



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## VÝZNAM DEFORMAČNÍ SÍŤE V OBLASTI TVÁŘENÍ

THE IMPORTANCE OF THE DEFORMATION NECKS IN FORMING

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

RADEK KUČERA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. EVA ŠMEHLÍKOVÁ, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie  
Akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student (ka): Radek Kučera

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Význam deformační sítě v oblasti tváření**

V anglickém jazyce:

#### **The importance of the deformation necks in forming**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o vytvoření přehledu metod nanášení deformačních sítí na povrch polotovaru. Jejich přínos a využití v praxi, a to zejména v oblasti technologie tváření. V práci by měl být uveden popis daných metod, používané přístroje a nástroje a dále výhody a nevýhody jednotlivých metod.

Cíle bakalářské práce:

Provedení průzkumu v oblasti tváření a vytvoření přehledu všech dostupných metod nanášení deformačních sítí. Zodpovězení významu deformačních sítí pro technologii tváření a jejich praktické využití. Uvedení stručného popisu stávajících metod a zhodnocení jejich výhod a nevýhod. Dle možností provedení výčtu jednotlivých firem, které se zabývají výrobou či distribucí komponentů potřebných pro nanášení deformačních sítí na povrch polotovaru.

Seznam odborné literatury:

- CHARKOV, Valerij A. Theory and Practice of deep Drawing..1st ed. London: MEP, 1995. 164 s. ISBN 08-529-8866-4.
- DRASTÍK, František a Jaroslav ELFMARK. Plastometry a tvařitelnost kovů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1977. 392 s. DT 539.214.07.
- DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: Plošné a objemové tváření. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.
- FOREJT, Milan. Teorie tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Nakladatelství VUT v Brně, 1991. 187 s. ISBN 80-214-0294-6.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Eva Šmehlíková, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 31.10.2011

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan

## **ABSTRAKT**

KUČERA Radek: Význam deformační sítě v oblasti tváření

Cílem této bakalářské práce je vypracování rešerše na téma deformační sítě v oblasti tváření. V práci jsou popsány jednotlivé metody nanášení sítí. Jsou zhodnoceny jejich výhody a nevýhody a využití v praxi. Mimoto je provedeno srovnání nejpoužívanějších způsobů nanášení sítí. Dále je zde uvedena souvislost deformačních sítí s limitními diagramy. Práce také předkládá přehled automatizovaných způsobů analýzy deformačních sítí.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** Nanášení deformačních sítí, elektrochemické leptání, sítotisk, limitní diagram, GPA, Argus

## **ABSTRACT**

KUČERA Radek: The importance of the deformation necks in forming

The aim of this bachelor thesis is elaboration of the research themed deformation necks in forming technology. Particular methods of spreading of the deformation necks are described in this thesis. The advantages and disadvantages are reviewed also as its use in practice. Moreover comparison of the most used methods of spreading of deformation necks had been carried out. Further the connection of deformation necks and forming limit diagram had been stated. The thesis also presents summary of the automated methods of deformation necks analysis.

**KEYWORDS:** Spreading of deformation necks, electrochemical etching, serigraphy, forming limit diagram, GPA, Argus

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KUČERA, Radek. *Význam deformační sítě v oblasti tváření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 32 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Eva Šmehlíková, Ph.D.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně, dne 16. 5. 2012

.....  
Podpis autora

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat paní Ing. Šmehlíkové, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování mé bakalářské práce.

# OBSAH

ZADÁNÍ  
ABSTRAKT  
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE  
ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ  
PODĚKOVÁNÍ  
OBSAH

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| ÚVOD .....                                          | 9  |
| 1. ZÁKLADNÍ PROBLEMATIKA DEFORMAČNÍCH SÍTÍ.....     | 10 |
| 2. NANÁŠENÍ DEFORMAČNÍCH SÍTÍ .....                 | 12 |
| 2.1 METODY NANÁŠENÍ DEFORMAČNÍCH SÍTÍ .....         | 12 |
| 2.1.1 Sítotisk.....                                 | 12 |
| 2.1.2 Elektrochemické leptání sítí .....            | 13 |
| 2.1.3 Fotochemické leptání sítí .....               | 14 |
| 2.1.4 Vytváření sítí pomocí laseru .....            | 15 |
| 2.1.5 Ofsetový tisk .....                           | 16 |
| 2.1.6 Gumostereotypie .....                         | 16 |
| 2.1.7 Ryté sítě.....                                | 16 |
| 2.1.8 Vyjiskřování deformačních sítí .....          | 17 |
| 2.2 SROVNÁNÍ METOD NANÁŠENÍ DEFORMAČNÍCH SÍTÍ ..... | 17 |
| 3. VYHODNOCOVÁNÍ DEFORMACÍ.....                     | 19 |
| 4. LIMITNÍ DIAGRAMY.....                            | 22 |
| 4.1 KEELER – GOODWINŮV DIAGRAM .....                | 23 |
| 5. METODY MĚŘENÍ DEFORMACÍ.....                     | 25 |
| 5.1 MANUÁLNÍ METODY .....                           | 25 |
| 5.2 AUTOMATICKÉ METODY .....                        | 25 |
| 5.2.1 Grid Pattern Analyzer (GPA).....              | 25 |
| 5.2.2 ASAME Target Model .....                      | 26 |
| 5.2.3 Argus .....                                   | 27 |
| 5.2.3 Aramis .....                                  | 28 |
| 5.3 ZHODNOCENÍ METOD MĚŘENÍ DEFORMACÍ.....          | 28 |
| 6. ZÁVĚR.....                                       | 29 |

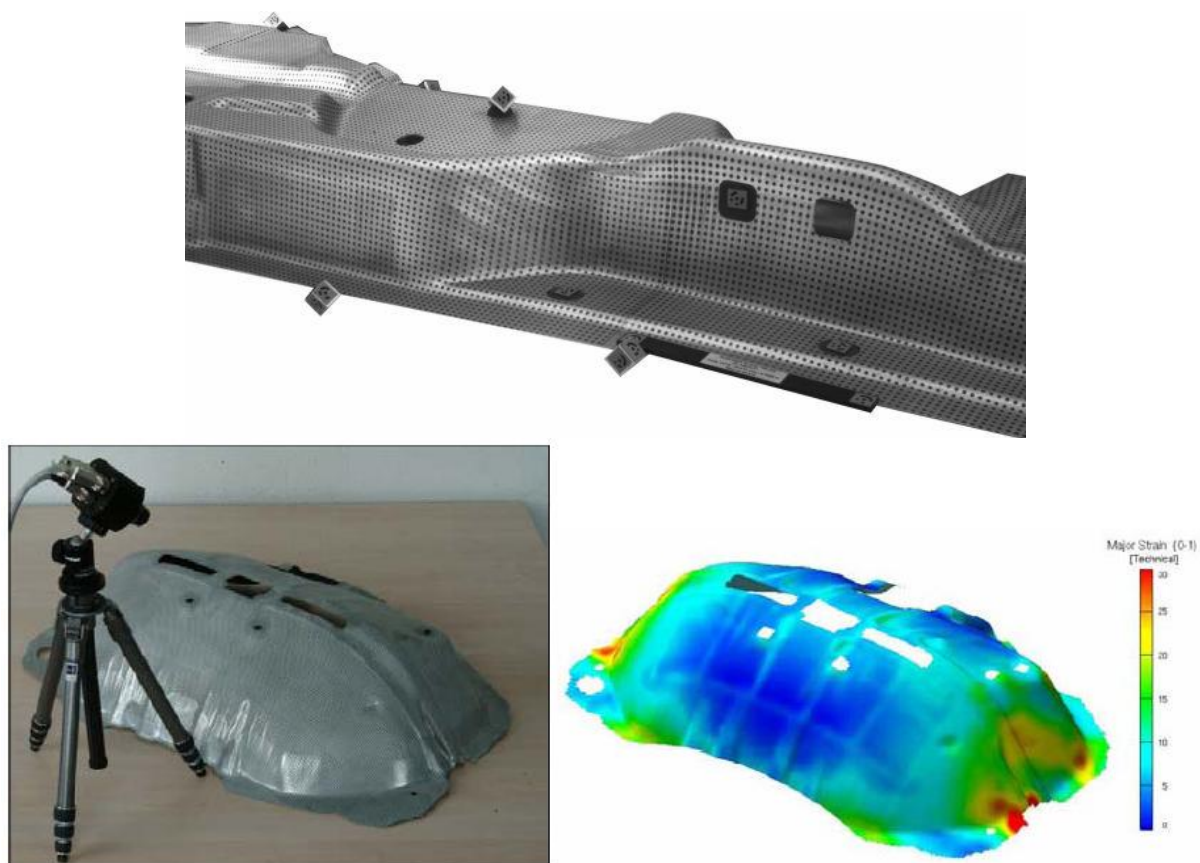
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ  
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

## ÚVOD [3],[7]

Analýza plastického přetvoření se v technologii tváření provádí řadou makroskopických metod. Mezi nejčastěji používané patří metody vrstvených modelů, dělených objemů, cizích těles, makrostruktury vláken a metoda přetvoření sítí, též nazývaná metoda deformačních sítí. Mým úkolem v rámci bakalářské práce je na základě literárních a internetových zdrojů provést průzkum na téma význam deformační sítě v oblasti tváření.

Metoda deformačních sítí se používá zejména při tváření plechových polotovarů. Hlavní princip spočívá v nanesení pravidelné sítě s daným vzorem (kruhový, čtvercový, jejich kombinace) na povrch plechu před samotným tvářením. Po deformaci do požadovaného tvaru následuje analýza přetvořené sítě za účelem nalezení kritických míst na tvářené součásti. Existují různé způsoby nanášení těchto sítí, které mají specifické atributy. Tyto je třeba zvážit a na jejich základě zvolit nejvhodnější metodu pro dané zadání.

Stejně jako v mnoha dalších oblastech je i zde trendem nahrazovat manuální analýzu vyhodnocováním automatickým. Velký pokrok v této oblasti je spojen s rozvojem systému pro transformaci fyzického modelu nebo výrobku do počítačového modelu, pomocí optického měření a principu Reverse Engennering (tzn. obrácený oproti transformaci počítačového modelu do výrobku). Zmíněné systémy poskytují důkladnou analýzu tvářených materiálů a na základě této analýzy se sestavují limitní diagramy, jež umožňují predikovat budoucí chování materiálu.



Obr. 1 Ukázka naleptané sítě po lisování [22] a plechového výtažku analyzovaného optickým systémem [9]

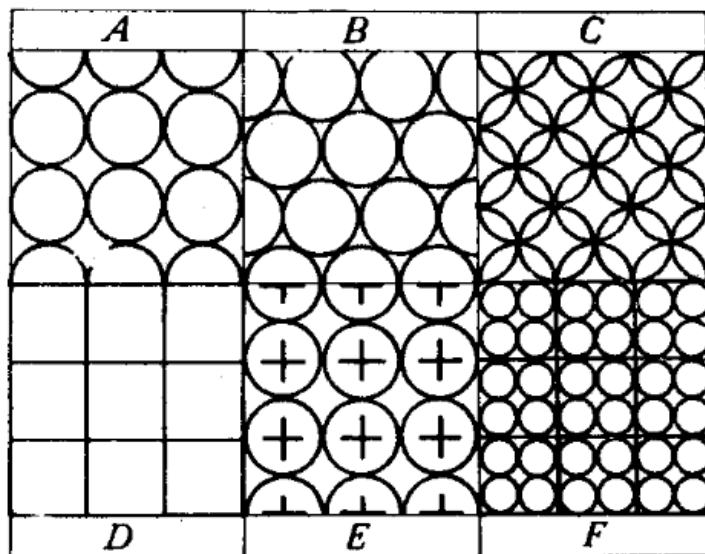
# 1. ZÁKLADNÍ PROBLEMATIKA DEFORMAČNÍCH SÍTÍ

[1],[3],[4],[6],[7]

Nanášení deformačních sítí se používá zejména pro analýzu tváření plechu. Tváření plechu je proces definovaný jako přetvoření plechového polotovaru do požadovaného tvaru bez vzniku trhliny a nadměrného lokalizovaného ztenčení. Tento proces může být jednoduchý, jako například ohýbání, anebo se může jednat o posloupnost velice komplexních operací jako například lisování. V posledních letech je přikládán značný význam numerickým metodám schopným modelovat proces tváření plechu.

Deformační analýza za pomoci vytváření sítí na povrchu zkoumaného vzorku je velice efektivně využívána pro řešení problémů při tváření kovů. Při tváření podléhá plech různým tlakům. To vede k vytvoření nejednotných napětí ve tvářené součásti. Proto se objeví oblasti jednak s vysokými napětími a jednak oblasti s nízkými napětími, které mohou vést ke zvlnění nebo k protržení materiálu. Za pomoci nanášení sítí mohou být snadno identifikována místa s vysokými napětími a s tím souvisejícími deformacemi. Před samotným tvářením je na plech nanesena síť. Poté, co je plech přetvořen do požadovaného tvaru, může být rozložení napětí zobrazeno a kritická místa napětí nalezeny pomocí limitního diagramu (FLD), a případně může být navržena změna tvářecích parametrů.

Metoda sítí spočívá v pozorování makroskopických přetvoření, okem běžně rozpoznatelných prvků typu čtverců, kosočtverců, kružnic a jejich kombinací, které na povrch nanášíme ve formě sítí (rýsováním, tištěním, leptáním apod.). Porovnáním původní a deformované sítě určíme velikost deformace.



Obr. 2 Příklady různých typů sítí používaných v praxi [1],[7]

Na obr. 2 jsou zobrazena schémata těchto sítí:

A – síť s kruhovými elementy, se středy uspořádanými do čtverců;

B – síť s kruhovými elementy, se středy uspořádanými v rozích rovnostranných trojúhelníků;

C – síť kruhová s překrytými obrysy jednotlivých elementů;

D – síť se čtvercovými elementy;

E – síť kombinovaná, se čtverci vyznačenými pouze průsečíky vrcholů;

F – síť kombinovaná, s vyznačením čtvercových i kruhových elementů.

Charakteristický rozměr elementů, tj. strany čtverce nebo průměr kružnice, se nazývá parametr sítě. Volba velikosti parametru závisí na účelu, pro který se zkouška provádí, a na technických možnostech způsobu, kterým se síť nanáší.

Žádná z uváděných sítí není bez určitých nedostatků, avšak jako nejosvědčenější se ukázala síť s kruhovými elementy. Tato síť je v dnešní praxi využívá nejčastěji, a z tohoto důvodu bude věnována pozornost zejména tomuto typu sítě.

Volba nejvhodnější metody a způsobu zobrazení deformační sítě záleží na těchto hlavních požadavcích:

- 1) Síť vytvořená na nástřihu plechu musí co nejméně ovlivňovat podmínky tření mezi nástrojem a plechem.
- 2) Vytvořená deformační síť nesmí narušovat povrch plechu do té míry, aby se mohl projevit vrubový účinek, který by mohl snížit hodnoty mezních přetvoření.
- 3) Dostatečná plasticita sítě. Síť musí být schopna velkých plastických přetvoření bez vážnějších vlivů na její čitelnost.
- 4) Odolnost sítě proti otěru. Splněním tohoto požadavku je určena míra čitelnosti sítě po tváření.
- 5) Odolnost proti používaným mazivům. Maziva by neměla svým účinkem snižovat čitelnost sítě po deformaci.
- 6) Důležitým požadavkem je tvarová a rozměrová přesnost nanesené sítě v závislosti na volbě jejího parametru.
- 7) Jednoduchost a malá pracnost metody nanášení deformační sítě.

Nutno podotknout, že žádná z metod nanášení deformačních sítí není univerzální. Každá metoda lépe, či hůře splňuje jednotlivé výše uvedené požadavky. Volba metody vyznačování sítě musí být tedy pokaždé zvážena v závislosti s upřednostňovanými požadavky a účelu použití.

## 2. NANÁŠENÍ DEFORMAČNÍCH SÍTÍ [4],[1]

### 2.1 METODY NANÁŠENÍ DEFORMAČNÍCH SÍTÍ [4]

Vyznačení deformační sítě je proces nanášení čárových vzorů na část povrchu plechu, o kterou se zajímáme. Nejpoužívanějšími metodami nanášení sítě na vzorek plechu jsou sítotisk, elektrochemické leptání, fotochemické leptání a vytváření sítě pomocí laseru. Mezi poněkud zastaralejší metody patří ofsetový tisk, gumostereotypie, ryté sítě, fotografická metoda, či vyjiskřování deformačních sítí. Všechny tyto metody mají specifické výhody i nevýhody. Aplikovaná síť i metoda aplikace nesmí mít vliv na tvářecí proces a musí být také schopna odolávat podmínkám tváření, jako například tření či mazivům. Navíc by mělo být možné nanést síť s co nejmenším úsilím. Tyto metody se od sebe liší přesností vzoru, kontrastem, odolností, kvalitou a cenou.

#### 2.1.1 Sítotisk [1],[4]

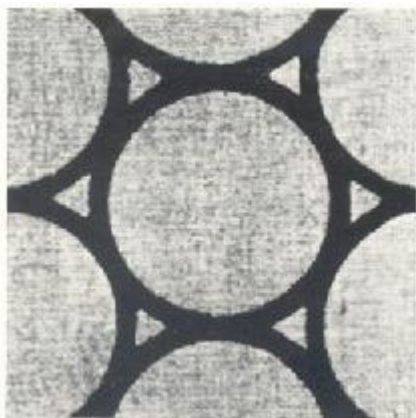
Sítotisk je jedna z prvních metod tiskání. Tato technika byla poprvé použita v Číně téměř před 2000 tisíci lety. Sítotisk je jednou z nejjednodušších a nejlevnějších metod nanášení deformačních sítí. U této metody je vzor sítě tisknut přímo na plech vhodným inkoustem, který je odolný proti tvářecímu procesu.



Obr.3 Sítotisk [4]

Nejprve je síťka těsně napnuta na hliníkový rám. Jako materiál síťky se obvykle používá hedvábí. Hedvábí je velice trvanlivý materiál a může být očištěn a znovupoužit. Šablona je negativem sítě, která bude natištěna. Základním principem je vytvořit šablonu na síťce. Volnými prostory můžeme poté protlačit inkoust a vytvořit tak požadovaný vzor na povrchu plechu.

Jednou z těchto metod je fotopozitiv. Při tomto postupu je síťka s obou stran pokryta emulzí, která je citlivá na UV záření a usušena v tmavé místnosti. Poté je rám se sítkou umístěn na šablonu s požadovaným vzorem a prosvícen UV zářením. Po několika minutách je světlo vypnuto. UV záření reaguje pouze s emulzí na síťce, která není krytá šablonou. Zakryté plochy zůstanou světlé, zatímco odkrytá místa ztmavnou. Síťka je omyta a tím je získána



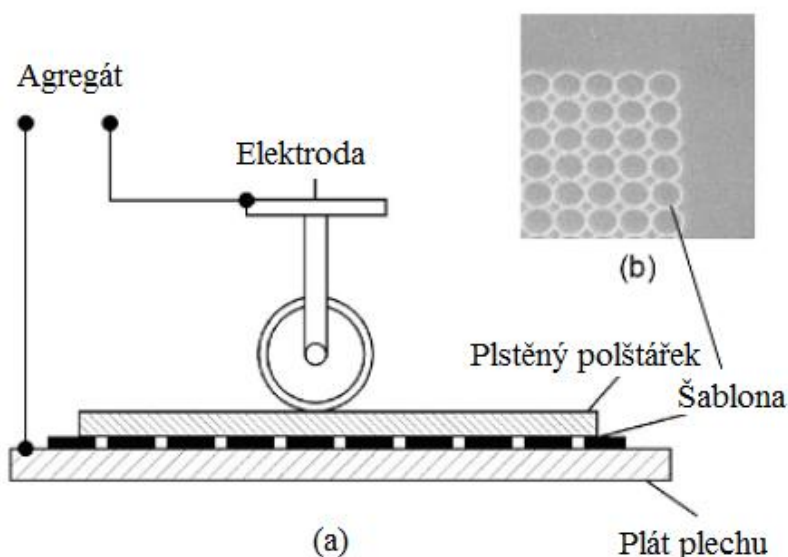
Obr. 3 Ukázka části sítě provedené sítotiskem [1]

požadovaná šablona. Poté je rám se sítí položen na očištěný plech a inkoust je za pomoci stěrky protlačován. Inkoust projde pouze skrze světlé plochy a tím je tištěn požadovaný vzor.

Velice důležitý je správný výběr inkoustu. Inkoust se při tváření nesmí stírat. Hlavními výhodami sítotisku jsou jednoduchost, snadná aplikace, finanční nenáročnost a dostupnost potřebných pomůcek. Při sítotisku se však setkáváme s vadami potisku způsobenými špatnou technikou nanášení a roztírání barvy na síťce a posuvem sítě při zvedání.

### 2.1.2 Elektrochemické leptání sítí [4],[5],[6],[1]

Tato metoda je v současnosti nejpreferovanější metodou nanášení deformačních sítí, a to díky své jednoduchosti, rychlosti, žádnému narušení plechu, finanční nenáročnosti a odolnosti během tváření.



Obr. 4 (a) Základní princip, (b) Příklad šablony [4]

Základní princip této metody je znázorněn na obrázku 4. Elektrochemické leptání vyžaduje nízkonapěťový zdroj proudu, šablonu, plstěný polštářek a leptací roztok. Nejdříve je zdroj proudu připojen k elektrodě a plátu plechu. Agregát je vybaven přepínačem střídavého a stejnosměrného proudu. Změnou proudu se dosahuje rozdílného zbarvení sítě. Poté je šablona s požadovaným vzorem sítě opatrně pokladena na povrch plechu. Povrch plechu by měl být před umístěním šablony očištěn. Následně je plstěný polštářek nasycený vhodným leptacím roztokem. Existuje několik typů leptacích roztoků pro rozdílné materiály. Pro konkrétní materiál je nutné zvolit správný roztok. Elektrické napětí je dodáváno přibližně po dobu 5 sekund. Elektroda připojená ke zdroji proudu se dotýká plstěného polštářku, a tudíž proud přechází z elektrody na plech. Tlakem válce je leptací roztok vytlačen z polštářku skrz obrysy šablony a dosahuje tak povrchu plechu. Hodnoty proudu se pohybují od 15 do 200 A v závislosti na velikosti šablony. Čas potřebný pro leptání závisí na materiálu plechu a aplikovaném napětí. Hloubka leptání je úměrná času aplikace. Pro ukončení leptání by měl být plát plechu omyt neutralizačním roztokem.



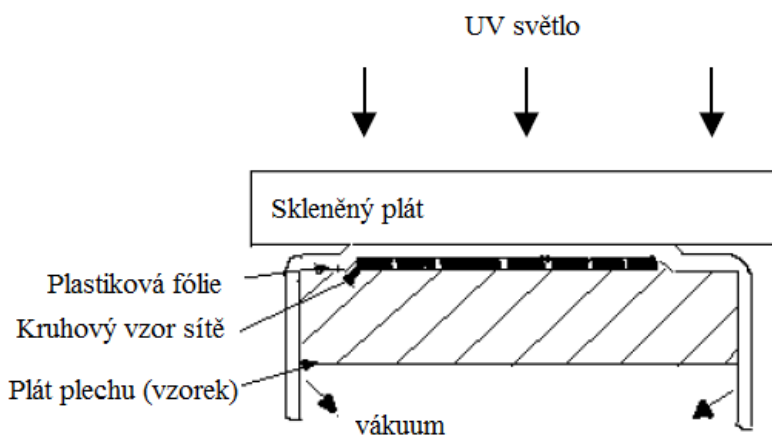
Obr. 5 Ukázka sady pro elektrochemické leptání sítí [10]

Hlavními výhodami této metody jsou jednoduchá aplikace a cenová výhodnost. Aplikovaná síť je permanentní, nezpůsobuje zkreslení a je odolná vůči opotřebení. Tato metoda však může být použita pouze u vodivých kovů. Potřebné vybavení pro elektrochemické leptání je běžně dostupné.

### 2.1.3 Fotochemické leptání sítí [1],[4],[6]

Fotochemické leptání patří mezi přesné metody nanášení deformačních sítí. Při vytváření sítě touto metodou se musíme držet následujících kroků:

- a) Očistění povrchu kovu
- b) Pokrytí povrchu vrstvou emulze odolné proti UV záření
- c) Osvětlení UV zářením
- d) Vyvolání
- e) Leptání
- f) Očistění povrchu

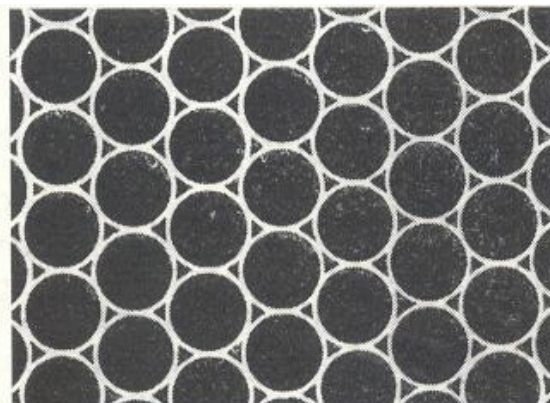


Obr. 6 Schéma fotografické metody nanášení sítí [6]

První čtyři kroky se shodují s fotografickou metodou nanášení sítí. Schéma fotografické metody je zachyceno na obrázku 6. Použití fotografické metody je však omezené a slouží zejména jako příprava k následnému leptání sítí. Lesklé a hladké povrchy se před samotným zpracováním musí důkladně očistit. Toho se dosahuje například pomocí toluenu ( $C_6H_5CH_3$ ), či trichloretylenu ( $CHCl_3$ ). Také se však používá ponoření do kyselé lázně. Následně je na povrch vzorku nanесena emulze. Během nanášení se pracuje při ochranném žlutém světle. Tloušťka vrstvy by neměla přesáhnout 0,01 mm. Poté je emulze pokryta průhledným negativem a vystavena silnému UV záření. Průhledná folie s negativem by měla být v úzkém kontaktu s povrchem plechu. Toho se dosahuje vytvořením vakua mezi povrchem vzorku a vzorem sítě. Vyvoláním získáme kresbu, která je tvořena obnaženým plechem v místech, která nebyla při expozici osvětlena. Na obrázku 7 je znázorněna část fotograficky nanášené sítě, která bude dále sloužit jako mezikrok k následnému leptání sítí.

Ve druhé fázi tvorby sítě fotochemickou metodou se síť leptá roztokem kyseliny. Používají se například 50% roztoky  $\text{HNO}_3$  nebo  $\text{HCl}$ . Při normální teplotě se ocel naleptá do hloubky 2 až 4  $\mu\text{m}$ . Při příliš dlouhé době by mohlo leptadlo narušovat ochrannou vrstvu nanesenou v předešlém kroku, což by mělo za následek zejména zhoršení okrajů čar. Po dokončení leptání se povrch vzorku opět očistí toluenem nebo trichlorethylenem.

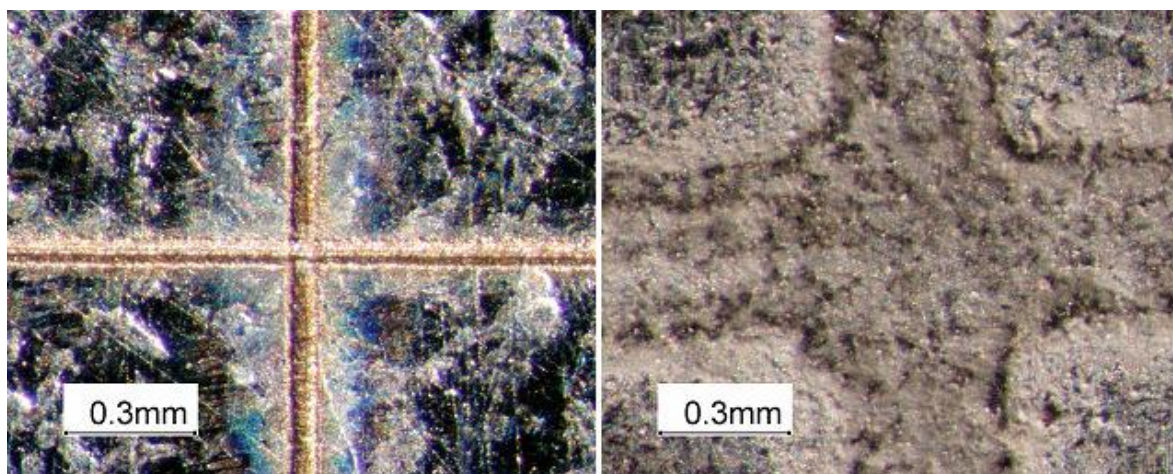
Hlavní nevýhodou tohoto způsobu nanášení sítě je zejména velká pracnost. Mezi výhody naopak patří kvalitní a ostré hrany čar sítě a možnost reprodukovat i velmi husté sítě. Čitelnost po velkých deformacích je možné zlepšit vhodným vybarvováním kresby. Jelikož je barva nanášena do povrchových nerovností, které byly vytvořeny leptáním, je přilnavost barviva velice dobrá a nemůže tak docházet k jejímu otěru působením tvářecích strojů.



Obr. 7 Fotograficky nanesená síť [1]

#### 2.1.4 Vytváření sítí pomocí laseru [4], [11]

Požadovaný vzor sítě je na povrch vzorku nanášen působením laseru. Při užití této metody můžeme kontrolovat úběr materiálu. Tato metoda se vyznačuje největší přesností nanesené sítě, nicméně v závislosti na velikosti vzorku může být velice pomalá. Navíc je tento způsob vytváření sítě velice nákladný a není možno získávat barevné sítě. Tato metoda je limitovaná tím, že síť má tmavou barvu, čímž je nemožné získat dostatečný kontrast mezi sítí a tmavě zbarveným povrchem plechu bez narušení vrchní vrstvy materiálu. V takovýchto případech se uvažuje metoda sítotisku. A to vzhledem k možnosti volby barvy sítě a s tím související maximalizací kontrastu. Musíme však počítat s možností otěru barvy během tváření. U pozinkovaných materiálů je tato metoda ve srovnání s chemickým leptáním přesnější a rychlejší. Stopa vytvořená laserem má poloviční hloubku a šířku oproti stopě vytvořené chemickým leptáním. To znamená, že síť vytvořená laserem nám dává spolehlivější výsledky, zatímco dochází k menšímu ztenčování materiálu než u chemického leptání. Tato metoda nahrazuje chemické leptání zejména tehdy, když potřebujeme vytvořit síť na plechu o velké ploše.



Obr. 8 Srovnání přesnosti sítě vytvořené laserem (nalevo) a leptáním (napravo). [11]

### 2.1.5 Ofsetový tisk [1]

Pro účel nanášení deformačních sítí je vhodná pouze metoda tisku z kovových matic – tzv. suchý ofset. Potřebami pro tuto metodu jsou zinková matrice, tiskařský váleček a barva pro ofset.

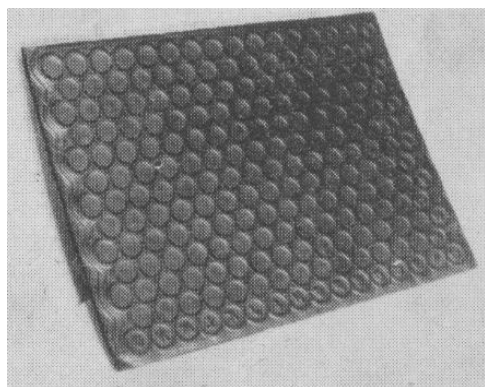
Při práci se nejdříve rovnoměrně rozetře barva na rovnou desku (např. sklo) pomocí válečku. Poté se barva očištěným válečkem přenese na matici. Pro kvalitní tisk se tento krok opakuje dvakrát. Materiál, který se chystáme potisknout, by měl mít přiměřenou drsnost a musí být dokonale odmaštěn. Pečlivým a rovnoměrným odvalováním čistého válečku nejdříve sejmeme vrstvu barvy s povrchu vzorku. K čištění tiskařského válečku slouží trichloretylen a oplach.

Vznik vad je většinou spojen se špatnou přípravou barvy a se špatnou technikou přenášení barevné vrstvy tiskařským válečkem.

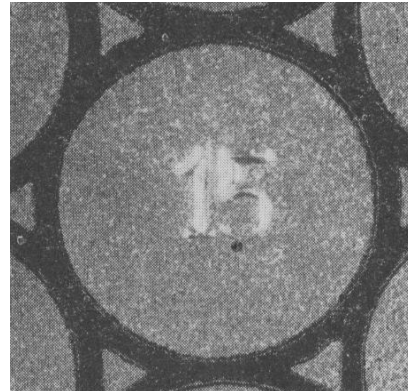
### 2.1.6 Gumostereotypie [1]

Základním principem gumostereotypie je použití razítka z pryže. Na obr. 9 je ukázka razítka s parametrem kruhové sítě o  $\varnothing$  8 mm. Toto razítko je vyrobeno ze speciální vrstvené pryže nalepené na desku s válcovým povrchem, která je mírně zakřivena. Postupujeme tak, že na razítko nanášíme vrstvu barvy tiskařským válečkem. Kolébavým pohybem pryžového razítka se obraz přenáší na odmaštěný povrch vzorku. Ukázka části sítě zhotovená touto metodou je na obr. 10.

Vady se mohou vyskytnout při použití nesprávné, či nesprávně připravené barvy. Při nesprávné práci s razítkem může snadno dojít k deformaci tisku nebo rozmáznutí. V místech povrchových nerovností vzorku nebo razítka může být tisk nečitelný. Odolnosti tisku proti opotřebení otěrem může být zvýšena nastříkáním ochranné vrstvy laku.



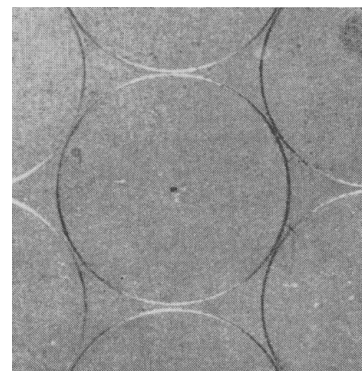
Obr. 9 Razítko z vrstvené pryže [1]



Obr. 10 Sít' zhotovená razítkem [1]

### 2.1.7 Ryté sítě [1]

Metoda spočívá v přemísťování nebo odebírání materiálu z povrchu vzorku. Správně vytvořená síť se získá odebráním třísky a nikoliv pouze vtlačováním nástroje. Pro vytváření kruhových sítí se nejdříve vyznačují středy kružnic. Poté se jednotlivé kružnice vyrývají kružítkem s hroty. Tato technika je velice pracná, její ukázka je uvedena obr. 11. Čtvercové sítě je možno metodou rytí zhotovovat na speciálních strojích. Po menších úpravách je taky možno použít obráběcí a měřicí zařízení, jejichž lože se pohybují ve dvou navzájem kolmých směrech.

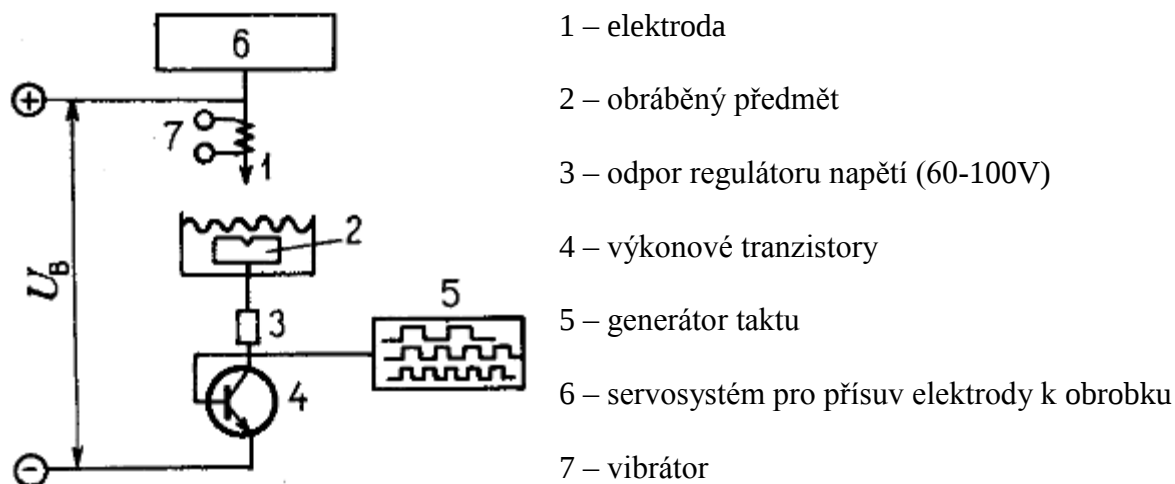


Obr. 11 Část sítě zhotovená rytím [1]

Při rytí sítí mohou chyby vznikat zejména nepřesností práce a otupením nástroje. S ohledem velké pracnosti je tato metoda v dnešní době velice málo používána.

### 2.1.8 Vyjiskřování deformačních sítí [1]

Tato technika využívá principu elektroerozivního obrábění kovů. K samotnému vyjiskření se používají elektrody vhodného tvaru. Pro vytváření kruhových sítí se používají elektrody se zakončením ve tvaru mezikruží. Operace probíhá ve vaně s dielektrikem (petrolej). Pracovní podmínky jsou určeny kmitočtem, pracovním proudem a napětím. Dále je potřeba vhodně zvolit amplitudu vibrátoru, tak aby bylo dosaženo dobré kvality vyjiskřené plochy a čas k vyhotovení sítě byl co nejkratší. Schéma zařízení pro vyjiskřování je na obr. 12.



Obr. 12 Schéma vyjiskřovacího stroje s popisem [1]

## 2.2 SROVNÁNÍ METOD NANÁŠENÍ DEFORMAČNÍCH SÍTÍ [1],[4]

Z výčtu vlastností jednotlivých metod nanášení sítí vyplývá, že neexistuje žádná univerzální metoda, která by poskytovala pouze výhody. Je proto pokaždé důkladně zvážit, jaká metoda bude pro daný úkol nejefektivnější.

Všechny uváděné metody nanášení sítí můžeme rozdělit do dvou základních skupin:

- 1) Metody s vyvýšenou kresbou
- 2) Metody s prohloubenou kresbou

Do první skupiny se řadí všechny druhy tisku. A to **sítotisk**, ofsetový tisk, gumostereotypie a fotografická metoda. Společnou nevýhodou těchto metod je nebezpečí otěru natištěné sítě způsobené třením při tváření.

Druhá skupina sestává z metody rytí, metody vyjiskřování, **elektrochemického leptání**, **fotochemického leptání** a **vytváření sítí pomocí laseru**. Od první skupiny se odlišují vlastní podstatou vytvoření deformační sítě. Tloušťka materiálu se prakticky nemění a vlastnosti povrchového tření zůstávají téměř nezměněny. Sítě jsou tedy i po velkých plastických přetvořeních velmi dobře čitelné, čemuž můžeme ještě napomoci vybarvením kresby sítě.

Je nutno zmínit, že některé uváděné metody jsou dosti zastaralé. V dalším srovnání bude proto pozornost věnována zejména metodám užívanými v současné praxi. Do této skupiny spadají sítotisk, elektrochemické leptání, fotochemické leptání a vytváření sítí pomocí laseru.

Všechny tyto metody nemění vnitřní vlastnosti materiálu a jsou široce používány v různých experimentech spojenými s povrchovou analýzou deformace. I tyto metody mají své výhody a nevýhody a jedna od druhé se liší přesností sítě, kontrastem, trvanlivostí,

kvalitou a cenou. Při výběru nejvhodnější metody pro konkrétní aplikaci musíme zvážit výhody a nevýhody každé metody ve vztahu k naší konkrétní aplikaci. Vybraná metoda vytváření sítě nesmí ovlivnit tvářecí proces a samotná síť nesmí být ovlivněna podmínkami tváření, jako například tření či mazání. Jelikož mohou být deformace posuzovány některou z automatizovaných metod, je nezbytné, aby byly sítě dobře čitelné. Zhodnocení a srovnání jednotlivých metod je uvedeno v tabulce 1.

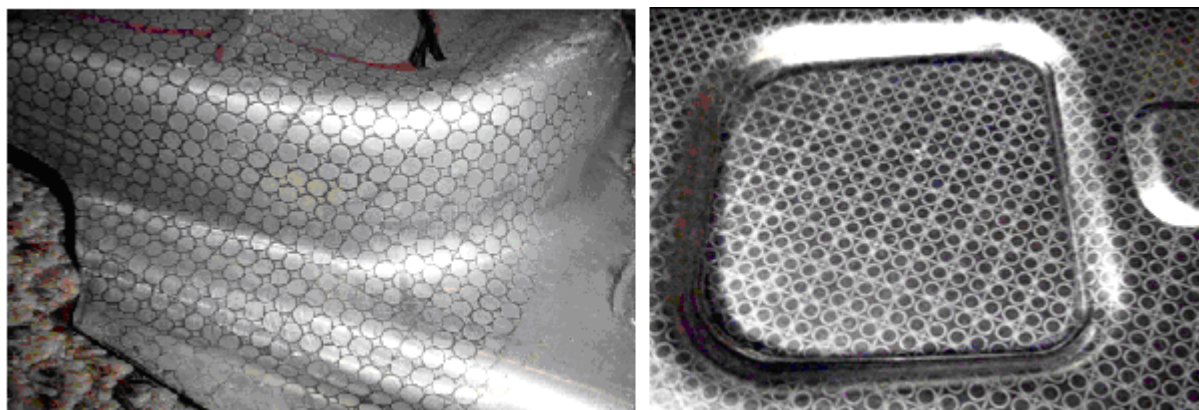
Tab. 1 Srovnání nejpoužívanějších metod nanášení deformačních sítí [4]

| Metoda nanášení sítě         | Parametry |                               |             |                                |                         |                                    |                     |                           |                                |
|------------------------------|-----------|-------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------------|--------------------------------|
|                              | Přesnost  | Kvalita, rozlišení a kontrast | Trvanlivost | Odolnost proti tření / mazivům | Odolnost proti teplotám | Aplikovatelnost na různé materiály | Finanční nákladnost | Čas potřebný pro nanášení | Aplikovatelnost na velké části |
| SÍTOTISK                     | B         | A                             | A           | B                              | C                       | A                                  | A                   | A                         | C                              |
| ELEKTROCHEMICKÉ LEPTÁNÍ      | A         | B                             | A           | A                              | A                       | D                                  | C                   | A                         | C                              |
| FOTOCHEMICKÉ LEPTÁNÍ         | B         | B                             | C           | B                              | C                       | A                                  | D                   | D                         | D                              |
| VYTVÁŘENÍ SÍTÍ POMOCÍ LASERU | A         | A                             | A           | A                              | A                       | C                                  | D                   | D                         | A                              |

Vysvětlivky: A = Výborný, B = Dobrý, C = Průměrný, D = Špatný

### 3. VYHODNOCOVÁNÍ DEFORMACÍ [1],[2],[7],[12],[13],[14],[15]

Ke zkoumání deformačních procesů se využívá simulací nebo deformačních sítí nanášených na povrch zkoumaného plechu. Vyhodnocení se u metody deformačních sítí provádí tak, že je na povrch polotovaru nanесena měrná síť pravidelných obrazců. Při tváření plechu se nanесená síť deformuje spolu s plechem. Velikost deformace se poté určí porovnáním původní nanесené sítě a sítě deformované.



Obr. 13 Ukázka výrobků z plechu s kombinovanou sítí [12],[13]

Jak již bylo zmíněno, pro vzor sítí se používají různé geometrické prvky (čtverce, kosočtverce, kružnice a jejich kombinace). Obecně se směr hlavních přetvoření určuje výpočtem. U sítí složených z kruhových elementů není nutno znát dopředu směry hlavních napětí a přetvoření. Kružnice se po tváření přetvoří na elipsy. Osy elips poté určují směry hlavních napětí a hlavních přetvoření. Tento fakt je důležitý pro mnohé případy vyhodnocování (např. tažení výlisků nepravidelných tvarů). V dnešní praxi se využívá hlavně kruhových sítí. Často se potom používají sítě kombinované s kruhovými a čtvercovými prvky. Z toho důvodu se budeme v následujícím rozboru věnovat zejména vyhodnocování přetvoření u sítí s kruhovými elementy.

Při tváření materiálu dochází ke změně jeho tvaru, která je dle okolností více či méně permanentní. V různých směrech se těleso přitom deformuje různě, podle způsobu tváření a podle vyvolaného stavu napjatosti. Velikost změny v daném směru se určuje poměrnou deformací či logaritmickou (skutečnou) deformací.

Poměrná deformace  $\varepsilon$  je obecně definována jako podíl změny rozměru k rozměru původnímu a je pro prodloužení dána vztahem:

$$\varepsilon = \frac{l_f - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.1)$$

Kde:  $l_f$  – konečná hodnota daného rozměru po přetvoření  
 $l_0$  – výchozí hodnota (před deformací)  
 $\Delta l$  – změna délky daného rozměru

Hlavní výhodou vyjádření velikosti deformace je její názornost. Její použití je však vhodné pouze pro popis malých deformací (cca do  $\varepsilon = 0,1$ ). Při tváření, kdy dochází k velkým

deformacím, je její použití nevhodné, jelikož se zvyšující se deformací materiálu dochází k velkému růstu chyby.

Jelikož se při technologických tvářecích postupech pracuje zejména s velkými deformacemi, využívá se pro posuzování přetvoření tzv. skutečná, logaritmická deformace. Skutečná, logaritmická deformace se odvozuje na základě matematických zákonitostí, kdy se uvažuje nekonečně malá změna objemu. Vychází se tedy z diferenciálního způsobu vyjadřování deformace.

Logaritmická (skutečná) deformace je dána vztahem:

$$\varphi_1 = \int_{l_0}^{l_f} \frac{dl}{l} = [\ln l]_{l_0}^{l_f} = \ln \frac{l_f}{l_0} \quad (3.2)$$

Kde:  $l_f$  – konečná hodnota daného rozměru po přetvoření  
 $l_0$  – výchozí hodnota (před deformací)

Analogicky se vyjadřuje deformace ve dvou dalších směrech ( $\varphi_2$  a  $\varphi_3$ ). Ze zákona zachování objemu potom vyplývá:

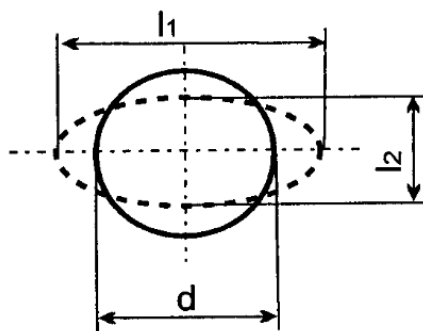
$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (3.3)$$

Ze vztahu (3.3) je zřejmé, že součet skutečných deformací ve dvou směrech se rovná hodnotě skutečné deformace ve směru třetím a tedy že všechny deformace nemohou mít stejné znaménko. Platnost skutečné (logaritmické) deformace je obecná a je proto vhodná jak pro malé, tak i velké deformace. Další výhoda skutečné deformace spočívá v její aditivnosti. To znamená, že při tvářecích pochodech, kdy se deformace uskutečňuje v postupně v několika krocích, je možné sčítat dílčí deformace.

Vztah mezi poměrnou a skutečnou (logaritmickou) deformací:

$$\varphi = \ln \frac{l_f}{l_0} = \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (3.4)$$

S ohledem na vlastnosti uvedených typů posuzování deformací se u analýzy přetvoření deformačních sítí využívá skutečná (logaritmická) deformace. Na obr. 14 je znázorněna deformovaná kružnice, která odpovídá konkrétnímu zkoumanému problému. Osy elipsy určují směr i velikost maximální a minimální logaritmické deformace výlisku.



Obr. 14 Vyhodnocování deformace ze změny tvaru sítě [7]

Pro náš konkrétní případ se velikost přetvoření v rovině plechu vypočítá ze vztahu (3.2) a deformace ve směru tloušťky ze vztahu (3.3). V průběhu deformace se může plocha elementu měnit nebo zůstává neměnná. Ke změně dochází tehdy, mění-li se tloušťka taženého plechu a deformace ve směru tloušťky tvářeného plechu je potom různá od nuly,  $\varphi_3 \neq 0$ .

a) Vyjádření velikosti logaritmické deformace v případě, kdy se mění tloušťka plechu ( $S_0 \neq S$ ):

$$\varphi_1 = \ln \frac{l_1}{d} \quad (3.5)$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{l_2}{d} \quad (3.6)$$

$$\varphi_3 = -(\varphi_1 + \varphi_2) \quad (3.7)$$

b) Vyjádření velikosti logaritmické deformace v případě, kdy tloušťka plechu konstantní ( $S_0 = S$ ):

$$\varphi_1 = \ln \frac{l_1}{d} \quad (3.5)$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{l_2}{d} = -\varphi_1 \quad (3.8)$$

$$\varphi_3 = 0 \quad (3.9)$$

Kde:  $\varphi_1$  – logaritmická deformace ve směru hlavní osy elipsy  
 $\varphi_2$  – logaritmická deformace ve směru vedlejší osy elipsy  
 $\varphi_3$  – logaritmická deformace ve směru tloušťky plechu  
 $l_1$  – délka hlavní poloosy elipsy po deformaci  
 $l_2$  – délka vedlejší poloosy elipsy po deformaci  
 $d$  – průměr nanesené kružnice před přetvořením

Deformační sítě dovolují proměření velikosti přetvoření v libovolném místě tvářeného plechu, což umožňuje:

- Stanovení kritické hodnoty přetvoření využitelné pro konstrukci limitního diagramu.
- Zjištění napětového stavu v libovolném místě zkoumaného vzorku.
- Vizuální nalezení místa potenciálního vzniku trhliny na základě největší lokální deformaci sítě.

#### 4. LIMITNÍ DIAGRAMY [2],[5],[6],[7],[8]

Tvářitelnost byla definována jako schopnost plechu být speciálními metodami tváření deformován z jeho originálního tvaru do finálního požadovaného tvaru bez vzniku porušení. Tři klíčové prvky této definice jsou: materiál, proces a tvar. Všechny tyto tři klíčové elementy musí být v jakékoliv studii tvářitelnosti posuzovány současně, jelikož se během procesu tváření všechny vzájemně ovlivňují.

Při posuzování tvářitelnosti s využitím limitních diagramů (FLD – Forming Limit Diagram) se vychází z poznatku, že mezní stupeň deformace závisí nejenom na jeho fyzikálních vlastnostech, ale i na stavu napjatosti. V praxi se limitní diagramy používají pro hodnocení technologické tvářitelnosti součástí z plechu, k odhadu výskytu defektů a v konečném důsledku ke korekci technologických tvářecích postupů.

V dnešní praxi se využívá třech základních typů limitních diagramů:

- Keeler – Goodwinův diagram.
- Diagram mezní plastičnosti.
- Diagram mezního stupně přetvoření.

V dalším textu se budeme zmiňovat zejména o Keeler – Goodwinově diagramu, jenž je nejpoužívanější.

Základem pro limitní diagramy jsou tzv. křivky mezní tvářitelnosti (FLC – Forming Limit Curves). Tyto křivky resp. diagramy mezních deformací lze získat buď matematicky, nebo na základě experimentů. Při experimentálně – analytickém postupu se využívá vybraných zkoušek. Nejčastěji jsou využívány:

- Tahová zkouška s tyčemi proměnných tvarů.
- Tažení polotovaru různými tvary tažníku.
- Membránová zkouška s eliptickým tvarem tažnice.
- Zkouška půlkulovým tažníkem.



Obr. 15 Ukázka vzorků po zkoušce půlkulovým tažníkem [16]

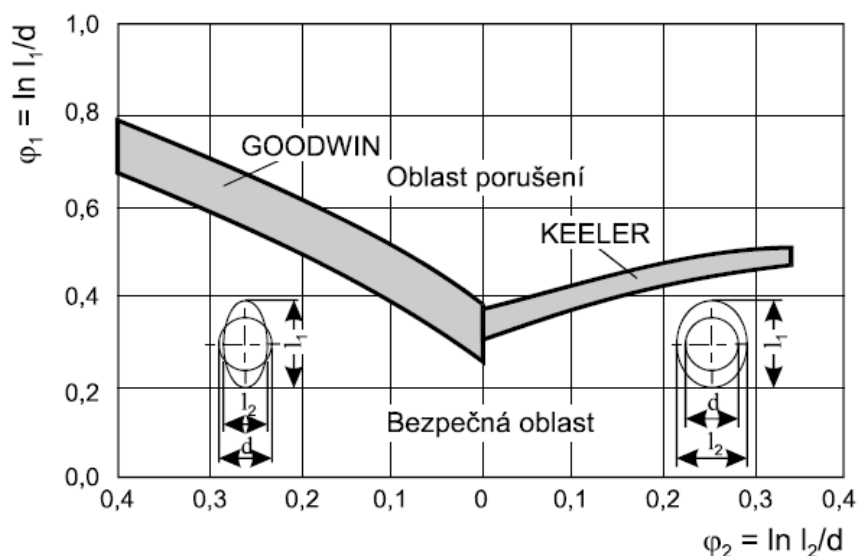
Každý výrobek z plechu má limit, do kterého může být deformován předtím, než se roztrhne. Maximální hodnota, do které může být materiál deformován, je funkcí nejenom hlavního napětí tvářené části, ale také přidruženého vedlejšího napětí.

V šedesátých letech dvacátého století shromáždil Keeler výsledky z mnoha experimentů zabývajících se analýzou hlavních a vedlejších přetvoření (deformací) při tváření plechových polotovarů. Zjistil, že hodnota hlavního přetvoření je závislá na hodnotě vedlejšího přetvoření. Získané hodnoty vynesl do grafu závislosti těchto dvou přetvoření a získal to, co pojmenoval FLD limitní diagram. Výsledná křivka definující hranici mezi bezpečnou oblastí a oblastí porušení se nazývá křivka mezní tvářitelnosti (FLC). Zajímavé je, že tvar FLC

křivky je v podstatě stejný pro všechny produkty z plechu. Jediným rozdílem je, kde se křivka nachází v osách hlavního a vedlejšího přetvoření. Keelerova práce byla limitována podmínkami, kdy obě dvě napětí byla kladná. V roce 1968 Goodwin rozšířil Keelerovu práci na situace, kdy hlavní přetvoření je kladné a vedlejší přetvoření je záporné. Tento složený diagram je dnes známý jako Keeler – Goodwinův diagram.

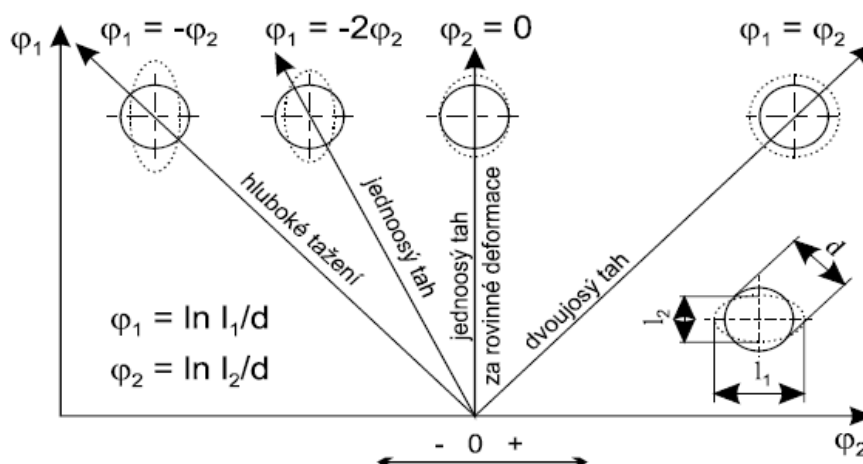
#### 4.1 KEELER – GOODWINŮV DIAGRAM [2],[5],[7],[9]

Na svislou osu se v diagramu vynášejí hodnoty největších tahových logaritmických deformací  $\varphi_1$  a na vodorovnou osu hodnoty deformací  $\pm\varphi_2$ , které jsou k  $\varphi_1$  kolmé, obr. 16.



Obr. 16 Keeler – Goodwinův diagram [9]

Jednotlivá pásma v diagramu vyznačují kritické (mezí) hodnoty přetvoření, počátek tvorby místního zeslabení plechu, nebo vznik trhlin. To znamená, že všechny stavy plošné napjatosti, kterým odpovídá oblast v grafu (obr. 16) pod šedě vyznačeným pásmem jsou v bezpečné oblasti a nehrozí zde poškození tvářené součásti. Oblast nad vyznačeným pásmem potom odpovídá stavům napjatosti, kdy je materiál ohrožen poškozením. Šedé pásmo představuje tzv. přechodnou oblast, kdy není zcela jasně dáno, dojde-li k porušení či ne. Obr. 17 ilustruje zvláštní způsoby zatížení. Paprsek  $\varphi_1 = -\varphi_2$  vyznačuje plošný stav deformace, kdy nedochází ke změně tloušťky plechu. Paprsek  $\varphi_2 = 0$  určuje dvourozměrný stav deformace, při němž se plech prodlužuje jen na úkor změny tloušťky, bez změny šířky.



Obr. 17 Typické deformační stopy při plošném tváření [9]

Poloha křivek v souřadném systému  $\varphi_1, \varphi_2$  Keelerova – Goodwinova diagramu je ovlivněna řadou faktorů. Patří mezi ně jakost materiálu, chemické a metalurgické zpracování a zpracování tepelné. Dále potom exponent deformačního zpevnění, kdy vyšší hodnoty exponentu posouvají křivky mezní tvářitelnosti (FLC) k vyšším hodnotám logaritmických deformací  $\varphi_1$ . Koeficient plošné anizotropie má vliv na polohu křivky hlavně v oblasti  $\varphi_2 < 0$ , a to takový, že se zvyšujícím se koeficientem se posouvá křivka mezní tvářitelnosti k vyšším hodnotám  $\varphi_1$ . Hodnota  $\varphi_1$  se zvyšuje také s rostoucí tloušťkou plechu. Vliv maziva a historie deformace na dosažení vyšších hodnot  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  nelze jednoznačně vyjádřit.

Využití Keeler – Goodwinova diagramu a křivek mezní tvářitelnosti umožňuje:

- Určit, zda dojde k poškození vzorku, známe-li dopředu velikost logaritmické deformace  $\varphi_1, \varphi_2$  v předpokládaných kritických bodech výtažku z plechu.
- Zjištění tzv. technologické bezpečnosti prováděné operace, a to srovnáním skutečně zjištěné deformace v kritických bodech výtažku s místem v diagramu vzhledem k oblasti mezní deformace plechu.
- Vyznačení tzv. trajektorie (historie) deformace, vyznačením hodnot deformace v následných operacích.

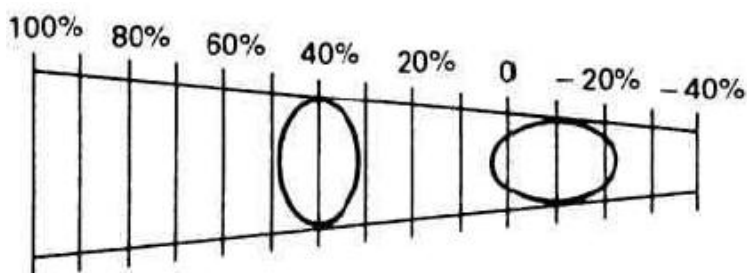
## 5. METODY MĚŘENÍ DEFORMACÍ [4],[5],[6]

Za účelem vypočítání deformací (napětí) je potřeba aplikovanou síť změřit před a po deformaci. Díky tomu mohou být zkonstruovány limitní diagramy. Navíc můžeme výsledky porovnávat se stejnou situací vymodelovanou v softwaru využívajícím metodu konečných prvků (MKP). Přesné měření hlavních a vedlejších deformací je rozhodující pro získání správných informací o deformaci zkoumaného vzorku. Pro posouzení deformace tvářeného plechu bylo vyvinuto mnoho technik. Měření může být prováděno manuálně nebo automaticky.

### 5.1 MANUÁLNÍ METODY [4],[5],[6]

Příkladem nejpoužívanějšího nástroje pro manuální měření přetvoření sítí je páska Mylar zobrazená na obr. 18. Páska Mylar je průhledné měřítko, kterým se deformace měří přímo. Páska má rozcházející se linky a je kalibrována tak, aby pro počáteční kruhový vzor daného průměru, bylo možno přímo odečíst deformaci v procentech.

Pro měření hlavní deformace musí být myšlená hlavní osa deformované elipsy rovnoběžná s čarami na přiloženém měřítku a rozcházející se linky se musí krýt s ostrým poloměrem. Po odečtení deformace v procentech se páska otočí o 90 stupňů a obdobně se měří vedlejší deformace. Je velice důležité mít rozcházející se linky kolmé k hlavní ose, abychom získali správné výsledky. Také je třeba, aby tyto linky překrývaly čáry vyleptaných deformovaných elips. Nesmí být uvnitř ani venku. Měřené kruhy, či elipsy by měly mít rovnoměrný tvar. Pokřivená elipsa (vypadající jako vejce) je příliš blízko k porušení a neposkytne přesné hodnoty.



Obr. 18 Páska Mylar [4]

Tato metoda je nejsnadnější způsob, jak získat hodnoty deformací, ale přesnost není v mnoha případech dostatečně velká. Navíc je tato metoda pomalá, pracná a vyžaduje zkušeného pracovníka, který se vyvaruje chybám během měření.

### 5.2 AUTOMATICKÉ METODY [4]

Automatické metody měření deformací byly vytvořeny jako odpověď na pracné a méně přesné ruční metody měření. S pomocí automatizovaných metod je možno dosáhnout mnohem přesnějších výsledků za krátkou dobu. Mezi nejpoužívanější systémy patří produkty firmy ASAME Technology LLC a firmy GOM Optical Measuring Systems. Vybrané produkty specializované na problematiku přetvoření sítí budou dále uvedeny podrobněji.

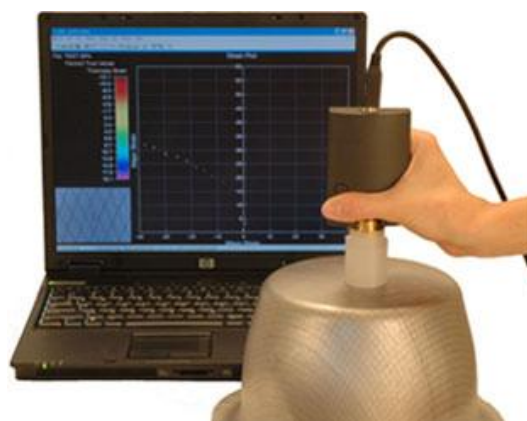
#### 5.2.1 Grid Pattern Analyzer (GPA) [4],[17],[18],[19]

Firma ASAME Technology nabízí dva hlavní typy systémů pro analýzu deformace plechu při tváření. Prvním z nich je systém GPA (obr. 19), který využívá kameru a software, který měří jeden element sítě a počítá hlavní a vedlejší deformaci u kritických míst na tvářené součásti a také ihned vytvoří FLC křivku.

Postup měření je následující:

- 1) Kamera, kterou obsluha drží v ruce, slouží ke zkoumání jednoho čtverce nebo kruhu sítě v daný moment.
- 2) V okamžiku, kdy se na obrazovce počítače, který je připojen k měřicímu systému, objeví element, který chceme zkoumat, obsluha stiskne tlačítko na kameře a vyfotí a zároveň změří síť.
- 3) GPA počítačový program lokalizuje deformovaný kruh nebo čtverec a vypočítá napětí a deformace.
- 4) Změřená data se automaticky vykreslí do limitního diagramu.

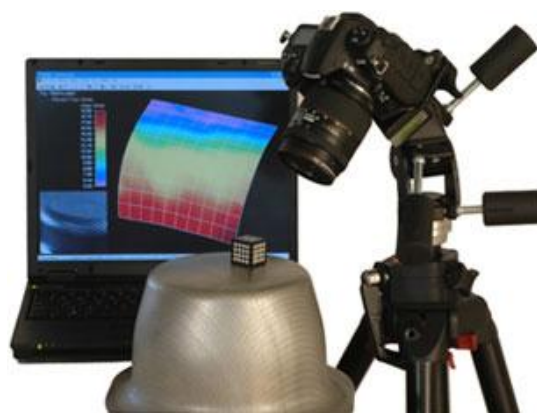
Systém GPA potřebuje k provozu pouze laptop, ze kterého je také napájen. Z toho vyplývá jeho hlavní výhoda, velice snadná přenosnost. Další výhodou je krátký měřicí čas, který je menší než 2 sekundy a okamžité vykreslení v FLD diagramu. Nevýhodami jsou nemožnost využití pro měření geometrie a značná nepraktičnost v případě měření větších součástí.



Obr. 19 Systém GPA [17]

### 5.2.2 ASAME Target Model [4], [18], [20], [21]

Druhým zástupcem od firmy je ASAME je systém ASAME Target Model (Obr. 20), který může měřit obojí, jak plošnou deformaci, tak geometrii velkých dílců. A to za pomoci dvou obrazů, které mají geometrický vztah jeden k druhému. Pro tento systém se využívá zejména sítě s čtvercovými elementy. A to proto, že když je kvalita sítě horší, systém lépe přečte čtvercovou síť.



Obr. 20 Systém ASAME Target Model [20]

Postup měření:

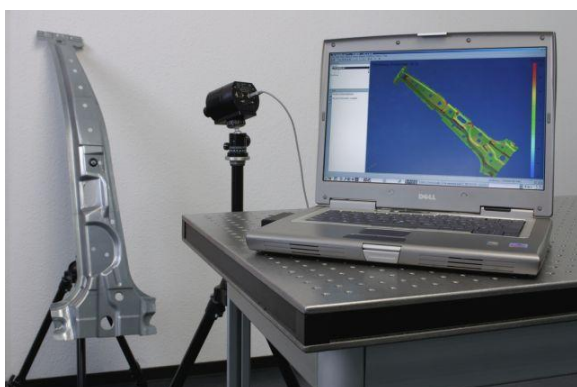
- 1) Na povrch nedeformovaného objektu je nanесena pravidelná síť.
- 2) Součást je tvářena.
- 3) Jsou vyfoceny dvě nebo více fotografií oblasti, která má být měřena. Na fotografiích musí být zabrána také speciální kostka.
- 4) Jsou vyhodnoceny 3D souřadnice v závislosti na poloze sítě na fotografii a pozici fotoaparátu v okamžiku vytvoření fotografie.
- 5) V závislosti na původní a deformované síti jsou vypočteny deformace.

Ve srovnání se systémem GPA dovoluje měřit daleko větší plochy a tím pádem i konstruovat FLC křivky a to v poměrně krátkém čase 10 až 30 minut v závislosti na velikosti vzorku.

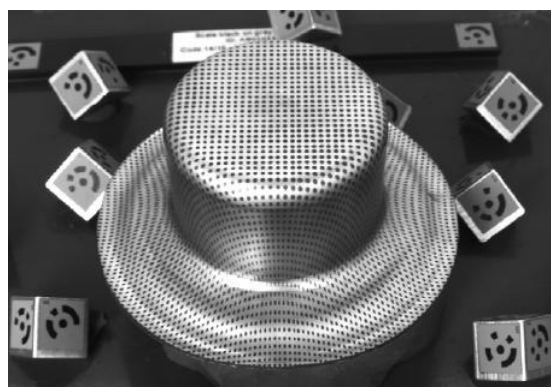
### 5.2.3 Argus [9],[22],[23]

Dalším představitelem 3D optického snímání je bezkontaktní měřicí systém ARGUS (obr. 21) německé firmy GOM mbH, v ČR MSAE System s.r.o. pro měření 3D deformací plechu při lisování. Systém ARGUS je v současnosti jedním z nejkomplexnějších nástrojů pro analýzu deformace plechu při tváření.

Analýza s pomocí toho systému se provádí následovně. Na zkoumaném objektu je některou ze zmiňovaných metod nanášení sítí vytvořen rastr, který se deformuje zároveň s lisovaným plechem (obr. 22). Vzdálenost bodů v síti je obvykle 1 až 6 mm. Vylisovaný prvek s rastrem je poté změřen kamerou CCD čipem a z tohoto snímku jsou vypočteny 3D souřadnice bodů mřížky. Vzdálenosti mezi jednotlivými body definují posunutí. A na základě metody zachování objemu je vypočteno rozložení hlavní a vedlejší deformace, redukce tloušťky materiálu a je vytvořen FLD diagram. Výsledky jsou zobrazeny ve 3D modelu, jako barevná mapa, nebo v řezech.



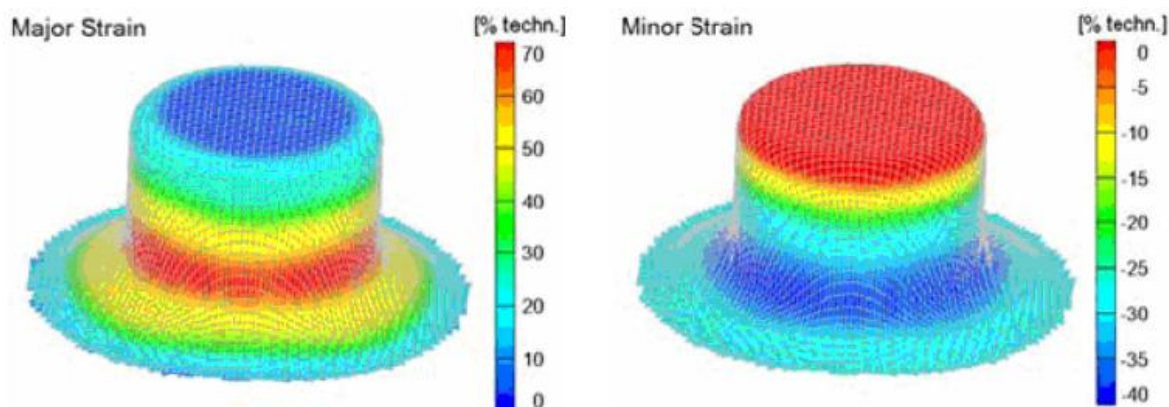
Obr. 21 Systém ARGUS [22]



Obr. 22 Tvářená součást [9]

Za pomoci toho systém můžeme zjišťovat hodnoty složek posunutí, deformace, hodnoty hlavních a vedlejších deformací (ukázka na obr. 23), řezy, změny tloušťky materiálu, velikost deformace vůči limitnímu diagramu. ARGUS slouží k optimalizaci procesu tváření, k detekci oblasti s kritickou deformací, k optimalizaci lisovacích nástrojů, zkouškám materiálů a jiným.

Celý systém je mobilní a lze jej převážet v osobním automobilu. Velikost měřených vzorků se může pohybovat od 100 mm až několika metrů. Rozsah měření deformace je od 0,5% až do stovek %. Program dále poskytuje analýzu za pomoci grafické vizualizace. Všechny tyto vlastnosti j představují hlavní výhody systému pro měření deformací ARGUS.



Obr. 23 Ukázka výstupu ze systému ARGUS – hlavní a vedlejší deformace [9]

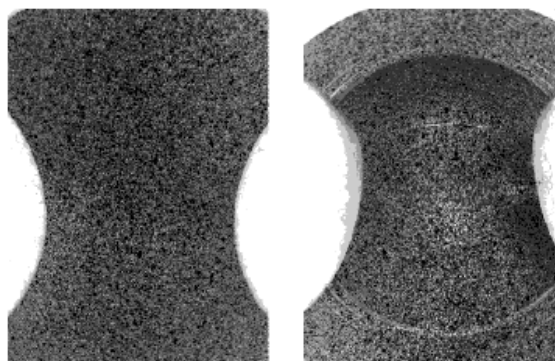
### 5.2.3 Aramis [4], [9], [24]

Pro lepší představu o dostupných měřicích systémech si krátce představíme další produkt firmy GOM mbH, a to systém ARAMIS (obr. 24). Tento systém je určen k měření reálných 3D deformací a rozložení deformace na objektech pod statickým nebo dynamickým zatěžováním. Tento systém však nepracuje na principu nanášení pravidelných deformačních sítí. Na povrch vzorku se obvykle sprejem nanese kontrastní vzor (obr. 25). Oproti systému ARGUS je vybaven dvojicí CCD kamer.

Hlavní využití spočívá v tvorbě křivek mezní tvářitelnosti (FLC), dimenzování součástek, zjišťování materiálových vlastností, analýze procesu tečení a stárnutí.



Obr. 24 Systém ARAMIS – kamery [24]



Obr. 25 Náhodný rast na vzorcích pro FLC [4]

## 5.3 ZHODNOCENÍ METOD MĚŘENÍ DEFORMACÍ

Z vlastností uváděných u jednotlivých metod vyplývá, že v dnešní době se využívá zejména automatizovaných metod a od ručního měření se upouští z důvodu velké pracnosti a nepřesnosti měření. U výběru některého z automatických systémů musí potenciální uživatel zhodnotit oblast použití, jelikož každý ze systému má specifické výhody a nevýhody. Nejbližšími konkurenty z uváděných systémů jsou však ASAME Target Model a ARGUS od společnosti GOM, respektive MCAE Systems v ČR.

## 6. ZÁVĚRY

Nanášení deformačních sítí je jednou z nejefektivnějších cest k analýze procesu tváření plechových součástí. Všechny způsoby nanášení sítí mají své konkrétní výhody a nevýhody. Jelikož některé z metod uváděných výše se vyznačují větším počtem nevýhod a svou zastaralostí, v dnešní praxi se nevyužívají. Naopak jako efektivní se ukázaly metody nanášení sítí elektrochemickým leptáním, fotochemickým leptáním a pomocí laseru. Tyto metody se dají zařadit do podskupiny metod, které mají prohloubenou kresbou sítě. Do skupiny metod s vyvýšenou kresbou sítě pak patří sítotisk, neuvažujeme-li další málo používané metody tisku.

Společnou výhodou metod s prohloubenou kresbou sítě je fakt, že během tváření nedochází k jakémukoliv znehodnocování sítě vlivem tření. Navíc můžeme zvýšit čitelnost sítě nanesením kontrastní barvy, která se v prohloubení nemá možnost setřít. U elektrochemického leptání jsou hlavními výhodami jednoduchost aplikace, cenová výhodnost a zejména snadná dostupnost potřebného vybavení. Metoda je však omezena na vodivé kovy. Výhodami fotochemického leptání jsou ostré hrany čar vytvořené sítě a možnost nanášet velice husté sítě. Metoda je však poměrně pracná. V případě použití laseru získáváme velmi kvalitní síť, což znamená přesnější výsledky. Laser se používá hlavně pro výrobky o velkých plochách. Nevýhodou je finanční nákladnost a špatný kontrast u plechů s tmavým povrchem.

U metody sítotisku je hlavní výhodou jednoduchost aplikace sítě, finanční nenáročnost a dostupnost potřebných pomůcek. Jelikož můžeme zvolit odstín nanášené barvy, dosahuje se také velkého kontrastu. Hrozí zde však nebezpečí otěru a s tím související zhoršení čitelnosti.

Z uvedených vlastností je evidentní, že neexistuje jediná univerzální metoda, která by skýtala pouze výhody. Musíme proto vždy vybrat optimální metodu pro náš konkrétní případ.

Nanesení sítě na povrch vzorku je pouze první krok v analýze chování zkoumaného vzorku. K predikci možného defektu materiálu během tvářecího procesu se využívá limitních diagramů. Po proměření námi nanesené sítě můžeme tyto hodnoty ověřit v limitních diagramech a zjistit, zdali se pohybujeme v tzv. bezpečné oblasti, nebo jestli budeme muset upravit některé technologické parametry tvářecího procesu.

Jako ve všech směrech lidské činnosti se i zde využívá k zjednodušení práce výpočetní technika. Při analýze tvářecího procesu existují dva rozdílné přístupy. Prvnímu z nich jsem se konkrétně věnoval ve své práci, protože přímo navazuje na problematiku deformačních sítí. Jedná se o princip Reverse Engineering, kdy je vytvořen fyzický vzorek, je nanesena síť a pomocí potřebného příslušenství je v počítačovém softwaru vyhodnocen. Zjištěna jsou reálná kritická místa tvářecího vzorku. Druhý princip přistupuje k danému problému ze zcela jiného úhlu. V počítačovém softwaru, obvykle pracujícím na principu metody konečných prvků, je vymodelován vzorek, o který se zajímáme. Za pomoci simulace tvářecího procesu v tomto programu se poté snažíme predikovat možná nebezpečná místa.

Při tomto postupu se můžeme vyvarovat chyb, které by byly v případě pořízení skutečného vzorku velice nákladné. Bohužel však není možno dosáhnout naprosto přesných výsledků. Pro dosažení přesných výsledků a udržení přijatelných nákladů je proto dobré oba uváděné postupy vhodně kombinovat.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. DRASTÍK, František a Jaroslav ELFMARK. *Plastometry a tvařitelnost kovů*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1977, 392 s. DT 539.214.07.
2. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: Plošné a objemové tváření*. 2. vyd. Brno: CERM, 2007, 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.
3. FOREJT, Milan. *Teorie tváření a nástroje*. 1.vyd. Brno: Nakladatelství VUT Brno, 1991, 187 s. ISBN 80-214-0294-6.
4. OZTURK, Fahrettin, Murat DILMEC, Mevlut TURKOZ, Remzi E ECE a Huseyin S. HALKACI. Grid Marking and Measurement Methods for Sheet Metal Formability. In: *Hidroskillendirme.com* [online]. 2009 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <[http://www.hidroskillendirme.com/docs/yayinlar/5\\_Grid\\_marking\\_and\\_measurement.pdf](http://www.hidroskillendirme.com/docs/yayinlar/5_Grid_marking_and_measurement.pdf)>.
5. SCHAEFFLER, Daniel J. a Evan J. VINEBERG. Troubleshooting Formability Problems Using Strain Analysis. *ASM handbook* [online]. Materials Park: ASM International, 2006, 14B, s. 10 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <[http://www.eqsgroup.com/ysx2tsinz6u0gxsw7kbt/8i2k7l0wefhre3wxhto3/EQS\\_introduction-to-circle-grid-strain-analysis.pdf](http://www.eqsgroup.com/ysx2tsinz6u0gxsw7kbt/8i2k7l0wefhre3wxhto3/EQS_introduction-to-circle-grid-strain-analysis.pdf)>.
6. JOSHI, Amit Mukund. Strain Studies In Sheet Metal Stampings. [online]. s. 8 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <<http://www.metalwebnews.com/howto/sheet-metal/sheetmetal-study.pdf>>.
7. LIDMILA, Zdeněk. *Teorie a technologie tváření*. 1.vyd. Brno: Univerzita obrany, 2008, 105 s. ISBN 978-80-7231-579-6.
8. MIELNIK, Edward M. *Metalworking science and engineering*. New York: McGraw-Hill, 1991, 976 s. ISBN 00-704-1904-3.
9. PETRUŽELKA, Jiří a Pavel SONNEK. *Tvářitelnost kovových materiálů* [online]. Ostrava, 2007 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <<http://www.345.vsb.cz/jiripetruzelka/Texty/TvCELEupr.pdf>>. Studijní podklady. Vysoká škola Báňská.
10. Grid Marking Equipment. *THE LECTROETCH COMPANY* [online]. 2010 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <<http://www.lectroetch.com/grid.html>>.
11. MÄNTYJÄRVI, Kari, Juha TULONEN, Teemu SAARNIVUO, Jyri PORTER a Jussi A. KARJALAINEN. Grid Patterns by Laser for Forming Strain Analysis. *Esaform2008.insa-lyon.fr* [online]. 2008 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <[http://esaform2008.insa-lyon.fr/proceedings/MS04/p\\_Ma\\_329.pdf](http://esaform2008.insa-lyon.fr/proceedings/MS04/p_Ma_329.pdf)>.
12. CIRCLEGRIDANALYSIS.COM. [online]. 2006 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <<http://www.circlegridanalysis.com/circlegridanalysis/about/>>.

13. SPARTANBURG STEEL PRODUCTS INC. [online]. [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <<http://www.ssprod.com/quality-management>>.
14. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI STUDIJNÍ MATERIÁLY. [online]. [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <<http://home.zcu.cz/~sbenesov/Skriptatvareni.pdf>>.
15. ČVUT - FAKULTA STROJNÍ - STUDIJNÍ PODKLADY. [online]. [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <[http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TMTV/2\\_vyp\\_def.pdf](http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TMTV/2_vyp_def.pdf)>.
16. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI STUDIJNÍ MATERIÁLY. [online]. [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/spt/fld.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/fld.pdf)>.
17. GPA models. *ASAME Technology LLC* [online]. 2009 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <<http://www.asametechnology.com/gpa.html>>.
18. Frequently Asked Questions. *ASAME Technology LLC* [online]. 2009 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <<http://www.asametechnology.com/faq.html>>.
19. Grid Pattern Analyzer. *ASAME Technology LLC* [online]. 2009 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <<http://www.asametechnology.com/dwn/factsheets/gpa.pdf>>.
20. ASAME Models. *ASAME Technology LLC* [online]. 2009 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <<http://www.asametechnology.com/asame.html>>.
21. ASAME Target Model. *ASAME Technology LLC* [online]. 2009 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <<http://www.asametechnology.com/dwn/factsheets/target.pdf>>.
22. Argus. *MCAE SYSTEMS, s.r.o.* [online]. 2012 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <<http://www.mcae.cz/argus>>.
23. ARGUS - Optical Forming Analysis. *GOM MBH* [online]. 2009 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <<http://www.gom.com/metrology-systems/sheet-metal-forming.html>>.
24. Aramis. *MCAE SYSTEMS, s.r.o.* [online]. 2012 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <<http://www.mcae.cz/aramis>>.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Označení      | Legenda                                             | Jednotka |
|---------------|-----------------------------------------------------|----------|
| $d$           | průměr nanesené kružnice před přetvořením           | [mm]     |
| $l_f$         | hodnota daného rozměru po přetvoření                | [mm]     |
| $l_0$         | výchozí hodnota (před deformací)                    | [mm]     |
| $l_1$         | délka hlavní poloosy elipsy po deformaci            | [mm]     |
| $l_2$         | délka vedlejší poloosy elipsy po deformaci          | [mm]     |
| $\Delta l$    | změna délky daného rozměru                          | [mm]     |
| $\varepsilon$ | poměrná deformace                                   | [ - ]    |
| $\varphi_1$   | logaritmická deformace ve směru hlavní osy elipsy   | [ - ]    |
| $\varphi_2$   | logaritmická deformace ve směru vedlejší osy elipsy | [ - ]    |
| $\varphi_3$   | logaritmická deformace ve směru tloušťky plechu     | [ - ]    |
| FLC           | Forming Limit Curve (Křivka mezní tvářitelnosti)    |          |
| FLD           | Forming Limit Diagram (Limitní diagram)             |          |
| GPA           | Grid Pattern Analyzer                               |          |
| MKP           | Metoda konečných prvků                              |          |