



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

DEFORMAČNÍ SÍTĚ A JEJICH UPLATNĚNÍ V PRAXI

THE DEFORMATION NECKS AND THEIR USE IN ENGINEERING PRACTICE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN HOVAD

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KAMIL PODANÝ, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Hovad

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:

Deformační sítě a jejich uplatnění v praxi

v anglickém jazyce:

The deformation necks and their use in engineering practice

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o zpracování literární studie metod nanášení deformačních sítí na povrch polotovarů. V práci bude uveden popis daných metod, jejich přínos a využití v praxi, výhody a nevýhody a používané přístroje a nástroje – zejména v oblasti technologií tváření.

Cíle bakalářské práce:

Aktuální literární studie se zaměřením na metody nanášení deformačních sítí na povrch polotovarů s vyhodnocením jejich výhod a nevýhod a s příklady použití.

Seznam odborné literatury:

1. HOSFORD, William F. and Robert M. CADDEL. Metal Forming: Mechanics and Metalurgy. 3th ed. New York: Cambridge University Press, 2007. 365 s. ISBN 978-0-521-88121-0.
2. MIELNIK, E.M. Metal Working Science and Engineering. 1.ed. N.Y.: McGraw-Hill, Inc., 1991. 890 s. ISBN 0-07-041904-3.
3. PETRUŽELKA, Jiří. Tvařitelnost a nekonvenční metody ve tváření. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2000. 156 s. ISBN 80-7078-635-3.
4. DRASTÍK, F. a J. ELFMARK. Plastomery a tvářitelnost kovů. Praha: SNTL, 1977. 392 s DT 539.214.07
5. FOREJT, Milan. Teorie tváření. 2.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 167 s. ISBN 80-214-2764-7.
6. SAMEK, Radko. Analýza mezního stavu plastičnosti a technologické tvařitelnosti. 1.vyd. Brno: VA, 1988. 88s.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

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

V Brně, dne 15.11 2011

L.S.

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ABSTRAKT

Hovad Jan: Deformační sítě a jejich uplatnění v praxi

V práci jsou zpracovány metody nanášení deformačních sítí. Pro každou metodu jsou stanoveny doporučení pro strojírenskou praxi a uvedeny jejich klady a zápory. Uvedeno je také porovnání metod. Dále jsou rozebrány manuální a automatické metody měření a zpracovány jsou jejich popisy, klady a zápory včetně porovnání.

Klíčová slova: deformační sítě, měření, metody

ABSTRACT

Hovad Jan: The deformation necks and their use in engineering practice

This theses presents methods for application of the deformation necks. There are described advantages, disadvantages and recommendations for use in engineering practice for each method. Methods are compared with each other. There are also discussed manual and automatic methods of the measurement, including descriptions, advantages, disadvantages and comparison.

Keywords: deformation necks, measurement, methods

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HOVAD, Jan. *Deformační sítě a jejich uplatnění v praxi*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 27 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 24.5 2012

podpis

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Kamilu Podanému, Ph.D. za věcné připomínky, pročítání textu a čas strávený nad vznikající prací.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 DRUHY POUŽÍVANÝCH SÍTÍ	10
2 NANÁŠENÍ SÍTÍ	11
2.1 Elektrochemické leptání	11
2.2 Fotochemické leptání	13
2.3 Metoda sítotisku	14
2.4 Metoda rytých sítí	15
2.5 Metoda nanášení sítí laserem	16
2.6 Porovnání metod nanášení sítí	17
3 VYHODNOCENÍ PŘETVOŘENÍ SÍTĚ	18
3.1 Ruční měření	18
3.2 Automatické měření	19
3.2.1 Měřicí systém ARGUS.....	19
3.2.2 Měřicí systém ARAMIS.....	21
3.2.3 Měřicí systém MODEL 100U	23
3.2.4 Měřicí systém ASAME Target Mode	24
3.2.5 Měřicí systém Grid Pattern Analyzer(GPA-100)	25
3.2.6 Porovnání bezkontaktních měřících systémů	26
4 ZÁVĚR	27

Seznam použitých zdrojů

ÚVOD [5],[6],[18],[19]

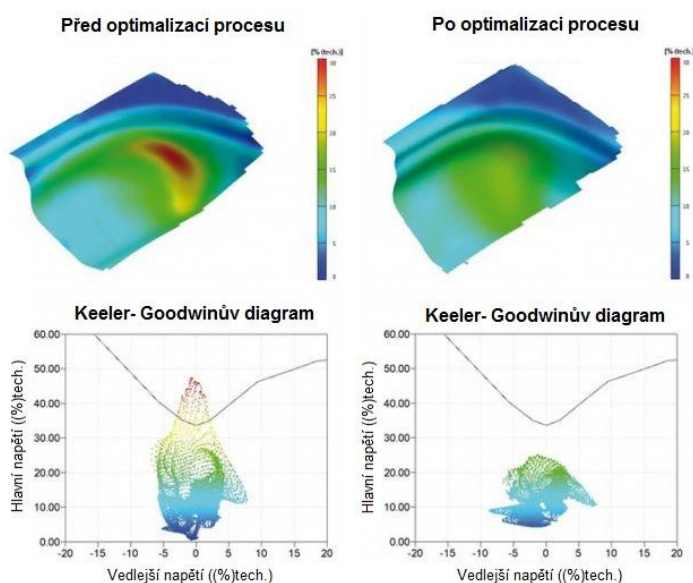
Pro výrobu součástí na co nejmenší počet operací a bez porušení je nutno přesně znát jejich stavy napjatosti a přetvoření. Za tímto účelem je nejčastěji využívána metoda deformačních sítí. Metoda deformačních sítí je efektivní nástroj pro analýzu deformací u tvarově komplikovaných výlisků. Analýza spočívá v proměření deformované sítě. Pod pojmem síť si lze představit vytištěný vzor na povrchu přístřihu skládající se ze symetrických a rovnoměrně rozložených elementů.

Při tváření se elementy na povrchu plechu přetvoří stejně jako samotný plech. Následně pro zjištění napěťo-deformačního stavu vzniklého jako důsledek tváření je nutné změřit přetvoření sítě a to lze provádět ručně nebo automaticky. Dnes jsou za tímto účelem využívány především bezdotykové snímací systémy (obr.1), které jsou propojeny zpravidla s běžným počítačem, který vyhodnotí získané snímky. Vyhodnocení deformací a napětí v materiálu se nejčastěji provádí pomocí Keeler-Goodwinových diagramů neboli Forming Limit Diagram (dále FLD), do kterých se vynášejí hodnoty deformace v hlavní a vedlejší ose. Na základě vynesení těchto údajů lze vyhodnotit jak blízko je deformace meznímu stavu přetvoření (obr.2). Dalším výstupem měření jsou informace o velikosti deformace



Obr.1 Ukázka systému ARGUS [5]

výlisku, napětí v materiálu, ztenčení plechu atd. Na základě těchto informací je pak možné tvářecí proces optimalizovat tak, aby byla maximálně využita plasticita materiálu, ale minimalizována pravděpodobnost vzniku trhliny (obr.2). V neposlední řadě je pak výstup této přímé zkoušky vhodný pro zhodnocení kvality odhadu přetvoření, který se provádí pomocí metody konečných prvků. Tato kontrola je vhodná především proto, že simulace toku materiálu vychází často v každém softwaru jinak a je nutné simulace potvrdit či vyvrátit. Zásadní odchylky pak mohou vést buď k trhlinám výlisku nebo nevyužití plasticity materiálu. Přes své nepřesnosti je metoda konečných prvků jediným způsobem, jak odhadnout stav napětí v materiálu při prvotním návrhu tvářecího nástroje.

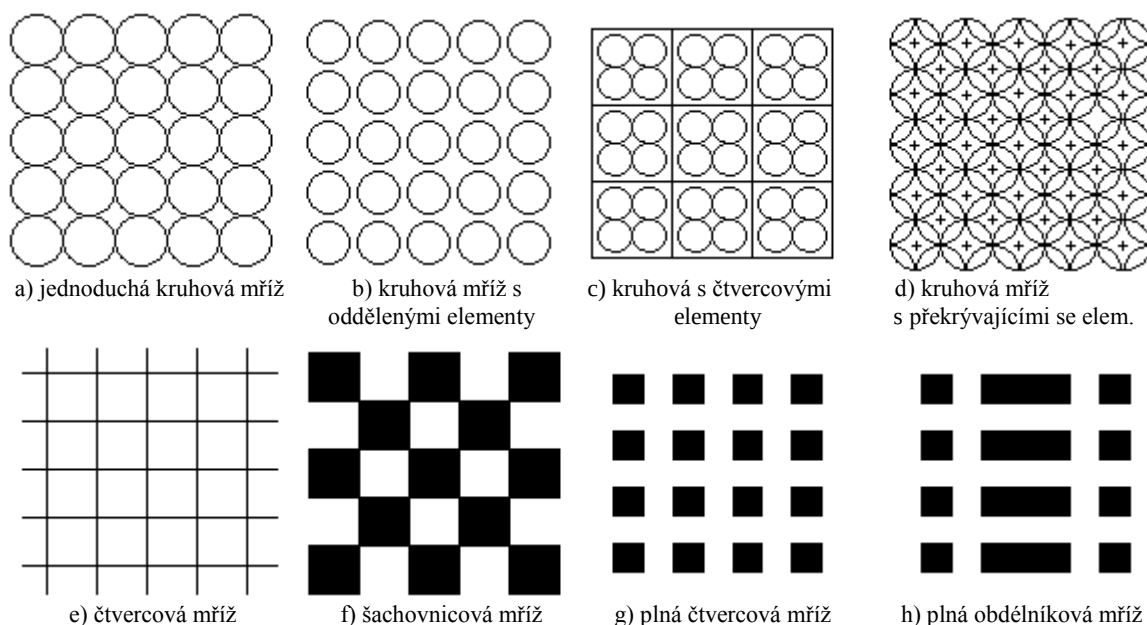


Obr.2 Optimalizace tvářecího procesu [6]

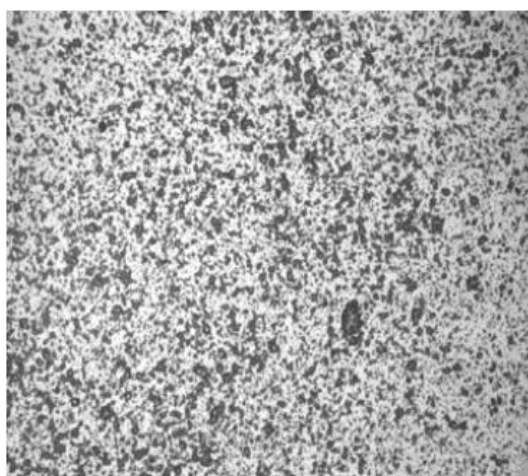
1 DRUHY POUŽÍVANÝCH SÍTÍ [9],[13],[16],[18],[19]

Sítě lze třídit dle rastru, který se nanáší na plech. Rastr se obvykle skládá z kruhových, čtvercových nebo obdélníkových elementů o průměru kružnice nebo délce strany čtverce 1 až 8 mm. Ukázky různých typů sítí lze nalézt na obr.3. Nejsou zde uvedeny všechny typy, neboť variací kruhových a čtvercových elementů je samozřejmě možných daleko více. Speciálním případem je pak síť se stochastickým vzorem (obr.4.).

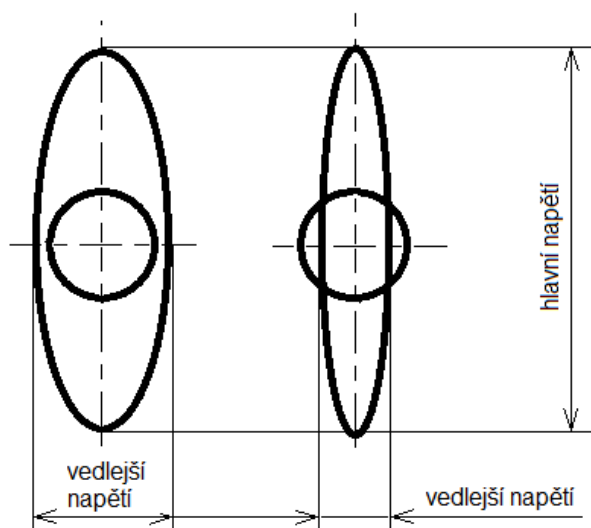
V praxi se nejvíce osvědčil typ kruhové sítě s překrývajícími se elementy, viz obr.3 d). Tyto sítě jsou vhodné díky osám a průsečíkům jednotlivých elementů. Neméně významný je také tvar elementu, který se při tvářecím procesu deformuje tak, že má delší poloosu ve směru hlavní deformace a tedy i hlavní napětí, zatímco malá poloosa je ve směru vedlejšího napětí (obr.5). Takto jednoduché určení směru toku materiálu není u sítí skládajících se z nekruhových elementů možné.



Obr.3 Příklady různých typů sítí [9],[13],[18]



Obr.4 Stochastický vzor [16]



Obr.5 Deformace kruhového elementu [13]

2 NANÁŠENÍ SÍTÍ [8],[9],[13],[18]

Nanášení sítě je proces tištění požadovaného vzoru na nejčastěji plechový polotovar a to buď jen na části, které mají být podrobené analýze, nebo na celý plech. Nanášení sítě lze provádět různými způsoby.

- Fotografická metoda
- Potiskování
 - a) sítotisk
 - b) ofsetový tisk
 - c) gumostereotypie
- Fotochemické leptání
- Elektrochemické leptání
- Rytí
- Ražení
- Laserem

Všechny tyto metody mají své klady a zápory, neexistuje tedy jedna univerzální metoda a je nutné volit způsob nanesení sítě dle požadavků na přesnost, velikost elementu, kontrast, trvanlivost, kvalitu a cenu nanesené sítě. V následujícím textu pak budou uvedeny metody fotochemického a elektrochemického leptání, sítotisku, rytí a nanášení sítě pomocí laseru. Metody byly pro popis voleny proto, že za jejich pomoci je nanášení sítě dostatečně efektivní, aby našly své uplatnění v praxi.

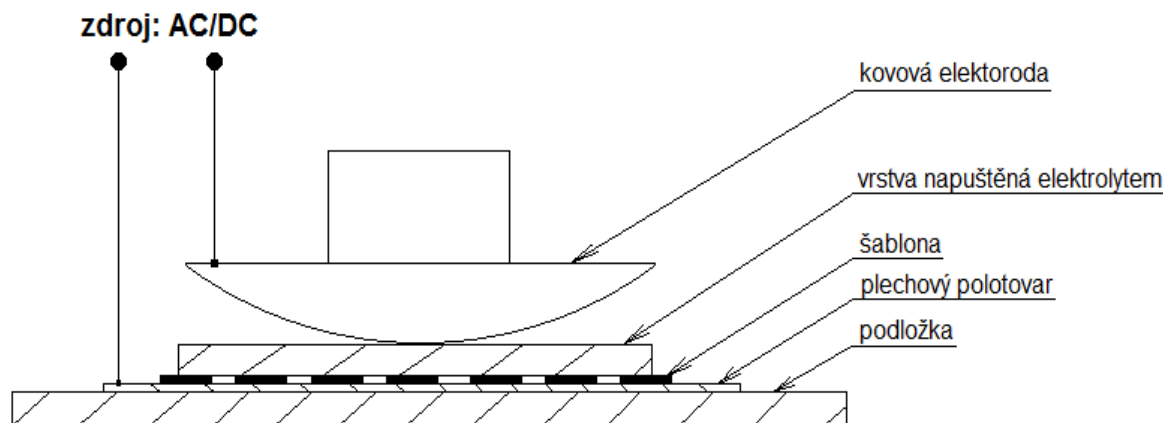
Metody nanášení sítí by pak měly splňovat následující požadavky. Nesmí mít zásadní vliv na tvářecí proces, jinak řečeno v naprosto ideálním případě síly mezi tvářecím nástrojem a výliskem jsou stejné u plechu se sítí a bez sítě. Dále síť musí být schopna odolávat tření při tváření a chemicky nereagovat s mazivem. Mezi další požadavky lze řadit odolnost vůči zvýšené teplotě a schopnost deformovat se, což platí především pro síť ve formě barvy. U sítí vzniklých odstraněním tenké vrstvy kovu se sleduje hloubka ubraného materiálu, kde je nežádoucí vznik koncentrátorů napětí s negativními důsledky na schopnost přetvoření polotovaru.

Shrnou-li se požadavky na síť, dle kterých lze hodnotit následující metody jsou to:

- přesnost
- rozlišení a kontrast
- odolnost vůči otěru a mazivům
- odolnost vůči zvýšené teplotě
- čas nutný pro vytvoření sítě
- možnost nanesení na velké plochy
- možnost nanesení na různé materiály
- finanční náklady

2.1 Elektrochemické leptání [9],[13],[18],[21],[24]

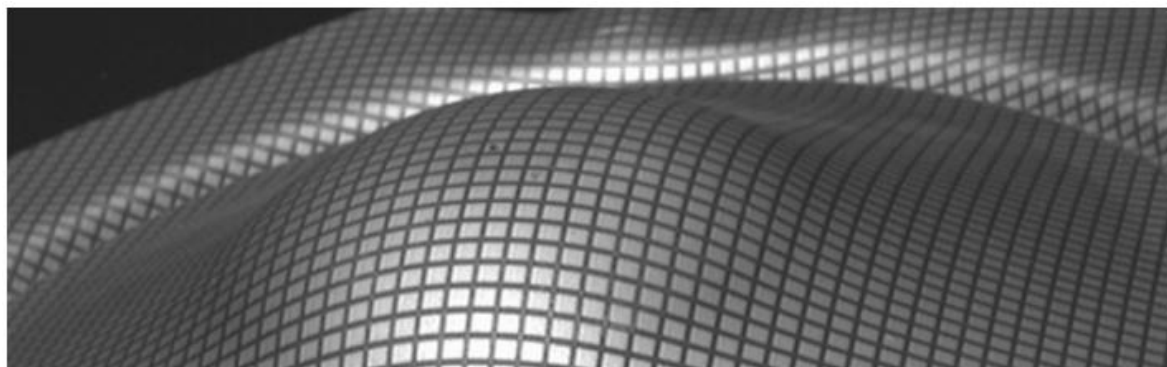
Elektrochemické leptání je jednou z nejvíce používaných metod díky jednoduchému a rychlému nanesení sítě. Poprvé ji použil R.H. Heyer a její základní princip je pak znázorněn na obrázku obr.6. Elektrický zdroj má malé napětí. Pro ocel se zpravidla používá střídavé napětí, pro neželezné kovy stejnosměrné. Typ zdroje lze také volit dle požadované barvy sítě. Proud se pohybuje v intervalu od 15 do 200A. Zdroj je zapojen mezi kovovou elektrodou a plechovým polotovarem, na který se nanáší síť. Mezi polotovarem a kovovou elektrodou se ještě nachází šablona se vzorem sítě a vrstva napuštěna leptacím roztokem respektive elektrolytem.



Obr.6 Schéma elektrochemické metody [13],[18]

Před umístěním šablony a ostatních dílů je nutné povrch polotovaru pečlivě očistit. Nastavení zdroje respektive proudu se volí v závislosti na hustotě linky sítě a pro různé materiály plechu je ideální elektrolyt o jiném složení.

Při samotném leptání je elektroda přitlačována, což má za následek, že elektrolyt vyteče z vrstvy, která ho obsahuje. Díky působícímu tlaku se z prostoru mezi šablonou a plechem vytlačí elektrolyt pouze do prostoru štěrbin v šabloně. Celý proces nanášení trvá přibližně 5 sekund. Nakonec je dobré plech opláchnout neutralizačním roztokem. Ukázka nanesené sítě lze nalézt na obrázku obr.7.



Obr.7 Ukázka nanesené a deformované sítě [24]



Obr.8 Zařízení pro elektrochemické leptání - Model 190 od firmy Qualitest [21]

Příkladem elektrolytu pro železné i neželezné kovy může být směs o složení:

- chlorid draselný 80g
- chlorid sodný 90g
- kyselina dusičná 100ml
- kyselina chlorovodíková . . . 100ml
- voda 4.5 litru

Mezi klady, lze řadit možnost vytvoření sítě s rozměrem elementu od 1 mm. Firma VIALUX ve své dokumentaci udává přesnost lepší nežli 0.01mm. Dalšími klady jsou časová nenáročnost, nízká cena, odolnost vůči otěru a nevznikající koncentrátoři napětí. Negativem je možnost nanášení sítí pouze na vodivé materiály a omezenost ve velikosti plochy, na kterou lze síť nanést. Tato metoda se zdá být ideální z hlediska finančních nákladů, časové náročnosti a kvality sítě. Proto je hojně využívána ve strojírenské praxi.

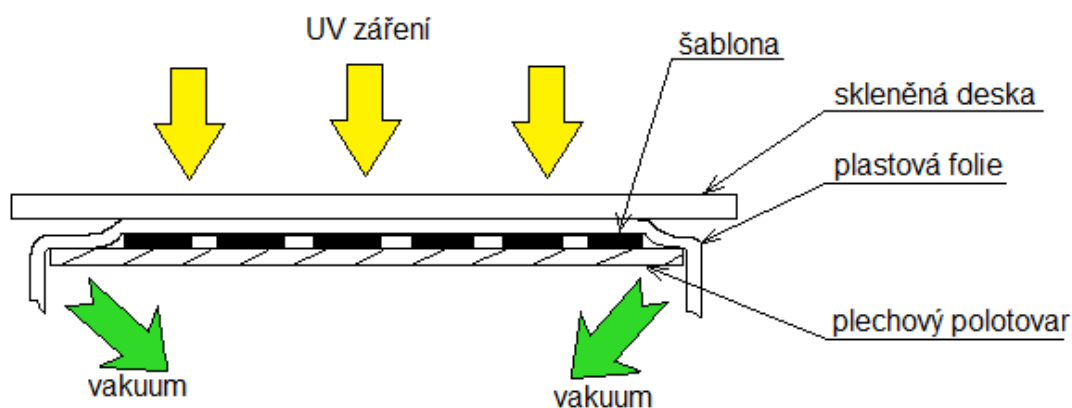
Z výše uvedeného plyne, že metodu lze doporučit pro takové aplikace, kdy je cílem kompromis mezi cenou zařízení a kvalitou nanášené deformační sítě. Metoda především vyniká svojí rychlostí nanášení, což ji předurčuje k hojnému využití jak v laboratorních podmínkách tak praxi.

2.2 Fotochemické leptání [9],[13],[18]

Fotochemické leptání je přesná metoda pro nanášení sítí. Skládá se ze dvou hlavních kroků, kde první je exponování emulze na povrchu plechu a druhým je leptání kyselinou v místech, které nezakrývá povlak vzniklý v předcházejícím kroku.

Postup celého procesu lze shrnout do těchto bodů:

- a) očištění plechu:* Na začátku celého procesu je nutné plech dokonale očistit a to buď toluenem ($C_6H_5CH_3$) nebo trichlorethylenem ($CHCl_3$), který je však zakázáno používat díky jeho ekologické závadnosti. Rychlé očištění lze provést také pomocí chemického rozpouštědla ovšem velice obezřetně.
- b) nanášení emulze:* Po důkladném očištění se na plech nanese vrstva emulze o tloušťce do 0.01 mm citlivé na světlo.
- c) překrytí šablonou:* Vrstva emulze se překryje šablonou se vzorem pozitivu požadované sítě. Šablona musí být odolná vůči UV záření. Dále je žádoucí, aby šablona a plechový polotovár na sebe maximálně lícovali, což zaručí vakuum, viz obr.9.
- d) exponování emulze UV zářením:* Na závěr první části procesu se vrstva emulze exponuje v temné komoře za působení UV záření. Takto vzniklá síť může být snadno odstraněna chemicky nebo třením, navíc vrstva je relativně tlustá a může ovlivňovat tvářecí proces, proto v této formě není vhodná pro metodu deformačních sítí a je nutné pokračovat leptáním požadovaného vzoru, proto také byl použit právě pozitiv požadovaného vzoru.
- e) leptání:* V druhé části procesu se na plech nanese kyselina (HCl , HNO_3 , HF , atd.), která se volí dle materiálu plechového polotovaru. Kyselina odleptá vrstvu kovu o tloušťce 2 až 4 μm v místech, která nejsou zakryta vrstvou exponované emulze. Nutné je kontrolovat dobu leptání, aby kyselina nepoškodila okraje exponované emulze, což by mělo negativní dopad na přesnost a ostrost kresby sítě.
- f) očištění od kyseliny:* Nakonec pro ukončení leptání se plech omyje vodou nebo toluenem.



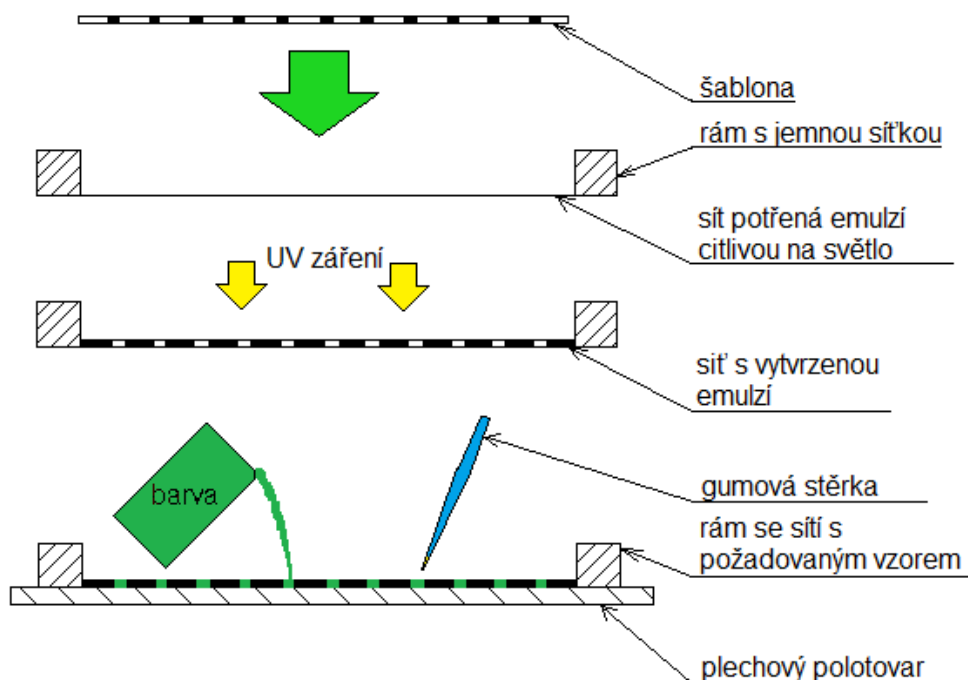
Obr. 9 Schéma prvního kroku fotochemické metody [13]

Mezi negativa lze řadit časovou náročnost, zpravidla trvá nanášení jedné sítě více než 30 minut. Metoda je vhodná pro nanášení sítí na malé díly. Klady jsou přesnost, ostrost, odolnost vůči otěru a slabá odleptaná vrstva, která nemá vliv na vlastnosti materiálu. Celkově by se však dalo říci, že negativa převažují nad kladů, neboť podobná pozitiva lze najít i u rychlejšího a méně pracného elektrochemického leptání.

Na základě uvedených kladů a záporů lze metodu doporučit pro takové aplikace, které nejsou podmíněny rychlým nanášením sítí, a je vyžadována vysoká přesnost nanášeného vzoru.

2.3 Metoda sítotisku [9],[18],[20],[22]

Jedná se o jednu z nejstarších metod tisknutí vůbec, její uplatnění je velice široké díky její jednoduché aplikaci (obr.10). Používá se pro tisk nápisů na reklamní předměty až po průmyslové aplikace.



Obr.10 Schéma sítotisku [20]

Nanášení je nutné začít zhotovením síta, které bude mít propustné pouze části pozitivu požadovaného vzoru. Za materiál síta se dříve volila především bavlna, dnes však převažují syntetické tkaniny. Vzhledem k tomu, že se barva nanáší na kov, který nesaje barvu je vyžadována nízká propustnost síta, což zaručí vysoká hustota tkaniny okolo 30 000 ok na cm^2 . První krok při zhotovení síta s požadovaným vzorem je natažení a vypnutí tkaniny v hliníkovém rámečku. Na síto v temné komoře se nanese emulze citlivá na světlo a nechá se uschnout. Potom se na síto přiloží šablona ve tvaru pozitivu požadovaného vzoru, neboli zakrývající ty části kde má být síto propustné. Vytvrzení emulze se provede osvětlením UV zářením. Posledním krokem v přípravě síta je vypláchnutí zaschlé, ale nevytvrzené emulze vodou. Exponovaná emulze jde ze síta odstranit chemicky a tím pádem lze síto použít znovu pro jiné vzory, je však dostatečně odolná pro tisknutí velkých sérií.

Po tom co je síto s požadovaným vzorem připraveno, je možné přistoupit k samotnému tisku. Rám se sítem se přiloží na plechový polotovar a upevní tak, aby se zabránilo jeho případnému posunutí. Na síto se nalije barva, která je po vytvrzení odolná vůči otěru a za pomoci stěrky nebo válečku se protlačuje skrz síto. Po rozetření barvy a při následném zvedání sítě je třeba dbát na to, aby pohyb byl maximálně přímočarý a kolmý vzhledem k rovině plechového polotovaru, jinak by mohlo dojít k rozmazání zatím nezaschlé barvy. Po vytvrzení barvy je možné pro zvýšení odolnosti vůči otěru kresbu sítě přestříknout slabou vrstvou průhledného laku.

Hlavními výhodami této metody jsou jednoduchost nanesení sítě, nízké náklady, možnost výběru barvy a tím vysoký kontrast a také možnost tisku na všechny materiály. Mezi zápory patří nižší odolnost sítě vůči otěru a teplotě ($150\text{ }^{\circ}\text{C}$) nežli u sítí vzniklých odstraněním tenké vrstvy kovu. Dále nanesená barva může ovlivňovat tření mezi nástrojem a výtažkem. Metoda by se mohla zdát vcelku neefektivní vzhledem k nutnosti přípravy síta a vlastnostem kresby sítě, která může ovlivnit tvářecí proces, má však svoji významnou pozici při nanášení sítí na špatně leptatelné plechy neboli plechy s povrchovou úpravou.

Metodu lze tedy doporučit tam, kde není možné použít leptání, nebo je vyžadován velice jasný kontrast. Vyniká také svými nízkými náklady, kde po zhotovení síta je třeba pouze vhodná barva.

2.4 Metoda rytí sítí [9]

Princip metody je odebrání tenké vrstvy kovu z povrchu materiálu rytím a to buď trojúhelníkového nebo obdélníkového průřezu. Nejde tedy jen o pouhé vtlačení materiálu, vzniklá drážka o tloušťce 0.008 mm a hloubce 0.015 mm pak poskytuje dobrou čitelnost sítě i v místech, kde došlo ke vzniku velkých přetvoření, přitom však dle zkoušek nemá vliv na vlastnosti u plechu o tloušťce 0.8 mm .

Ruční tvorba sítě s kruhovými elementy spočívá ve vyznačení středů kruhových elementů dle šablony a následném rytí jednotlivých kroužků pomocí kroužítka s hroty. Tento postup je však velice pracný a lze ho samozřejmě automatizovat, což má pozitivní vliv na přesnost a rychlost tvorby sítě. Situace při ručním rytí sítě s čtvercovými elementy je značně jednodušší a lze ho snadno provést na speciálních strojích, které zajišťují pohyb ve dvou směrech, které jsou na sebe kolmé. U leštěných povrchů je možné zhotovit síť s čtvercovými elementy o malé délce strany (0.05 mm a menší).

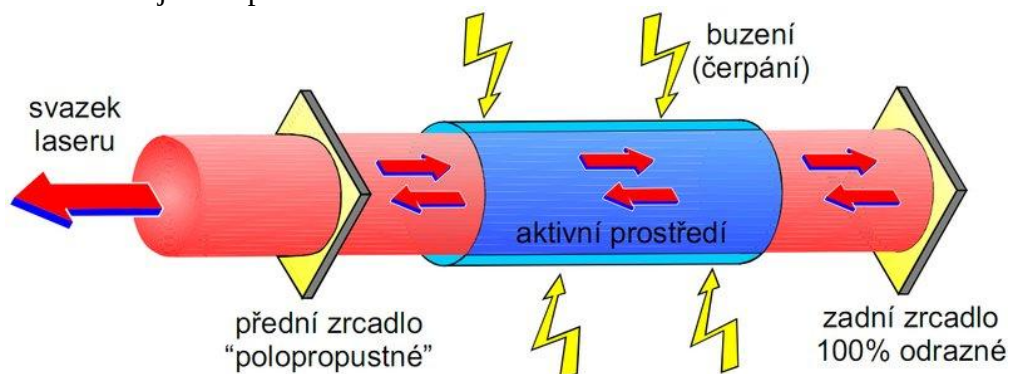
Mezi hlavní výhody této metody patří možnost tvorby sítě s malými elementy (kruhové $2\text{ až }3\text{ mm}$), dobrá čitelnost i po přetvoření. Negativa jsou pracnost a to především při ručním nanášení a možnost nepřesného provedení v důsledku otupení

nástroje. Dalším výrazným negativem je vznik vrubů při hlubším rytí sítě, což může mít negativní dopad na vyhodnocení mezních stavů přetvoření, ke kterým s vruby dojde samozřejmě dříve.

Metodu lze doporučit pro takové aplikace kde je zcela rozhodující cena. V takové situaci se však bude jednat o ruční rytí, které sebou nese vysokou pracnost a podmíněnost kvality výsledku lidským faktorem, což samozřejmě není žádoucí.

2.5 Metoda nanášení sítě laserem [14],[18],[25]

Metoda spočívá v natavení materiálu laserem. Laser je optický zesilovač (obr.11), který generuje elektromagnetické záření neboli světlo. Pro generování záření je třeba budit aktivní prostředí a to buď opticky nebo elektricky. Následně je nutné vzniklé záření zesílit k čemuž slouží optický rezonátor, který je tvořen dvěma zrcadly. Jedno zrcadlo je polopropustné a druhé odráží prakticky všechno záření, které na něj dopadne. Toto uskupení má za následek zesilování záření, až do chvíle kdy je dostatečně silné a projde polopropustným zrcadlem. Díky rezonátoru je takové záření velice koncentrované a je schopno natavit kov.



Obr.11 Princip laseru [25]

Samotná metoda nanesení deformační sítě pomocí pulzního laseru spočívá v natavení nejčastěji povrchu plechu, kde po vychladnutí vzniká jasně čitelná stopa. Dle nastavení délky a intenzity pulzu lze stanovit, zdali dojde k zahřátí, natavení nebo vypaření materiálu. Při nanášení sítě se nastavuje laser tak, aby došlo k natavení materiálu, kde délka pulzu je v desítkách nanosekund, výkon laseru v jednotkách wattů a frekvence v desítkách kHz. Odpaření materiálu však nejde úplně zabránit.

Tato metoda je pak vhodná pro vzorky s nevodivým povlakem jako je polyuretan, polyester nebo kovovým povlakem, který se špatně leptá jako např. zinek. Tím pádem nelze použít elektrochemické leptání a v úvahu přichází pouze sítotisk nebo laser. Vzniklá síť je velice přesná ovšem ne vždy kontrastní a to především v případech, kdy je snahou usilovat o zabránění porušení povlaku.

Metoda má tedy vůči sítotisku výhodu v přilnavosti sítě na vzorek, ale nevýhodu v kontrastu. Vzhledem k elektrochemickému leptání lze tvořit přesnější síť a to i na nevodivé materiály, hloubka odebraného materiálu je přibližně poloviční (obr.12 a obr.13). Velkou nevýhodou této metody je pořizovací cena laseru. Problematické je také nastavení laseru, kdy se usiluje o kompromis mezi kontrastem kresby a porušením povlaku vzorku.

Metodu nanášení sítě laserem lze doporučit všude tam, kde je vyžadována maximální přesnost provedení a nehraje rozhodující roli cena. Případně tam, kde je komplikace s typem materiálu. Vzniklá síť je pak přesná, kontrastní a má zcela libovolný tvar.



Obr.12 Profil odpařené vrstvy oceli válcované za studena [14]



Obr.13 Profil odleptané vrstvy oceli válcované za studena [14]

2.6 Porovnání metod nanášení sítí [9],[18]

Jak již bylo uvedeno na začátku kapitoly 2, každá metoda má své klady a zápory a nelze zvolit jednu ideální. Je nutné vybrat metodu dle charakteristik konkrétní aplikace.

U metod, které vyznačují síť odebráním materiálu z povrchu plechu, nebyl pozorován vliv na vlastnosti polotovaru. Jejich další výhody jsou dobrá čitelnost vybarvených sítí i po velkých přetvořeních. Mají v porovnání s plechem bez sítě prakticky stejný součinitel tření, tudíž jejich vliv na tvářecí proces je minimální. Mezi společná negativa se pak řadí nemožnost výběru barvy sítě, neuvažuje-li se následné barvení sítě, což má negativní dopad na kontrast. Metody se liší přesností, časovou náročností, možností nanesení na velké plochy a finančními náklady.

V přesnosti dominuje metoda nanášení sítě laserem, která je však vůči ostatním o tolik dražší, že v podstatě nemá smysl koupě pulzního laseru pouze za účelem nanášení sítí. Nejméně časově náročnou metodou je elektrochemické leptání, které však neposkytuje možnost nanášení sítě na povlakované materiály jako laser a odebírá více materiálu. Porovnání metod dle možnosti nanášení sítě na velké plochy je relativně sporné, neboť u leptání jsme omezeni velikostí šablony a u laseru a rytí velikostí posuvu, záleží tedy na konkrétních případech. Finančně je nejméně nákladné rytí sítí. Vzhledem k tomu, že slovní porovnání jednotlivých vlastností by bylo značně nepřehledné, je zde uvedena tabulka tab.1.

Metody založené na vyznačení sítě nanášením tenké vrstvy barvy nebo exponované emulze na plech mají výhody vůči metodám založeným na odebrání materiálu z povrchu polotovaru v možnosti volby barvy sítě čímž dosahují lepšího kontrastu. Dalším kladem je možnost nanášení sítě na všechny materiály. Nevýhody pak spočívají v nanesené vrstvě, která ovlivňuje tření mezi výliskem a nástrojem více nežli u metod založených na odebrání materiálu. Jsou také méně odolné vůči zvýšené teplotě a více náchylné k poškození při velkých přetvořeních. Výše v textu byly uvedeny pouze dvě metody a to fotografická metoda jako první část metody fotochemické, neboť využití pouze vytvrzené emulze jako sítě pro analýzu má zásadní nedostatky z hlediska tloušťky nanesené vrstvy a odolnosti vůči otěru, zde je v obou případech lepší metoda sítotisku.

Tab.1 Porovnání jednotlivých metod nanášení sítí [18]

Metody	Elektrochemická	Fotochemická	Rytí sítí	Laser	Sítotisk
Parametry					
Přesnost	A	B	B	A	B
Rozlišení, kontrast	B	B	B	B	A
Odolnost vůči otěru a mazivům	A	B	A	A	C
Odolnost vůči zvýšené teplotě	A	C	A	A	C
Čas nutný pro vytvoření sítě	A	D	C	D	B
Možnost nanesení na velké plochy	C	D	C	A	C
Možnost nanesení na různé materiály	D	A	C	B	A
Finanční náklady	C	D	B	D	A
A = výborný, B = dobrý, C = průměrný, D=dostatečný					

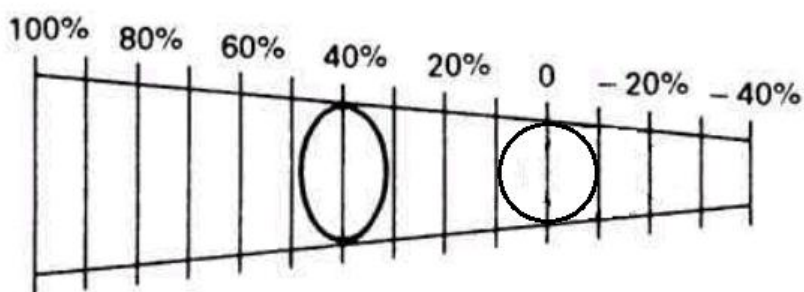
3 VYHODNOCENÍ PŘETVOŘENÍ SÍTĚ [13],[18],[19]

Měření nanesené sítě se provádí jak před deformací, tak po tváření, aby bylo možné elementy porovnat a vynést do FLD. Měření musí být dostatečně přesné, aby výsledky byly objektivní, zpravidla by se neměla překročit tolerance $\pm 2.5\%$. Prvním způsobem měření sítě bylo ruční měření, které je však často velice komplikované díky zakřivení výtažku a také časově náročné. Z hlediska pořizovací ceny však nemá konkurenci. Díky dosahované přesnosti se dnes používají především automatické měřicí systémy. Jsou z hlediska časové náročnosti vyhodnocení a přesnosti efektivnější nežli měření ruční.

3.1 Ruční měření [13],[18]

Nejpoužívanějším typem měřidla pro ruční měření je Mylarova páska. Jedná se o průhledné měřidlo opatřené dvěma sbíhajícími se linkami a stupnicí určující deformaci kruhových elementů sítě, viz obr.14. Díky této konstrukci měřidla ho pro zjištění deformace elementu stačí vhodně přiložit, získaná přesnost měření se však pohybuje okolo $\pm 5\%$, což je v rozporu s normou ASTM E2218-02 popisující podmínky pro určení FLD, dle které by měření nemělo mít větší chybu nežli 2.5%.

Měření pomocí Mylarovy pásky je velice zdoluhavé a málo přesné, navíc vyžaduje kvalifikovanou obsluhu. Z hlediska pořizovací ceny však nemá konkurenci, proto se uplatní především tam, kde měření deformačních



Obr.14 Princip Mylarovy pásky [18]

sítě je pouze občasné a není kladen požadavek na rychlé vyhodnocení, to je především u experimentů a firem, u kterých plošné tváření není významně zastoupeno.

Další možností ručního měření přetvořených elementů je měření za použití dílenských mikroskopů s posuvem. Získané hodnoty jsou značně přesnější, ovšem vyhodnocení je ještě zdouhavější nežli u Mylarovy pásky. U obou metod není vyloučena chyba díky lidskému faktoru.

3.2 Automatické měření [18]

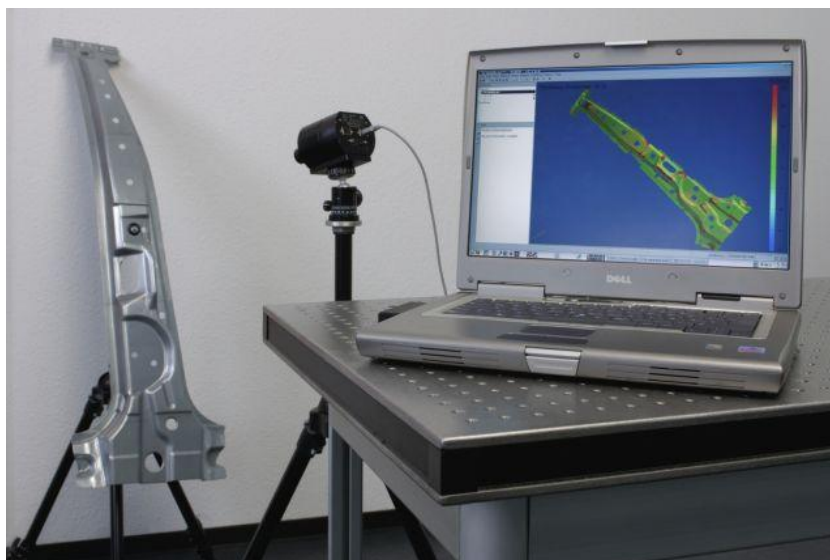
Automatické metody měření byly vyvinuty za účelem zpřesnění a zrychlení měření. Zpravidla se jedná o optické systémy skládající se ze snímací kamery nebo fotoaparátu a počítače. Snímací zařízení je propojeno s počítačem, na kterém je nainstalovaný specializovaný software pro výpočet analýzy.

Dnes je na trhu několik takových systémů, kde mezi nejvýraznější dodavatele lze řadit firmu GOM Optical Measuring Techniques, která dodává na trh čtyři systémy a to ARGUS, ARAMIS, TRITROP a PONTOS. Dalším významným dodavatelem měřících systémů je firma ASAME Technology LLC, která dodává systémy ASAME Target Model a Grid Pattern Analyzer.

Přesnost u automatického snímání je lepší nežli 1.5%, což je přibližně 3 krát lepší než u ručního měření a časy potřebné pro analýzu jsou řádově nižší. Jedinou nevýhodu vůči ručnímu měření lze shledat v pořizovací ceně, která je zásadně vyšší. Vzhledem ke kladům a záporům automatické měření své místo nachází především ve firmách, kde plošné tváření hraje významnou roli, jako je například automobilový průmysl.

3.2.1 Měřicí systém ARGUS [5],[6],[17],[23]

Bezkontaktní měřicí systém ARGUS (obr.15) dodává na trh firma Optical Measuring Techniques (GOM) a to ve třech provedeních (tab.2) lišících se v rozlišení snímacího zařízení. Výrobce pak udává u všech systémů stejnou přesnost, ale ta se zhoršuje s rostoucí velikostí měřeného dílce. Tím pádem je vhodné pro větší dílce volit větší rozlišení.



Obr.15 Měřicí systém ARGUS [5]

Tab.2 Druhy systému ARGUS [5]

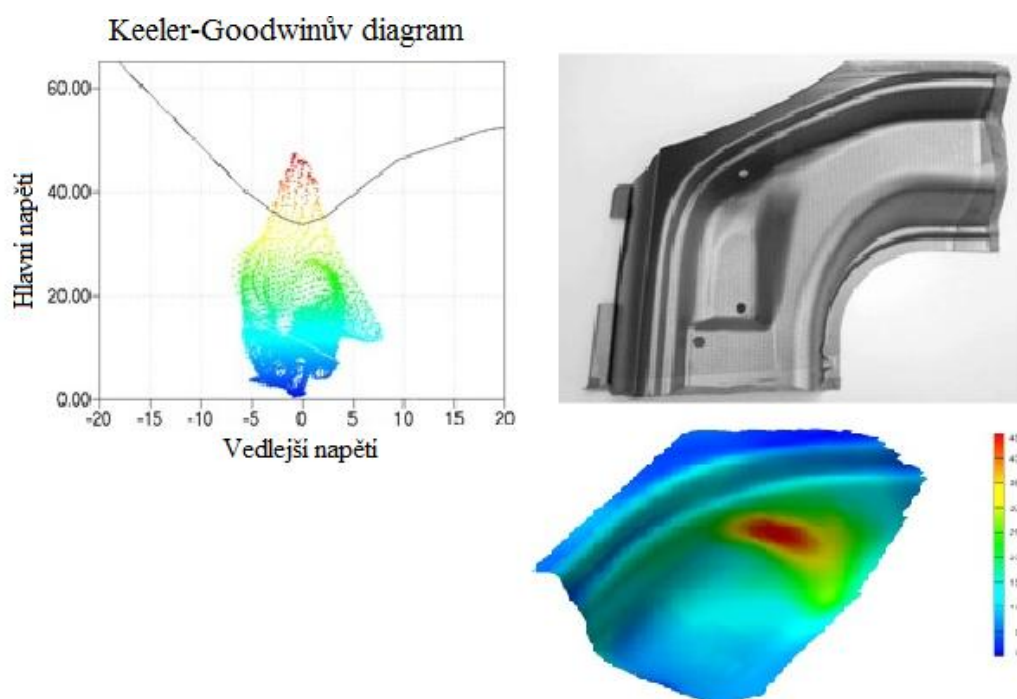
Typ	Rozlišení	Přesnost měření	Rozsah měření
2M	1600 x 1200	0,10%	od100mm do několika metrů
5M	2440 x 2050	0,10%	od100mm do několika metrů
12M	4280 x 2840	0,10%	od100mm do několika metrů

Jedná se o statický 3D měřicí systém. Statický znamená, že jeho snímací zařízení je digitální fotoaparát a vyhodnocuje tedy neměnný obraz, tím pádem se uplatní při analýze již přetvořené součásti. Softwarovou část lze po zakoupení stáhnout z oficiálních stránek firmy GOM a nainstalovat na zcela běžný počítač.

Měření probíhá v několika krocích. Nejprve se na vhodná místa tvářeného plechu s deformační sítí umístí kódované značky, které hrají roli známých objektů při vyhodnocování obrazu. Každý snímek pak musí obsahovat alespoň jednu značku. Následně je výlisk nasnímán snímáním s CCD čipem a to z dvou či více úhlů. Potom jsou ze snímku pomocí zpracování obrazu vypočteny 3D souřadnice bodů deformované sítě. Dále jsou na základě metody zachování konstantního objemu vypočteny hodnoty hlavní a vedlejší deformace. Výstupem měření jsou informace o hlavních a vedlejších napětích, změně tloušťky plechu, velikost přetvoření vzhledem ke křivce mezního stavu přetvoření neboli Forming Limit Curve (dále FLC). Tyto údaje jsou podány graficky jako barevná pole na 3D modelu výtažku nebo ve formě řezů. Výstupem pak jsou i protokoly o měření a v neposlední řadě vykreslení bodů do FLD, kde každý bod tvoří právě jeden snímání element (obr.16). Díky vykreslení FLD si pak lze rychle udělat představu o využití plasticity materiálu.

Informace získané při měření lze použít pro tyto činnosti:

- ověřování simulace tvářecího procesu
- optimalizace tvářecího procesu
- identifikace oblastí s mezní deformací
- optimalizaci lisovacích nástrojů

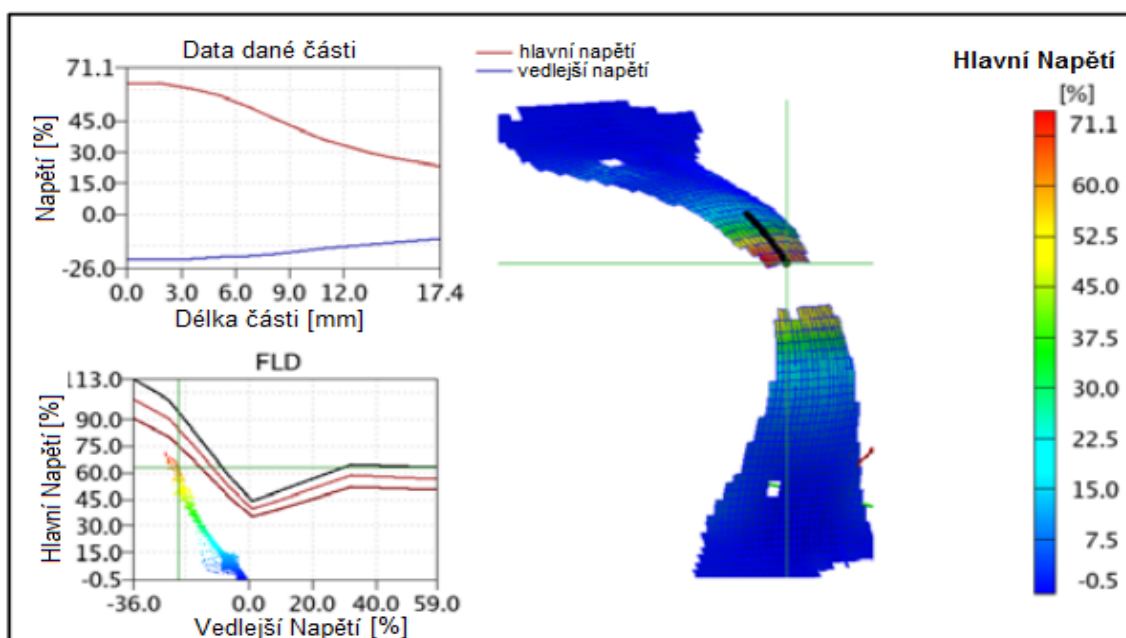


Obr.16 Ukázka vykreslení snímání bodů do FLD [17]

Mezi klady tohoto systému lze řadit dostatečnou přesnost, kterou výrobce udává lepší nežli 0.1%, bohatý výstup měření, který lze uplatnit v kritických bodech návrhu tvářecího nástroje, možnost měřit dílce ve velikosti od 100mm do několika metrů a také mobilitu systému, kdy ho lze bez problémů převézt.

Negativem je, že v případně analýzy součásti s trhlinou systém nedokáže rozpoznat body v oblasti trhliny neboli roztržené elementy sítě, proto je tento systém schopný vyhodnotit pouze body, které neleží přímo v blízkosti trhliny. Tím pádem analyzuje části deformační sítě, které mají nižší hodnotu přetvoření a posouvá výsledky k nižším hodnotám deformace. Tento jev lze pozorovat na obrázku (obr.17), který zaznamenává výstup systému. Z obrázku je zřejmé, že došlo k trhlíně v materiálu, ale v FLD diagramu všechny body leží pod křivkou FLC, tím pádem neodpovídá měření realitě. Tento systém je tedy vhodný pro analýzu výsků bez trhin, pro hodnocení výlisků s trhlinou existuje specializovaný systém ARAMIS od stejného dodavatele, který je uvedený níže v textu.

Systém ARGUS by se dal doporučit pro analýzy výlisků, u kterých nepotřebujeme znát dynamiku přetvoření a jsou bez trhliny, díky tomu je jeho využití velice široké. Znalost dynamiky tvářecího procesu schází především u analýz výtažků z materiálu, u kterého známe FLC, neboť pomocí statického systému nelze mezní stav přesně určit.



Obr.17 Ukázka výstupu systému ARGUS [23]

3.2.2 Měřicí systém ARAMIS [3],[4],[10],[15]

Měřicí systém ARAMIS je produktem stejné firmy jako systém ARGUS a jedná se o dynamický 3D měřicí systém. Pojem dynamický v tomto případě znamená, že snímacím zařízením je kamera s CCD čipem. Na trh se dodává pět verzí tohoto systému, které se liší ve snímací frekvenci a rozlišení (tab.3). Se stoupající frekvencí snímání klesá rozlišení kamer. Parametry kamer se pak volí dle velikosti dílců kdy s rostoucí velikostí je vhodné volit vyšší rozlišení kamer. Snímání se provádí pomocí dvojice kamer (obr.18) což zajišťuje dva úhly pohledu, které jsou nezbytné pro vytvoření 3D obrazu.

Prvním krokem při měření je nanesení vzoru na plech a to jak symetrických elementů nebo náhodného rastru pomocí spreje. Při tváření dochází ke snímání a následně jsou vypočteny pomocí zpracování obrazu 3D souřadnice elementů

deformované sítě pro všechny nasnímané okamžiky. Při následném vyhodnocení jednotlivých snímků dojde k výpočtu 3D posuvů, tvaru deformovaného objektu a 3D deformace. Výstupem měření jsou údaje 3D posunutí mřížky, hodnoty hlavních a vedlejších deformací, změny tloušťky materiálu, vyhodnocení deformací vůči FLC a grafické či tabulkové výstupy měření.



Obr.18 Snímací kamery systému ARAMIS [3]

Tab.3. Druhy systému ARAMIS [4]

Typ	Snímací frekvence	Rozlišení	Přesnost měření	Rozsah měření
2M	15 až 29 Hz	1624 x 1236	0,01%	od 1mm do 1000mm
4M	60 až 480 Hz	2352 x 1728	0,01%	od 1mm do 1000mm
5M	15 až 29 Hz	2448 x 2050	0,01%	od 1mm do 1000mm
12M	24 až 367 Hz	4096 x 3072	0,01%	od 1mm do 1000mm
HS	500 až 4000 Hz	1280 x 1024	0,01%	od 1mm do 1000mm

Využití informací z měření je široké, uplatnění má stejné jako systém ARGUS a navíc díky tomu, že snímání je dynamické lze systém využít pro dimenzování součástí, zkoušky materiálů a zjišťování materiálových vlastností. Vzhledem k metodě deformačních sítí lze pomocí systému ARAMIS určit FLC, neboť díky dynamickému snímání lze zpětně dohledat situaci, která předcházela poškození materiálu. V tomto smyslu se systém využívá pro zkoušky dle Nakajimy (ISO 12004), kdy dochází k protlačování plechu kulovým tažníkem, pro různé velké vzorky (obr.19). Vzhledem k výše uvedenému také odpadá nedostatek systému ARGUS, u kterého není možné přesně určit deformaci výlisku s trhlinou.



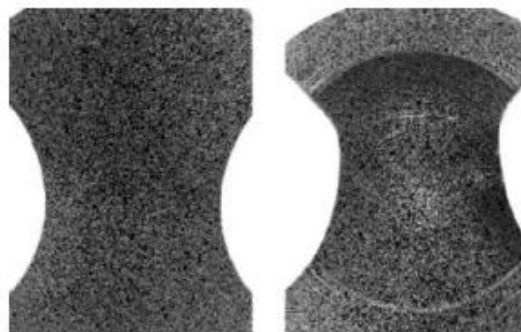
Obr.19 Ukázka testu dle Nakajima pro determinaci FLC [15]

Systém ARAMIS má velký rozsah měření jak do velikosti dílce od 1mm do 1000mm tak velikosti deformace od 0.01% do stovek %. Další výhodou je možnost nanášet pouze stochastický rast pomocí spreje (obr. 20), což značně urychluje

a zjednodušuje přípravu přístřihu. V neposlední řadě mezi jeho kvality patří mobilita a široký výstup měření v přehledné grafické nebo tabulkové podobě.

Uplatnění systém ARAMIS najde nejen při analýze výtažků, ale ve všech oborech, kde je třeba zjistit deformace výrobku a místa s největším napětím. V podstatě lze deformaci sledovat na čemkoli, na co lze nanést stochastický rast pomocí spreje. Pro představu příkladem takových použití může být sledování deformací pneumatiky, deformace lidského těla při pohybu, zjišťování kritických oblastí namáhání nového typu bot atd. Takovéto aplikace jsou především možné díky vysoké frekvenci snímání, která se pohybuje od 15Hz do 4000Hz právě dle typu systému a jeho nastavení, kdy volíme kompromis mezi rozlišením a snímací frekvencí.

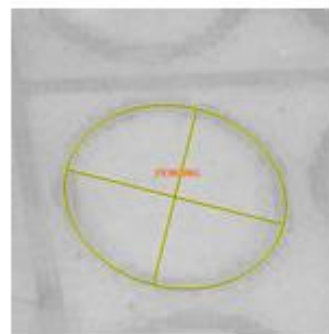
Systém ARAMIS vzhledem k metodě deformačních sítí lze doporučit v takových případech, kdy je třeba vytvořit komplexní analýzu od zjištění či upřesnění FLC až po vyhodnocení deformací a optimalizaci tvářecího procesu. Uplatní se také v případech, kdy dochází k trhlinám při tváření.



Obr.20 Plech se stoch. rastrem [15]

3.2.3 Měřicí systém MODEL 100U [11],[12],[18]

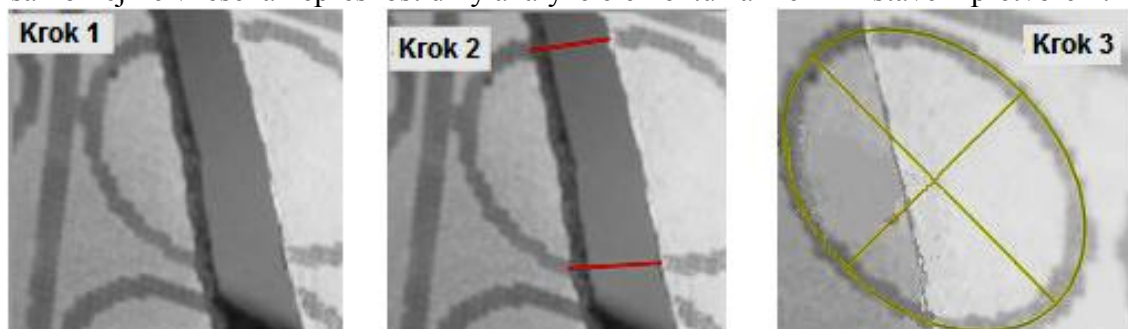
Jedná se o bezkontaktní 2D měřicí systém, zpracovávající statický obraz. Na trh ho dodává firma FMTI Systems Inc. Systém je určen pro měření kruhových nebo čtvercových elementů a to ideálně o velikosti elementu sítě 2mm. Snímání probíhá pouze ve dvou rozměrech, tím pádem lze očekávat značné nepřesnosti u měření zakulacených částí výtažku.



Obr.21 Snímání měřicím systémem MODEL 100U [11]

Princip měření spočívá v porovnání fotografie sítě před přetvořením a po přetvoření, kdy se elementy sítě snímají jednotlivě (obr.21). Získané údaje z měření jsou pak vyhodnoceny na běžném počítači obsahujícím potřebný software. Hlavním údajem získaným z měření je vynesení naměřených údajů do Keeler-Goodwinova diagramu a jejich vizuální zhodnocení vzhledem k FLC. Obsahem výstupu softwaru jsou také údaje o ztenčení plechu a napětích materiálu. Získané výsledky by pak měly mít lepší přesnost nežli 0.5%.

Ačkoliv se jednotlivé snímání elementů sítě může zdát neefektivní, lze tímto individuálním přístupem analyzovat i místa s trhlinou, kdy lze zpětně softwarově složit roztržené elementy a získat údaje o mezním stavu přetvoření (obr.22). Je zde samozřejmě vnesena nepřesnost díky analýze elementů za mezním stavem přetvoření.

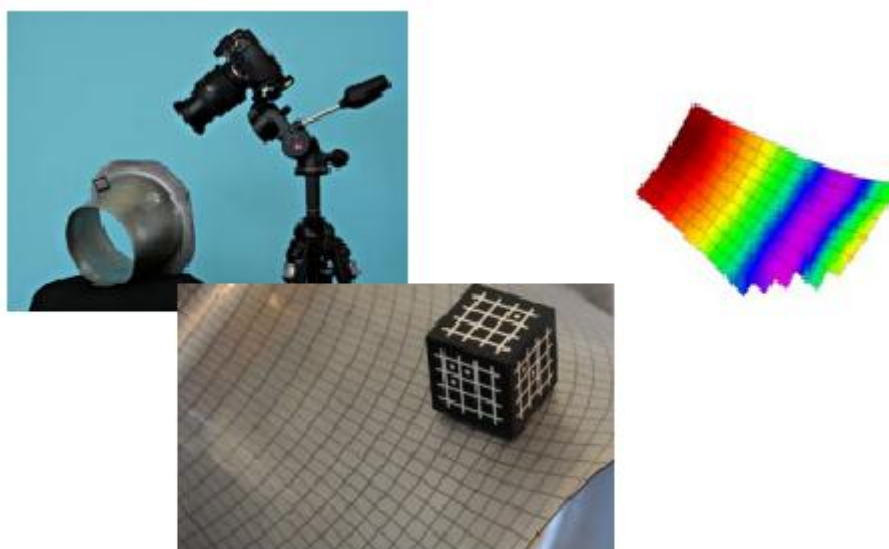


Obr.22 Rekonstrukce elementu sítě [12]

Tento měřicí systém lze doporučit pro jednodušší analýzy kdy, není třeba mít naprosto komplexní přehled o přetvoření výtažku a to jak z důvodu pracnosti, tak komplikovaného vyhodnocení zaoblených částí. Relativní pracnost vůči např. systému ARGUS spočívající v nutnosti snímat každý element zvlášť, kompenzuje možnost opětovného složení elementů sítě, díky čemuž lze alespoň přibližně získat FLC. Na trhu je ještě k dispozici měřicí systém s označením MODEL 100 UPD, který se však zásadně neliší od verze 100U a umožňuje měření více typů sítí.

3.2.4 Měřicí systém ASAME Target Model [1]

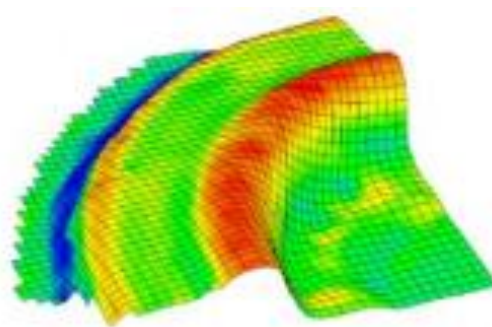
Tento systém je bezkontaktní 3D měřicí systém, dodávaný firmou ASAME Technology LLC. Snímacím zařízením je fotoaparát a tím pádem se jedná o statické snímání (obr.23). Vyhodnocení pak probíhá opět na běžném počítači opatřeným potřebným softwarem. Výrobce doporučuje nevyhodnocovat více jak 1600 bodů elementů mříže a doporučený počet je 600.



Obr.23 Měřicí systém: ASAME Target Model [1]

Měření se provádí u výtažků, na které byla nanesena síť skládající se ze symetrických elementů o velikosti 0.5 až 25mm. Výtažek se snímá ze dvou či více pohledů, aby bylo možné vytvořit pomocí zpracování obrazu trojrozměrný model

výtažku. Každý snímek pak musí obsahovat kostku (obr.23), která hraje roli známého objektu při vyhodnocení. Při vyhodnocení jsou vypočteny 3D souřadnice jednotlivých bodů mřížky a vytvořen 3D model výtažku. Dalším krokem je výpočet deformace a napětí v materiálu. Přesnost výstupu měření je 1.5% v případě dvou snímků, pokud bylo pořízeno více snímků je možné dosáhnout přesnosti 0.5%. Více snímků však ovlivňuje čas měření a vyhodnocení, který se pohybuje od 5 do 20 minut.



Obr.24 3D model získaný systémem ASAME Target Model [1]

Výstupem měření je zakreslení nasnímaných bodů do Keeler-Goodwinova diagramu, vykreslení napětí na 3D model formou barevných polí (obr.24) a protokoly o měření.

Výstup měření pak lze použít pro vyhodnocení kritických oblastí, vyhodnocení bodů vzhledem k FLC, k zhodnocení simulace a optimalizaci tvářecího nástroje.

V mnoha ohledech se jedná o měřicí systém velice podobný systému ARGUS, neboť vyhodnocuje statický obraz a více elementů sítě najednou. Díky tomu lze ASAME Target Model doporučit pro stejné využití jako systém ARGUS a tedy pro výtažky bez trhlin a tam, kde není třeba znát dynamiku tvářecího procesu.

3.2.4 Měřicí systém Grid Pattern Analyzer (GPA-100 Model) [2]

Jedná se o bezkontaktní měřicí systém (obr.25) vyhodnocující statický obraz. Systém na trh dodává firma ASAME Technology LLC. Snímacím zařízením je kamera o rozlišení 640x480, která je přizpůsobena snímání vždy jen jednoho elementu sítě. Snímací zařízení je propojeno přes USB s běžným počítačem, na kterém musí být nainstalován potřebný software. Pro snímání je pak třeba, aby snímáný díl obsahoval pravidelnou mříž s kruhovými či čtvercovými elementy sítě.



Obr.25 Měřicí systém GPA-100 [2]

Při měření je potřebné znát velikost původních elementů sítě, neboť do zorného pole snímacího zařízení se neumísťuje žádný referenční objekt. Velikost elementu je tedy vhodné změřit ještě před tvářením. Samotné měření probíhá tím způsobem, že se nejprve snímací kamera zaměří na požadovaný element a to tak, že trubička okolo objektivu musí co nejpřesněji lícovat se snímaným povrchem, aby pohled byl maximálně kolmý. Následně jednoduchým stisknutím tlačítka se element nasnímá a informace se odešlou do počítače. Dále se vypočtou deformace, napětí a tloušťka plechu a údaje se vynesou do FLD. Celý proces nasnímání a vyhodnocení jednoho elementu sítě pak trvá do 2 sekund. Výstupy měření by měly mít lepší přesnost nežli 2% a při malých deformacích sítě se lze dostat na hodnotu 1.5%.

Systém se ve svém principu podobá systému MODEL 100U, kdy oba vyhodnocují elementy sítě postupně, což vede k podobnému doporučení pro využití systému. Měřicí systém je vhodný pro nevelké díly, neboť snímání několika tisíc elementů sítě by bylo značně časově náročné. Individuální přístup ke každému elementu sítě však přináší i své výhody jako je softwarová rekonstrukce prasklin.

3.2.6 Porovnání bezkontaktních měřících systémů

Při srovnání jednotlivých měřících systémů je třeba vycházet z jejich principu, neboť nelze porovnávat statický systém s dynamickým nebo jednotlivé snímání s hromadným. Proto budou systémy rozděleny do skupin:

- systémy statické, s jednotlivým snímáním elementů sítě
- systémy statické, s hromadným snímáním elementů sítě
- systémy dynamické.

Sledovány budou především hodnoty přesnosti výstupů, neboť v ostatních bodech jako je šíře výstupních informací jsou si systémy z dané skupiny vždy velice podobné.

Mezi systémy statické s jednotlivým snímáním elementů sítě se z výše popsaných řadí MODEL 100U a GPA-100. Model 100U dle výrobce poskytuje přesnost měření s maximální odchylkou 0.5%, což je značně lepší než u systému GPA-100, který za ideálních podmínek dosáhne přesnosti 1.5%. U obou systémů však dochází k vyhodnocení deformací pouze z jednoho snímku, což může mít neblahý vliv na přesnost měření křivých ploch a lze předpokládat, že udávaná přesnost v těchto situacích bude značně horší.

Dalším typem systémů, které byly uvedeny výše, jsou systémy statické vyhodnocující více elementů sítě najednou. Díky tvorbě 3D modelu z více snímků jsou schopné dosáhnout lepší přesnosti. Odchylka měření u systému ARGUS je maximálně 0.1% a u systému ASAME Target Model 1.5% v případě pořízení pouze dvou snímků, tudíž lze s více snímky z více úhlů dosáhnout lepší přesnosti pohybující se okolo 0.5%.

Posledním typem systému pro vyhodnocení deformačních sítí jsou systémy dynamické, které snímají více elementů sítě najednou a v podstatě poskytují stejnou přesnost jako systémy statické, neboť jediný rozdíl je v typu snímacího zařízení a pak samozřejmě v softwaru. Z této skupiny byl výše uveden systém ARAMIS.

Pokud by se měly stanovit doporučení pro výběr měřícího systému, tak statické měřicí systémy a to takové, které vyhodnocují elementy sítě individuálně, lze doporučit pro jednoduchá měření malých dílů bez zásadních ohybů. Ignorováním faktu, že snímání je pouze 2D a každý element se hodnotí zvlášť, by se dosáhlo značné přesnosti a pak také chyb měření křivých částí či naprosté nemožnosti je změřit. Tyto nedostatky pak odstraňují statické systémy hodnotící více elementů sítě najednou, kde díky snímání z více úhlů se vytváří prostorový obraz výlisku, což poskytuje možnost vyhodnocení velkých dílů se značně křivými plochami. Nedostatkem systémů hodnotících více elementů najednou je nemožnost analyzovat roztržené části sítě.

Zde oceníme individuální přístup ke každému elementu u první uvedené skupiny měřících systémů. Rekonstrukce sice probíhá softwarově, ale výběr částí sítě, které k sobě patří zůstává na člověku. Nutné je si uvědomit, že i rekonstruovaný element je zatížen chybou, neboť se hodnotí stav až po mezním stavu přetvoření. Získání dostatečného počtu dat pro tvorbu FLC by bylo značně časově náročné. Tyto nedostatky pak odstraňují dynamické systémy, které jsou schopny snímat velký počet částí sítě najednou a také zpětně dohledat stav před lomem. Tím pádem určit mezní stav přetvoření a vytvořit FLC s přesností odpovídající rozlišení a snímací frekvenci.

4 ZÁVĚR

Metod nanášení deformačních sítí je celá řada a jejich základní rozdělení lze provést na metody, které odebírají materiál z povrchu a na metody, při jejichž aplikaci dochází k nanesení tenké vrstvy barvy. Obě tyto skupiny mají své klady a zápory vycházející z jejich základního principu. Přesněji metody odstraňující materiál z povrchu plechu se vyznačují dobrou čitelností sítě při velkých přetvořeních a dobrou odolností vůči otěru, jejich čitelnost je však podmíněna, tím jak dobře kontrastují s povrchem plechu, což nelze zásadně ovlivnit. Metody založené na principu nanesení barvy, pak vynikají svojí kontrastností, ale zase hůře odolávají velkým přetvořením a otěru. Celkově mezi metodami odstraňujícími materiál z povrchu přístřihu dominuje elektrochemické leptání a laser. To je dáno jejich výraznými klady jako je u elektrochemického leptání rychlost nanesení a přesnost nanesené sítě. Laser pak vyniká především v přesnosti a ostrosti kresby sítě. Mezi metodami založenými na principu nanesení barvy je nejvýraznějším zastupitelem sítotisk a to díky jeho nízkým nákladům a kvalitě nanesené sítě.

Proměření deformovaných sítí lze provést pomocí ručního měření, které je však málo přesné a velice zdoluhavé. Proto se měření nejčastěji provádí pomocí automatických systémů, které lze dělit na statické a dynamické. Statické systémy se vyznačují tím, že analyzují pouze jeden snímek a tak nejsou vhodné pro zjišťování mezních stavů přetvoření, protože nejsou schopny zachytit okamžik před trhlinou v materiálu. Dále lze statické systémy dělit na 2D a 3D. Systémy pracující v trojrozměrném prostoru jsou přesnější, ale to se také promítá v jejich ceně. Dynamické systémy zpravidla pracují s určitou frekvencí snímání, která je podmíněna kvalitou získaných snímků. Pomocí těchto systémů lze dostatečně přesně určit mezní stavy přetvoření. Díky tomu lze tyto systémy využít i v takových případech, kdy nejsou známy přesné údaje o plasticitě tvářeného materiálu. Celkově je nutné snímací systém volit vždy s ohledem na cíl analýzy a její rozsah.

Seznam použitých zdrojů [7]

1. ASAME TECHNOLOGY LLC. *ASAME Target Model* [online]. 2009 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: www.asametechnology.com/dwn/factsheets/target.pdf
2. ASAME TECHNOLOGY LLC. *Grid Pattern Analyzer: GPA-100 Model* [online]. 2009 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: www.asametechnology.com/dwn/factsheets/gpa.pdf
3. ARAMIS. *MCAE 3D digitální technologie* [online]. 2009 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/aramis>
4. ARAMIS - Optical 3D Deformation Analysis. *OPTICAL MEASURING TECHNIQUES. ARAMIS - Optical 3D Deformation Analysis* [online]. 2011, 14.11 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.gom.com/metrology-systems/system-overview/aramis.html>
5. ARGUS - Optical Forming Analysis. *Optical Measuring Techniques* [online]. 2010, 20.12 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: <http://www.gom.com/metrology-systems/sheet-metal-forming.html>
6. ARGUS Software. *Optical Measuring Techniques* [online]. 2010, 10.9 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: <http://www.gom.com/3d-software/argus-software.html>
7. *Citace 2.0: Generátor citací* [online]. 2004 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://generator.citace.com/>
8. ČADA, Radek. *Technologický design výtažku z plechu: teze inagurační přednášky k řízení ke jmenování profesorem v oboru "Strojírenská technologie"*. Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1459-9. Inagurační spisy. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní.
9. DRASTÍK, F. aj. ELFMARK. *Plastomery a tvařitelnost kovů*. Praha: SNTL, 1977. 392 s DT 539.214.07
10. DRÁPELA, Miroslav. *MCAE SYSTEMS. 3D optické měření deformace při tváření materiálu* [online]. [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/data/files/clanek2-mcae-drapela-3d-opticke-mereni-deformace-pri-tva-23.pdf>
11. Forming Measurement Tools Inovations. *FMTI Systems Inc.* [online]. 2010, 5.10 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.fmtisystems.com/>
12. Fracture Measurements using Grid Stitching. *FMTI Systems Inc.* [online]. 2010, 18.6 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.fmtisystems.com/fracture.htm>
13. JOSHI, Amit Mukund. B.E MECHANICAL. *STRAIN STUDIES IN SHEET METAL STAMPING* [online]. [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: www.metalwebnews.com/howto/sheet-metal/sheetmetal-study.pdf
14. MANTYJARVI, Kari, Juha TULONEN, Jyri PORTER a Jussi A. KARJALAINEN. *Grid Patterns by Laser for Forming Strain Analysis* [online]. Finland, 2008 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: http://esaform2008.insa-lyon.fr/proceedings/MS04/p_Ma_329.pdf

15. OPTICAL MEASURING TECHNIQUES. *Applocation Example: Material Testing: Material Properties: Determination of Process Limitations in Sheet Metal Forming - Forming Limit Diagram* [online]. 2009 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: www.gom.com/fileadmin/user_upload/industries/flc_fld_EN.pdf
16. OPTICAL MEASURING TECHNIQUES. *Application Example: Material Testing: Materials properties: Improved Determination of Yield Stress for Sheet Metal Materials* [online]. 2008 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: www.gom.com/fileadmin/user_upload/industries/yield_stress_EN.pdf
17. OPTICAL MEASURING TECHNIQUES. *Application Example: Sheet Metal Forming: Optimization of Metal Forming Tools during Tool Try-Out* [online]. 2012, 10.4 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: www.gom.com/fileadmin/user_upload/industries/tool_optimize_EN.pdf
18. OZTURK, Fahrettin, Murat DILMEC, Mevlut TURKOZ a Huseyin S. HALKACI. *Grid Marking and Measurement Methods for Sheet Metal Formability* [online]. Aydın TURKEY, 2009 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: http://www.hidrokillendirme.com/docs/yayinlar/5_Grid_marking_and_measurement.pdf
19. PETRUŽELKA, Jiří. *TVAŘITELNOST KOVOVÝCH MATERIÁLŮ* [online]. Ostrava, 2007, 9.7 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: <http://www.345.vsb.cz/jiripetruselka/Texty/TvCELEupr.pdf>
20. Postup výroby Sítotiskem: *Potisky na Trička* [online]. [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: <http://www.potisky-na-tricka.cz/sitotisk.html>
21. Sheet Metal Marking Instrument Model 190. *QUALITEST* [online]. 1999-2012 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: <http://www.worldofest.com/sheet190.htm>
22. Sítotisk. *Wikipedie* [online]. 2011, 21.10 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/S%C3%ADtotisk>
23. SOLFRONK, Pavel a Tomáš JÍRA. *VYUŽITÍ OPTICKÉHO SYSTÉMU ARGUS 4M V KRITICKÝCH OBLASTECH KAROSÁŘSKÉHO VÝLISKU* [online]. Rožnov pod Radhoštěm, 2010, 18.5 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: http://www.metal2012.com/files/proceedings/metal_10/lists/papers/150.pdf
24. VIALUX. *AutoGrid Accessories: Marking equipment* [online]. 2012, 5.19 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: http://www.vialux.de/pdf/autogr_zubeh_en.pdf
25. Základní princip laseru a jejich dělení. *Články a zprávy z newsletteru LAO-Info* [online]. 2010 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: http://www.lao.cz/laoinfo/serial2011/princip_laser_a_deleni.php