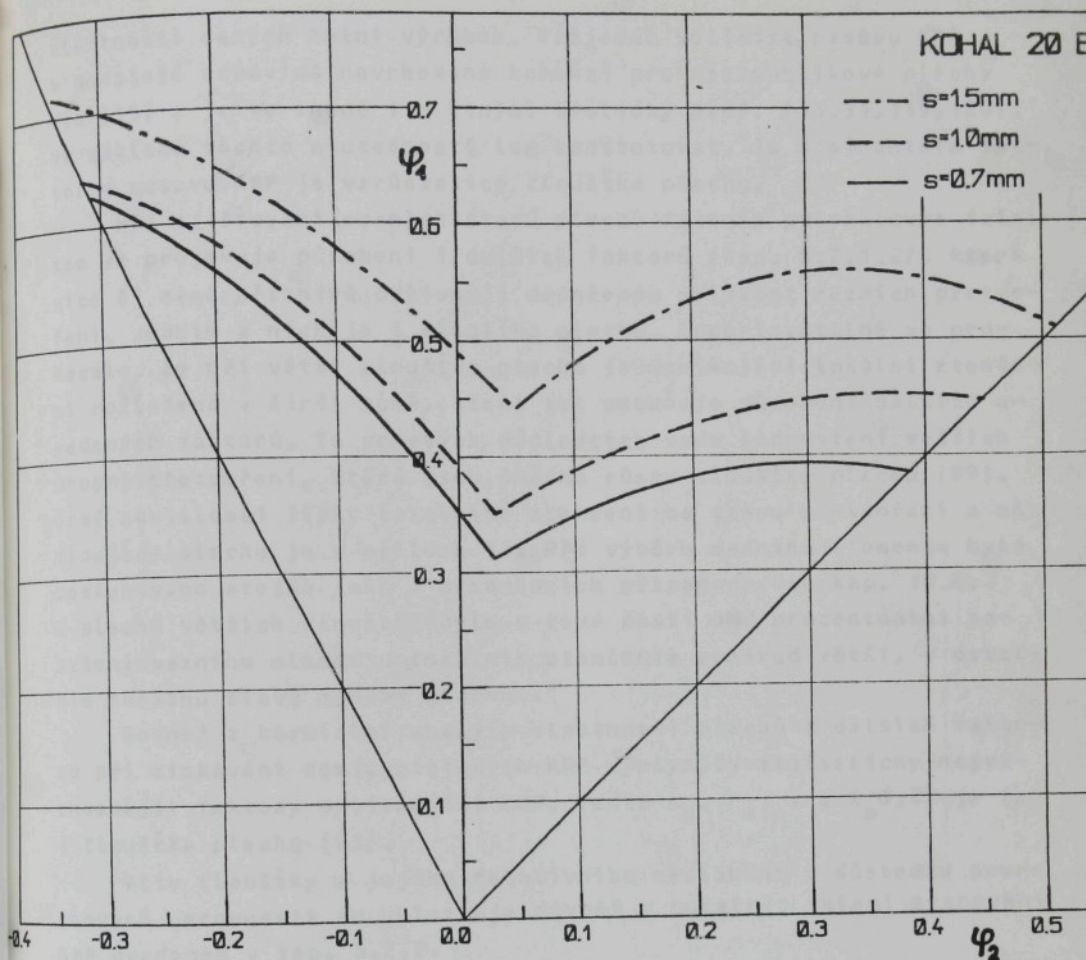
12.3 Vliv tloušťky plechu na hodnoty mezních přetvoření

Při porovnávání DMP plechů stejného chemického složení a přibližně stejných mechanických vlastností byly zjišťovány poměrně výrazné rozdíly v hodnotách mezních přetvoření ve vztahu k tloušťce plechu [31,119,120].

Tyto skutečnosti vedly k závěru, že při porovnávání KMP různých plechů je nutno vždy dodržet podmínku rovnosti tloušťek [121]. Tloušťka plechu tak vystupuje jako velmi důležitý faktor ovlivňující dosažené hodnoty mezních přetvoření. Tato skutečnost se odráží např. v [15], kde je vyjádřeno posunutí průřezu KMP získané početní metodou s osou φ_1 v závislosti na tloušťce plechu a součiniteli n .

K posouzení velikosti vlivu tloušťky plechu na dosažená mezní přetvoření byly zvoleny plechy tří různých tloušťek 0,7, 1,0 a 1,5 mm stejné obchodní kvality KOHAL 20 E. Základní hodnoty jejich charakteristik jsou v tab. 1 pro tl. 0,7 mm a pro ostatní tloušťky v příloze 11. Fotografie charakteristických struktur plechů všech tří tloušťek jsou v příloze 12. Získané DMP /orientace podélné osy zkušebních těles $\alpha = 90^\circ$ jsou pro tl. 0,7 mm na obr. 11.5 a pro tl. 1,0 a 1,5 mm v přílohách 13 a 14. Křivky mezních přetvoření pro všechny tři plechy jsou souhrnně zachyceny na obr. 12.9. Z něho je patrné, že se zvětšující se tloušťkou plechu se příslušná KMP posouvá k větším hodnotám přetvoření.

Tloušťka 1,0 mm je zhruba o 50 % větší než 0,7 mm a odpovídá jí posuv KMP na ose $\varphi_1 / \varphi_2 = 0 /$ o 11 % resp. v maximu právě větve KMP o 14%. Tloušťka 1,5 mm je rovněž o 50% větší než 1,0 mm,



Obr. 12.9 Křivky mezních přetvoření pro tři tloušťky plechu
KOHAL 20 E

ale odpovídá jí posuv KMP o 25,2 % /resp. o 24,6 %/.

Posuv KMP k vyšším hodnotám přetvoření může být tak do určité míry způsoben v prvním případě i větší hodnotou součinitele normálové anizotropie /jiné ukazatele např. zásoba plastičnosti, kap.3.1, hovoří však v neprospěch plechu s vyšší KMP/, ve druhém pak větší hodnotou součinitele deformačního zpevnění /v neprospěch plechu s vyšší KMP pak hovoří např. hodnoty normálové anizotropie/.

Vzhledem k daným možnostem výběru materiálů nebylo možné zaručit stejné charakteristiky všech plechů, pouze stejnou obchodní kvalitu výběrem plechů jednoho druhu, KOHAL 20 Extra, s obvyklým rozptylem

vlastností daných hutní výrobou. Vzájemná velikost posuvu KMP v podstatě odpovídá navrhované korekci pro nízkouhlikové plechy dle [15] a je ve shodě i s jinými výsledky např. [13, 31, 119, 120]. Na základě těchto skutečností lze konstatovat, že dominantním faktorem posuvu KMP je vzrůstající tloušťka plechu.

Při zjišťování mezních stavů plechů tažením polokulovým tažníkem se projevuje působení i dalších faktorů /kap. 5.2.1.2/, které více či méně příznivě ovlivňují dosaženou velikost mezních přetvoření. Jedním z nich je i tloušťka plechu. Experimentálně se prokázalo, že při větší tloušťce plechu je vznikající lokální ztenčení rozloženo v širší zóně, která tak umocňuje působení dalších uvedených faktorů. To ve svých důsledcích vede k dosažení vyšších úrovní přetvoření, která jsou úměrná růstu tloušťky plechu [99]. Graf závislosti šířky lokálního ztenčení na stavu přetvoření a na tloušťce plechu je v příloze 11. Při výběru mezního elementu bylo postupováno stejně jako v předchozích případech dle kap. 10.2. U plechů větších tlouštěk bylo v levé části DMP procentuální zasažení mezního elementu lokálním ztenčením poněkud větší, v ostatním rozsahu stavů m_{ϕ} pak obdobné.

Rovněž z korelační analýzy vlastností plechů a dalších faktorů při získávání semiempirických KMP vyplynuly statisticky nejvýznamnější faktory ovlivňující KMP. Vedle n_s , $r_{\min}$ a $R_{p0,2}$ je to i tloušťka plechu [95].

Vliv tloušťky a jejího relativního zeslabení v důsledku povrchových nerovností se uplatňuje rovněž v početním řešení stanovení KMP uvedeném v kap. 5.2.2.

Obdobné zákonitosti byly zjištěny i v případě mosazných plechů, jejichž DMP jsou v přílohách 8, 9, 10 /jejich charakteristiky ze zkoušky tahem a struktury jsou v příloze 7/.

12.4. Vliv technologických podmínek provádění zkoušky na mezní přetvoření

Hodnoty mezních přetvoření jsou ovlivněny nejen způsobem jejich definování, tvarem zkušebních těles, charakterem použité deformační sítě a vlastnostmi zkoumaného plechu, ale i technologickými podmínkami provádění zkoušky. K posledně jmenovaným se řadí především rychlost přetvoření, podmínky tření, ale i odchylky od

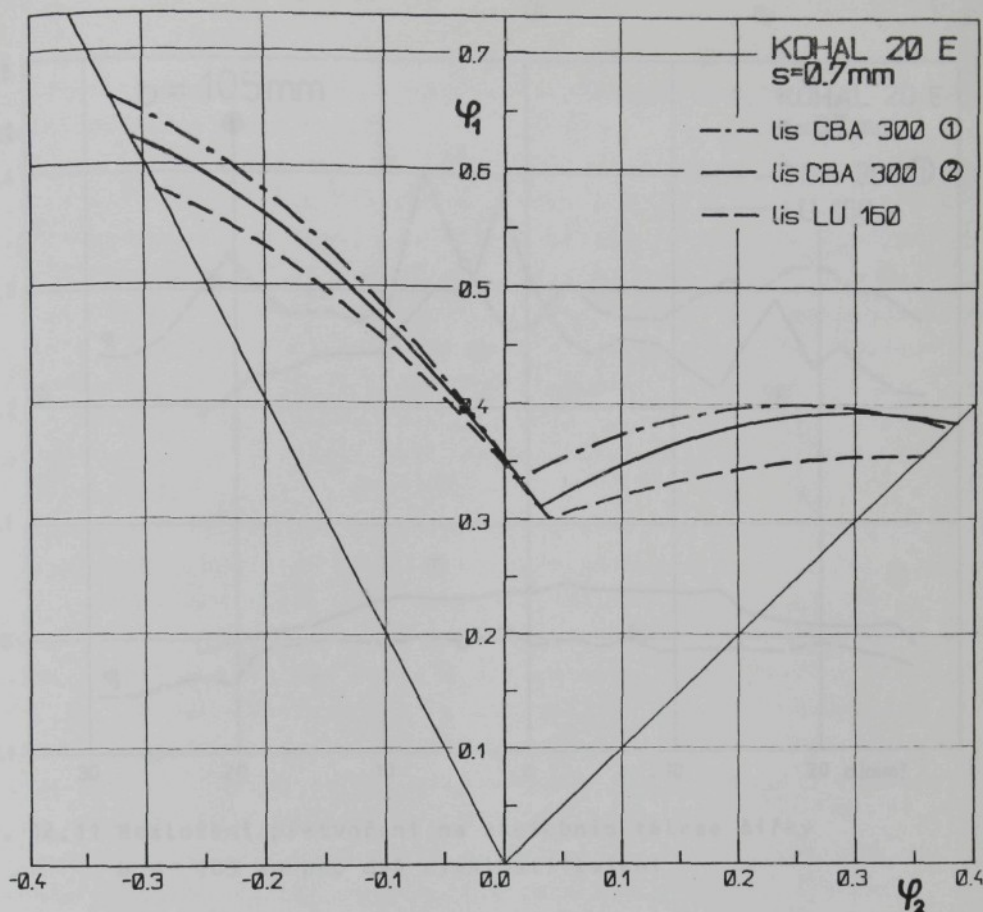
prostého zatěžování čili historie přetvoření /tvar deformační stopy/. Na míru ovlivnění diagramu mezních přetvoření těmito faktory lze usuzovat např. prostřednictvím změn polohy a tvaru křivek mezních přetvoření v návaznosti na změny technologických podmínek tažení [106, 118, 122, 123]. Charakteristiky použitého plechu /kap. 12.4.1 až 12.4.3/ jsou v tab. 1 na str. 84.

12.4.1 Vliv rychlosti přetvoření

Různých rychlostí přetvoření bylo dosahováno různými rychlostmi pohybu tažníku. Volba těchto rychlostí byla dána možnostmi strojového vybavení katedry tváření a plastů VŠST. K dispozici byl univerzální tažný nástroj umístěný na lisu LU 160, obr. 8.1. Rychlost pohybu tažníku je $v_3 \doteq 273 \text{ mms}^{-1}$ na počátku tažení a klesá na nulovou hodnotu v dolní úvrati beranu. Jako protipříklad bylo možno využít rychlosti tažení $v_1 \doteq 0,208 \text{ mms}^{-1}$ dosahované v jednoúčelovém tažném nástroji dle obr. 8.7, umístěném na lisu CBA 300. Touto rychlostí trvá zkouška poměrně dlouho a během tažení se vytlačí u plných nástřihů $b = 210 \text{ mm}$ podstatná část maziva. V důsledku zhoršených podmínek tření je velice obtížné vytáhnout zkušební těleso tak, aby lom vznikl na vrcholu sféry $/m_\varphi \rightarrow 1/$. Z těchto důvodů byly tyto mezní stavy získány zkouškou hydraulickou. Vzhledem k tomu, že tažníky obou nástrojů /obr. 8.1 a 8.7/ mají jiný průměr, 78 mm resp. 100 mm, byl vyroben nový tažník $\varnothing d = 100 \text{ mm}$ se zakončením ve tvaru elipsoidu tak, aby křivost ve vrcholové části obou tažníků byla stejná $/r = 39 \text{ mm}/$.

Diagram mezních přetvoření získaný rychlostí v_3 je v příloze 15, DMP pro rychlost v_1 /označen ①/ je v příloze 16. KMP získané při obou rychlostech spolu s KMP dle obr. 11.5, zde označenou ②, jsou na obr. 12.10.

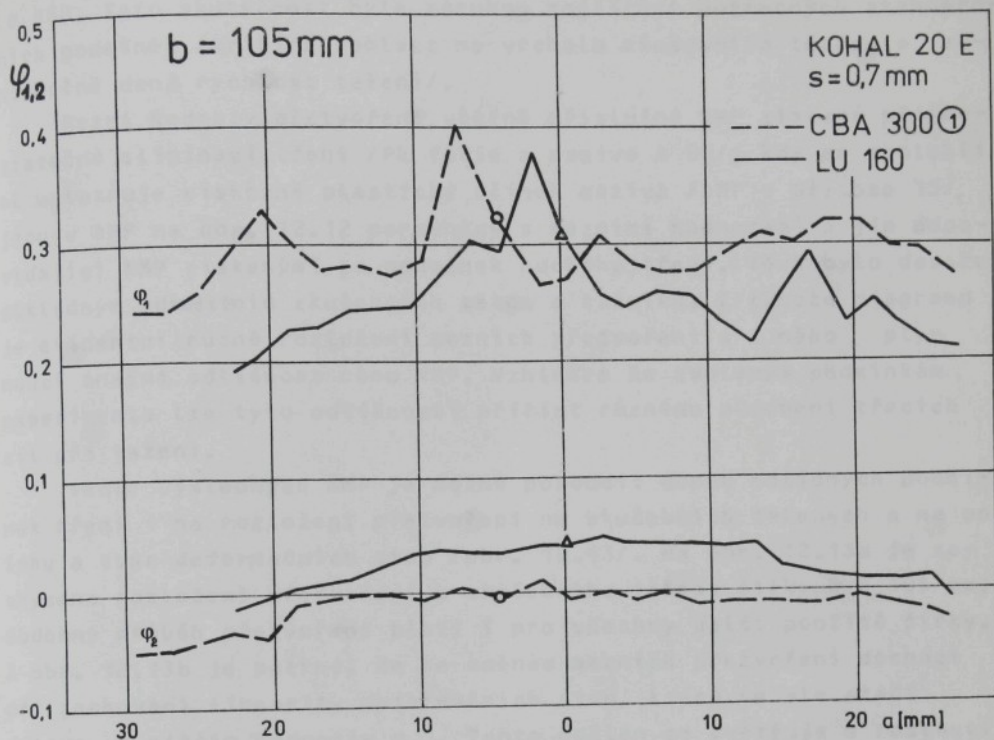
Z tohoto diagramu je zřejmé, že charakter KMP je obdobný ve všech třech případech, ale s rostoucí rychlostí tažení se posouvá příslušná KMP k nižším hodnotám ve směru osy φ_1 . V oblasti rovinného přetvoření $/\varphi_2 = 0/$ jsou KMP téměř totožné. Výrazně se dále projevuje posun minima křivek mezních přetvoření, kdy se se zmenšující rychlostí přetvoření posouvá nejen k vyšším hodnotám ve směru osy φ_1 , ale i k nižším hodnotám m_φ .



Obr. 12.10 Křivky mezních přetvoření získané při různých rychlostech tažení / ① $v_1 \doteq 0,208 \text{ mms}^{-1}$, ② KMP získaná dle kap. 8, pro LU 160 je $v_3 \doteq 273 \text{ mms}^{-1}$ /

Charakter rozložení přetvoření na zkušebním tělese šířky $b = 105 \text{ mm}$ /odpovídá minimu KMP/ je zřejmý na obr. 12.11. Obdobný průběh vykazují i přetvoření na zkušebních tělesech ostatních šířek.

Z obr. 12.10 je zřejmé, že rychlost tažení /přetvoření/ významným způsobem ovlivňuje mezní přetvoření a její vliv je nutno brát v úvahu.



Obr. 12.11 Rozložení přetvoření na zkušební tělese šířky $b = 105$ mm pro dvě rychlosti tažení

12.4.2 Vliv podmínek tření

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 popsanych v kap. 10. S růstem třecích sil tak vzrůstá význam znalosti celkového rozložení přetvoření, definice mezního stavu a způsob jeho určování [13,99,106,119,124].

Mezní stavy přetvoření pro různé podmínky tření byly získány pomocí univerzálního tažného nástroje /obr. 8.1/ umístěném na lisu

LU 160. Tato skutečnost byla zárukou zajištění potřebných standardních podmínek /kritická oblast na vrcholu zkušebního tělesa a jednoznačně daná rychlost tažení/.

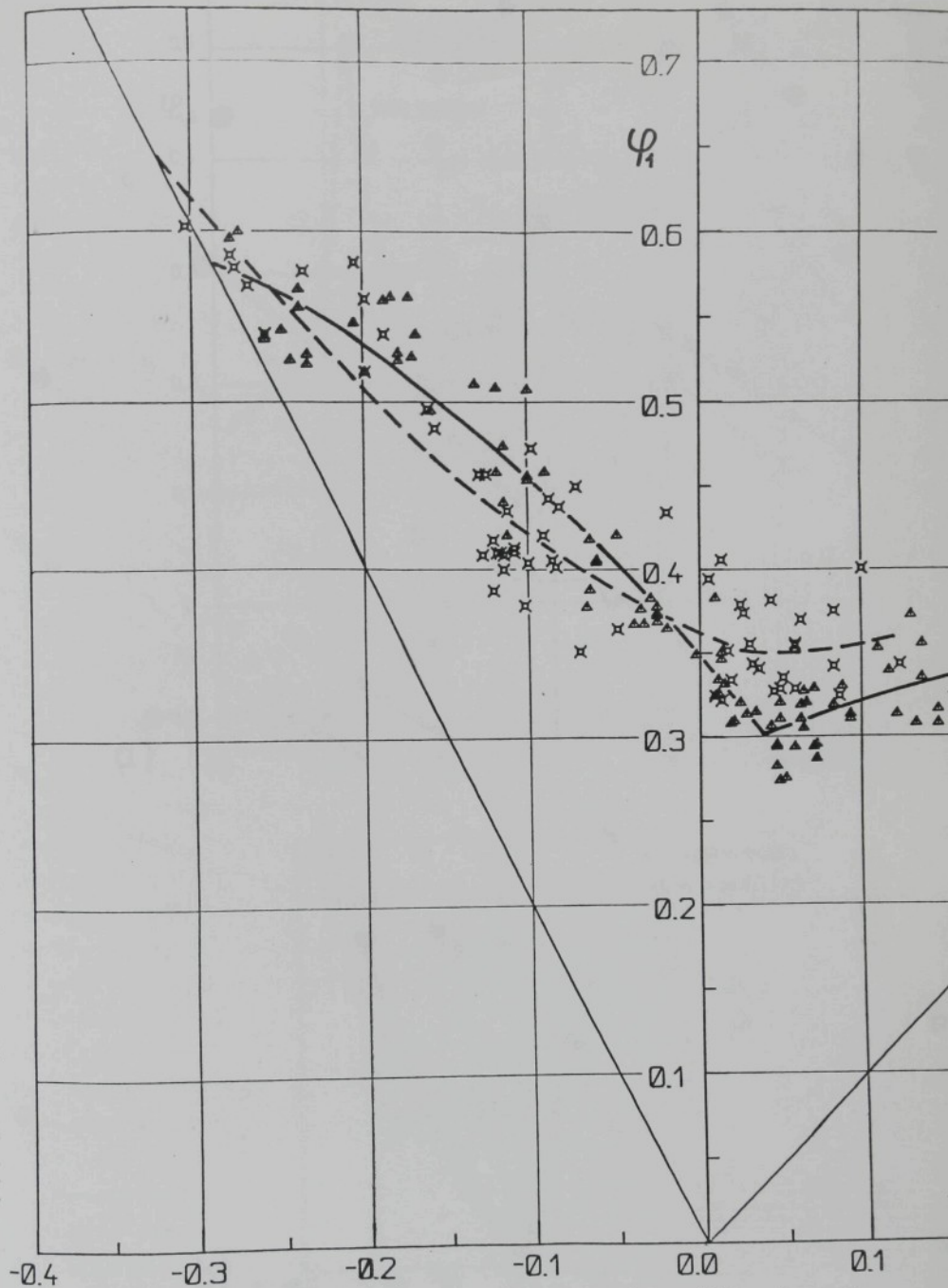
Mezní hodnoty přetvoření, včetně příslušné KMP, získané při dostatečné eliminaci tření /PE folie a mazivo A 00/, kdy se spolehlivě uplatňuje viskózně plastický účinek maziva /DMP v příloze 15/, jsou v DMP na obr. 12.12 porovnány s mezními hodnotami a jim odpovídající KMP získanými za podmínek suchého tření. Těch bylo dosaženo důkladným odmaštěním zkušebních těles a tažníku. Z tohoto diagramu je evidentní různé rozložení mezních přetvoření a z něho plynoucí značná odlišnost obou KMP. Vzhledem ke zvoleným podmínkám experimentu lze tyto odlišnosti přičíst různému působení třecích sil při tažení.

Vedle výsledných KMP je možné posoudit dopad odlišných podmínek tření i na rozložení přetvoření na zkušebních tělesech a na polohu a tvar deformačních stop /obr. 12.13/. Na obr. 12.13a je zachyceno rozložení přetvoření u zkušebního tělesa šířky $b = 105$ mm. Obdobný průběh přetvoření platí i pro všechny další použité šířky. Z obr. 12.13b je patrné, že ke změnám mezních přetvoření dochází při zachování linearit deformačních stop, které se ale stáčí doleva, k nižším hodnotám m_{φ} . Tento odklon se zvětšuje s rostoucí šířkou zkušebních těles, úměrně růstu třecích sil.

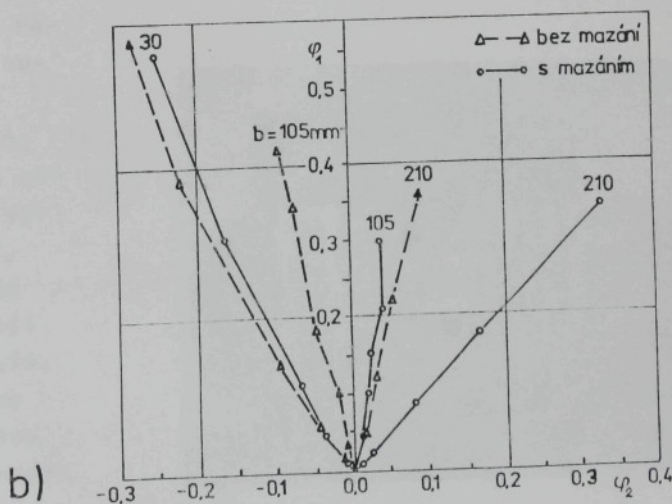
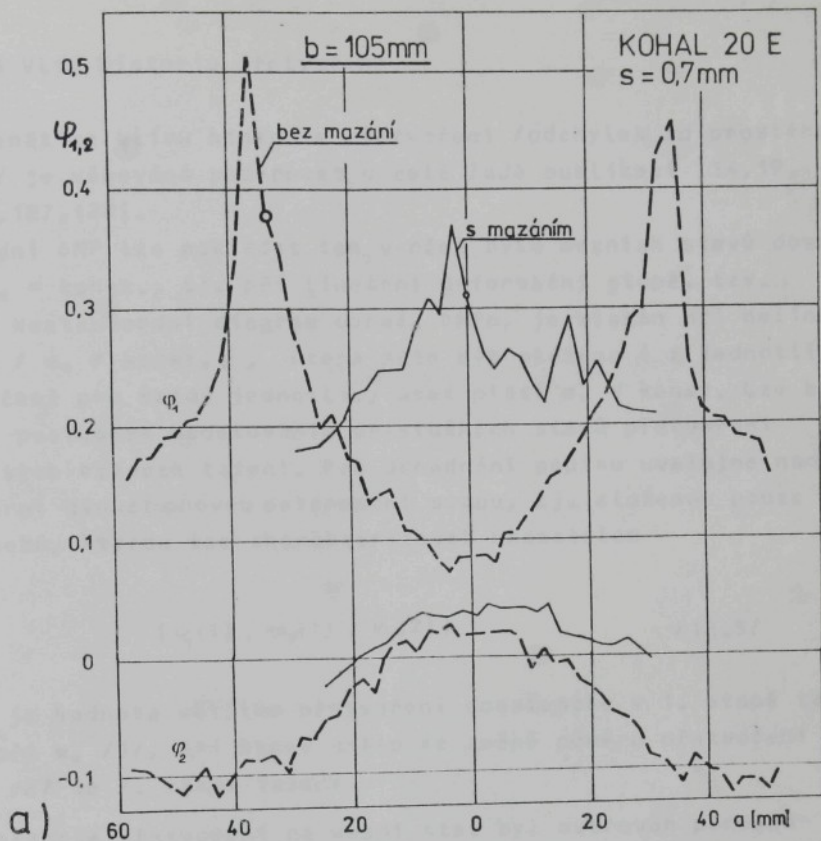
Podmínky tření vystupují při experimentálním určování DMP jako velice důležitý faktor ovlivňující dosažená mezní přetvoření. Na rozdíl od vlivu rychlosti přetvoření se naopak faktor tření uplatňuje nejvíce ve střední části DMP a mění i charakter průběhu KMP.

Tab. 6 Regresní koeficienty KMP "bez mazání"
z obr. 12. 12

KMP	b_1	b_2	b_3	s_R
L	0,3628	-0,4600	1,3071	0,0328
P	0,3559	-0,2128	2,0983	0,0226



obr. 12.12 Hodnoty mezních přetvoření spolu s KMP získané při různých podmínkách tření



Obr. 12.13 Vliv faktoru tření na rozložení přetvoření a/ a polohu a tvar deformačních stop b/ pro vybrané šířky zkušebních těles

12.4.3 Vliv historie přetvoření

Problematicke vlivu historie přetvoření /odchylek od prostého zatěžování/ je věnována pozornost v celé řadě publikací [14, 19, 20, 125, 126, 127, 128].

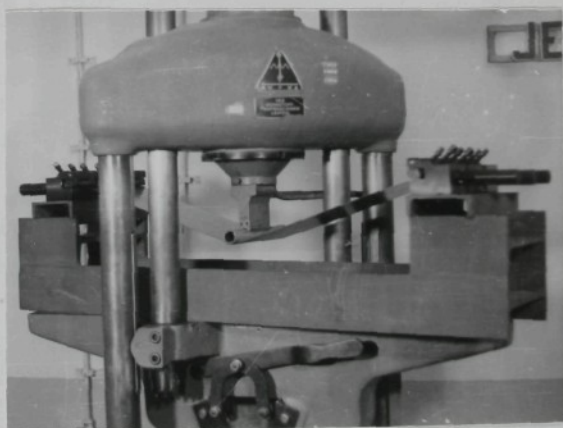
Za standardní DMP lze pokládat ten, v němž bylo mezních stavů dosaženo při $m_\varphi = \text{konst.}$, tj. při lineární deformační stopě, tzv. DMP /lds/. Nestandardní diagram označ. DMPn, je získán při nelineární stopě / $m_\varphi \neq \text{konst.}$ / , která může být složena i z jednotlivých úseků, přičemž pro každý jednotlivý úsek platí $m_\varphi = \text{konst.}$ Lze ho tak 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

$$(\varphi_1, m_\varphi(1), m_\varphi(2)) \quad /12.5/$$

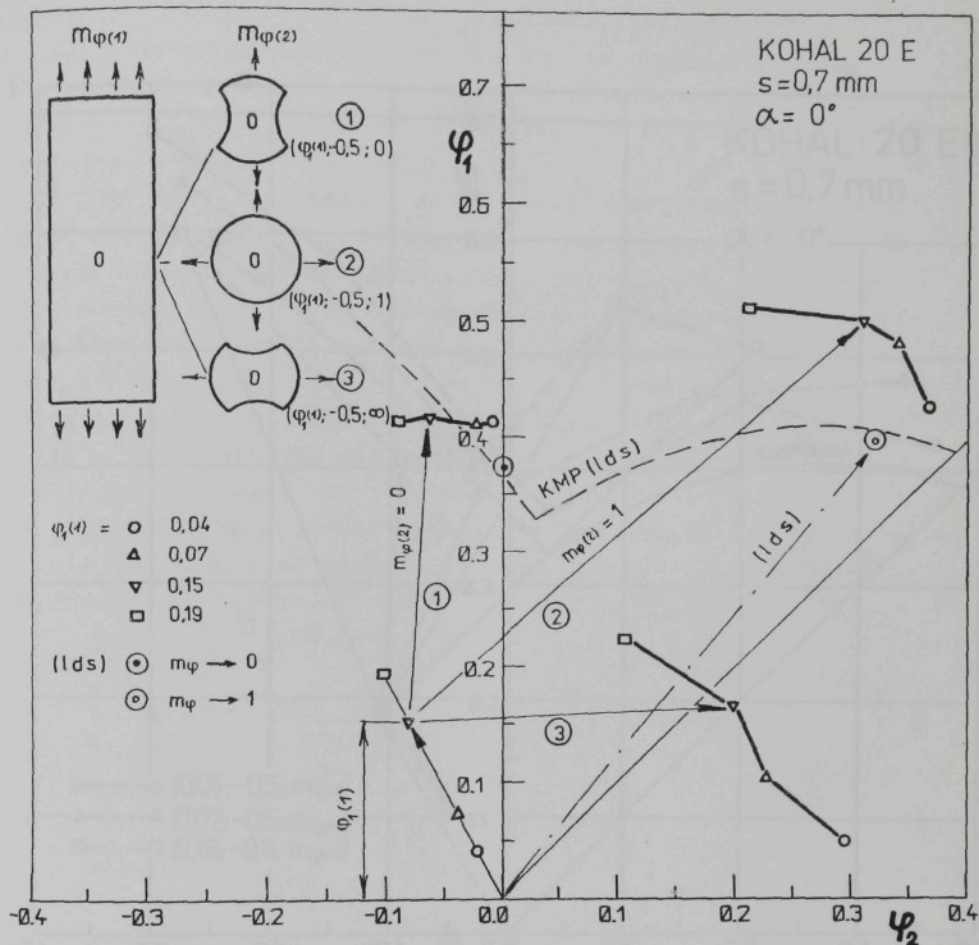
kde φ_1 /1/ je hodnota většího přetvoření dosaženého v 1. etapě tažení při m_φ /1/, při které došlo ke změně poměru přetvoření na m_φ /2/ ve 2. etapě tažení.

Vliv trajektorie přetvoření na mezní stav byl ověřován porovnáním mezních přetvoření dosažených při lineární a nelineární deformační stopě. Nelineární dvoustupňová stopa typu / φ_1 /1/, -0,5, m_φ /2// byla modelována pomocí přípravku vyrobeného na KPT, který je umístěn na trhačím stroji ZDM 50, obr. 12.14.

Pomocí něho se dosáhne u pásu plechu předdeformace φ /1/ při m_φ /1/ = -0,5. Druhý úsek deformační stopy je realizován

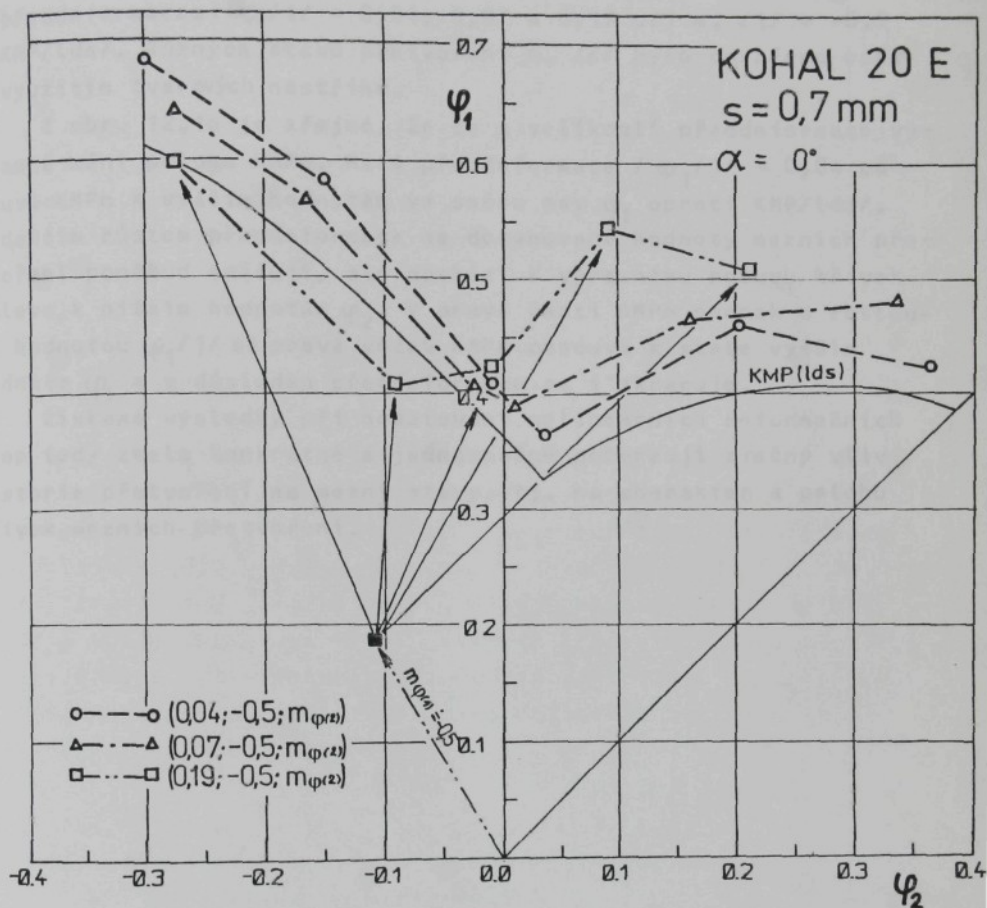


Obr. 12.14 Přípravek pro předdeformaci $m_\varphi = -0,5$ na trhačím stroji ZDM 50



Obr. 12.15 Mezní přetvoření pro lineární a některé typy nelineárních deformačních stop /charakteristika plechu viz. tab.1/

pomocí tvarových nástřihů metodikou popsanou v kap. 8 až 10 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 $/lds/$ představované příslušnou KMP $/lds/$ z přílohy 5 jsou na obr. 12.15. Z tohoto obr. vyplývá, že podle charakteru deformační stopy $/historie\ zatěžování/$ lze dosáhnout vyšších i nižších mezních stavů vyjádřených konečnými hodnotami $\varphi_{2k}, \varphi_{1k}$, ve srovnání s případem, kdy je $m_{\varphi} = \text{konst.}$ během celého procesu tažení $/KMP/lds/$.



Obr. 12.16 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//
 /charakteristika plechu viz. tab. 1/

vliv historie přetvoření na KMP je patrný z obr. 12.16, kde jsou porovnány KMPn odpovídající nelineárním dvoustupňovým stopám s předdeformacemi $\varphi_1/1/ = 0,04, 0,07$ a $0,19$ při $m_\varphi/1/ = -0,5$ s KMP/lđs/. Různých stavů přetvoření $m_\varphi/2/$ bylo dosaženo opět s využitím tvarových nástřihů.

Z obr. 12.16 je zřejmé, že se s velikostí předdeformace významně mění poloha KMPn. Malá předdeformace $\varphi_1/1/ = 0,04$ posouvá KMPn k vyšším hodnotám ve směru osy φ_1 oproti KMP/lđs/. S dalším růstem předdeformace se dosahované hodnoty mezních přetvoření poněkud snižují, ale dochází k výraznému posuvu křivek doleva, k nižším hodnotám φ_2 . V pravé části DMPn naopak s rostoucí hodnotou $\varphi_1/1/$ se pravá větev KMPn posouvá k stále vyšším hodnotám φ_1 a v důsledku předdeformace se i zkracuje.

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.

13. MOŽNOSTI APLIKACE A DALŠÍHO VYUŽITÍ NAVRŽENÉ METODIKY EXPERIMENTÁLNÍHO URČENÍ D M P

Z cílů stanovených v kap. 7 vyplynuly metody řešení problematiky, jež jsou zpracovány v kap. 8, 9, 10 a 11. V kap. 12 byly uvedeny některé poznatky dosažené s využitím navržené metodiky. Další možnosti aplikace jsou obsahem této kapitoly.

13.1 Hodnocení plastičnosti plechů prostřednictvím diagramů mezních přetvoření

Z předchozích kapitol vyplývá výhodnost hodnocení plastických vlastností plechů prostřednictvím experimentálně stanovených diagramů mezních přetvoření. Takový způsob hodnocení se vzhledem k složitosti této problematiky, ve vztahu k výliskům nepravidelných tvarů, jeví dosud jako nejkomplexnější. Za tím účelem by bylo výhodné blíže definovat křivku mezních přetvoření tak, aby její definice svým charakterem více odpovídala přijaté definici plastičnosti /kap. 2.3/. Tedy přímo definovat křivku mezních přetvoření jako křivku plastičnosti.

13.1.1 Definice křivky mezních přetvoření jako křivky plastičnosti

Plastičnost je dle kap. 2.3 chápána jako vlastnost podmíněná mnoha činiteli. Jedním z nich je i napjatost. Vzhledem k rozmanité napjatosti vyskytující se při tažení výlisků nepravidelných tvarů, musí nutně i definice plastičnosti plechů vliv této různorodosti stavů napjatosti zahrnovat. S ohledem na možnost porovnání kvalitativního vlivu napjatosti na plastičnost /prostřednictvím prostoroového diagramu/ je vhodné uvažovat poměrné veličiny příslušných napětí, zahrnující všechny tři složky napětí ve dvou proměnných. Těmi mohou být např. poměrné aktaedrické normální napětí α_n dané vztahem /13.1/

$$\alpha_{\sigma} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3|\sigma_{\max}|}, \quad \alpha_{\sigma} \in \langle -1, 1 \rangle \quad /13.1/$$

a ukazatel stavu napjatosti v_{σ} dle vztahu

$$v_{\sigma} = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \quad v_{\sigma} \in \langle -1, 1 \rangle. \quad /13.2/$$

Bližší představu o klasifikaci plastičnosti ve vztahu k obecné napjatosti jednoznačně charakterizované veličinami α_{σ} a v_{σ} poskytne diagram poměrných hlavních napětí [37]. Každému bodu v rovině $\alpha_{\sigma} - v_{\sigma}$ lze přiřadit pořadnici vyjadřující v určitém měřítku velikost některého ukazatele plastičnosti /Tzv. jednoduchou plastičnost/. Mírou jednoduché plastičnosti může být např. mezní hodnota intenzity přetvoření stanovená dle zvoleného kritéria. Pro všechny možné stavy napjatosti koncové body pořadnic vytvoří prostorovou plochu plastičnosti danou rovnicí

$$\varphi_{ik} = f(\alpha_{\sigma}, v_{\sigma}, M) \quad /13.3/$$

kde M zahrnuje materiálové vlastnosti spoluurčující velikost φ_{ik} přidanych teplotně-rychlostních podmínkách.

Popsaným způsobem sestrojený prostorový diagram se může stát východiskem pro objektivní hodnocení plastičnosti. Prostorová plocha plastičnosti v diagramu určuje tzv. celkovou plastičnost, která je dána objemem pod touto plochou

$$\Pi = \int_{\alpha_{\sigma}=-1}^1 \int_{v_{\sigma}=-1}^1 \varphi_{ik} d\alpha_{\sigma} dv_{\sigma} \quad /13.4/$$

a to pro dané teplotně-rychlostní podmínky přetvoření, chemické složení a určitý strukturální stav materiálu. Tato geometrická představa umožní snadno stanovit i tzv. průměrnou plastičnost, kterou s ohledem na /13.4/ lze stanovit takto

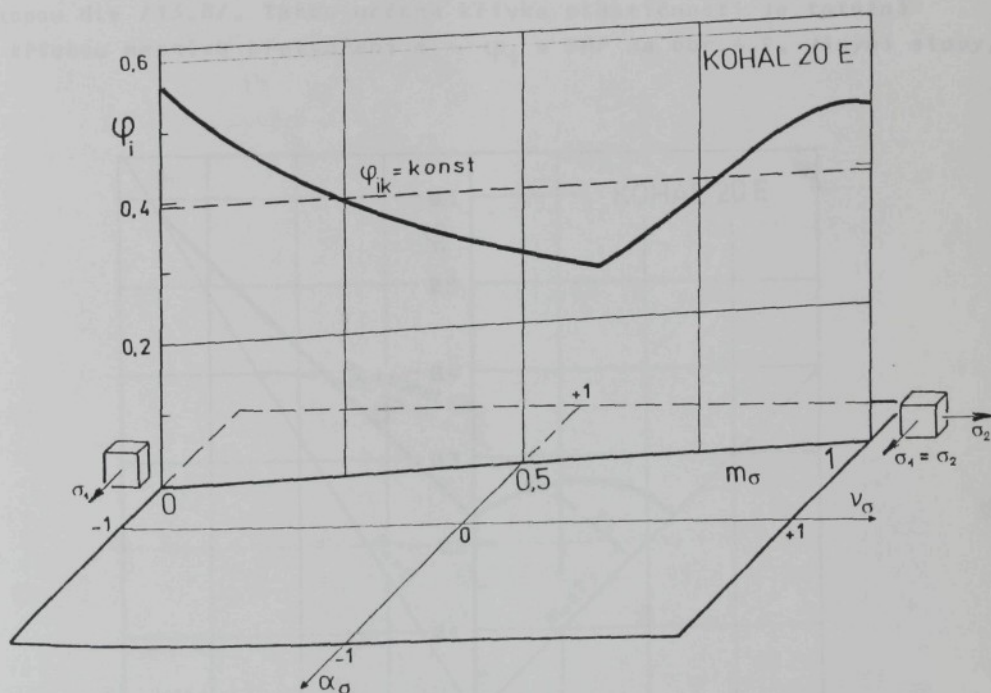
$$\bar{\Pi} = \frac{\Pi}{4} \quad /13.5/$$

Rovina průměrné plastičnosti tak omezuje prostorový útvar stejného objemu jako je pod plochou plastičnosti. Průměrná plastičnost charakterizuje při daných podmínkách celkově plastické vlastnosti materiálu a není závislá na okamžitém stavu napjatosti.

Pro aplikaci tohoto přístupu při hodnocení plastičnosti plechů, kdy se uplatní rovinná napjatost, lze s použitím /4.2/ upravit vztahy /13.1/ a /13.2/ na

$$\alpha_{\sigma} = \frac{1}{3} (1 + m_{\sigma}) \quad /13.6/$$

$$v_{\sigma} = 2 m_{\sigma} - 1. \quad /13.7/$$

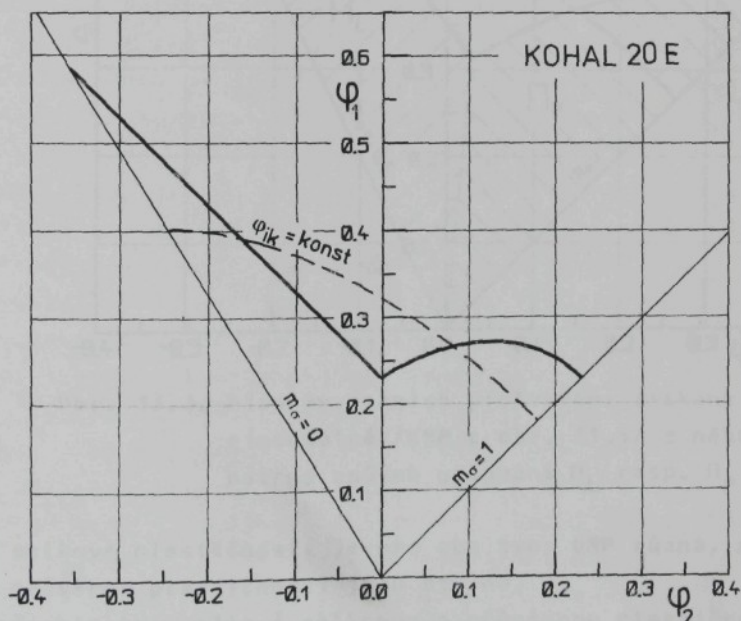


Obr. 13.1 Diagram poměrných hlavních napětí. Intenzita přetvoření spočtena pomocí materiálových charakteristik /tab. 1/ dle /5.11/ a /5.16/

stavy napjatosti charakterizované ukazatelem m_σ , při kterých dochází při tažení výlisků ke ztrátě stability a k porušení soudržnosti plechu, budou v diagramu poměrných hlavních napětí, obr. 13.1, ležet na přímce určené rovnicí /13.8/, jež plyne ze vztahů /13.6/ a /13.7/,

$$\alpha_\sigma = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} v_\sigma \quad /13.8/$$

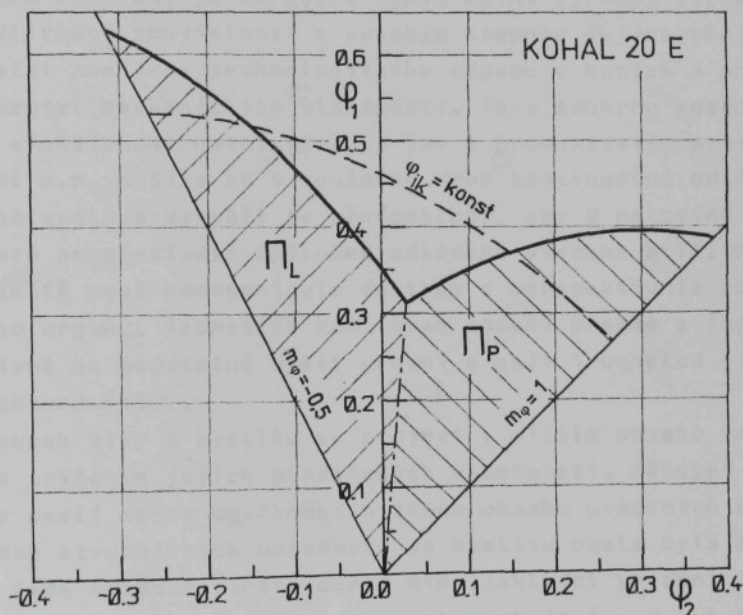
Koncové body pořadnic φ_{ik} vytvoří křivku plastičnosti, jež je v podstatě daná pronikem pomyslné prostorové plochy plastičnosti s rovinou kolmou na rovinu $\alpha_\sigma - v_\sigma$, jejíž stopa je určena rovnicí /13.8/. Plocha pod křivkou plastičnosti pak dává hodnotu celkové plastičnosti. Průměrná plastičnost je představována přímkou $\varphi_{ik} = \text{konst.}$, jejíž vzdálenost od základy odpovídá průměrné výšce pořadnic křivky plastičnosti nad stopou dle /13.8/. Takto určená křivka plastičnosti je totožná s křivkou mezních přetvoření $m_\sigma - \varphi_i$ v DMP na obr.4.2. Jinými slovy,



Obr. 13.2 Diagram mezních přetvoření, v němž čárkovaná křivka představuje průměrnou plastičnost. KMP je spočtena, obdobně jako předchozí /obr. 13.1/, dle /5.21/ a /5.22/

k ř i v k a m e z n í c h p ř e t v o ř e n í j e s h o -
 ra uvedeným postupem definována jako k ř i v k a p l a s -
 t i č n o s t i .

V kap. 4 byl definován diagram mezních přetvoření v souřad-
 nicích $\varphi_2 - \varphi_1$. Jednotlivé stavy napjatosti, v něm rovněž cha-
 rakterizované ukazatelem m_σ , jsou v podobě paprsků $m_\sigma = \text{konst.}$
 vycházejících z počátku souřadného systému. Mezní přetvoření jsou
 tak i v tomto případě funkcí napjatosti. Analogicky s předchozím
 případem pro proměnnou m_σ plocha vymezená KMP a stopami $m_\sigma = 0$
 resp. $m_\sigma = 1$ rovněž odpovídá celkové plastičnosti. Průměrná plas-
 tičnost je představována elipsou $\varphi_{ik} = \text{konst.}$, která mezi stej-
 nými stopami ohraničuje plochu odpovídající celkové plastičnosti,
 obr. 13.2.



obr. 13.3. Diagram mezních přetvoření získaný expe-
 rimentálně /KMP z obr. 11.5/ z něhož je
 patrný způsob určování Π_L resp. Π_P

Hodnota celkové plastičnosti je pro oba typy DMP různá, avšak
 hodnoty průměrné plastičnosti jsou stejné.

Tímto způsobem lze určit i celkovou a průměrnou plastičnost
 plechů charakterizovaných experimentálně určenými DMP, obr.
 13.3. Z hlediska praktického využití je výhodné stanovit
 plastičnost zvlášť pro levou / Π_L / a pravou / Π_P / část DMP

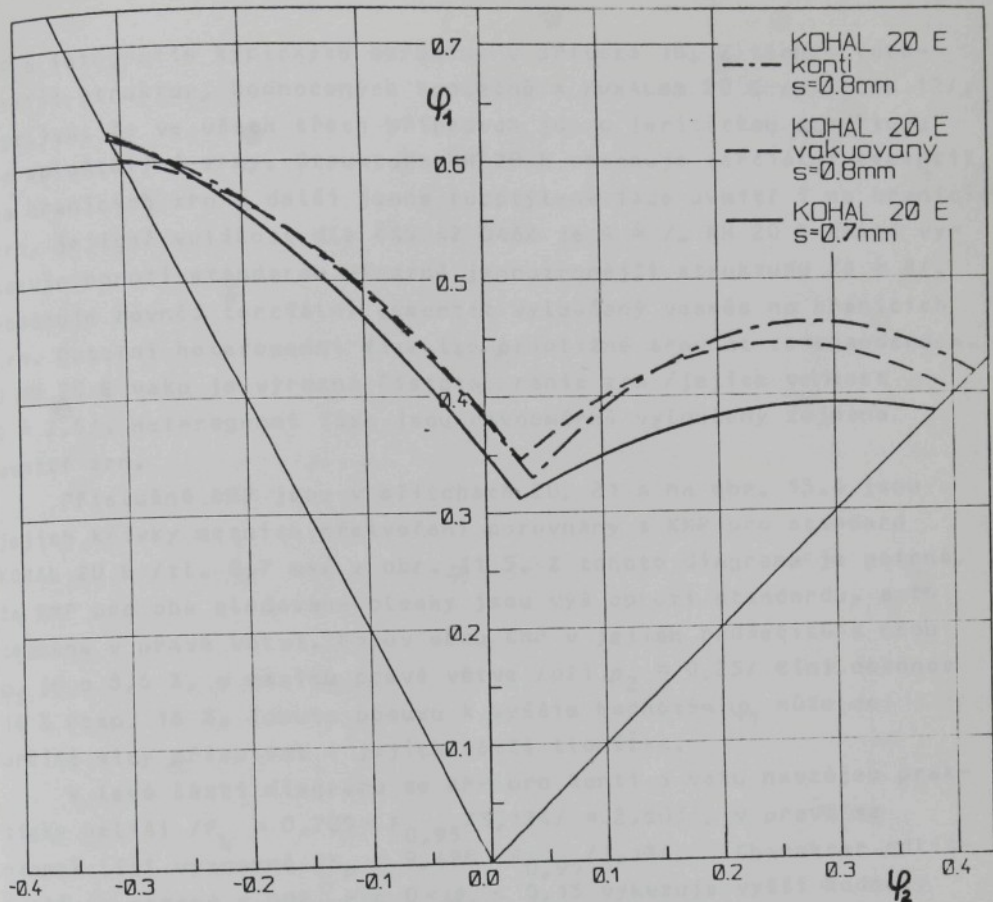
celková plastičnost je $\Pi = \Pi_L + \Pi_P$. Hranice mezi nimi je dána deformační stopou procházející minimem KMP dle obr. 13.3.

13.1.2 Posouzení plastičnosti plechů vyráběných novými hutními technologickými postupy

K těmto technologiím se bezesporu řadí kontinuální odlévání Bram pro válcování plechů a vakuové odplynění tekuté oceli.

Při kontinuálním lití se ocel plynule odlévá do krystalizátoru /odpadá manipulace s kokilami/, z něhož vychází brama délky úměrné množství použité tekuté oceli. Předností tohoto způsobu odlévání je zkrácení cyklu hutní výroby, zvýšení jakosti předlitků v souvislosti s vysokým stupněm jejich stejnorodosti, umožní zmenšení technologického odpadu v hutích a snižuje se i rozptyl mechanických vlastností. To v souhrnu značně zvyšuje jak efektivnost hutní výroby, tak i produktivitu práce [129]. Ve VSŽ n.p. Košice se v současné době kontinuálně odlévá 20 % vyrobené oceli a vytváří se předpoklady, aby v polovině 90. let byla tímto progresivním způsobem odlévána všechna ocel. Před odlitím se ještě ocel homogenizuje dusíkem s perspektivním použitím čistého argonu. Geometrie kontibram oproti bramám z ingotu je kvalitativně na podstatně vyšší úrovni a mají i poněkud jinou vnitřní strukturu [130].

Nízký obsah síry a kyslíku se projeví v nižším obsahu vměstků v oceli a zvýšením jejich plastických vlastností. Běžnými pochody výroby oceli nelze dosáhnout nízkého obsahu uvedených prvků. V důsledku stoupajících požadavků na kvalitu ocele byla pro to vyvinuta řada metod rafinace oceli mimo základní výrobní agregát, tzv. sekundární metalurgie. Jednou z nich je i vakuování ocele na DH zařízení, čili tzv. zdvižné vakuování. Jeho princip tkví v použití vakuové komory zakončené hrdlem, jenž se noří do pánve s taveninou. Při tomto pohybu nateče část obsahu pánve do komory a dochází k bouřlivé reakci odplynění, především oxidu uhelnatého. Pak následuje zdvižení komory, ocel z ní vyteče zpět do pánve a proces se opakuje. Vylučováním CO do prostoru nad taveninou se snižuje obsah kyslíku v tavenině, tzv. deoxidace uhlíkem, takže úměrně tomu se může vytvářet menší množství



Obr. 13.4 Křivky mezních přetvoření plechů KOHAL 20 E konti a KOHAL 20 E vaku v porovnání s KMP pro standard KOHAL 20 E

oxidů a zároveň se snižuje i obsah uhlíku. Turbulence při vstupu a výstupu oceli vedou k jejímu dobrému promísení, což vede k homogenizaci v celém objemu pánve, zvyšuje se pravděpodobnost střetu a koagulace vměstků a i vyplouvání větších vměstků z oceli do strusky je snazší [131,132].

Prostřednictvím KMP byla stanovena plastičnost plechů válcovaných jednak z kontinuálně litých bram označené jako KOHAL 20 E konti /tl. 0,8 mm/, jednak z ingotů oceli vakuově odplyněné označené jako KOHAL 20 E vaku. Oba druhy plechů byly vyrobeny v rámci ověřovacích zkoušek. Jejich materiálové charakteristiky ze zkoušky tahem jsou v příloze 17, pracovní diagramy v příloze

19 a fotografie typických struktur v příloze 18. Z těchto fotografií struktur, hodnocených společně s KOHALEM 20 E /příloha 12/, vyplývá, že ve všech třech případech jde o feritickou strukturu se sploštělými zrny. Struktura KH 20 E obsahuje terciální cementit na hranicích zrn a další jemně rozptýlené fáze uvnitř i na hranicích zrn, jejichž velikost dle ČSN 42 0462 je 6 ± 7 . KH 20 E konti vykazuje oproti standardu výrazně jemnozrnnější strukturu / 6 ± 8 /. Obsahuje rovněž terciální cementit vyloučený vesměs na hranicích zrn. Ostatní heterogenní fáze lze přibližně srovnat se standardem. U KH 20 E vaku je výrazná čistota hranic zrn /jejich velikost $6 \pm 7,5$ /. Heterogenní fáze jsou rovnoměrně vyloučeny zejména uvnitř zrn.

Příslušné DMP jsou v přílohách 20, 21 a na obr. 13.4 jsou jejich křivky mezních přetvoření porovnány s KMP pro standard KOHAL 20 E /tl. 0,7 mm/ z obr. 11.5. Z tohoto diagramu je patrné, že KMP pro oba sledované plechy jsou výš oproti standardu, a to zejména v pravé větvi. Posuv obou KMP v jejich průsečíku s osou φ_1 je o 8,6 %, v maximu pravé větve /při $\varphi_2 = 0,25$ / činí dokonce 14 % resp. 18 %. Tomuto posuvu k vyšším hodnotám φ_1 může do určité míry přispívat i jejich větší tloušťka.

V levé části diagramu se KMP pro konti a vaku navzájem prakticky neliší / $F_L = 0,709 < F_{0,95}/3,134/ \approx 2,605$ /, v pravé se naopak liší významně / $F_P = 9,498 > F_{0,95}/3,134$ /. Charakter odlišnosti je patrný z DMP. Pro $0 < \varphi_2 < 0,15$ vykazuje vyšší hodnoty přetvoření KOHAL 20 E vaku, pro hodnoty $\varphi_2 > 0,15$ KOHAL 20 E konti.

Hodnoty plastičnosti celkové / Π /, pro levou / Π_L /, resp. pravou / Π_P / část DMP jsou v tab. 7. Oba testované plechy vykazují při stavech $\sim m_\varphi < 0$ o 7,3 % /vaku/ resp. o 10,6 % /konti/ větší plastičnost, pro $\sim m_\varphi > 0$ však již o 28,3 % resp. o 30 % oproti standardu.

Tab. 7 Hodnoty plastičnosti zjištěné z DMP na obr. 13.4

plech	Π_L	Π_P	Π
KOHAL 20 E	0,0681	0,0623	0,1304
KH 20 E konti	0,0753	0,0810	0,1563
KH 20 E vaku	0,0731	0,0799	0,1529

Tohoto postupu lze použít obecně pro hodnocení plastičnosti i nových druhů plechů vyvíjených v rámci inovačního programu VSŽ n.p. Košice /viz. kap. 13.1.3/.

13.1.3 Posouzení plastičnosti nových druhů plechů s vyššími pevnostními hodnotami

Spolu se zvyšováním ekonomičnosti výroby výlisků se v současné době klade důraz i na ekonomiku provozu automobilu. Na ní se vedle aerodynamických vlastností významně podílí rovněž i hmotnost vozu. Tato otázka je řešena i vývojem a používáním nových druhů plechů s vyššími užitnými vlastnostmi. U těchto materiálů se předpokládá především zvyšování pevnostních parametrů, které umožní zmenšením tloušťky použitého plechu snížit hmotnost výrobku, např. vozidla, a to se promítne do úspor. Výsledný efekt je dále umocněn i snížením spotřeby pohonných hmot. Od jejich zavedení se očekává i zvýšení bezpečnosti karoserie. V následujících letech se předpokládá zvýšení spotřeby pevnostních plechů v automobilovém průmyslu u všech předních výrobců jak v USA a Japonsku, tak i v Evropě [133].

Zvyšování pevnostních parametrů těchto plechů, které se týká růstu meze kluzu a dosahované pevnosti v tahu, má za následek snížení jejich plastičnosti. Cílem inovačních trendů je vyrábět plechy s vyšší pevností a zároveň s co nejlepší plastičností, přičemž je zřejmé, že tyto materiály těžko dosáhnou plastičnosti obvyklé u klasických nízkouhlíkových plechů. Možností jak zvyšovat pevnost plechu je celá řada:

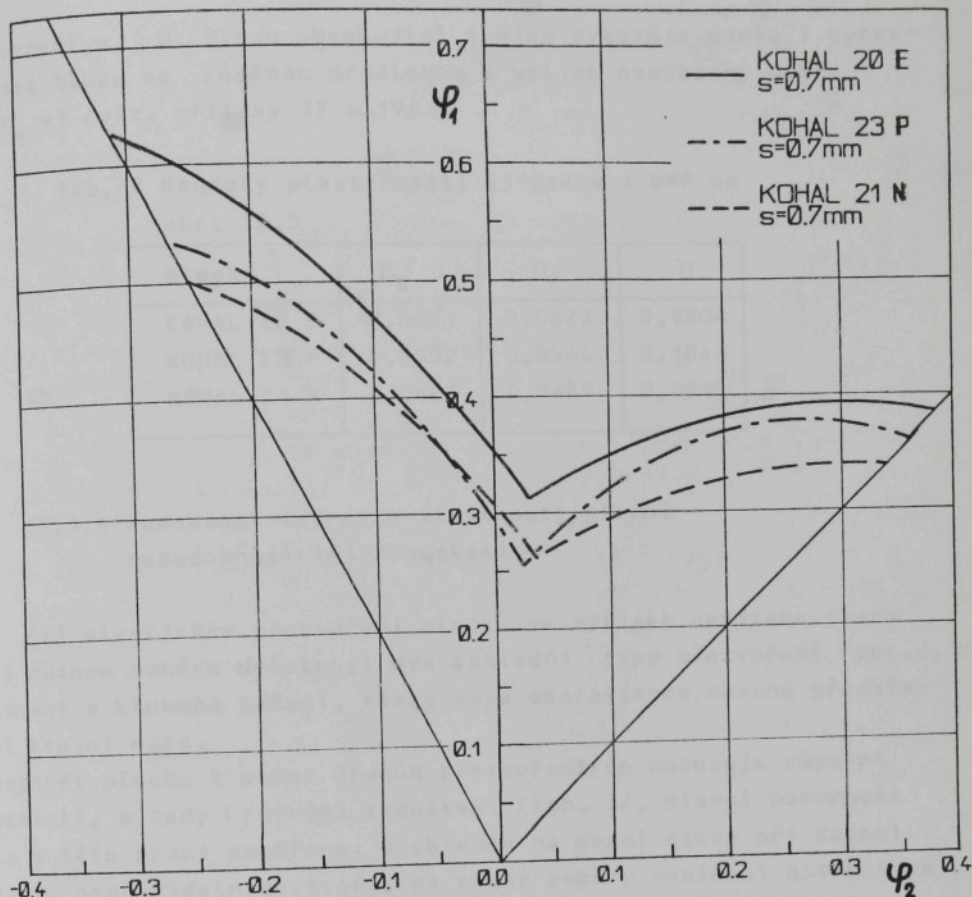
- 1/ Zvýšení pevnosti substitučním zpevněním tuhého roztoku Feα přidávkou asi 0,1% fosforu. Při nízkém obsahu C, S, N₂, se má docílovat zvýšení až na $R_m = 500 \text{ MPa}$ při celkem dobré plastičnosti.
- 2/ Zjemnění zrna spolu s precipitačním zpevněním se zvyšuje mez kluzu i pevnost. Toho lze docílit např. přidáním Nb a Ti. Rozpuštěnost niobu v tuhém roztoku je omezená, takže vedle výrazného zjemnění zrna a vytváření jemně dispergovaných precipitátů se může podílet i na stárnutí příslušného plechu [134]. Tento způsob zvýšení pevnosti s sebou nese riziko značného poklesu plastičnosti.

- 3/ vysokou pevnost, avšak omezenou plastičnost, vykazuje i plech s dislokačním zpevněním, kterého se dosáhne neúplným vyžiháním po válcování za studena nebo po úplném vyžihání dalším válcováním za studena.
- 4/ Nízkou mez kluzu při vysoké pevnosti vykazuje tzv. dvoufázová ocel. Zpevnění je v důsledku výskytu martenzitu ve feritické matici po prudkém ochlazení při doválcování. Takový plech vykazuje dobrou plastičnost a výhodný poměr $R_p/R_m \approx 0,5$.
- 5/ Výhodné je tvářet materiál s nižšími pevnostními hodnotami s dobrou plastičností a pevnost zvýšit až u hotového výlisku. Toho se dosáhne precipitačním zpevněním, k němuž dojde až při vytvrzování laku karoserie.

Vlastnosti nově vyvíjených plechů se dost odlišují od stávajících nízkouhlíkových, s jejichž zpracováním jsou již značné zkušenosti. Nové plechy, které budou tenčí, pevnější, s horší tvářitelností, musí jít zpracovávat stávajícími technologiemi, i když si vynutí určité změny v konstrukci nástrojů a i některé změny tvaru vlastních výlisků. Větší rozptyl mechanických vlastností může způsobovat větší zmetkovitost. Je nutné brát v úvahu i tendenci k většímu odpružení a zvlnění, tuhost výlisku, korozní odolnost, svařitelnost a možnost povrchových úprav [127,135,59].

Výběr pevnostních plechů pro posouzení jejich plastičnosti prostřednictvím DMP vycházel z potřeb jejich výrobce /VSŽ n.p. Košice [136] a i zpracovatele /AZNP Mladá Boleslav/. Z dostupného sortimentu plechů vyrobených v rámci ověřovacích zkoušek se tak zaměřila pozornost na KOHAL 23 P se zvýšeným obsahem fosforu $/C = 0,07 \%, Mn = 0,32 \%, P = 0,061 \%, S = 0,013 \%/$. Z něho se zkušebně táhnou výlisky jako je kapota, kryt kufru, dveře, přední a zadní blatník, přední a zadní podlaha vozu Š 742. Druhý materiál, který obsahoval vedle fosforu i niob, byl rovněž ze zkušební série VSŽ. Jejich materiálové charakteristiky ze zkoušky tahem jsou v příloze 17 a pracovní diagramy v příloze 19. Diagramy mezních přetvoření pro oba plechy jsou v přílohách 22 a 23. Křivky mezních přetvoření spolu s KMP pro standard KOHAL 20 E jsou na obr. 13.5. Z něho je patrné, že KMP pro oba sledované plechy jsou nižší oproti nízkouhlíkovému standardu a potvrzují tak předpoklad o menší plastičnosti pevnostních plechů.

Rovněž KMP obou pevnostních materiálů se navzájem liší



obr. 13.5 Křivky mezních přetvoření plechů KOHAL 23 P a KOHAL 21 N v porovnání s KMP pro standard KOHAL 20 E

$F_L = 10,262 > F_{0,95} / 3,134 / = 2,605$, $F_P = 30,575 > F_{0,95} / 3,134 /$.
S výjimkou oblasti okolo $m_\varphi = 0$ vykazuje KH 23 P lepší plastičnost, a to zejména v pravé části DMP. Hodnoty plastičnosti, obdobně jako v předchozí kapitole, jsou souhrnně zachyceny v tab.8.

V levé části DMP dosahují oba pevnostní plechy zhruba 71% resp. 74 % hodnoty plastičnosti standardu. V pravé se projeví lepší plastičnost plechu mikrolegovaného fosforem, kde dosahuje 87% plastičnosti nízkouhlíkového standardu, zatímco plech mikrolegovaný navíc niobem pouze 68,5 %.
S ohledem na větší plastičnost bude pro tažení náročnějších výlisů vhodnější KOHAL 23 P oproti KOHALu 21 N, zejména pro stavy

přetvoření $m_p > 0$. Plech obsahující i niob vykazuje navíc i výraznou mez kluzu se značnou prodlevou a velice nevýhodný poměr $R_{eL}/R_m \rightarrow 1$ /viz. přílohy 17 a 19/.

Tab. 8 Hodnoty plastičnosti zjištěné z DMP na obr. 13.5

plech	π_L	π_P	π
KOHAL 20 E	0,0681	0,0623	0,1304
KOHAL 23 P	0,0502	0,0544	0,1046
KOHAL 21 N	0,0483	0,0427	0,0910

13.1.4 Hodnocení tvárných vlastností plechů napodobňujícími zkouškami

Při plastickém přetvoření plechu ve výlisek určitého tvaru se v různém poměru uplatňují dva základní typy přetvoření /obr.2.1/, vypínání a hluboké tažení, které svým charakterem obecně představují krajní meze.

Schopnost plechu k oběma druhům přetvoření se posuzuje různými ukazateli, a tedy i různými zkouškami /kap. 3/. Hlavní pozornost byla v této práci zaměřena, s ohledem na mezní stavy při tažení výlisků nepravidelných tvarů, na různé poměry vypínání a tím i na hodnocení plastičnosti plechu. K tomuto účelu slouží především křivky mezních přetvoření, jež byly v kap. 13.1.1 přímo definovány jako křivky plastičnosti. Takto pojatý DMP však nemůže být bezprostředně vztahován k druhé krajní mezi přetvoření, tj. k hlubokému tažení. V žádném případě ho nelze chápat jako ukazatel hlubokotažnosti.

Podmínky hlubokého tažení /např. válcové nádoby/ eventuálně podmínky tváření u určitých typů a oblastí výlisků nepravidelných tvarů, kladou požadavky nejen na plastičnost, ale musí splňovat i určité požadavky z hlediska přenosu síly do oblasti plastického přetvoření. Z tohoto důvodu je účelné rozšířit a doplnit pohled na vlastnosti plechu hodnocené prostřednictvím dosažených mezních stavů formou DMP i z hlediska dalších, napodobňujících zkoušek, včetně zkoušky tahem.

zkouška tahem sice nepatří mezi napodobňující, ale je velmi rozšířená a jejím prostřednictvím zjištěné charakteristiky jsou stále nejpoužívanější při hodnocení tvárných vlastností plechů. Výše uvedené skutečnosti ovlivnily volbu dalších zkoušek i příslušných ukazatelů.

Ze zkoušky tahem je to např. index tvářitelnosti r_{sn_s} a zásoba plasticity /kap.3.1/ /při jejímž výpočtu byla pro jednoduchost uvažována hodnota deformace při porušení, nikoli ϵ_R /, které jsou chápány především jako ukazatelé tvářitelnosti.

Hodnoty prohloubení IE /kap. 3.2/ a celková plastičnost Π z DMP /kap. 13.1.1 až 13.1.3/ pak jako ukazatelé plastičnosti.

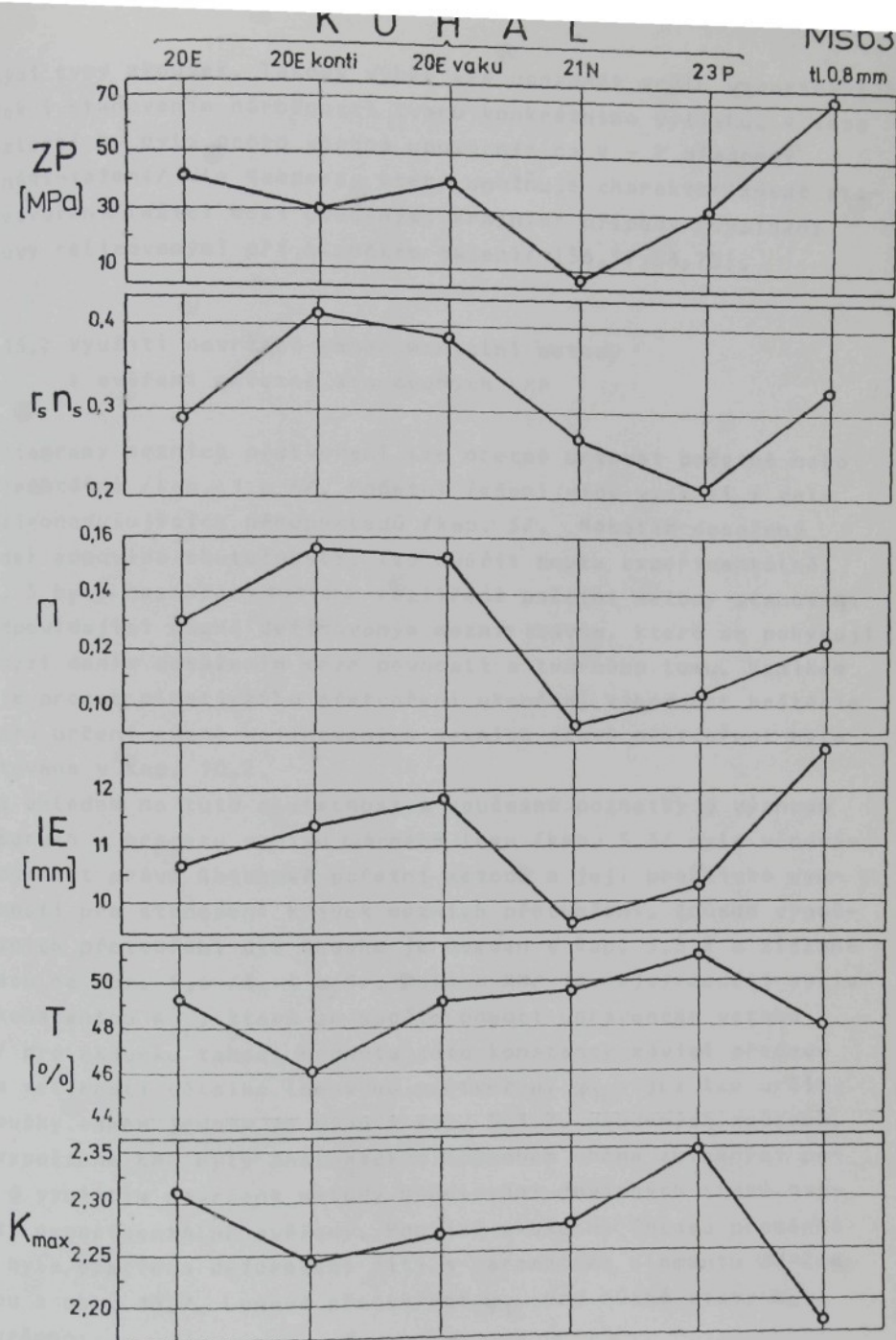
A konečně mezí stupeň tažení K_{max} a stupeň T /kap. 3.2/ jako ukazatelé hlubokotažnosti.

Všechny tyto ukazatelé byly určovány pro vybraných šest druhů plechů. Jsou to standard KOHAL 20 E, KOHAL 20 E konti i vaku, dále KOHAL 23 P spolu s KOHALEM 21 N a konečně Ms63 tl. 0,8 mm. Zjištěné hodnoty vytypovaných ukazatelů pro uvedené materiály jsou souhrnně zachyceny na obr. 13.6. Na jeho základě lze učinit některé následující závěry.

Standard KOHAL 20 E dosahoval vyrovnaných hodnot ve všech ukazatelích. Konti a vaku mají sice hodnoty ZP srovnatelné se standardem, ale ostatní ukazatelé tvářitelnosti znatelně vyšší. Naopak ukazatelé hlubokotažnosti jsou o něco nižší u vaku, ale značně menší u konti. Oba představitelé pevnostních plechů mají výrazně nižší ukazatele tvářitelnosti /ZP, r_{sn_s} , Π , IE/. U hlubokotažnosti vykazoval KOHAL 21 N srovnatelné hodnoty se standardem, KOHAL 23 P však výrazně vyšší. Mosazný plech vykazoval vyšší ukazatele tvářitelnosti / Π poněkud nižší/ a naopak měl nižší ukazatele hlubokotažnosti.

Z tohoto rozboru je zřejmé, že poměrně velmi dobře navzájem korespondují ukazatelé r_{sn_s} , Π , IE. Totéž je možno konstatovat o hodnotách T a K_{max} . Tato skutečnost celkem zřetelně potvrzuje úvahy v úvodu této kapitoly. Je však nutno upozornit na to, že ukazatel ZP, který je používán jako ukazatel hlubokotažnosti nekoresponduje s ukazateli T a K_{max} .

Dosažené výsledky souhrnně potvrzují skutečnost, že je účelné navrhovat tvar výlisku bezprostředně ve vztahu k vlastnostem plechu. Nebo naopak příslušnému typu výlisku, s ohledem na lisovatelnost, vybrat plech s vhodnými vlastnostmi posuzovanými



Obr. 13.6 Některé ukazatele tváritelnosti a hlubokotažnosti
 charakterizující vybrané druhy materiálu /KOHAL
 20 E konti a vaku tl. 0,8 mm, ostatní tl. 0,7 mm/

vhodnými typy zkoušek. Takový výběr lze usnadnit vedle vzpomínaných zkoušek i stanovením náročnosti tvaru konkrétního výlisku. V této souvislosti by bylo proto vhodné upozornit na $V - T$ diagram /vypínání-tažení/ dle Kaspera, který umožňuje charakterizovat stavy přetvoření ležící mezi uvedenými krajními případy /vypínání a posuvy relizovanými při hlubokém tažení/ [56,57,58,75].

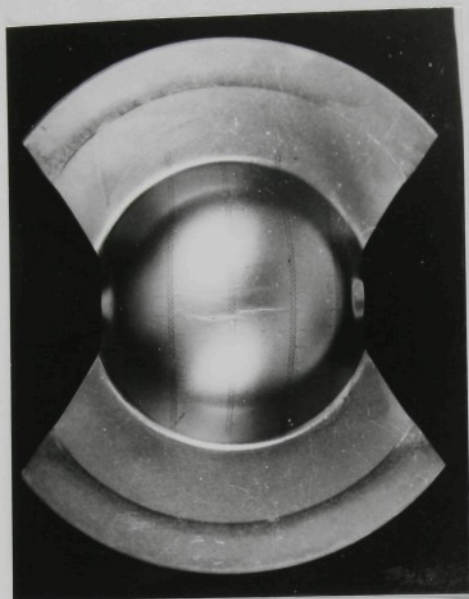
13.2 Využití navržené experimentální metody k ověření početně stanovených KMP

Diagramy mezních přetvoření lze obecně určovat početně nebo experimentálně /kap. 1 a 4/. Početní řešení vždy vychází z celé řady zjednodušujících předpokladů /kap. 5/. Nakolik dosažený výsledek odpovídá skutečnosti, lze ověřit pouze experimentálně. V kap. 5 byly naznačeny některé rozšířené početní metody stanovení KMP odpovídající různě definovaným mezním stavům, které se pohybují v rozmezí daném dosažením meze pevnosti a tvárného lomu. Vznikem lomu je proces plastického přetvoření ukončen. Výhodnost kritéria lomu pro určení různě definovaných mezních stavů přetvoření byla diskutována v kap. 10.2.

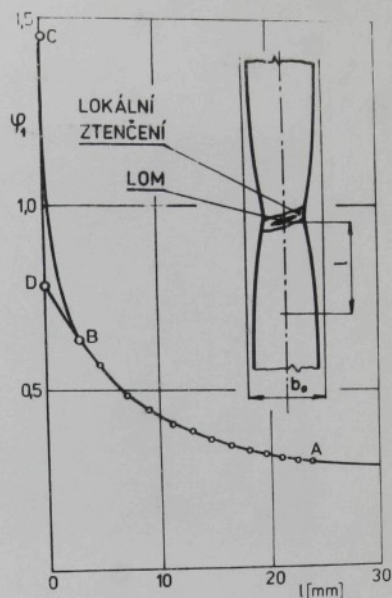
S ohledem na tuto skutečnost a současné poznatky o významu mikroporuch v procesu vzniku tvárného lomu /kap. 5.3/ byla věnována pozornost právě Ghoshevě početní metodě a její praktické využitelnosti pro stanovení křivek mezních přetvoření. Způsob výpočtu mezních přetvoření dle Ghoshe je uveden v kap. 5.3.2 a získané KMP jsou na obr. 5.6 /č. 4 a 5/. Poloha KMP je nejvýrazněji ovlivněna konstantou K_{cr} , která se spočte pomocí upraveného vztahu /5.27/ pro zkoušku tahem. Hodnota této konstanty závisí především na velikosti většího lomového přetvoření φ_{1L} , jež lze určit ze zkoušky tahem jedním ze dvou v kap. 5.3.2. uvedených způsobů.

Vypočtené KMP byly analogickým způsobem oběma zmíněnými postupy s využitím navržené metody modelování rovinných stavů napjatosti experimentálně ověřeny. Použitá zkušební tělesa proměnné šířky byla opatřena deformační sítí s parametrem elementu $\varnothing d=2\text{mm}$ patrnou z obr. 13.7. Lomové přetvoření φ_{1L} pro různé stavy m_φ bylo určeno:

- a) Nejprve dle Ghoshe nepřímou metodou z přetvoření ve směru tloušťky φ_{3L} a šířky φ_{2L} v místě lomu /bod C na obr. 13.8/.



Obr. 13.7 Zkušební těleso s deformační sítí pro určení hodnot φ_{2L} , φ_{1L}



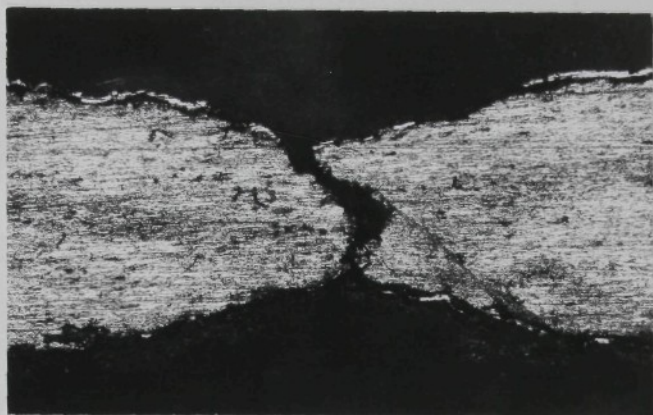
Obr. 13.8 Principy stanovení lomového přetvoření φ_{1L}

Přesné určení tloušťky plechu v místě lomu umožní měření na metalografickém mikroskopu např. při stonásobném zvětšení, obr. 13. 9.

b/ Jako funkce vzdálenosti l od místa lomu /mezi body A a B/ s využitím deformační sítě dle obr. 13.7 s následnou regresní analýzou a extrapolací do bodu D, obr. 13. 8.

Šířky b použitých nástřihů byly voleny tak, aby byl pokryt požadovaný interval stavů přetvoření m_{φ} . Lomová přetvoření $\varphi_{2L, 1L}$ získaná oběma popsanými způsoby byla vynesena do DMP na obr. 13.10. Z polohy těchto experimentálně určených bodů ve vztahu k vypočteným KMP lze vyvodit závěr, že matematický model Ghoshova kritéria lomu odpovídá realitě. KMP spočtená pomocí φ_{1L} určeného způsobem dle a/ platí v celém rozsahu modelovaných stavů přetvoření. Křivka spočtená z lomového přetvoření φ_{1L} určeného extrapolací přetvoření do místa lomu, platí v oblasti záporných a pouze malých kladných hodnot φ_2 . V souvislosti s uvedenými skutečnostmi je nutné opět poznamenat, že mezní přetvoření, jejichž velikost je

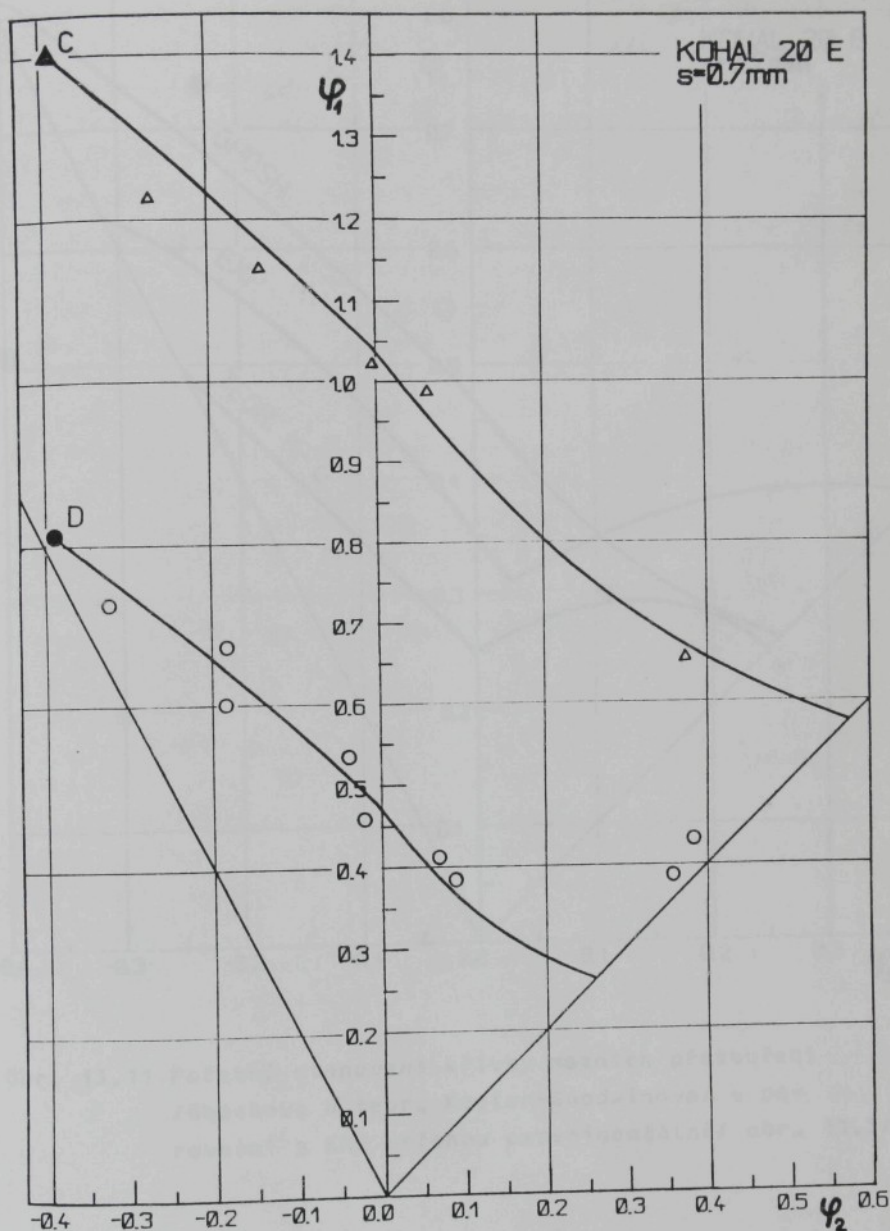
dána hlavně nárůstem v oblasti lokálního ztenčení, a která odpovídají horní KMP, jsou z praktického hlediska ve vztahu k výlisku nevyužitelná.



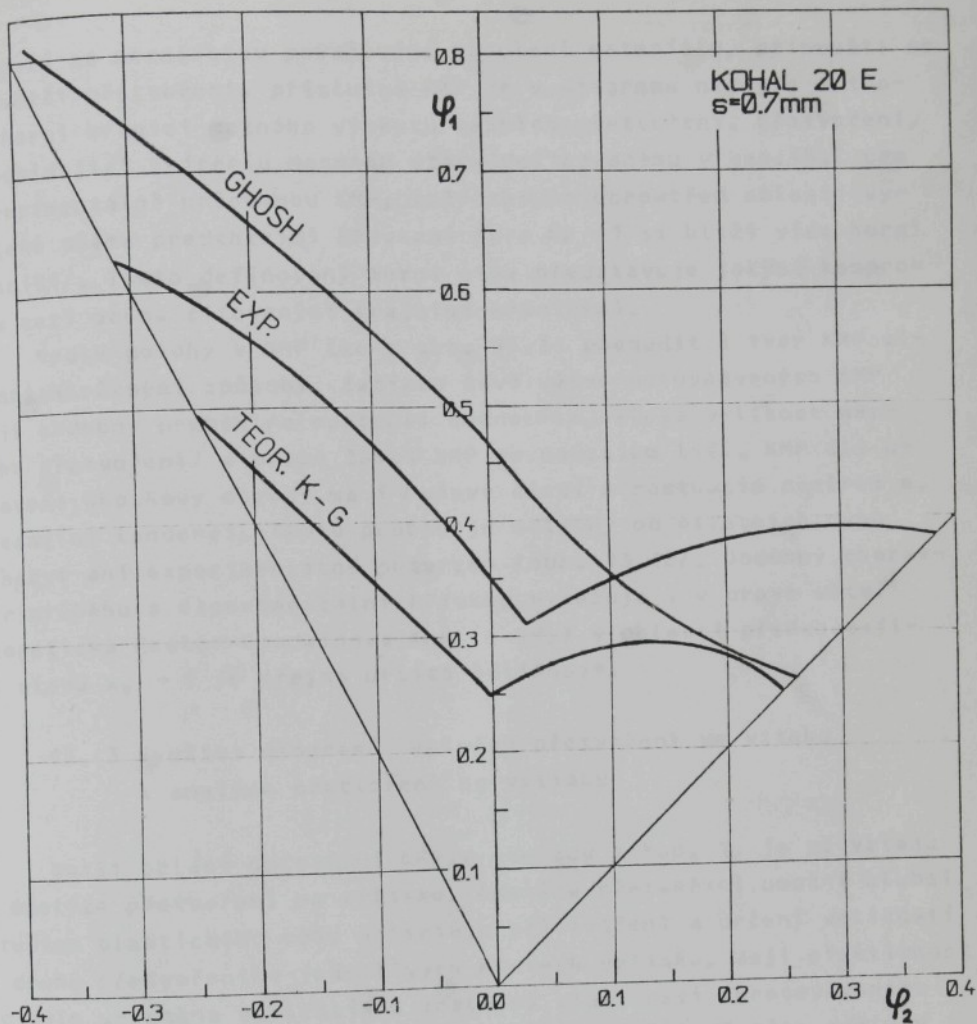
Obr. 13. 9. Detail oblasti porušení pro měření tloušťky v místě lomu / $b = 105$ mm, zvětšení 100x/

Shrnutím uvedených poznatků je možné učinit závěr, že lze prakticky použít upravenou Ghoshovu početní metodu pro určení levé větve KMP. V tomto případě se určí konstanta K_{cr} pomocí φ_{1L} ze zkoušky tahem extrapolací přetvoření v blízkosti lomu. Vzájemný vztah mezi křivkami mezních přetvoření určenými různými způsoby je zřejmý z DMP na obr. 13.11. V něm je nakreslena jednak teoretická Keeler-Goodwinova křivka odpovídající ztrátě stability při dosažení meze pevnosti spočtená dle vztahů /5.22/, jednak křivka stanovená dle upraveného Ghoshova kritéria spočtená způsobem b/ dle /5.27/. Porovnání je provedeno pro ocelový plech KOHAL 20 E tl. 0,7 mm /tab. 1/. Obě početně stanovené křivky jsou porovnány s KMP určenou experimentálně navrženou metodou /obr. 11.5/ dle definice mezního stavu vycházející z kritéria lomu /kap. 10.2/.

Z obrázku je patrný značný vliv zvoleného kritéria mezního stavu na polohu KMP. Kritérium ztráty stability odpovídající mezi pevnosti je nejnáročnější z hlediska přípustných deformací a tvoří tak spodní hranici výskytu mezních přetvoření.



Obr. 13. 10 KMP dle Ghoshe vypočtené pomocí ψ_{1L} , určených oběma způsoby, jsou porovnány s experimentálně získanými mezními přetvořeními



Obr. 13.11 Početně stanovené křivky mezních přetvoření /Ghoshova a teor. Keeler-Goodwinova/ v porovnání s KMP určenou experimentálně/ obr. 11.5/

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 definovanému v kap.10.2 pro experimentálně určenou KMP, leží zhruba uprostřed oblasti vymezené oběma předchozími křivkami /pro $m_\varphi \rightarrow 1$ se blíží více horní hranici/. Takto definovaný mezní stav představuje jakýsi kompromis mezi oběma citovanými krajními hranicemi.

Vedle polohy v DMP lze z obr. 13.11 posoudit i tvar KMP získaných různými způsoby. Zatímco levé větve porovnávaných KMP mají obdobný průběh /s rostoucí hodnotou m_φ klesá velikost mezního přetvoření/ v pravé části DMP se navzájem liší. KMP dle upravené Ghoshovy metody má i v pravé části s rostoucím poměrem m_φ klesající tendenci. Tento průběh je odlišný od ostatních dvou a nebyl ani experimentálně potvrzen /obr. 13.10/. Obdobný charakter průběhu s experimentální křivkou vykazuje i v pravé větvi teoretická Keeler-Goodwinova KMP, i když v oblasti předcházející stavu $m_\varphi \rightarrow 1$ je zřejmá určitá odlišnost.

13. 3 Využití diagramů mezních přetvoření ve vztahu k analýze přetvoření na výlisku

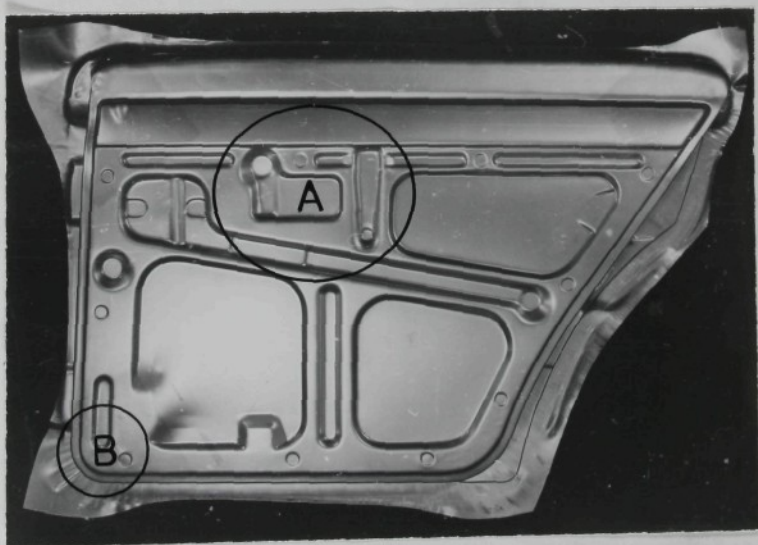
Další oblast uplatnění DMP, v souladu s kap. 1, je ve vztahu k analýze přetvoření na výlisku. Analýza přetvoření umožní hlubší studium plastického toku materiálu při tváření a určení velikosti a druhu přetvoření v jednotlivých místech výlisku. Její efektivnost je dále umocněna spolehlivou znalostí vlastností zpracovávaného plechu, a to zejména jeho plastičnosti. Na základě této analýzy prováděné s ohledem na mezní stavy materiálu, lze spolehlivě volit určitá opatření, včetně doplňkových technologických zásahů, jež směřují k odstranění příčin zmetkovitosti. Porovnání na výlisku dosažených přetvoření / φ_1^V / s mezními / φ_{1k} / při stejném φ_2 , zachycenými v příslušném DMP, umožní stanovit míru využití plastičnosti plechu η ,

$$\eta = \frac{\varphi_1^V}{\varphi_{1k}} \quad /13.9/$$

v daném místě výlisku. Tímto postupem lze na výlisku spolehlivě vytypovat kritická místa. V nich pak s velkou pravděpodobností může dojít ke vzniku trhliny.

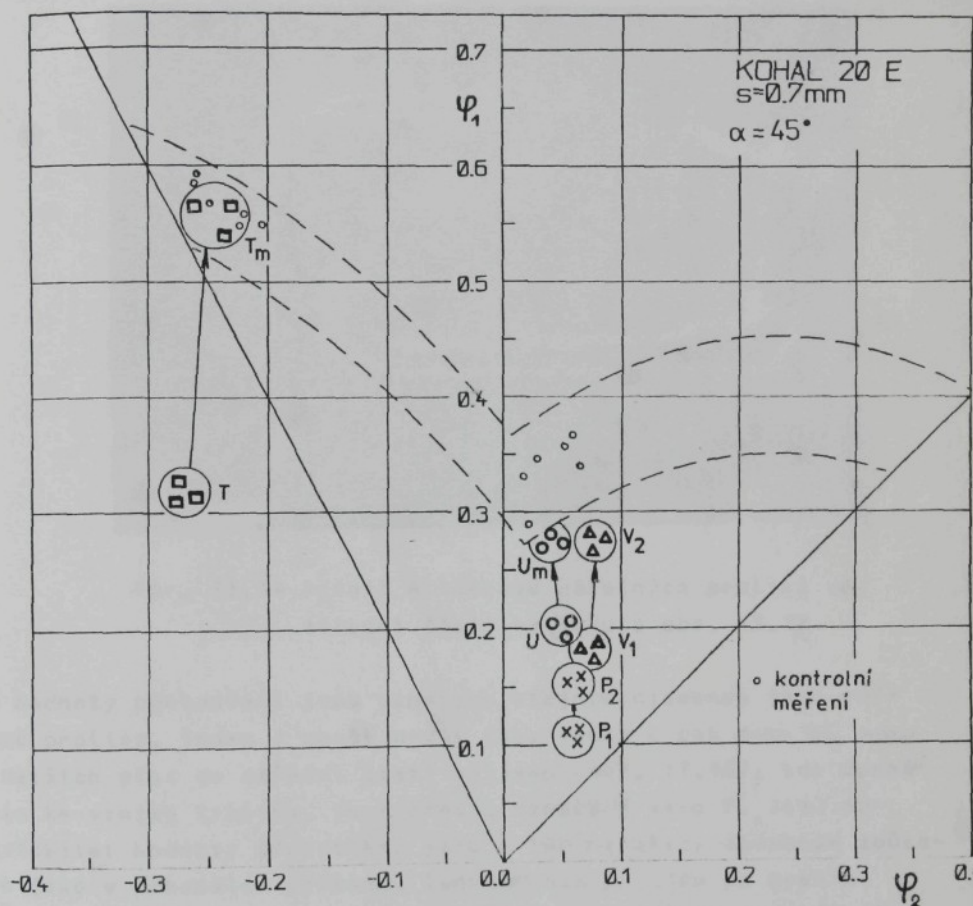
K ověření uvedeného postupu byl ve spolupráci s oddělením technologie lisování AZNP Mladá Boleslav vybrán výlisek vnitřku zadních dveří vozu Š 742 zhotovený z plechu KOHAL 20 E tl. 0,7 mm, obr. 13.12. Tento díl je zařazen mezi výlisky s vysokou náročností na plastičnost plechu. Vykazoval větší procento zmetkovitosti v důsledku výskytu trhlin, zejména v obvodových oblastech a ve střední části, kde jsou tvarově náročné prolisy, např. oblast A na obr. 13.12. Po určitých úpravách tvaru výlisku /zvláště zvětšení poloměrů zaoblení hran prolisů/ se snížila zmetkovitost pod již přijatelnou hranici /cca 3 %/. Na zmetkovitosti se podílí první dvě tažné operace. V první operaci se vytáhne základní tvar a dojde k předtažení vnitřních prolisů, ve druhé se provádí dokončení tahu a kalibrace. Analýza přetvoření byla provedena jak na dobrém výlisku, tak na zmetkovém.

Ve vytypovaných místech byly zjištěny pomocí předem nanesené deformační sítě hodnoty dosažených přetvoření.



obr. 13.12 Výlisek vnitřku zadních dveří vozu
Š 742 po druhém tahu

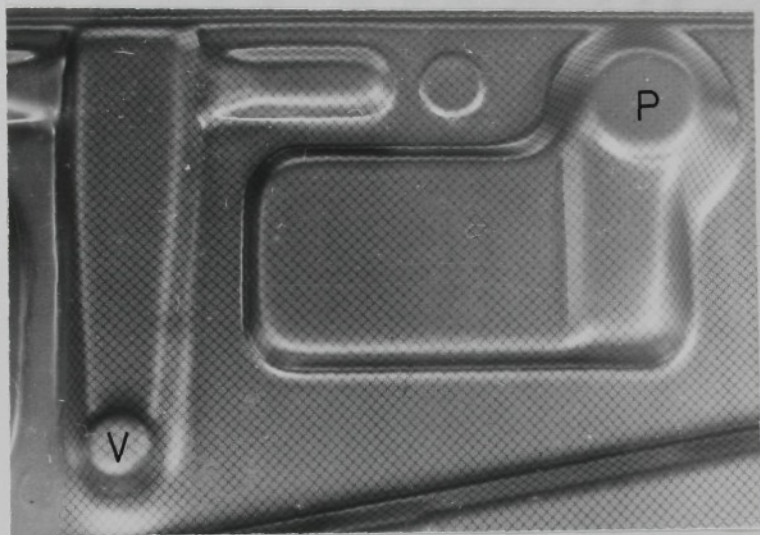
vzhledem k tomu, že směry hlavních přetvoření φ_1^V v kritických oblastech jsou orientovány přibližně pod úhlem 45° ve vztahu ke směru válcování, byl pro rozbor použit DMP z přílohy 6. Toleranční pásmo odpovídající uvedenému diagramu je na obr. 13.13 nakresleno čárkovanou čarou. Pro ověření jeho platnosti i pro plech



Obr. 13.13 DMP zachycující přetvoření ve vybraných místech výlisků z obr. 13.12

použitý na tento díl jsou do něho vyneseny z kontrolních důvodů určené hodnoty mezních přetvoření /na obr. 13.13 označené jako "kontrolní měření"/ zpracovávaného plechu pro stavy m_ϕ , při kterých je na výlisku dosahováno mezních nebo jim blízkých hodnot.

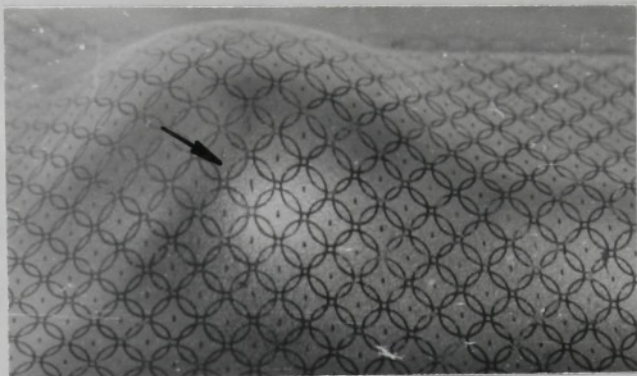
většina míst na výlisku vykazuje hodnoty přetvoření dostatečně vzdálené od spodního okraje mezního pásma. Využití plastičnosti je $\eta = 50$ až 70% . V DMP na obr. 13.13 je pro představu zachyceno přetvoření pouze jednoho z mnoha proměřovaných míst, a to prolisu na obr. 13.14 označeném písmenem P. Dosaže-



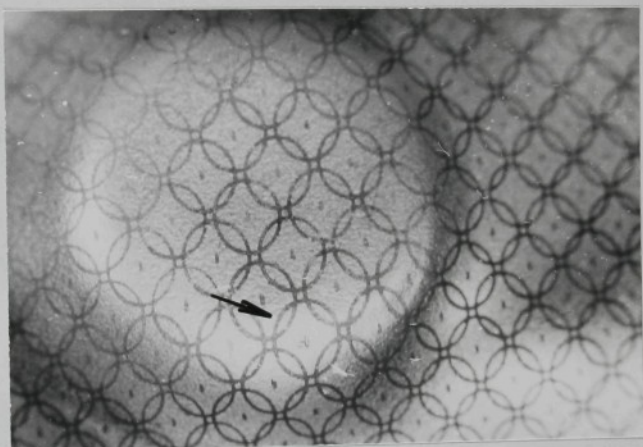
Obr. 13.14 Detail A tvarově náročných prolisů ve střední části výlisku z obr. 13.12

né hodnoty přetvoření jsou označeny stejným písmenem jako zmíněné prolisy, index 1 značí první tah, index 2 pak druhý tah. Jedno z dalších míst ve střední části výlisku /obr. 13.14/, kde docházelo ke vzniku trhliny, je i prolis označený jako V. Jemu odpovídající hodnoty přetvoření jsou v DMP označeny obdobným způsobem jako v předešlém případě. Tvar tohoto prolisu po prvním i druhém tahu je patrný z detailních fotografií na obr. 13.15. Oblast výběru elementů deformační sítě, pomocí nichž byla určena velikost přetvoření, je označena šipkou. Zvětšením poloměrů zaoblání hran prolisů byl odstraněn výskyt trhlin, ale dosahovaná přetvoření jsou stále v blízkosti mezního pásma / $\eta = 90 \%$ /. V případě zhoršení kvality používaného plechu, jež má za následek posun mezního pásma k nižším hodnotám přetvoření, by v těchto místech opět došlo k výskytu trhlin.

a/



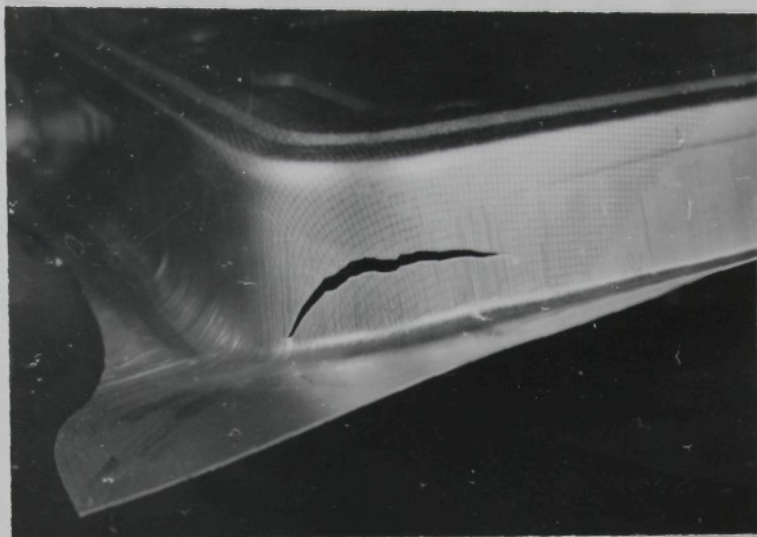
b/



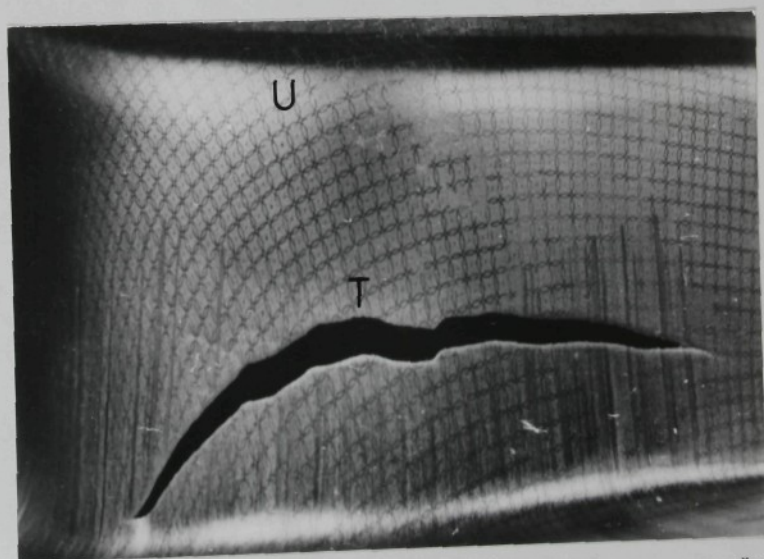
Obr. 13.15 Prolis "V" z obr. 13.14 a/ první tah
b/ druhý tah

Na zmetkovém dílu vznikla trhlinka v jeho levém dolním rohu /oblast B na obr. 13.12/ jak je patrné z obr. 13.16. Přetvoření u trhliny představující mezni stav /oblast T na obr. 13.17/, byla určována v souladu s kap. 10.2. Dále byla zjišťována přetvoření v místě přechodového poloměru do dna výslisku nad trhlinou /oblast U na obr. 13.17/. V DMP naobr. 13.13 jsou jim odpovídající přetvoření označena písmeny dle příslušných oblastí s indexem "m". Pro oblast U leží hodnoty přetvoření těsně pod mezním pásmem $/U_m/$, $\eta = 97 \%$, pro T zapadají již do mezního pásma $/T_m/$. Pro srovnání byla měřena přetvoření v těchto místech na dobrém výlisku /v DMP tyto hodnoty označeny jako T a U/.

Deformační stopa mezi oběma stavy přetvoření je naznačena šipkou.
 v tomto případě jsou v obou sledovaných místech /T, U/ dosažená
 přetvoření dostatečně vzdálená od mezního pásma, $\eta_T = 60 \%$,
 $\eta_U = 71 \%$.



Obr. 13.16 Levý dolní roh výlisku, kde došlo
 k výskytu trhliny



Obr. 13.17 Detail oblasti výskytu trhliny s označením
 míst /T, U/, kde byla měřena přetvoření

získané výsledky potvrzují oprávněnost použití analýzy přetvoření uplatňované na lisovaných dílech s pomocí deformačních sítí a konfrontaci těchto výsledků s mezními stavy přetvoření zachycenými v DMP. Aplikace tohoto postupu umožní objektivně určit kritická místa na výlisku a usnadní volbu technologických zásahů vedoucích ve svých důsledcích ke snížení zmetkovitosti při výrobě výlisků. I když zde bylo uvedeno využití analýzy přetvoření spolu s DMP při řešení vyráběného výlisku, je možnost aplikace daleko širší a významnější. Jde zejména o uplatnění tohoto postupu v souvislosti se zkoušením tažného nástroje v závěrečné etapě přípravy výroby, kdy jsou realizovány doplňkové technologické zásahy. Dnešní zvyšující se tempo inovací při výrobě automobilů, snaha o zefektivnění a zkrácení technické přípravy výroby vede v zahraničí k využívání počítačových systémů již v předvýrobních etapách /systémy CAD, CAM/. Uplatnění těchto pokrokových prvků v technologii výroby výlisků vyžaduje dostatek společných vstupních informací. Mezi nimi pak zaujímá významné místo i systém objektivního hodnocení náročnosti výlisků z hlediska jejich tvaru /kap. 13.1.4/ a dosahovaných stupňů přetvoření, využívající znalosti DMP.

14. DOPORUČENÍ PRO PRAKTICKOU APLIKACI A DALŠÍ VÝZKUM

Navržená metodika je např. v současné době bezprostředně prakticky aplikovaná při hodnocení některých nových druhů hlubokotažných ocelových plechů vyvíjených pro potřeby automobilového průmyslu a v této oblasti také zpracovávané. Jedná se o tenké plechy určené pro tažení výlisků nepravidelných tvarů karosářského typu a vyráběné v rámci ověřovacích zkoušek ve VSŽ n.p. Košice pro AZNP Mladá Boleslav. Jde o nízkouhlíkové plechy vyráběné novými hutními technologiemi a o plechy s vyššími pevnostními hodnotami [136]. Tato bezprostřední aplikace vyplynula z potřeb výzkumu a výroby plechů vyvíjených v rámci současných inovačních procesů a od kterých se očekávají vyšší užité vlastnosti. Pro jejich další vývoj je užitečná znalost mezních stavů v rozsahu napjatostí daných technologií zpracování ve srovnání se stávajícími plechy, s nimiž jsou při výrobě výlisků již bohaté zkušenosti.

Navrženého postupu hodnocení tenkých plechů bylo využito nejen jejich výrobcem, ale i jejich zpracovatelem AZNP Mladá Boleslav [66]. Cílem bylo získat spolehlivě využitelný DMP a ověřit možnosti jeho aplikace ve vztahu ke konkrétním výliskům. Ze strany AZNP i VSŽ je v současné době požadováno hodnocení dalších druhů plechů jak ve vztahu k řešení zmetkovitosti stávající výroby, tak i při řešení náběhu nových typů výlisků. V této souvislosti je dále bezpodmínečně nutné používat i další metody hodnocení materiálů /některé napodobňující zkoušky a pod./ a takto získané poznatky o vlastnostech plechů konfrontovat s praktickými výsledky lisování. Uvedený přístup bude nutně vyžadovat i použití postupů uplatněných v kap. 11, 12 a 13. Záměry zpracovatele jsou takové, že by se aplikace DMP v konfrontaci s analýzou přetvoření prováděnou na výliscích uplatňovala obecně, a to jak při stávající výrobě, ve vztahu k výskytu zmetků v důsledku vzniku trhlin, tak i zejména v souvislosti s náběhem nového vozu Š 781.

I když výsledky rozmanitých a poměrně rozsáhlých zkoušek jsou do určité míry ovlivněny subjektivními chybami, je možno,

se zřetelem na přijatou definici mezního stavu a ve spojení se statistickými metodami zpracování, předpokládat srovnatelnost výsledků. Bezprostřední konfrontace dosažených výsledků mezi výrobcem, zpracovatelem a dalšími pracovišti zabývajícími se zkoušením materiálů, může přinést cenné poznatky o vlastnostech a možnostech využití nových druhů plechů ve vztahu k výliskům karosářského typu. Lze předpokládat, že taková hodnocení budou na vyšší úrovni ve srovnání se stávajícím využíváním pouze základních hodnot ze zkoušky tahem.

Jedna z možností jak účinně a cílevědomě postupovat při snižování zmetkovitosti, zefektivnění a zkrácení předvýrobních etap a při přípravě výroby nových typů výlisků je i optimální využívání systémů všeobecně známých pod zkratkami CAD/CAM. Jedním z nutných předpokladů pro jejich funkci je znalost mezních stavů materiálu formou DMP. Praktická aplikace diagramů na této úrovni však již nutně vyžaduje použití moderní výpočetní techniky.

Značná pozornost byla věnována postupu určování prakticky využitelných mezních přetvoření, která by odpovídala meznímu stavu v počátku vzniku lokálního ztenčení. Navrženým postupem určovaná mezní přetvoření odpovídají meznímu stavu ležícímu přibližně uprostřed v rozmezí meze pevnosti a tvárného lomu. Takovým způsobem získané DMP zachycují přetvoření prakticky využitelná ve vztahu k výlisku. Na základě dosavadních zkušeností /kap.13.3/ lze předpokládat, že tento závěr bude potvrzen analýzou přetvoření prováděnou s ohledem na dosažení mezních stavů pro většinu výlisků.

Při práci je nutno mít na zřeteli i specifické požadavky na funkční spolehlivost celé řady výlisků např. s ohledem na bariérové zkoušky nebo odolnost proti únavovým lomům. V těchto případech lze diskutovat dva základní okruhy problémů. Jedním z nich je vliv stupně přetvoření na tuhost a stabilitu výlisku. Druhým je pak vliv mikroporuch, které jsou v materiálu od počátku přetvoření a jejichž nárůst není monotónní. V tomto případě jde o podíl počtu a velikostí mikroporuch v závislosti na přetvoření na únavové porušení materiálu při různém způsobu namáhání. Tato otázka se úzce dotýká problematiky mezních stavů tvářeného materiálu a možností jeho zkoušení. Pro posouzení celé problematiky by bylo v těchto případech výhodné vytvořit od-

povídající matematický model. I v tomto případě je navržená metodika stanovení mezních přetvoření využitelná.

Některé bezprostřední možnosti využití navržené metodiky určování DMP jsou naznačeny v kap. 12 a 13. Několik dalších možností vedoucích k rozvoji metod určování a využití DMP lze shrnout do následujících bodů:

- navržený tvar nástříhu zkušebních těles vyhovuje z hlediska jejich přípravy i ve vztahu k vlastnímu stanovení mezního přetvoření a jeho použití lze i nadále doporučit. Umožňuje navíc nenáročnou úpravou tvaru ve střední části dosáhnout v levé části DMP i další snížení gradientu přetvoření,
- pro snížení pracnosti při nanášení deformačních sítí na výliscích, použít pro elektrochemické leptání síta s parametrem 2,5 mm, pro orientační měření pak 5 mm,
- nabízí se i zlepšení funkční způsobilosti nástroje pro tažení zkušebních těles rozšiřující jeho možnosti modelování různých podmínek tažení ve vztahu ke konkrétním podmínkám lisování vyplývajících např. z kap. 12,
- blíže vymezit vliv materiálových charakteristik plechů na mezní stavy a dále se zabývat metodikou jejich určování tak, aby bylo možné nalézt spolehlivý a obecně použitelný způsob jejich využití pro početní stanovení DMP,
- blíže se zabývat početními metodami stanovení KMP, zejména pro pravou větev, kde je důležitý vliv mikrostrukturních nehomogenit a kde stávající modely chování materiálu dosud neposkytují uspokojivé výsledky.

Předložená kandidátská práce vznikla na základě potřeb hodnocení vlastností hlubokotažných plechů ve vztahu k výliskům karosářského typu a zejména v souvislosti s vývojem nových druhů materiálů, od kterých se očekávají vyšší užitné vlastnosti. Řešená problematika byla součástí fakultního úkolu F-2421-053 a resortního úkolu R-57-124-006. Cílem bylo na základě rozborů uvedených v kap. 1 až 7 navrhnout metodiku umožňující určit prakticky využitelné hodnoty mezních přetvoření tenkých plechů používaných v automobilovém průmyslu v rozsahu napjatosti $m_{\sigma} \in (0, 1]$, při kterých dochází u výlisků ke vzniku trhlin v oblasti velkých plastických přetvoření.

Jako optimální se v této souvislosti jeví zachycení zmíněných mezních stavů v diagramech mezních přetvoření /kap. 4/, jež jsou určovány experimentálním modelováním daných stavů napjatosti. Pro tento postup byl navržen vhodný tvar zkušební tělesa /kap. 8.1/ umožňující jeho nenáročnou přípravu jedním střížným nástrojem a splňující požadavek určení stavů přetvoření v požadovaném rozsahu.

K realizaci přetvoření uvedených nástřihů byl vyroben tažný nástroj s polokulovým tažníkem umístěný na dvoučinném hydraulickém lisu /kap. 8.2/. Pomocí uzavřeného televizního okruhu lze sledovat průběh přetvoření a zvolit vhodný okamžik jeho přerušení. Pro zvolený postup byla vyvinuta metoda vytváření deformačních sítí kombinací metod fotografické a elektrochemického leptání /včetně zhotovení příslušných zařízení/ splňující i náročná kritéria přesnosti stanovení přetvoření /kap. 9/. Objektivnost výsledků je založena na zpracování výsledků experimentů pomocí výpočetní techniky při širokém využití matematické statistiky /kap. 11/.

Prostřednictvím navržené metodiky byly získány využitelné DMP některých druhů tenkých plechů již používaných nebo vyvíjených např. pro potřeby automobilového průmyslu. Spolu s využitím některých dalších zkoušek byl tak rozšířen pohled na jejich vlastnosti ve vztahu k technologii jejich zpracování /kap. 11, 13.1/. Rovněž byla pomocí navržené metodiky ověřena využitel-

nost křivek mezních přetvoření získaných některými početními metodami /kap. 13.2/.

Byly ověřeny i možnosti její aplikace k posouzení výkyvů vlastností plechu dané charakterem hutní výroby včetně využití metodiky pro vymezení vlivu technologických podmínek provádění zkoušky na získané hodnoty mezních přetvoření /kap. 12/. Rovněž bylo využito získaných DMP v souvislosti s analýzou přetvoření na konkrétním výlisku /kap. 13.3/.

Další možnosti navržené metodiky jsou naznačeny v kap. 14. Rozbory provedené v rámci státního úkolu III-1-6/2-4 v r. 1986 ukazují, že navrženou metodiku bude možno použít i pro určování mezních stupňů přetvoření povrchově upravených tenkých ocelových plechů. Výsledky této práce představují součást komplexního problému řešení lisovatelnosti výlisků z plechu, který je dlouhodobě řešen na katedře tváření a plastů VŠST v Liberci.

Závěrem bych chtěl poděkovat Doc. Ing. Jaroslavu Tmějovi, CSc. a Ing. Viktoru Mikešovi, CSc. za odborné vedení, cenné připomínky a veškerou pomoc poskytovanou během vědecké práce. Děkuji Ing. Zdeňce Moravcové za pomoc při určování materiálových charakteristik zkouškou tahem a při získávání struktur použitých plechů. Zároveň děkuji celému kolektivu pracovníků katedry tváření a plastů za pochopení i pomoc při řešení dílčích problémů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- 1| KOŠTÁL, I.: Aplikace manipulátorů v plošném tváření. Inf.přehled tváření, VUTS, 1983, č.8
- 2| ŠPAČEK, J.: Pružné výrobní soubory pro hluboké tažení. Inf.přehled tváření, VUTS, 1985, č.8
- 3| HRBÁČEK, P.: Rozbor podmínek vzniku zmetků při tažení tenkých plechů při výrobě automobilu./Dipl.práce/, Liberec, VŠST, 1986
- 4| PEARCE, R.: Sheet metal testing machine for teaching and research. SH.METAL IND., 60, 1983, č.8
- 5| KEELER, S.P.: Formability - the basics and beyond. AMER. MACH., 1982, January
- 6| CHINA, M.L.-TOMLENOV, A.D.-MIRANSKAJA, E.D.-RUZANOV, F.I.: Opyt ispolzovanija i perspektivy razvitiya metodov issledovanija štampujemosti listovogo metalla. KUZ. ŠTAMP. PROIZ., 1978, č.6
- 7| ŠIŠKIN, K.A.-MIRANSKAJA, E.D.: Ispolzovanie EVM dlja teoretiko-eksperimentalnogo issledovanija processov formoobrazovanija složnyh vyťažnyh perechodov. KUZ. ŠTAMP. PROIZ., 1978, č.11
- 8| SOKOLOV, I.A.-KORŠUNOVA, Z.I.: Opyt primenenija krivych predelnoj štampujemosti dlja ocenki kačestva tonkolistovogo metalla. KUZ. ŠTAMP. PROIZ., 1982, č.1
- 9| KARDOŠ, K.: Učet technologičeskich ispytanij materiálov pri razrabotke tehnologii listovoj štampovki. KUZ. ŠTAMP. PROIZ., 1985, č.3
- 10| AVERKIJEV, A.Ju.: Štampujemoť listovogo prokata. KUZ. ŠTAMP. PROIZ., 1986, č.9
- 11| KEELER, S.P.: Understanding sheet metal formability. Part 4, Machinery, 1968, May
- 12| CHATFIELD, D.A.-KEELER, S.P.: Designing for formability. METAL PROG., 1971, May
- 13| VEERMAN, C.Chr.: The determination and application of the FLC-onset of localised necking. In: Sheet metal forming and formability, Congress IDDRG, 1972
- 14| SANZ, G.: Graniczne krzywe tłoczności. Obróbka plastyczna, tom XIV, zeszyt 1, 1975
- 15| JOHNSON, W.E.-STINE, P.A.: Application of sheetmetal research to high production fabrication shops. In: Sheet metal forming and energy conservation. Congress IDDRG, 1976
- 16| ISHIGAKI, H.-UMENARA, Y.-OKAMOTO, I.: Analysis of surface deformation defects in the press forming of large sized autobody panels. In: Congress IDDRG, 1978
- 17| GHOSH, S.K.: Principally on sheet metal forming defects as described in the 11th congress of IDDRG. INT.J.MECH.SCI., vol.23, 1981
- 18| KLUGE, S.-TESKE, F.: Anwendung von grenzformänderungsdiagrammen für die herstellung unregelmässiger blechwerk-

"
stücke. Umformtechnik, 1982, č. 6

- 19| MELANDER, A.-SCHEDIN, E.: On the forming limit in sheet metal forming. In: Advanced technology of plasticity, Vol. 1, Tokyo, 1984
- 20| RAO, U.S.-CHATURVEDI, R.C.: Sheet metal forming limits under complex strain paths using shear instability criterion. In: Advanced technology of plasticity, Vol. 1, Tokyo, 1984
- 21| BLAŽEK, S.-KOUTSKÝ, E.-SOUKUP, R.: Hlubokotažnost oceli a náročnost výlisku. Strojírenství, 21, 1971, č. 9
- 22| BLAŽEK, S.-SOUKUP, R.-KOUTSKÝ, E.: Hranice tváření plechu. Strojírenství, 22, 1972, č. 12
- 23| TMĚJ, J.-MIKEŠ, V.: Rozbor podmínek lisovatelnosti tenkých plechů. Strojírenství, 24, 1974, č. 6
- 24| LEE, D.: Computer-aided control of sheet metal forming processes. J. METALS, 1982, November
- 25| CHUNG, K.-LEE, D.: Computer-aided analysis of sheet material forming processes. In: Advanced technology of plasticity, Vol. 1, Tokyo, 1984
- 26| YOSHIDA, K.: Trends in forming technology for car body in Japan. In: Advanced technology of plasticity, Vol. 1, Tokyo, 1984
- 27| TOMÁŠEK, J.: Tvářitelnost a technologie tváření plechu. Inf. přehled tváření, VUTS, 1986, č. 2
- 28| BLOM, K.: Press formability of stainless steels. SH.METAL IND., 57, 1980, č. 1
- 29| PRNKA, T.-PASTRŇÁK, Z.: Současné a perspektivní požadavky na čs. metalurgii v souvislosti se zvyšováním užitných vlastností oceli. In: Predikce mechanických vlastností kovových materiálů na základě strukturních charakteristik, Nové Město n. Moravě, 1985
- 30| MIKEŠ, V.: Příspěvek k problematice určování mezních hodnot velkých plastických přetvoření při tažení výlisků karosářského typu. /Kandidátská disertační práce/, Liberec, 1969, VŠST
- 31| RICHARDS, P.N.: Forming and drawing of sheet steel. Part 1, 2 SH.METAL IND., 58, 1981, č. 10, 11
- 32| MARCINIAK, Z.: Sheet metal forming limits. In: Mechanics of sheet metal forming - material behavior and deformation analysis, GMR symposium, New-York, 1978
- 33| KEELER, S.P.: Sheet metal stamping technology-need for fundamental understanding. In: Mechanics of sheet metal forming-..., GMR symposium, New-York, 1978
- 34| TMĚJ, J.-MIKEŠ, V.-BUCHAR, Z.: Metoda určování diagramů mezních přetvoření pro hodnocení lisovatelnosti, aplikovatelná pro ocelové plechy se zvýšenými pevnostními hodnotami. In: Úspora kovů a zvýšení kvality výrobků z plechů VSŽ, Košice, 1984
- 35| AVERKIJEV, A. Ju.: Metody ocenki šampujemosti listovogo metalla. Moskva, Mašinostrojenie, 1985

- 36| KEELER, S. P. - BACKOFEN, W. A.: Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches. TRANS. QUART. ASM, Vol. 56, March, 1963, č. 1
- 37| POČTA, B.: Základy teorie tváření kovů. SNTL, Praha, 1966
- 38| POLLÁK, L.: Anizotropia a hlbokotažnosť ocelových plechov. ALFA, Bratislava, 1978
- 39| TMĚJ, J. - STRÁŽ, B.: Rozbor klinové zkoušky tenkých plechů. In: Sborník vědeckých prací VŠST, Liberec, 1972
- 40| PRIMUS, F. /rec. /: Přichystal, L., Vliv tloušťky plechu na polohu a tvar křivek mezních přetvoření. /Dipl. práce/, Liberec, VŠST, 1984
- 41| NOVÁK, J. - MACHEK, V.: Homogenní tažnost, její určování a využití. Strojírenská výroba, 29, 1981, č. 8
- 42| MACHEK, V.: Příspěvek k hodnocení tvářitelnosti plechů a pásů válcovaných za studena. Strojírenská výroba, 28, 1980, č. 8
- 43| POLLÁK, L.: Nové kritéria tvárnitelnosti plechov. In: Rozvoj technológie tvárnenia v 7. SRP, Vysoké Tatry, 1985
- 44| PRIMUS, F.: Tvářitelnost hlubokotažných plechů. Strojírenství, 26, 1976, č. 8
- 45| KEELER, S. P.: Formability - the basics and beyond. AMER. MACH., 1982, January
- 46| MIKEŠ, V.: Příspěvek k problematice určování materiálové hodnoty n tenkých hlubokotažných ocelových plechů. Strojírenství, 22, 1972, č. 5
- 47| MACHEK, V. - FOTUL, I.: Zjišťování normálové anizotropie a koeficientu zpevnění hlubokotažných plechů a pásů. Strojírenská výroba, 24, 1976, č. 11 a 12
- 48| MIKEŠ, V.: Aproximace křivek přetvárné pevnosti hlubokotažných ocelových plechů. In: Sborník prací VŠST, Liberec 1980
- 49| MORAVCOVÁ, Z.: Příspěvek k metodice hodnocení hlubokotažných plechů zkouškou tahem. In: Sborník prací VŠST, Liberec, 1985
- 50| DAVIES, G. J. - BURKE, M. A. - OZTURK, T.: The processing of sheet for optimal formability. SH. METAL IND., 60, 1983, č. 6
- 51| RUZANOV, F. I.: Opredelenie šampujemosti tonkolistovoj stali po veličině rovnoměrného udlinění. KUZ. ŠTAMP. PROIZ., 1966, č. 3
- 52| ŠORM, J.: Zkoušení normálové anizotropie tenkých ocelových plechů. Metodická pomůcka, Normalizace, 1971, č. 3
- 53| KOŘÍNEK, M. a kol.: Analýza napjatosti a přetvoření při tažení výlisků nepravidelných tvarů. /Zpráva v. v. úkolu F-3-22-6/1c, Liberec, VŠST, 1968
- 54| ŠTEFAN, B. - ŠLESÁR, M. - BOBROVÁ, E. - LUŠTÍK, J.: Mechanizmy tvárného lomu. In: Predikce mechanických vlastností kovových materiálů na základě strukturních charakteristik, Nové Město n. Moravě, 1985
- 55| GRONOSTAJSKI, J. - BANASIAK, C.: The effect of anisotropic plasticity and work-hardening on the sheet metal drawability

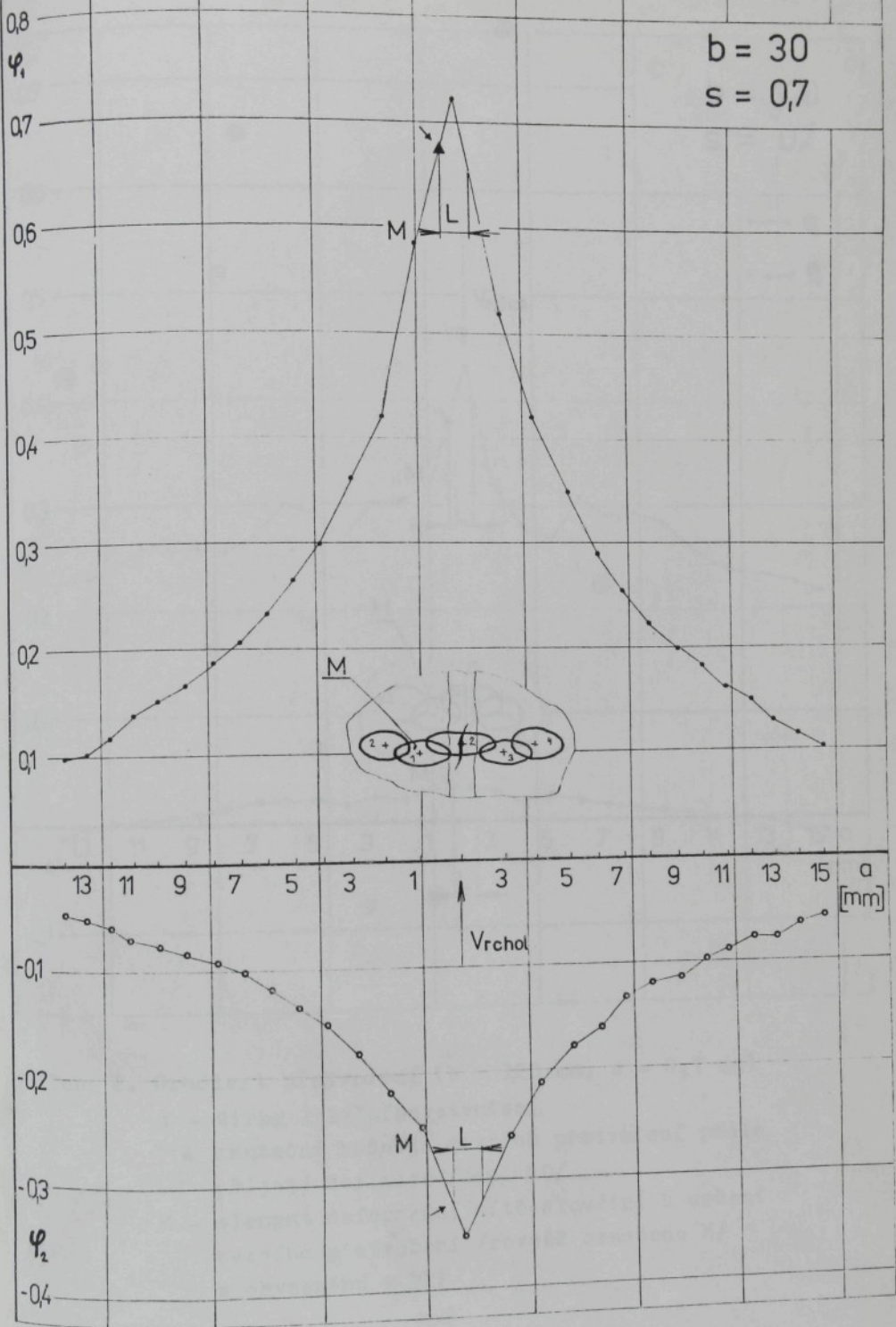
ty. In: Sheet metal forming and energy conservation, Congres IDDRG, 1976

- 56] KASPER, A.S.: How we will predict sheet metal formability. METAL PROG., 1969, October
- 57] KASPER, A.S.: How steels and dies interact in forming shapes. METAL PROG., 1971, May
- 58] KASPER, A.S.-VANDERVEEN, P.J.: Stretch-draw shape analysis for predictions of formability. In: Sheet metal forming and formability, Congres IDDRG, 1972
- 59] WILSON, D.V.: Shaping things to come- a metallurgist's view. Part 1, SH.METAL IND., 57, 1980, č.12
- 60] BLAŠČÍK, F.-WESSELY, E.: Plastované plechy. ALFA, Bratislava, 1980
- 61] TOMLENOV, A.D.: Plastičeskoe naprjažennoe sostojanie i ustojčivost' processa vytažki detalej složnoj formy. In: Voprosy obrabotki metallov davleniem, AN SSSR, 1959
- 62] TOMLENOV, A.D.: Ustojčivost' processov plastičeskogo formoobrazovaniya listovykh metallov. In: Rasčety plastičeskogo deformirovaniya metallov, Moskva, izd. Nauka, 1975
- 63] TMĚJ, J.-MIKEŠ, V.: Teorie tváření. /Skripta/, Liberec, 1981, VŠST
- 64] KEELER, S.P.: Determination of forming limits in automotive stampings. SH.METAL IND., 42, 1965, č.9
- 65] KEELER, S.P.: Predicting forming limits. Understanding sheet-metal formability, part 4. SH.METAL IND., 48, 1971, č.8
- 66] TMĚJ, J.-BUCHAR, Z.-MIKEŠ, V.-HORAVCOVÁ, Z.: Aplikace experimentální metody KPT VŠST Liberec při určování diagramu mezních přetvoření plechu KOHAL EXTRA. /Práce na zakázku AZNP Mladá Boleslav č.64049/350/, VŠST, 1984
- 67] RUZANOV, F.I.: Ustojčivost' processa deformacii ortotropnogo metalla v uslovijach ploskogo naprjažennogo sostojaniya. In: Plastičeskoe formoizmenenie metallov, Moskva, AN SSSR, 1967
- 68] HILL, R.: Matematičeskaja teorija plastičnosti. Moskva, GITTL, 1959
- 69] HILL, R.: On discontinuous plastic states, with special reference to localized necking in thin sheets. J.MECH. PHYS.SOLIDS, Vol.1, 1952
- 70] RUZANOV, F.I.: Predelnye deformacii pri formoobrazovanii rastjaženiem ortotropnogo listovogo metalla, Mašinovědě-
nija, 1969, č.5
- 71] RUZANOV, F.I.: Lokalnaja ustojčivost' processa deformacii ortotropnogo listovogo metalla v uslovijach složnogo nagraženiya, Mašinověděnie, 1973, č.4
- 72] GOLOVLEV, V.D.: Ustojčivost' dyuchosnogo rastjaženija anizotropnogo lista, Mašinověděnie, 1966, č2
- 73] GOLOVLEV, V.D.: Skladkoobrazovanie anizotropnogo lista pri vytažke. In: Plastičeskoe formoizmenenie metallov, Moskva, AN SSSR, 1967
- 74] RUZANOV, F.I.: Lokalnaja ustojčivost' processa deformacii ortotropnogo listovogo metalla v uslovijach složnogo na-

- 75| BUCHAR, Z.: Diagramy mezních přetvoření. /Pisemná část k odborné kandidátské zkoušce/, Liberec, 1982, VŠST
- 76| SWIFT, H.W.: Plastic instability under plane stress. J. MECH. PHYS. SOLIDS, Vol. 1, 1952
- 77| MOORE, G.G. - WALLACE, J.F.: The effect ^{of} anisotropy on Instability in sheet metal forming. J. INST. METALS, Vol. 93, 1964-65
- 78| VENTER, R.D. - de MALHERBE, M.C.: Theoretical estimate of the Keeler - Goodwin formability curve. SH. METAL IND., 48, 1971
- 79| GHOSH, A.K.: Strain localization in the diffuse neck in sheet metal. METALLURG. TRANS., Vol. 5, 1974, July
- 80| PRIMUS, F.: Nomogramy pro určení zásoby plasticity/anizotropních hlubokotažných plechů. Strojírenská výroba, 26, 1978, č. 2
- 81| RUZANOV, F.I.: Opredelenie kritičeskich deformacij pri formoobrazovanii detali iz anizotropnogo listovogo metal-la, Mašinověděnie, 1974, č. 2
- 82| BUCHAR, Z. - MIKEŠ, V.: Příspěvek k problematice hodnocení tvárnosti plechů. In: Sborník prací VŠST, Liberec, 1985
- 83| MARCINIAK, Z. - KUCZYŃSKI, K.: Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal. INT. J. MECH. SCI., Vol. 9, 1967
- 84| SOWERBY, R. - DUNCAN, J.L.: Failure in sheet metal in biaxial tension. INT. J. MECH. SCI., Vol. 13, 1971
- 85| 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
- 86| GHOSH, A.K.: A criterion for ductile fracture in sheet under biaxial loading. METALLURG. TRANS. A, 1976, April
- 87| KRATOCHVÍL, J. - KROUPA, F. - SAXL, I.: Termodynamické aspekty plastické deformace a porušování. In: Predikce mechanických vlastností kovových materiálů na základě strukturních charakteristik. Nové Město n. Moravě, 1985
- 88| TMĚJ, J. - MIKEŠ, V. - BUCHAR, Z.: Uplatnění kritérií lomu při určování diagramů mezních přetvoření hlubokotažných plechů. In: Rozvoj technológie tvárnenia v 7. SRP, Vysoké Tatry, 1985
- 89| HASEK, V.: Untersuchung und theoretische beschreibung wichtiger einflussgrößen auf das grenzformänderungsschaubild, Blech-Rohre-Profile, 25, 1978, č. 5, 6, 10, 12
- 90| ČERMÁK, J. - ŠANOVEC, J.: Experimentální zjišťování Keeler-Goodwinových křivek mezních přetvoření. Strojírenská výroba, 28, 1980, č. 3
- 91| YOSHIDA, K. - HAYASHI, Y.: Developments in research into sheet-metal forming process in Japan, part 1, 2. SH. METAL IND., Vol. 55, 56, 1978-č. 12, 1979-č. 3
- 92| TMĚJ, J. - MIKEŠ, V. - BERAN, F. - BUCHAR, Z. - MORAVCOVÁ, Z.: Rozbor metod určování mezních hodnot velkých plastických přetvoření při tažení výlisků z plechu. /Výzkumná zpráva úkolu R 57-124-006/, Liberec, VŠST, 1981

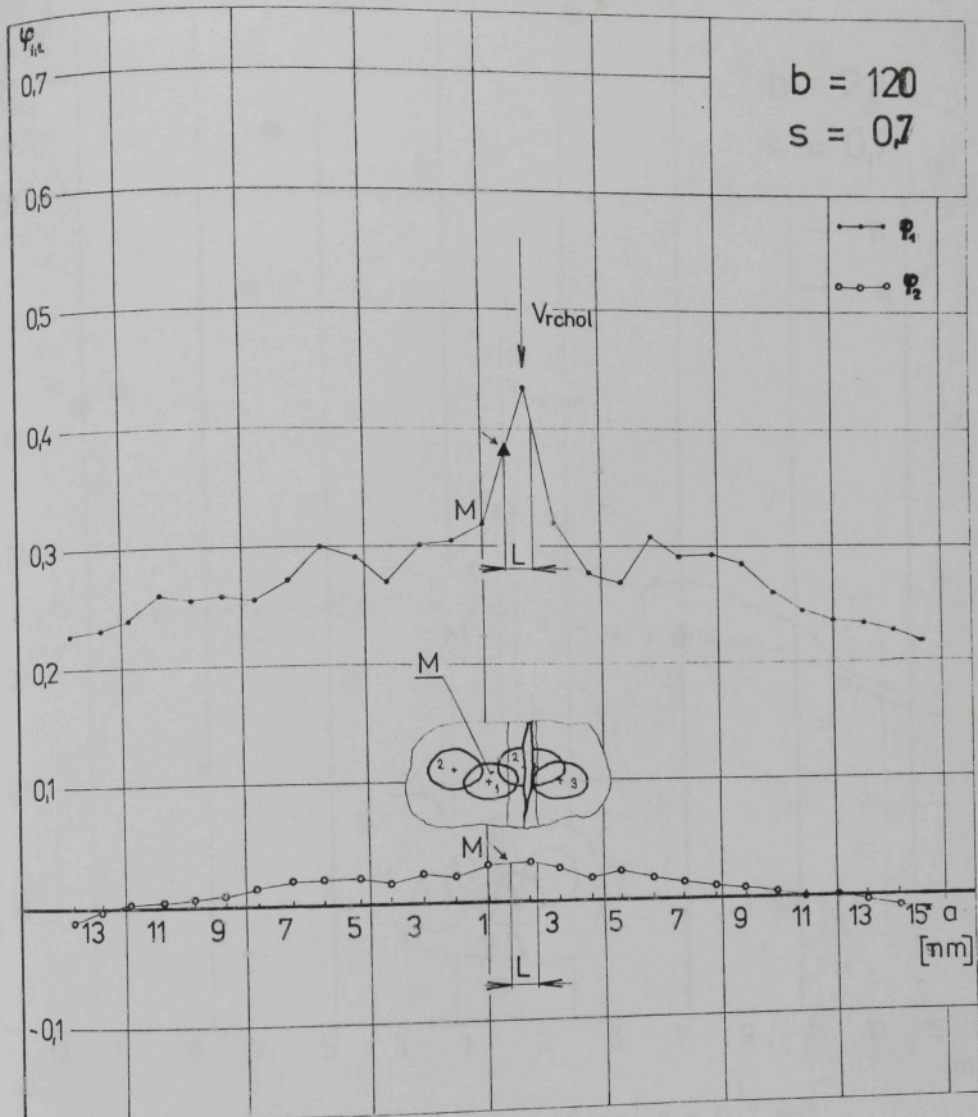
- 93| TMĚJ, J. - MIKEŠ, V. - BERAN, F. - BUCHAR, Z. - MORAVCOVÁ, Z.: Metodika experimentálního hodnocení plechů z hlediska mezních hodnot velkých plastických přetvoření. / Výzkumná zpráva úkolu R 57-124-006/82/, Liberec, 1982, VŠST
- 94| CHARPENTIER, P.L.: Influence of punch curvature on the stretching limits of sheet steel. METALLURG. TRANS. A, Vol. 6A, 1975, August
- 95| PANUŠ, J.: Hodnocení plechů z neželezných slitin elastoplastickými vlastnostmi. / Disertační práce/, Brno, 1982, VÚ070
- 96| TMĚJ, J. - BERAN, F. - BUCHAR, Z. - MIKEŠ, V. - MORAVCOVÁ, Z.: Metody hodnocení lisovatelnosti hlubokotažných plechů. / Výzkumná zpráva úkolu F-2421-040/, Liberec, 1983, VŠST
- 97| MIKEŠ, V. - BUCHAR, Z.: Příspěvek k metodice experimentálního určování diagramů mezních přetvoření. Celostátní konference, Liberec, 1982
- 98| KOŠKA, J.: Vliv stavu napjatosti na materiálovou charakteristiku "n". / Dipl. práce/, Liberec, 1985, VŠST
- 99| KEELER, S.P.: Forming limit criteria-sheets, chapter 4. In: Advances in deformation processing, Army materials research center, 1978
- 100| KEELER, S.P.: Visible strain patterns. Understanding sheet metal formability, part 2. SH. METAL IND., 48, 1971, č. 6
- 101| ŠANOVEC, J. - POTUŽÁKOVÁ, V. - ROLLER, I.: Zaleptané sítě k zjišťování intenzity přetvoření při tváření za studena. Strojírenská výroba, 21, 1973, č. 2
- 102| HECKER, S.S.: Simple technique for determining forming limit curves. SH. METAL IND., 52, 1975, č. 11
- 103| ČSN 01 0250, 52, 53: Statistické metody v průmyslové praxi, 1972
- 104| JENČÍK, J. - KUHN, L.: Technická měření ve strojnictví, SNTL, Praha, 1982
- 105| VEERMAN, C. Chr. - HARTMAN, L. - PEELS, J. J. - NEVE, R. F.: Determination of appearing and admissible strains in cold-reduced sheets. SH. METAL IND., 48, 1971, č. 9
- 106| HECKER, S.S.: A simple forming limit curve technique and results on aluminium alloys. In: Sheet metal forming and formability, Congres IDDRG, 1972
- 107| LIU, Y. C.: A new method in the determination of forming limit diagram. SH. METAL IND., 58, 1981, č. 4
- 108| VEERMAN, C. Chr. - BROZZO, P.: Discussions on sheet metal forming and formability, part 3, Congres IDDRG, 1972
- 109| BERAN, F.: Z dosud nepublikovaných prací katedry tváření a plastů VŠST, Liberec, 1986.
- 110| VAN MINH, H. - SOWERBY, R. - DUNCAN, J. L.: Variability of forming limit curves. INT. J. MECH. SCI., Vol. 16, 1974
- 111| VINOGRADOV, I. V.: Matematičeskaja enciklopedija, 1. izd. "Sovětskaja enciklopedija", Moskva, 1977
- 112| REKTORIS, K.: Přehled užité matematiky. SNTL, Praha, 1981
- 113| BOROŮVKA, F.: Výpočet pneumatického uložení hmot s aplikací na podložky tiskových strojů. / disertační práce/, Liberec, 1982, VŠST

- 114] HÄTLE, J. - LIKES, J.: Základy počtu pravděpodobnosti a matematické statistiky. SNTL/ALFA, Praha, 1974
- 115] WILSON, D.V. - ACSELRAD, O.: Effects of microstructure on forming limits in biaxial stretching. SH.METAL IND., Vol. 56, 1979, č. 5
- 116] CHODORA, I. - ŠÝKORA, J. - SMRČKA, J.: Rozptyl ukazatelů hlubokotažnosti a kolísání vlastností podél svítku plechu a jejich vliv na zmetkovitost. In: Rozvoj technologie tvárnenia v 7. SRP, Vysoké Tatry, 1985
- 117] BUCHAR, Z. - KRACÍK, V.: Hodnocení tváritelnosti tenkých plechů prostřednictvím diagramů mezních přetvoření. In: Sborník prací VŠST, Liberec, 1985
- 118] 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
- 119] HABERFIELD, A.B. - BOYLES, M.W.: Laboratory determined forming limit diagrams. SH.METAL IND., 1973, č. 7
- 120] JALINIER, J.M. - BAUDET, B.: Theoretical analysis of the influence of damage on the shape and position of the forming limit diagram and on the strain-path and thickness effects. In: Congress IDDRG, 1978
- 121] HECKER, S.S. - VEERMAN, C. Chr.: Discussions on the sheet metal forming and formability, part 3. In: Congress IDDRG, 1972
- 122] PERCY, J.H.: Vlivanie skorosti deformácii na diagramu predelného formoizmenění listovogo metalla. EI-TO KUZN. ŠTAMP. PROIZ., 1981, č. 3
- 123] BLAŠČÍK, F. - POLÁK, K.: Teória tvárnenia. ALFA-SNTL, 1985
- 124] DEVEDŽIČ, B. - STEFANOVIČ, M.: Formänderungsverteilung beim Blechen, ihre Auswertung und ihr Einfluss auf die technologische Sicherheit. In: Industrielle Fertigung auf dem Wege zur Automatisierung, Dresden, 1982
- 125] RASMUSSEN, S.N.: Theoretical prediction of strainpath dependence of limit strains in sheet materials. In: Annals of the CIRP, vol. 30/1, 1981
- 126] KLEEMOLA, H. - KUMPULAINEN, J. - FANTA-ESKOLA, A.: Faktory vlijajuščije na diagrammu predelnogo formoizmenění listovogo metalla. EI-TO KUZN. ŠTAMP. PROIZ. 1981, č. 22
- 127] RAO, U.S. - CHATURVEDI, R.C.: Method for analyzing press shop failures. SH.METAL IND., 61, 1984, č. 6
- 128] FANTA-ESKOLA, A.: Vlivanie puti nagraženiya na štampujemość listovykh metallov. EI-TO KUZN. ŠTAMP. PROIZ., 1981, č. 22
- 129] CELIKOV, A.I.: Hutní stroje a zařízení-současné a budoucí, SNTL, Praha, 1984
- 130] KOŽAR, O. - GABANI, Š. - PRIBULA, P.: Niektoré poznatky z overovania plynulého odlievania ocele vo VSŽ Košice, Ocelové plechy, 1984, 3-4
- 131] ZORIČÁK, M.: Vákuovanie dynamo ocele na DH zariadení. Ocelové plechy, 1983, 1-2
- 132] MITURA, K. - LANDOVÁ, S.: Vměstky v oceli a jejich vliv na užité vlastnosti oceli. SNTL, Praha, 1986
- 133] JANOK, J.: Sortiment výroby a nové výrobky plechov v 8. SRP. In: Plechy pre automobil. priemysel, Mladá Boleslav, 1986
- 134] MČEDLIŠVILI, V.A. - CHORVINA, V.V.: Bor, kalcij, niobij i cirkonij v čugune i stali. Metallurgizdat, Moskva, 1961
- 135] PEARCE, R.: Developments in sheet metal. SH.METAL IND., 1986, č. 4
- 136] BUCHAR, Z. - MIKEŠ, V. - TMĚJ, J.: Diagramy mezních přetvoření plechů KOHAL 20 E, KOHAL 20 E konti a KOHAL 21 N./Práce na zakázku č. 65102/350, VSŽ n.p. Košice/, VŠST, Liberec, 1985



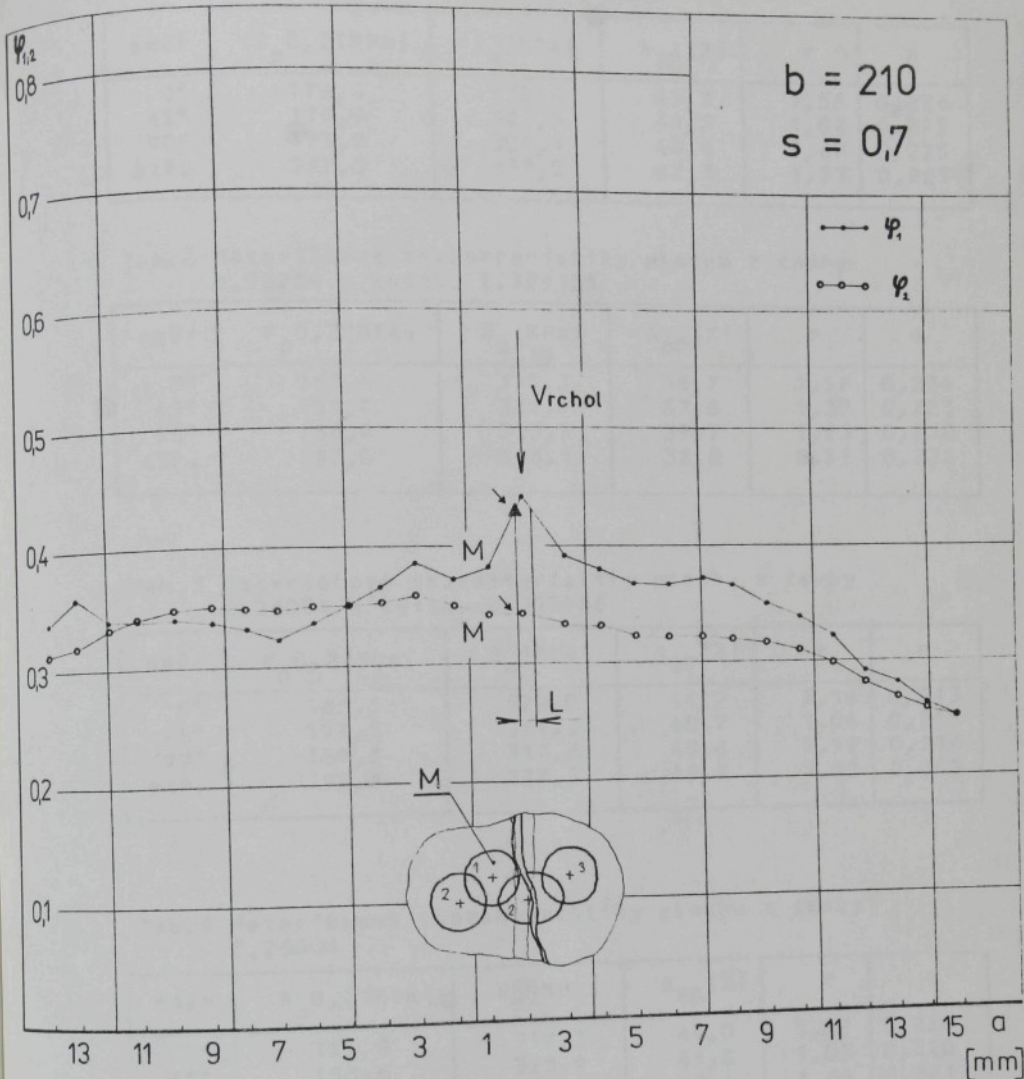
Příloha 1. Gradient přetvoření ($b = 30$ mm, $s = 0,7$ mm)

L - šířka lokálního ztenčení



Příloha 2. Gradient přetvoření ($b = 120$ mm, $s = 0.7$ mm)

- L - šířka lokálního ztenčení
- $\rightarrow \blacktriangle$ skutečná hodnota mezního přetvoření podle přijaté definice /kap. 10/
- M - element deformační sítě sloužící k určení mezního přetvoření /rovněž označeno M / zachyceného v DMP



Příloha 3. Gradient přetvoření ($b = 210$ mm, $s = 0,7$ mm)
L - šířka lokálního ztenčení

směr	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	r	n
0°	176,4	312,6	43,3	1,58	0,226
45°	179,9	323,5	41,2	1,02	0,225
90°	173,0	309,1	43,6	1,68	0,225
stř.	177,3	317,2	42,3	1,33	0,225

Tab.2 Materiálové charakteristiky plechu z tavby
č.58238 a svítku č.325135

směr	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	r	n
0°	183,6	315,2	39,7	1,52	0,234
45°	188,8	321,9	37,8	1,30	0,223
90°	186,9	313,5	39,7	1,93	0,230
stř.	187,0	318,1	38,8	1,51	0,228

Tab.3 Materiálové charakteristiky plechu z tavby
č.26004 a svítku č.315986

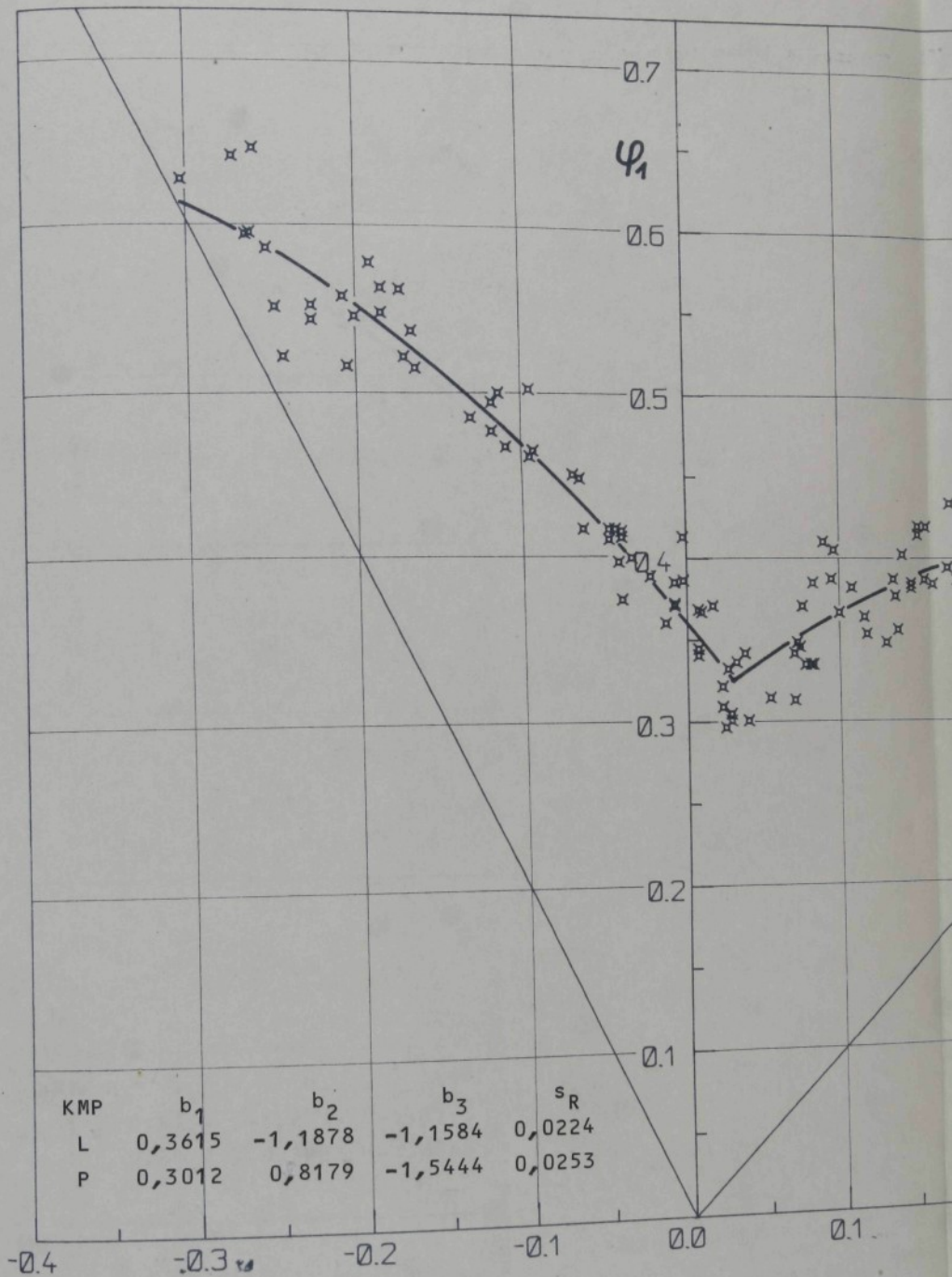
směr	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	r	n
0°	187,3	322,0	44,7	1,56	0,213
45°	197,3	334,3	40,7	1,04	0,215
90°	189,3	317,6	43,6	1,57	0,216
stř.	192,8	327,1	42,4	1,30	0,215

Tab.4 Materiálové charakteristiky plechu z tavby
č.26004

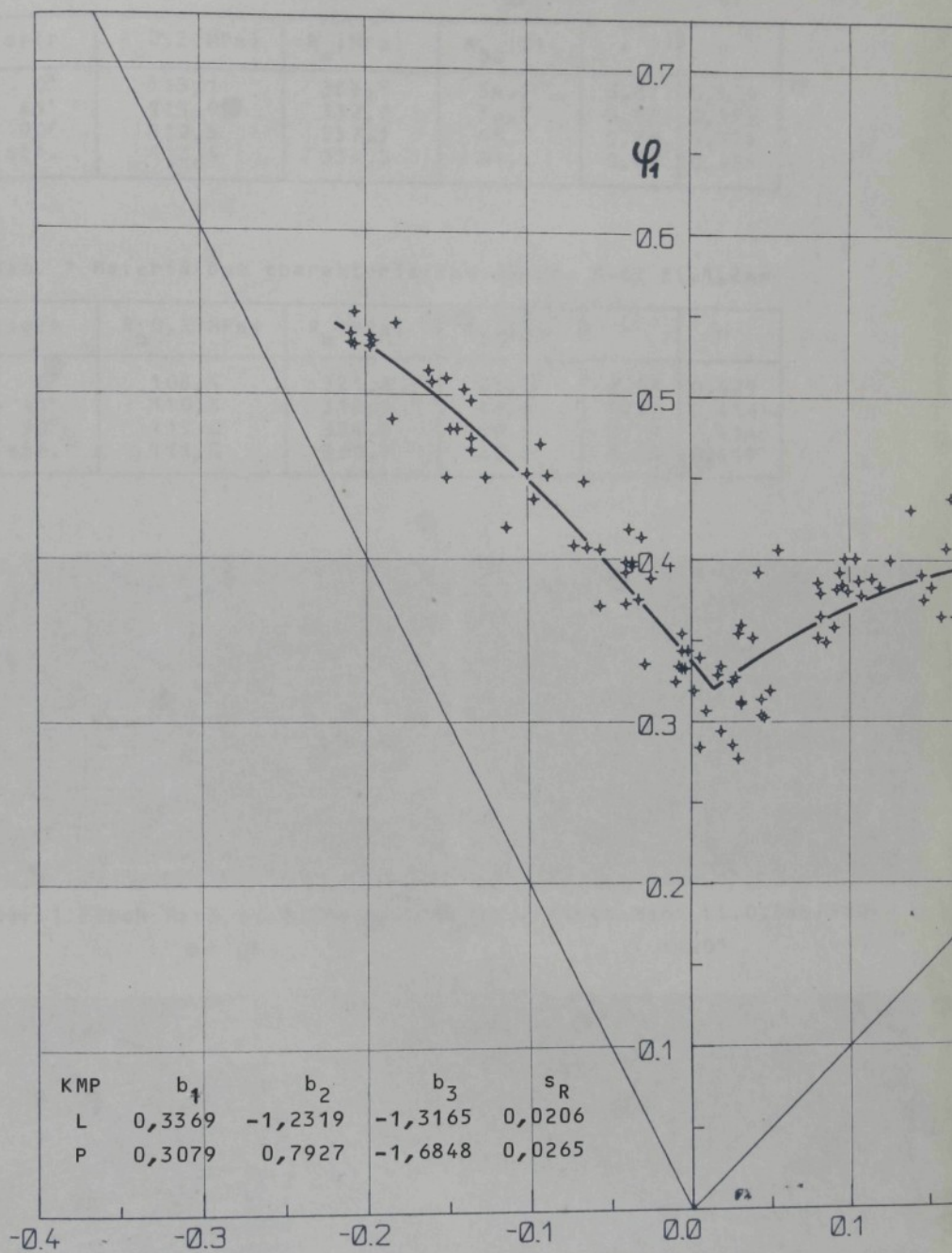
směr	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	r	n
0°	181,8	317,3	44,0	1,57	0,220
45°	188,6	328,9	41,0	1,03	0,220
90°	181,1	313,3	43,6	1,63	0,221
stř.	185,0	322,1	42,4	1,32	0,220

Tab.5 Materiálové charakteristiky plechu z tabule "41"

směr	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	r	n
0°	194,7	326,1	43,0	1,54	0,205
45°	210,6	340,3	39,6	1,06	0,216
90°	196,1	325,0	45,7	1,60	0,214
stř.	203,0	332,9	42,0	1,32	0,213



Příloha 5. Diagram mezních přetvoření pro směr hlavního normálního přetvoření totožný se směrem válcování pro plech KOHAL 20 E



Příloha 6. Diagram mezních přetvoření pro směr hlavního normálního přetvoření 45° vůči směru válcování pro plech KOHAL 20 E

směr	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	r	n
0°	113,1	336,8	54,1	0,87	0,424
45°	113,9	332,0	56,7	0,82	0,399
90°	112,5	337,1	48,7	0,76	0,394
stř.	113,4	334,5	54,1	0,82	0,404

Tab. 7 Materiálové charakteristiky plechu Ms63 tl.1,2mm

směr	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	r	n
0°	108,4	321,8	63,0	0,87	0,429
45°	110,3	318,3	68,4	0,87	0,416
90°	115,0	324,2	60,9	0,79	0,414
stř.	111,0	320,7	65,2	0,85	0,419



Obr.1 Plech Ms63 tl.0,8mm/500x/
 $\alpha = 0^\circ$



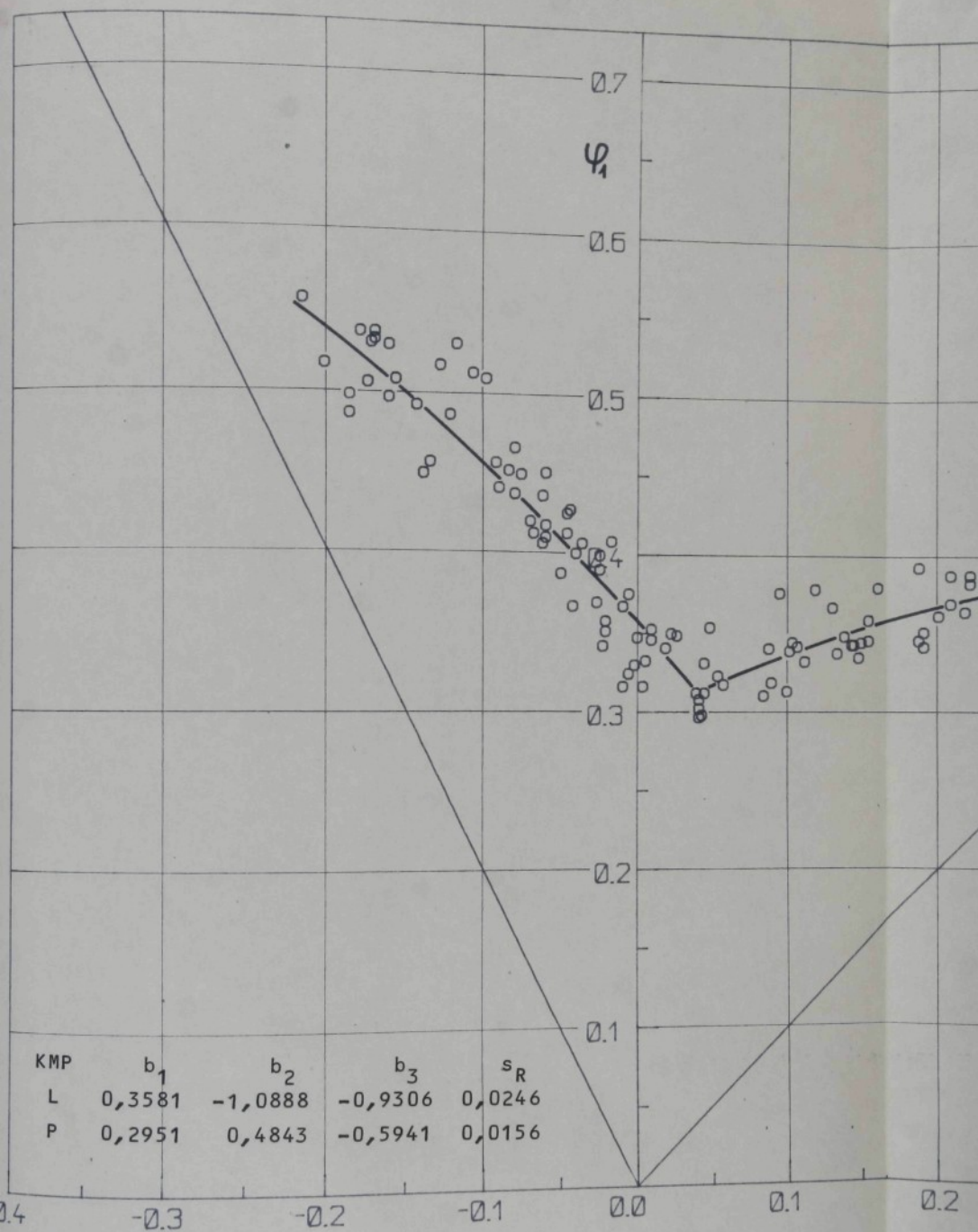
Obr.2 Plech Ms63 tl.0,8mm/500x/
 $\alpha = 90^\circ$



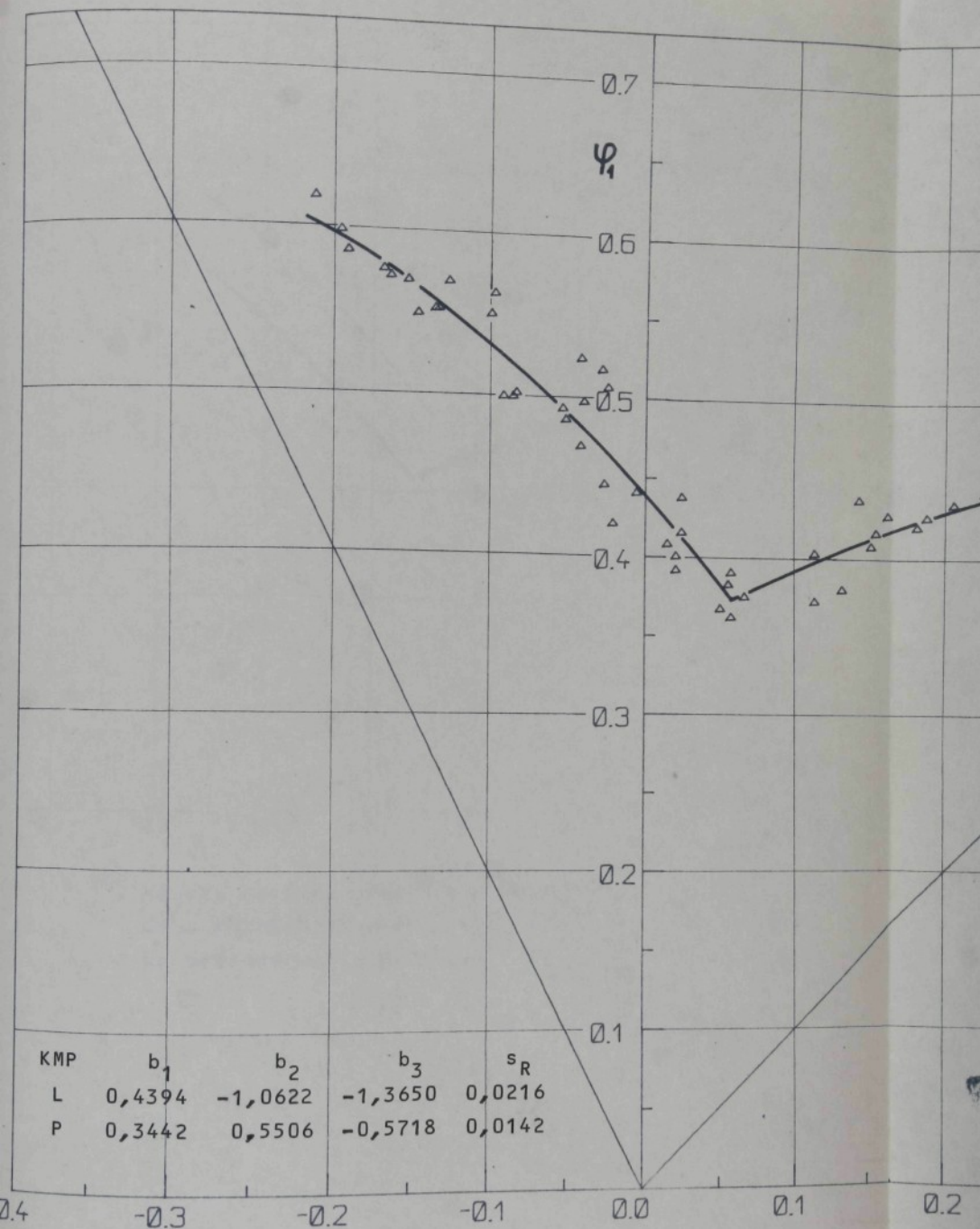
Obr.3 Plech Ms63 tl.1,2mm/500x/
 $\alpha = 0^\circ$



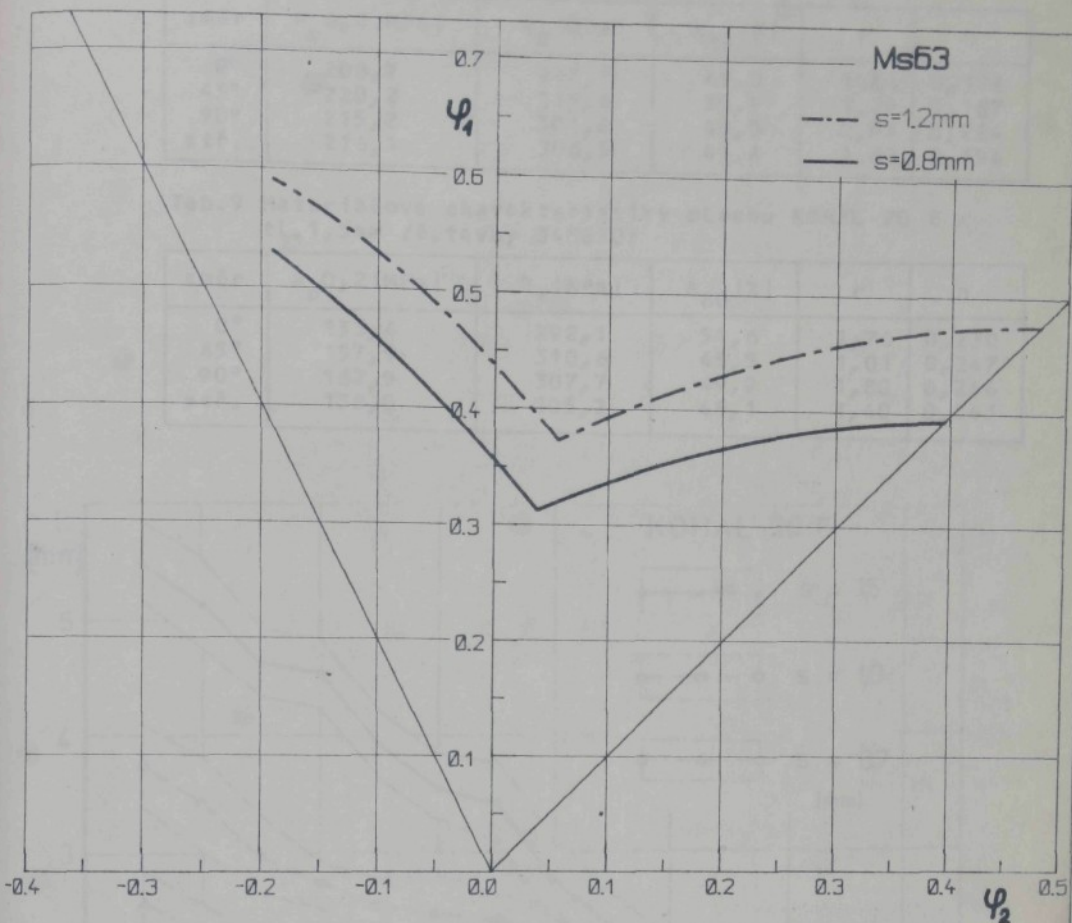
Obr.4 Plech Ms63 tl.1,2mm/500x/
 $\alpha = 90^\circ$



Příloha 8. Diagram mezních přetvoření pro mosazný plech
tloušťky 0,8 mm /směr hlavního normálního
přetvoření je kolmý na směr válcování/



Příloha 9. Diagram mezních přetvoření pro mosazný plech
tloušťky 1,2 mm /směr hlavního normálního
přetvoření je kolmý na směr válcování/



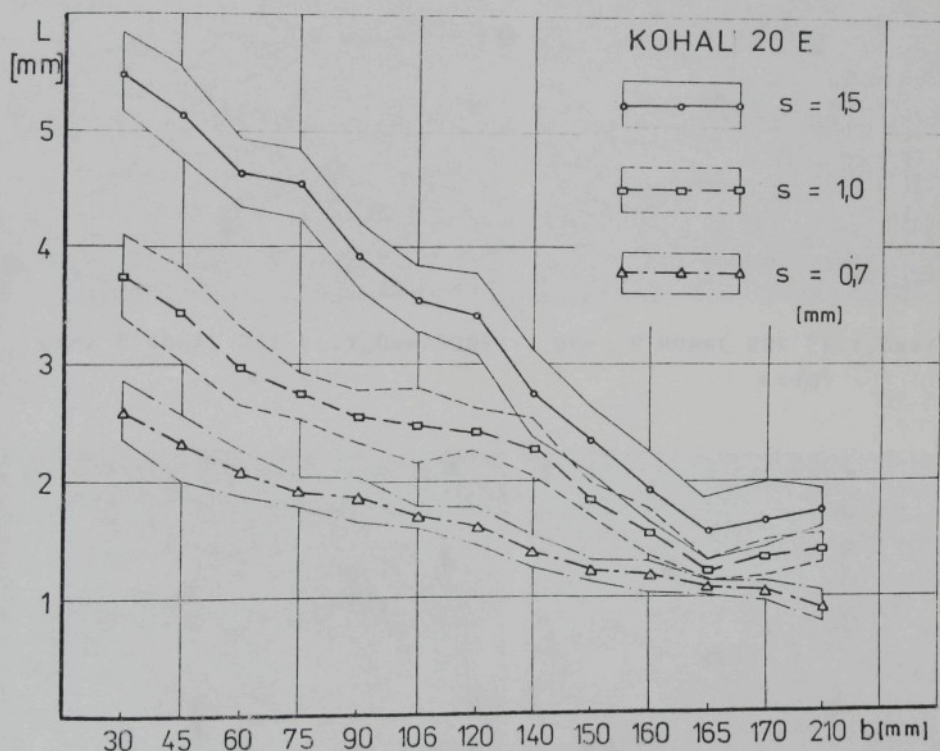
Příloha 10. Křivky mezních přetvoření pro mosazné plechy dvou různých tloušťek /směr hlavního normálního přetvoření je kolmý na směr válcování/

Tab.8 Materiálové charakteristiky plechu KOHAL 20 E
tl.1,0mm /č.tavby 5975603/

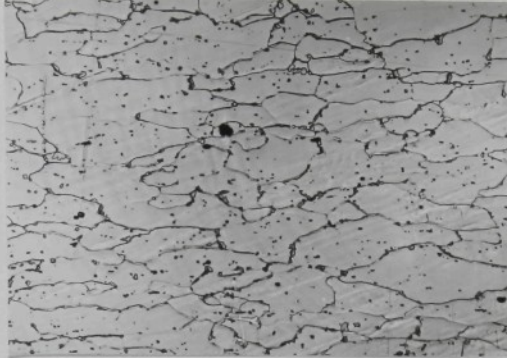
směr	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	r	n
0°	208,7	293,7	45,0	1,84	0,178
45°	220,2	315,6	39,9	1,29	0,187
90°	215,2	301,0	40,0	2,05	0,224
stř.	216,1	306,5	41,4	1,62	0,194

Tab.9 Materiálové charakteristiky plechu KOHAL 20 E
tl.1,5mm /č.tavby 348870/

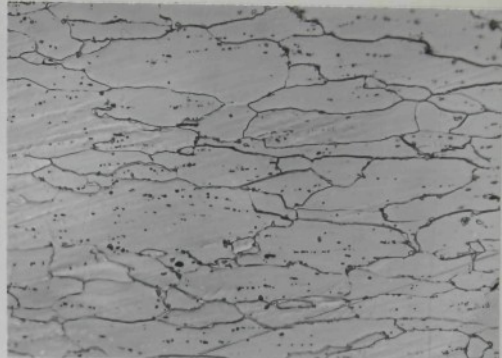
směr	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	r	n
0°	153,4	292,1	51,6	1,76	0,230
45°	157,9	310,6	45,5	1,01	0,247
90°	162,9	307,7	49,9	1,80	0,246
stř.	158,0	305,2	48,1	1,40	0,243



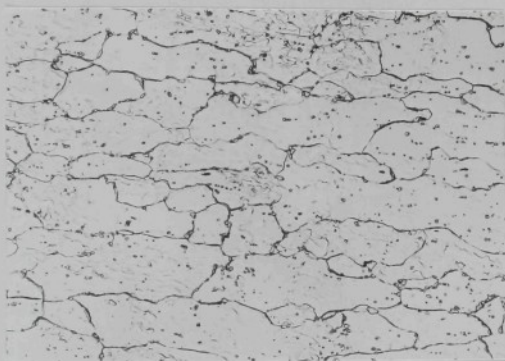
Obr. 5 Závislost šířky lokálního ztenčení L na stavu přetvoření /dán šířkou nástřihu b/ a na tloušťce plechu



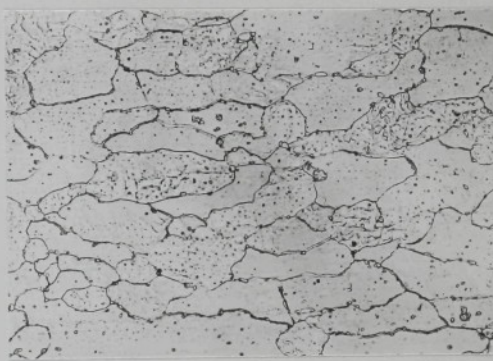
Obr. 6 KOHAL 20E tl.0,7mm/500x/
 $\alpha = 0^\circ$



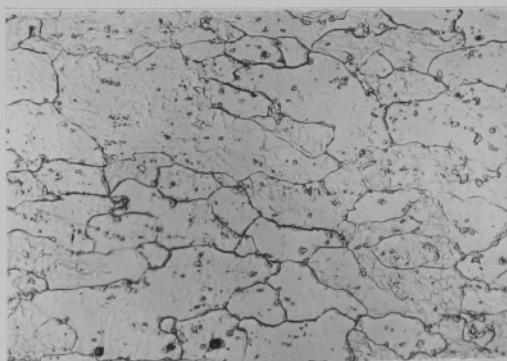
Obr. 7 KOHAL 20E tl.0,7mm/500x/
 $\alpha = 90^\circ$



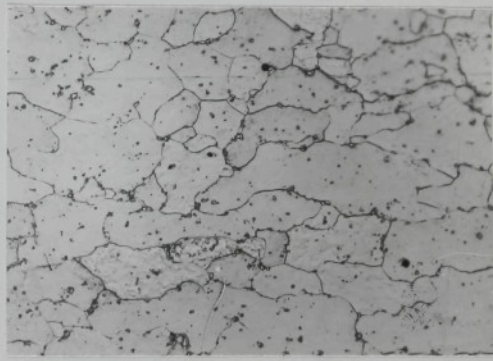
Obr. 8 KOHAL 20E tl.1,0mm/500x/
 $\alpha = 0^\circ$



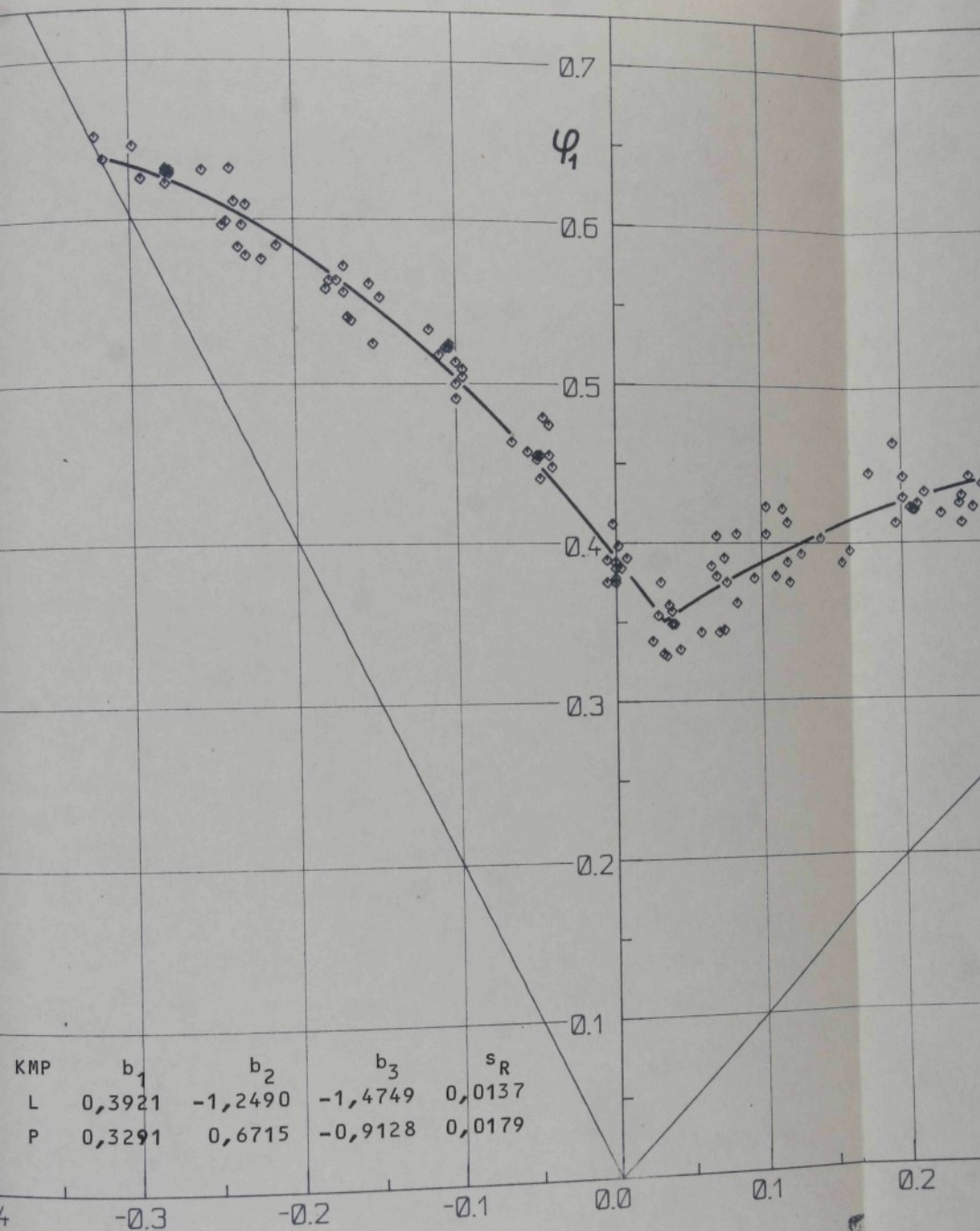
Obr. 9 KOHAL 20E tl.1,0mm/500x/
 $\alpha = 90^\circ$



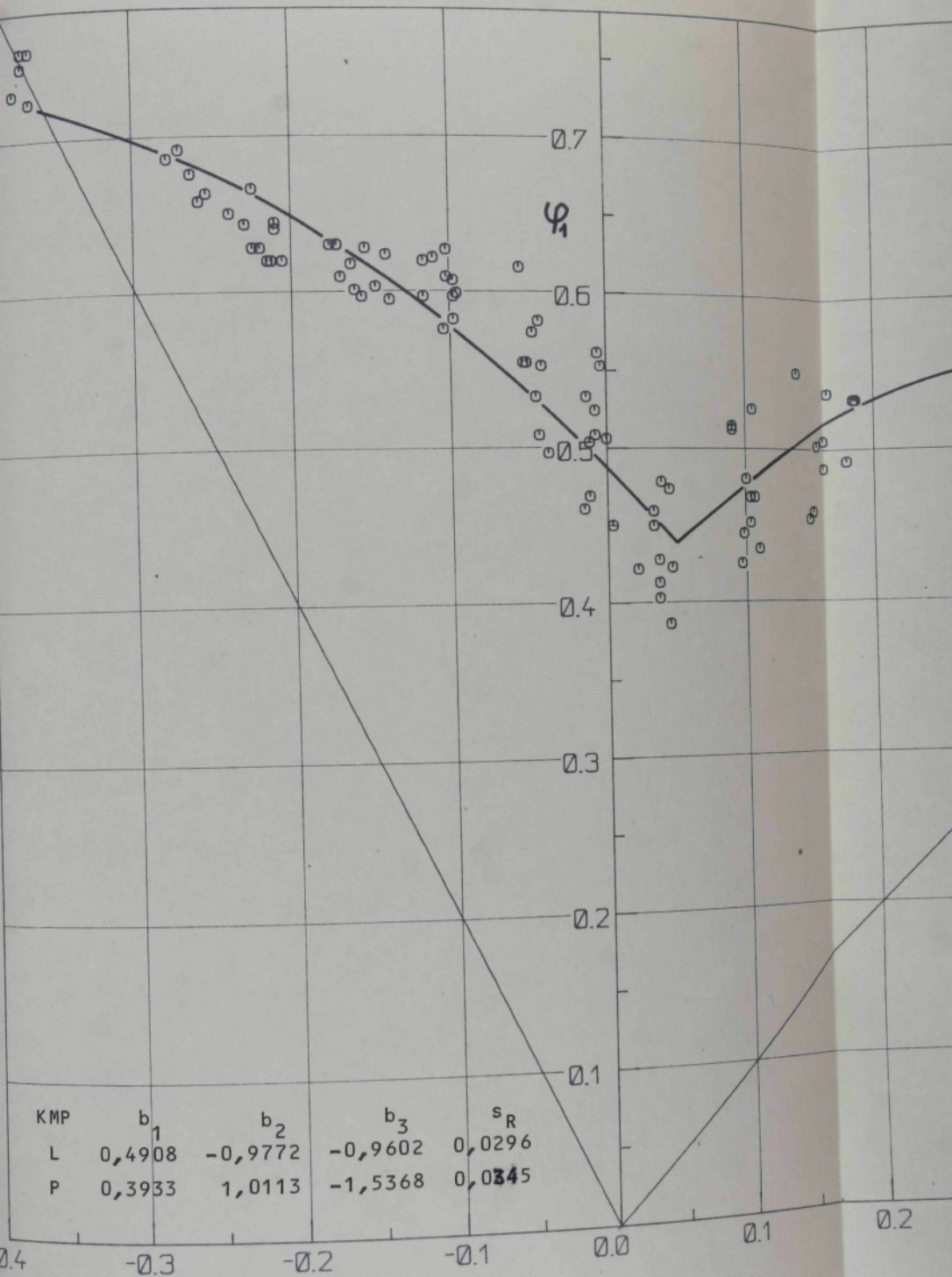
Obr.10 KOHAL 20E tl.1,5mm/500x/
 $\alpha = 0^\circ$



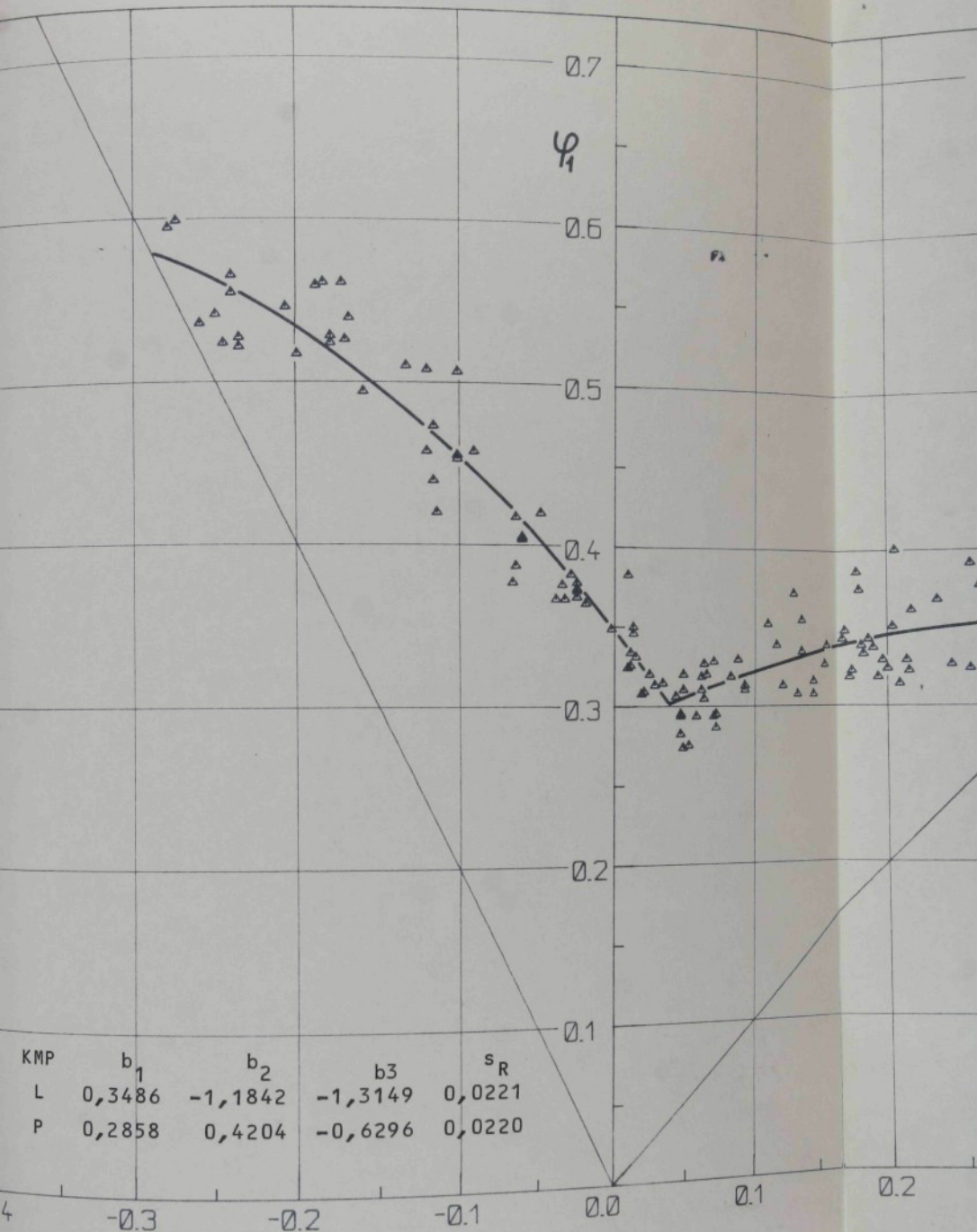
Obr.11 KOHAL 20E tl.1,5mm/500x/
 $\alpha = 90^\circ$



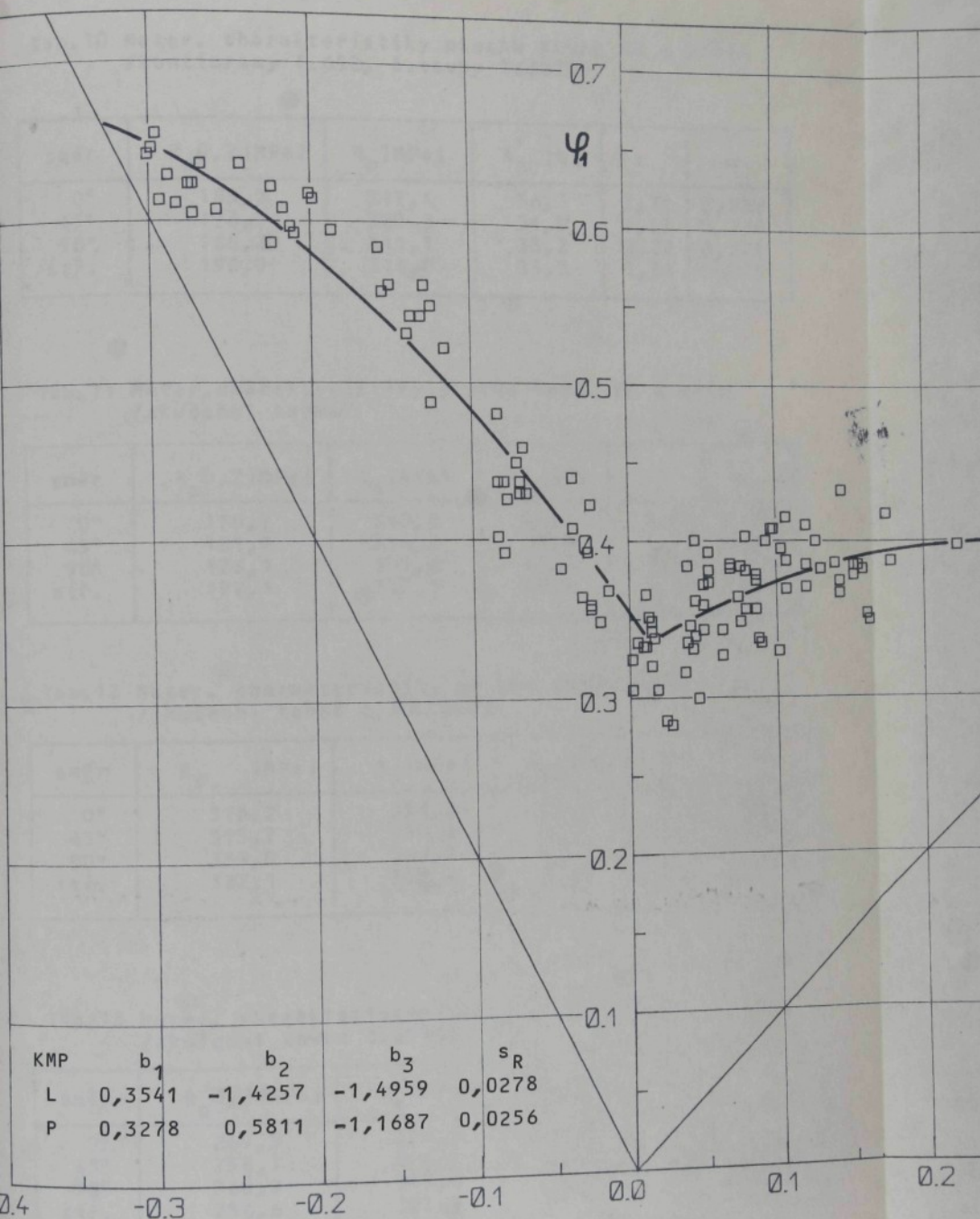
Příloha 13. Diagram mezních přetvoření pro plech
KOHAL 20 E tloušťky 1,0 mm



Příloha 14. Diagram mezních přetvoření pro plech
KOHAL 20 E tloušťky 1,5 mm



Příloha 15. Diagram mezních přetvoření získaný pomocí univerzálního tažného nástroje na lisu LU 160



Příloha 16. Diagram mezních přetvoření získaný pomocí jednoúčelového nástroje na lisu CBA 300

Tab.10 Mater. charakteristiky plechu KOHAL 20 E konti
/kontibramy č.652, č.tavby 1668309/

směr	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	r	n
0°	185,3	312,4	36,3	2,11	0,230
45°	196,5	320,3	34,0	1,45	0,230
90°	185,2	311,1	33,2	2,22	0,227
stř.	190,9	316,0	34,3	1,81	0,229

Tab.11 Mater. charakteristiky plechu KOHAL 20 E vaku
/zkušební tavba/

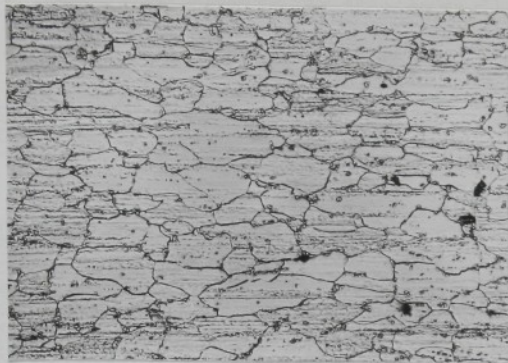
směr	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	r	n
0°	170,7	310,8	41,6	1,74	0,234
45°	181,9	316,1	38,9	1,51	0,234
90°	173,9	305,2	42,3	1,85	0,232
stř.	177,1	312,1	40,4	1,65	0,234

Tab.12 Mater. charakteristiky plechu KOHAL 21 N
/zkušební tavba č.6000002/

směr	R_{eL} [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	r	n
0°	316,2	354,6	30,4	1,49	0,198
45°	315,7	350,6	32,5	1,38	0,195
90°	333,0	358,5	30,7	1,43	0,190
stř.	322,1	353,6	31,5	1,42	0,195

Tab.13 Mater. charakteristiky plechu KOHAL 23 P
/zkušební tavba č.25706/

směr	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	r	n
0°	249,5	392,6	32,2	1,35	0,171
45°	258,1	394,1	32,0	1,21	0,168
90°	260,9	385,6	32,6	1,29	0,165
stř.	256,6	391,6	32,2	1,27	0,168



Obr.12 KOHAL 20E konti /500x/
 $\alpha = 0^\circ$



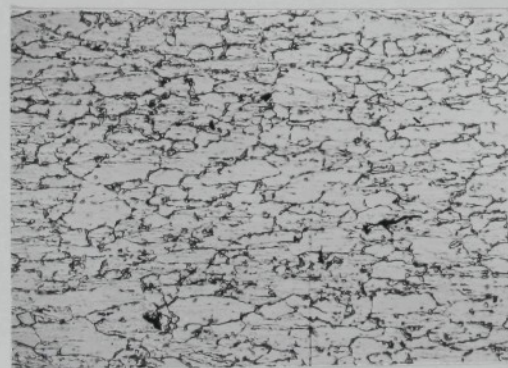
Obr.13 KOHAL 20E konti /500x/
 $\alpha = 90^\circ$



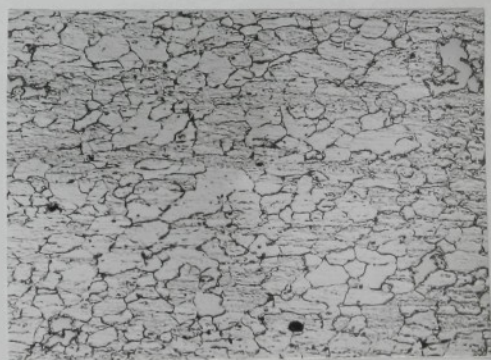
Obr.14 KOHAL 20E vaku /500x/
 $\alpha = 0^\circ$



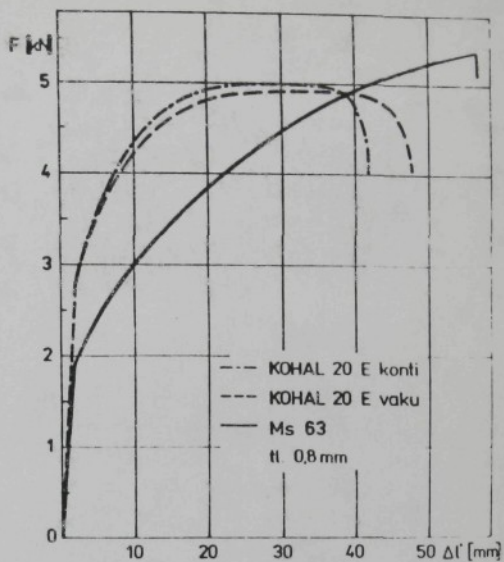
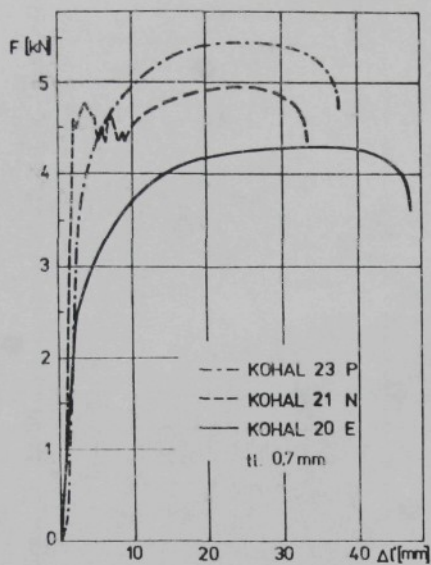
Obr.15 KOHAL 20E vaku /500x/
 $\alpha = 90^\circ$



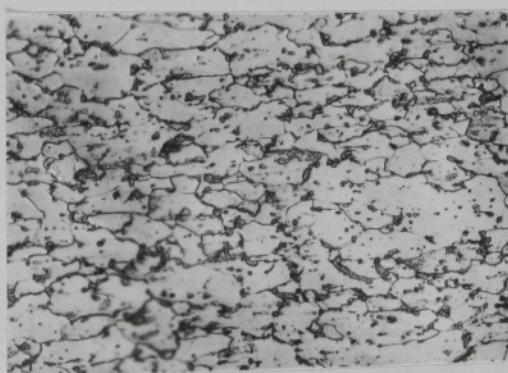
Obr.16 KOHAL 21 N /500x/
 $\alpha = 0^\circ$



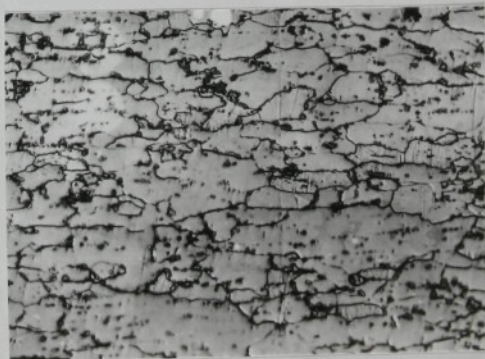
Obr.17 KOHAL 21 N /500x/
 $\alpha = 90^\circ$



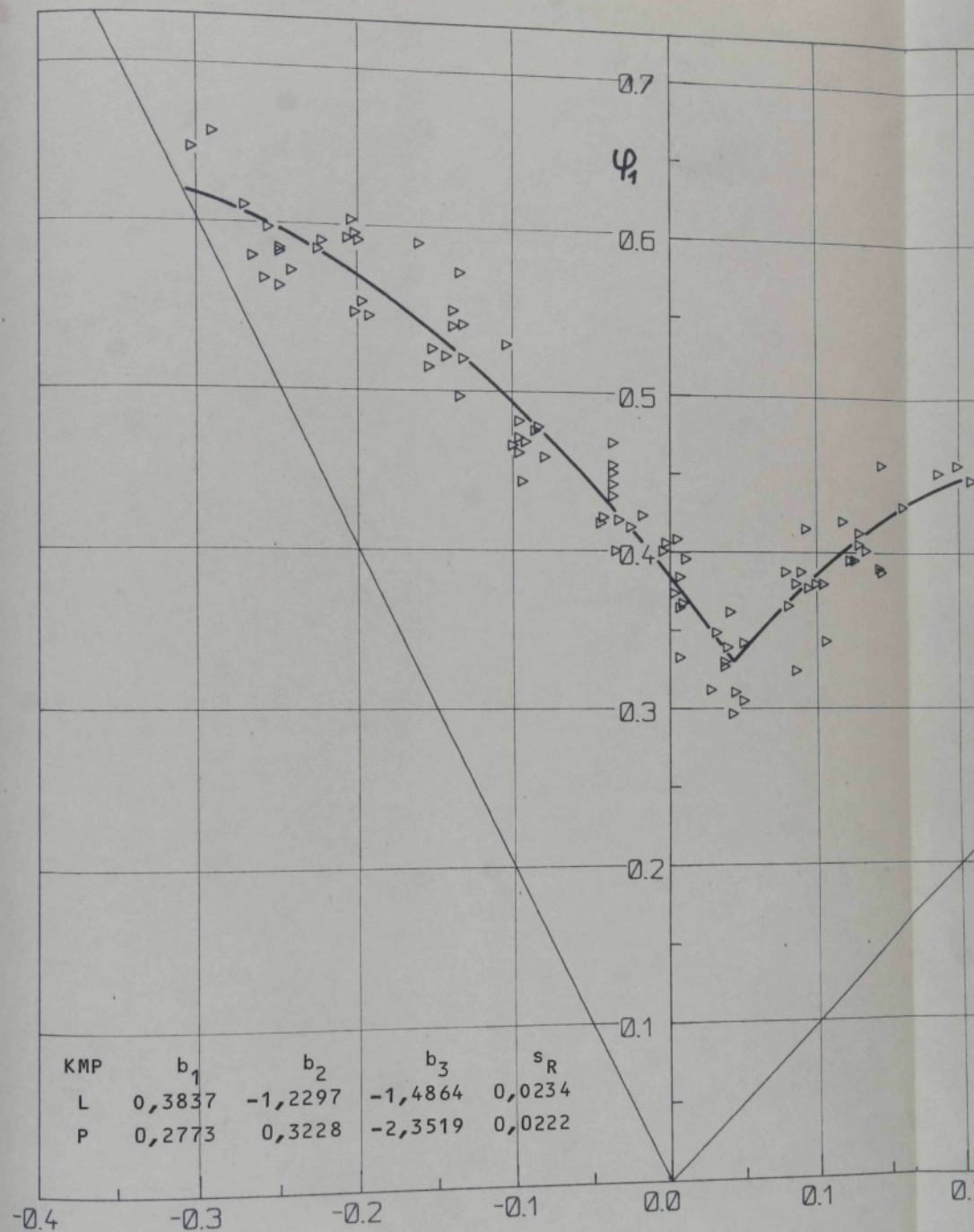
Obr. 18 Charakteristické pracovní diagramy vybraných materiálů



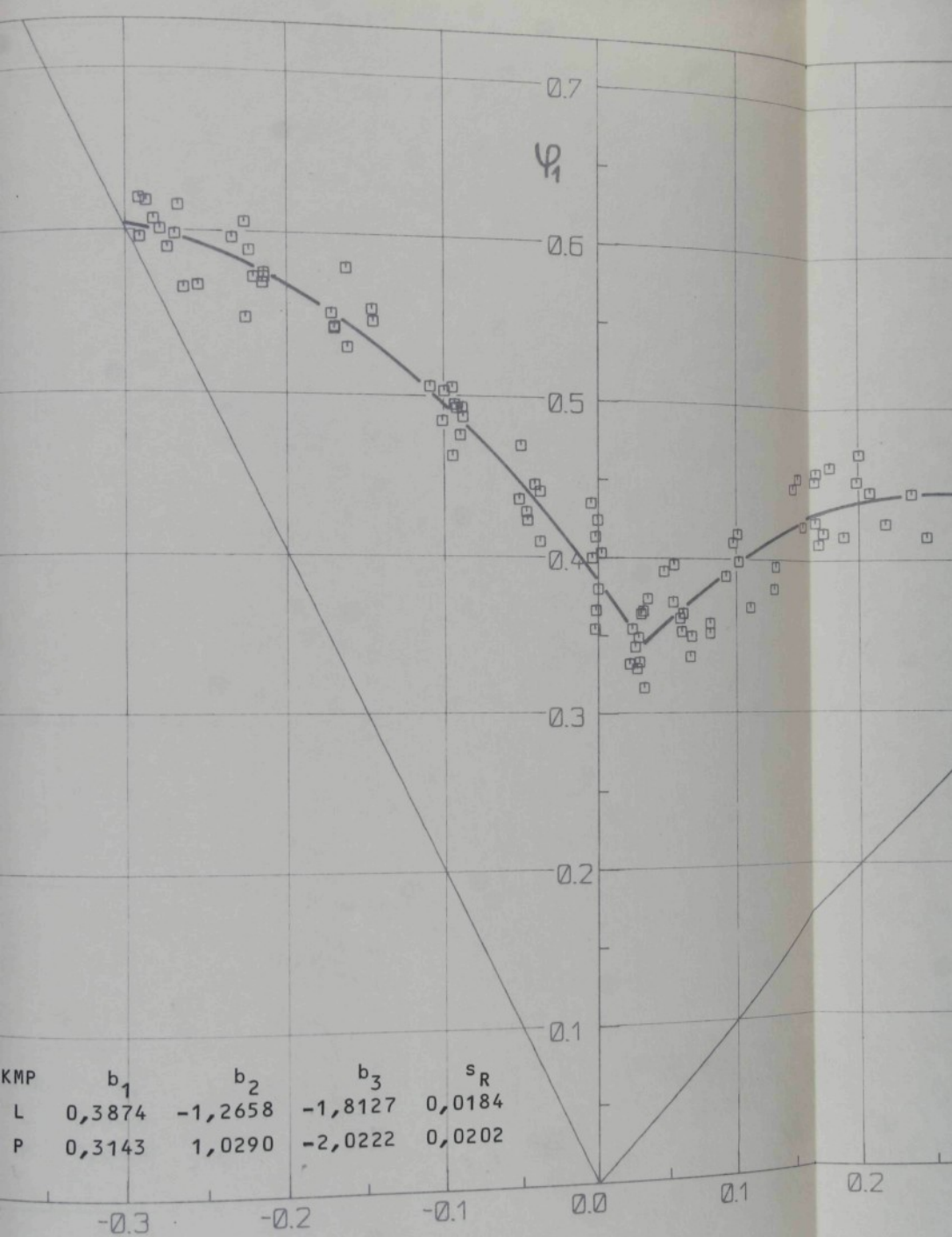
Obr.19 KOHAL 23 P /500x/
 $\alpha = 0^\circ$



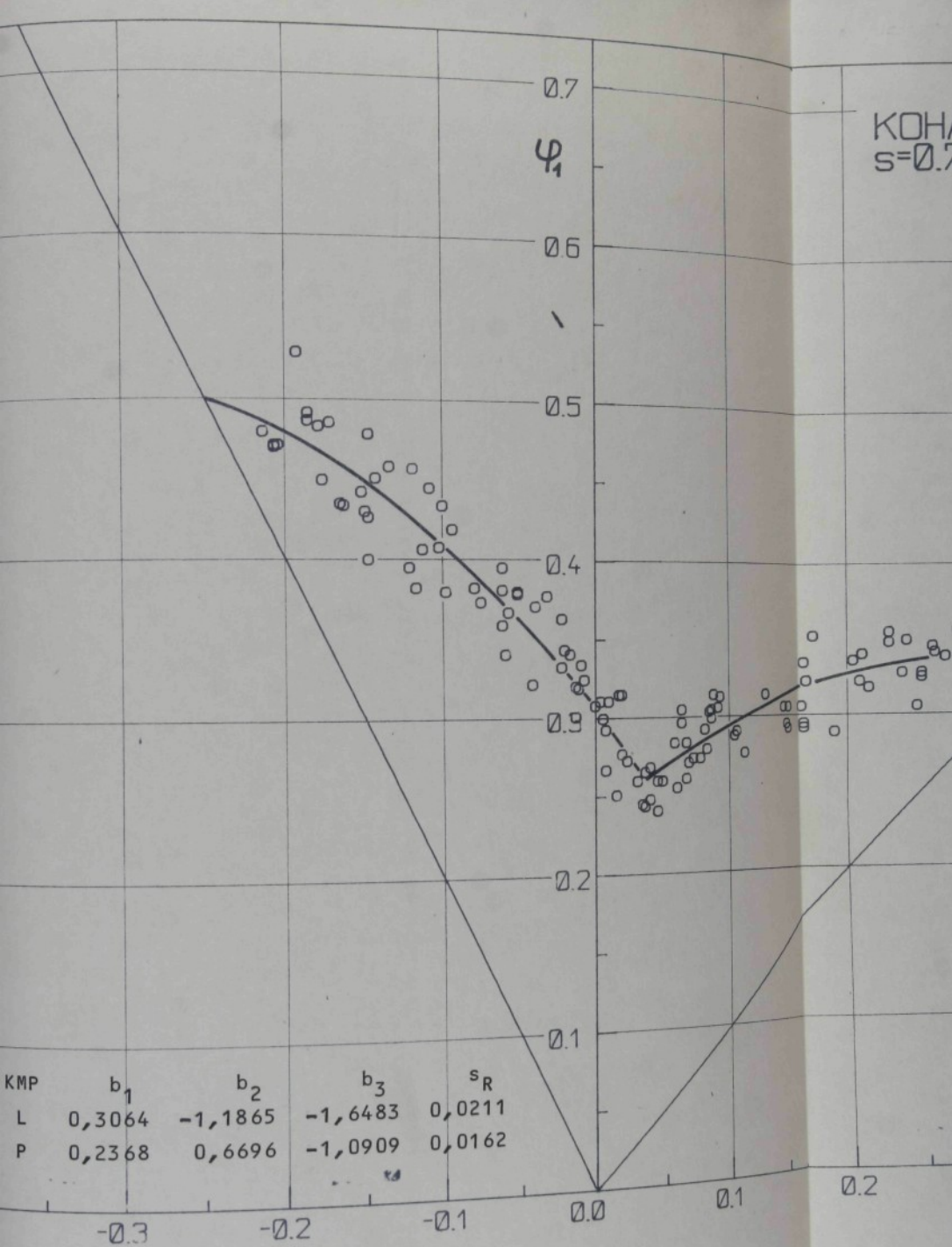
Obr.20 KOHAL 23 P /500x/
 $\alpha = 90^\circ$



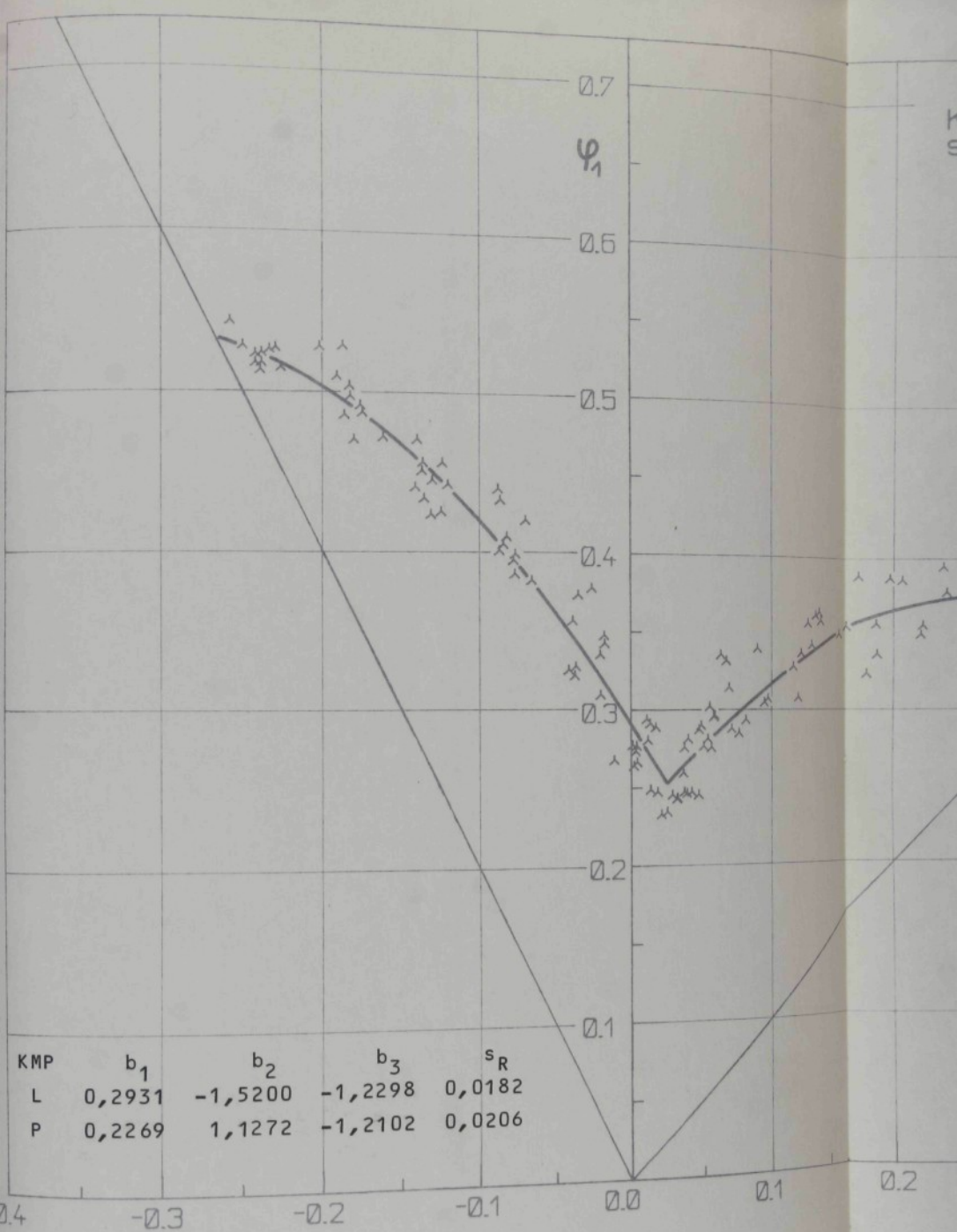
Příloha 20. Diagram mezních přetvoření plechu
KOHAL 20 E konti



Příloha 21. Diagram mezních přetvoření plechu
KOHAL 20 E vaku



řiloha 22. Diagram mezních přetvoření plechu
KOHAL 21 N



Příloha 23. Diagram mezních přetvoření plechu
KOHAL 23 P