

Srovnání konvenčních metod měření deformace s metodou DIC

Bc. Radek Kolařík

Diplomová práce
2016

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Radek Kolařík**
Osobní číslo: **T14537**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Srovnání konvenčních metod měření deformace s metodou DIC**

Zásady pro vypracování:

- 1. Literární přehled**
- 2. Příprava experimentu**
- 3. Experiment**
- 4. Vyhodnocení výsledků**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle zadání vedoucího DP

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jakub Javořík, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

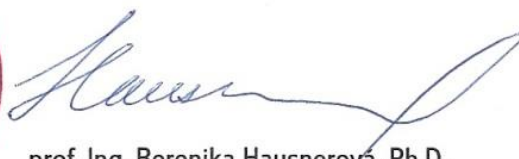
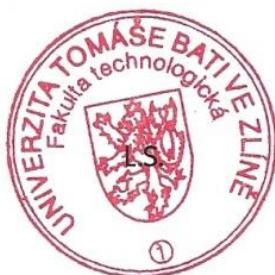
Datum zadání diplomové práce: **8. ledna 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **20. května 2016**

Ve Zlíně dne 11. dubna 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 1.5.2016



.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevýdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem práce bylo zjistit vhodnost použití DIC metody pro snímky získané při tahových a smykových zkouškách.

Byly provedeny tahové a smykové zkoušky šesti vzorků, jejichž průběh byl zaznamenáván digitálním fotoaparátem. První a poslední snímky byly podrobeny DIC analýzám za účelem zjištění hodnot poměrných deformací v příčném a podélném směru. Dále se posuzovalo, zda je měření touto metodou za daných okolností vhodné.

Klíčová slova: digitální obrazová korelace, deformace, analýza, míra vykreslení, DIC

ABSTRACT

The aim of the thesis was to determinate the suitability of methods for images obtained during tensile and shear tests.

Uniaxial tension and shear tests were conducted for six samples. They were recorded with digital camera. For the first and last images was made DIC analysis. The results of DIC analysis were relative deformation in the transverse and longitudinal direction. It was examined whether this method is suitable.

Keywords: digital image correlation, deformation, analysis, rate plot, DIC

Tímto bych velice rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, panu doc. Ing. Jakubu Javoříkovi Ph.D. za trpělivost, poskytnuté podklady a cenné připomínky věnované mé diplomové práci.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 DEFORMACE	13
1.1 PLASTICKÁ DEFORMACE.....	13
1.2 ELASTICKÁ DEFORMACE	13
1.3 POISSONOVO ČÍSLO	13
2 TENZOR DEFORMACE	14
3 NAPJATOST	16
3.1 PROSTOROVÁ NAPJATOST.....	17
3.2 ROVINNÁ NAPJATOST	19
4 VZTAH NAPĚTÍ A DEFORMACE	20
5 METODA DIC (DIGITAL IMAGE CORRELATION)	21
6 SOFTWARE MOIRE	26
7 DALŠÍ METODY MĚŘENÍ DEFORMACE	27
7.1 MECHANICKÉ SNÍMAČE	27
7.1.1 Mechanický průtahoměr.....	28
7.1.2 Martensův optický průtahoměr	29
7.1.3 Kapacitní extenzometr	30
7.1.4 Tenzometr	31
7.2 OPTICKÉ SNÍMAČE	33
7.2.1 Videoextenzometr	33
7.2.2 Laserový extenzometr	35
II PRAKTICKÁ ČÁST	37
8 CÍL PRÁCE	38
9 PŘÍPRAVA VZORKŮ	39
9.1 VZORKY PRO ZKOUŠKU TAHEM	39
9.2 VZORKY PRO ZKOUŠKU ČISTÝM SMYKEM.....	40
10 TAHOVÁ ZKOUŠKA	41
10.1 PRINCIP ZKOUŠKY	41
10.2 ZKUŠEBNÍ VZORKY	42
10.3 POSTUP ZKOUŠKY	42
11 ZKOUŠKA ČISTÝM SMYKEM	43
11.1 PRINCIP ZKOUŠKY	43
11.2 ZKUŠEBNÍ VZORKY	44
11.3 POSTUP ZKOUŠKY	44
12 PRÁCE V SOFTWARE MOIRE	45

12.1	VÝSLEDKY DIC ANALÝZ PŘI 20% ROZLIŠENÍ.....	46
12.2	VÝSLEDKY DIC ANALÝZ PŘI 40% ROZLIŠENÍ.....	47
12.3	VÝSLEDKY DIC ANALÝZ PŘI 60% ROZLIŠENÍ.....	48
12.4	VÝSLEDKY DIC ANALÝZ PŘI 80% ROZLIŠENÍ.....	49
12.5	VÝSLEDKY DIC ANALÝZ PŘI 100% ROZLIŠENÍ.....	50
13	DIC ANALÝZY PRO ZKOUŠKU TAHEM	51
13.1	VZOREK 1.....	52
13.1.1	Snímky tahové zkoušky	52
13.1.2	Výřezy snímků	52
13.1.3	Výsledky analýzy	53
13.1.4	Grafické znázornění získaných dat	53
13.2	VZOREK 2.....	55
13.2.1	Snímky tahové zkoušky	55
13.2.2	Výřezy snímků	55
13.2.3	Výsledky analýzy	56
13.2.4	Grafické znázornění získaných dat	56
13.3	VZOREK 3.....	58
13.3.1	Snímky tahové zkoušky	58
13.3.2	Výřezy snímků	58
13.3.3	Výsledky analýzy	59
13.3.4	Grafické znázornění získaných dat	59
13.4	VZOREK 4.....	61
13.4.1	Snímky tahové zkoušky	61
13.4.2	Výřezy snímků	61
13.4.3	Výsledky analýzy	62
13.4.4	Grafické znázornění získaných dat	62
13.5	VZOREK 5.....	64
13.5.1	Snímky tahové zkoušky	64
13.5.2	Výřezy snímků	64
13.5.3	Výsledky analýzy	65
13.5.4	Grafické znázornění získaných dat	65
13.6	VZOREK 6.....	67
13.6.1	Snímky tahové zkoušky	67
13.6.2	Výřezy snímků	67
13.6.3	Výsledky analýzy	67
14	DIC ANALÝZY PRO ZKOUŠKU ČISTÝM SMYKEM.....	68
14.1	VZOREK 1.....	69
14.1.1	Snímky zkoušky čistým smykem.....	69
14.1.2	Výřezy snímků	69
14.1.3	Výsledky analýzy	70
14.1.4	Grafické znázornění získaných dat	70
14.2	VZOREK 2.....	72
14.2.1	Snímky zkoušky čistým smykem.....	72
14.2.2	Výřezy snímků	72
14.2.3	Výsledky analýzy	73

14.2.4	Grafické znázornění získaných dat	73
14.3	VZOREK 3.....	75
14.3.1	Snímky zkoušky čistým smykem.....	75
14.3.2	Výřezy snímků	75
14.3.3	Výsledky analýzy	76
14.3.4	Grafické znázornění získaných dat	76
14.4	VZOREK 4.....	78
14.4.1	Snímky zkoušky čistým smykem.....	78
14.4.2	Výřezy snímků	78
14.4.3	Výsledky analýzy	79
14.4.4	Grafické znázornění získaných dat	79
14.5	VZOREK 5.....	81
14.5.1	Snímky zkoušky čistým smykem.....	81
14.5.2	Výřezy snímků	81
14.5.3	Výsledky analýzy	82
14.5.4	Grafické znázornění získaných dat	82
14.6	VZOREK 6.....	84
14.6.1	Snímky zkoušky čistým smykem.....	84
14.6.2	Výřezy snímků	84
14.6.3	Výsledky analýzy	85
14.6.4	Grafické znázornění získaných dat	85
ZÁVĚR	.....	87
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	.....	88
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	.....	90
SEZNAM OBRÁZKŮ	.....	92
SEZNAM TABULEK	.....	96

ÚVOD

K určení materiálových charakteristik jsou základem data získaná materiálovými zkouškami. Možností, jak provádět měření deformací je velké množství. Záleží na požadavcích, které jsou kladeny na průběh zkoušky. Například pokud je umístění snímačů na testovaný vzorek v rozporu s požadavky na testování, nebude možné použít metodu mechanického měření deformací, ale bude zapotřebí použít některou z optických metod, které nejsou v přímém kontaktu se zkoušeným vzorkem.

V poslední době jsou optické metody měření deformací stále více využívány díky jejich bezkontaktnosti a univerzálnosti. Bohužel jejich nevýhodou je, že i malá změna okolních podmínek, jako je změna osvětlení nebo vibrací, může mít za následek zkreslení výsledků zkoušky. Bezkontaktní metody jsou využívány hlavně při měření, kdy při zkouškách dochází k velkým deformacím.

Měření deformací pomocí optických zkoušek lze vyhodnocovat dvěma způsoby, podle typu použité metody. Vyhodnocení probíhá buď přímo při průběhu zkoušky, nebo se vyhodnocuje až po jejím skončení ze záznamu.

Diplomová práce se bude zabývat metodou DIC (digital image correlation), což je metoda pracující na principu digitální obrazové korelace. K jejímu výraznému rozvoji došlo až v posledních letech a to hlavně díky pokroku v oblasti digitálních fotografií a výpočetní techniky. Vychází ze snímků zaznamenaných v průběhu materiálové zkoušky pomocí digitálního fotoaparátu. Na základě posunutí jednotlivých elementů zkoušených vzorků dle pořízených snímků bude pak pomocí příslušného softwaru vyhodnocována jejich deformace.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 DEFORMACE

Pevné vazby mezi částicemi látky způsobují, že tělesa z těchto látek si zachovávají svůj tvar. Ke změně tvaru může dojít působením vnějších sil, čímž dojde ke změně vzájemné polohy částic. Nemusí nutně docházet ke změně tvaru, ale může dojít ke změně rozměrů a tím i ke změně objemu. Vždy se jedná o deformaci tělesa. Deformace tělesa je změna rozměrů, tvaru nebo objemu tělesa, která je zapříčiněna vnějšími silami. V případě namáhání tělesa tahem, dochází k jeho protahování a tím pádem k posunutí jeho částic ve směru zatěžující síly. [1]

1.1 Plastická deformace

Pokud zatížíme těleso soustavou vnějších sil, tak důsledkem jejich působení dojde k posunutí částic zatíženého tělesa ve směru působení těchto sil. Po ukončení zatěžování se jeho částice nevrátí do původní polohy jako před zatížením a tento stav je nevratný.

1.2 Elastická deformace

Oproti plastické deformaci se po uvolnění vnějších zatěžujících sil tělesa posunutá částice vrátí do původního stavu před zatížením. To znamená, že vyvolaná deformace je vratná a označujeme ji jako elastickou.

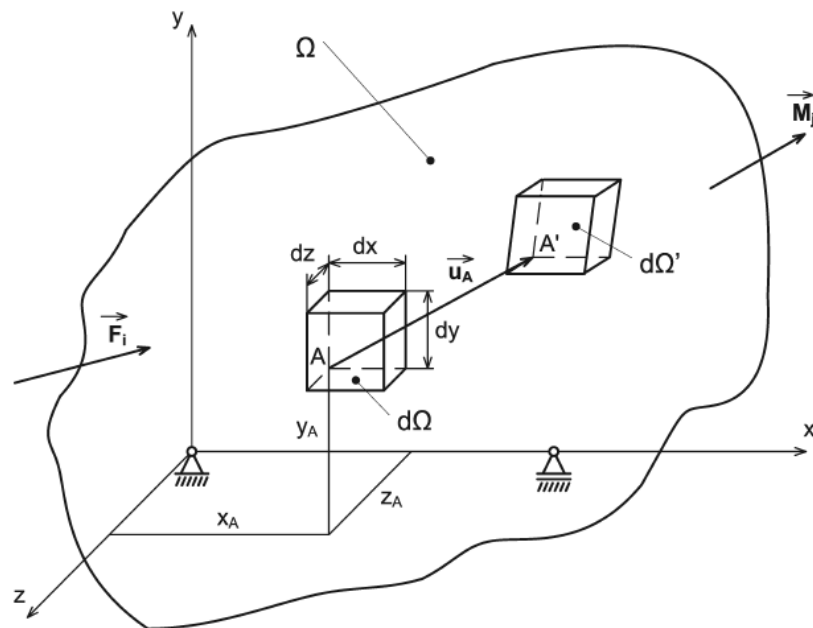
1.3 Poissonovo číslo

Označuje se písmenem μ , je bezrozměrné a pro většinu materiálů nabývá hodnot z intervalu 0 až 0,5. Poissonovo číslo je pro izotropní materiály nezávislé na směru zatěžování. Pro anizotropní materiály jako je například dřevo nebo kompozitní materiály je Poissonovo číslo různé v závislosti na směru zatížení vůči struktuře. Je definováno jako poměr poměrné příčné deformace k poměrné podélné deformaci.

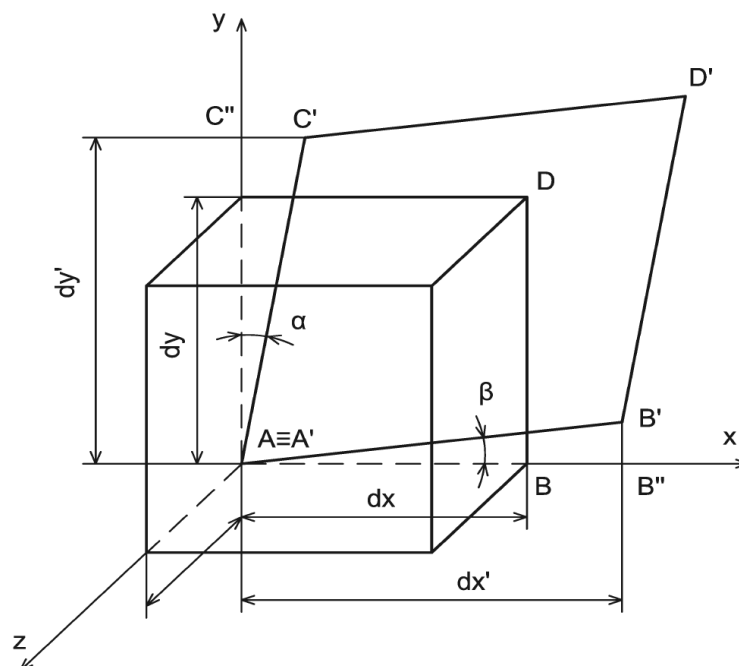
$$\mu = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \quad (1)$$

2 TENZOR DEFORMACE

Při deformaci tělesa dochází ke změně polohy bodů tělesa vzhledem ke vztaženému souřadnicovému systému. Mění se tedy vzdálenosti bodů, tvar tělesa a jeho částí. Deformace tělesa je určena deformací každého jeho trojnásobně elementárního prvku. Deformací je myšlena změna tvaru a rozměrů. [18],[24]



Obr. 1 Matematické vyjádření deformace elementu tělesa [18]



Obr. 2 Relativní změna rozměrů a tvaru elementu [18]

Změna rozměrů elementu je popsána délkovými přetvořeními ε_x , ε_y a ε_z [18],[24]

$$\varepsilon_x = \frac{dx' - dx}{dx} \quad \varepsilon_y = \frac{dy' - dy}{dy} \quad \varepsilon_z = \frac{dz' - dz}{dz} \quad (2)$$

Změna tvaru elementu je popsána úhlovými přetvořeními, které geometricky představují změnu pravého úhlu. [18],[24]

$$\gamma_{xy} = \alpha + \beta \quad \gamma_{yz} = \gamma + \delta \quad \gamma_{xz} = \alpha + \beta \quad (3)$$

Deformace v obecném bodě tělesa A je definována deformací elementárního prvku, který tento bod obsahuje. Deformace je určena tzv. tenzorem deformace T_ε , který je symetrickým tenzorem druhého řádu a obsahuje 6 nezávislých prvků. [18],[24]

$$T_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \frac{\gamma_{xy}}{2} & \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} & \varepsilon_y & \frac{\gamma_{yz}}{2} \\ \frac{\gamma_{xz}}{2} & \frac{\gamma_{yz}}{2} & \varepsilon_z \end{pmatrix} \quad (4)$$

Pokud je deformace shodná ve všech bodech A tělesa Ω , tzn. tenzor deformace T_ε je ve všech bodech A shodný, jedná se o homogenní deformaci. [18],[24]

Pokud je deformace v různých bodech A tělesa Ω různá, jedná se o deformaci nehomogenní. Deformace může být nehomogenní i po částech. [18],[24]

Výše uvedené vztahy platí pouze pro malé deformace. Za malé deformace lze považovat takové, které nepřesáhly 5%.

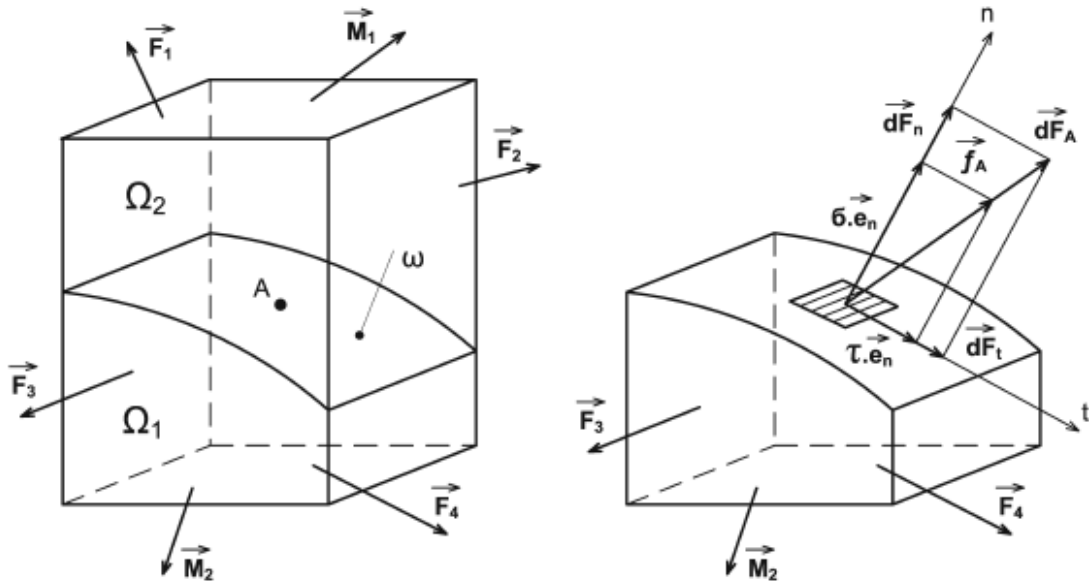
Při velkých deformacích (větších než 5%) je potom deformace popsána následovně [20]:

$$T_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \frac{\gamma_{xy}}{2} & \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} & \varepsilon_y & \frac{\gamma_{yz}}{2} \\ \frac{\gamma_{xz}}{2} & \frac{\gamma_{yz}}{2} & \varepsilon_z \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta u_k}{\Delta x_i} \cdot \frac{\Delta u_k}{\Delta x_j} \right) \quad (5)$$

3 NAPJATOST

Napjatost v bodě tělesa A je množina obecných napětí \vec{f} a jeho složek σ, τ , působící ve všech řezech, které bodem A procházejí. [18]

K určení obecných napětí \vec{f} a jeho složek σ a τ je zapotřebí uvolnění prvku tělesa Ω_1 řezem ω a zavedení tzv. plošných sil. [18]



Obr. 3 Uvolnění tělesa [18]

Elementární síla vzájemného působení v místě A se značí $d\vec{F}_A$.

$$d\vec{F}_A = \vec{f}_A dS \quad (6)$$

$$\vec{f}_A = \frac{d\vec{F}_A}{dS} \quad (7)$$

$$d\vec{F}_A = d\vec{F}_n + d\vec{F}_t \quad (8)$$

$$\frac{d\vec{F}_A}{dS} = \frac{d\vec{F}_n}{dS} + \frac{d\vec{F}_t}{dS} \quad (9)$$

$$\vec{f}_A = \vec{f}_n + \vec{f}_t = \sigma \cdot \vec{e}_n + \tau \cdot \vec{e}_t \quad (10)$$

σ – normálová napětí, τ – smyková napětí

Vztahy mezi obecným napětím a jeho složkami:

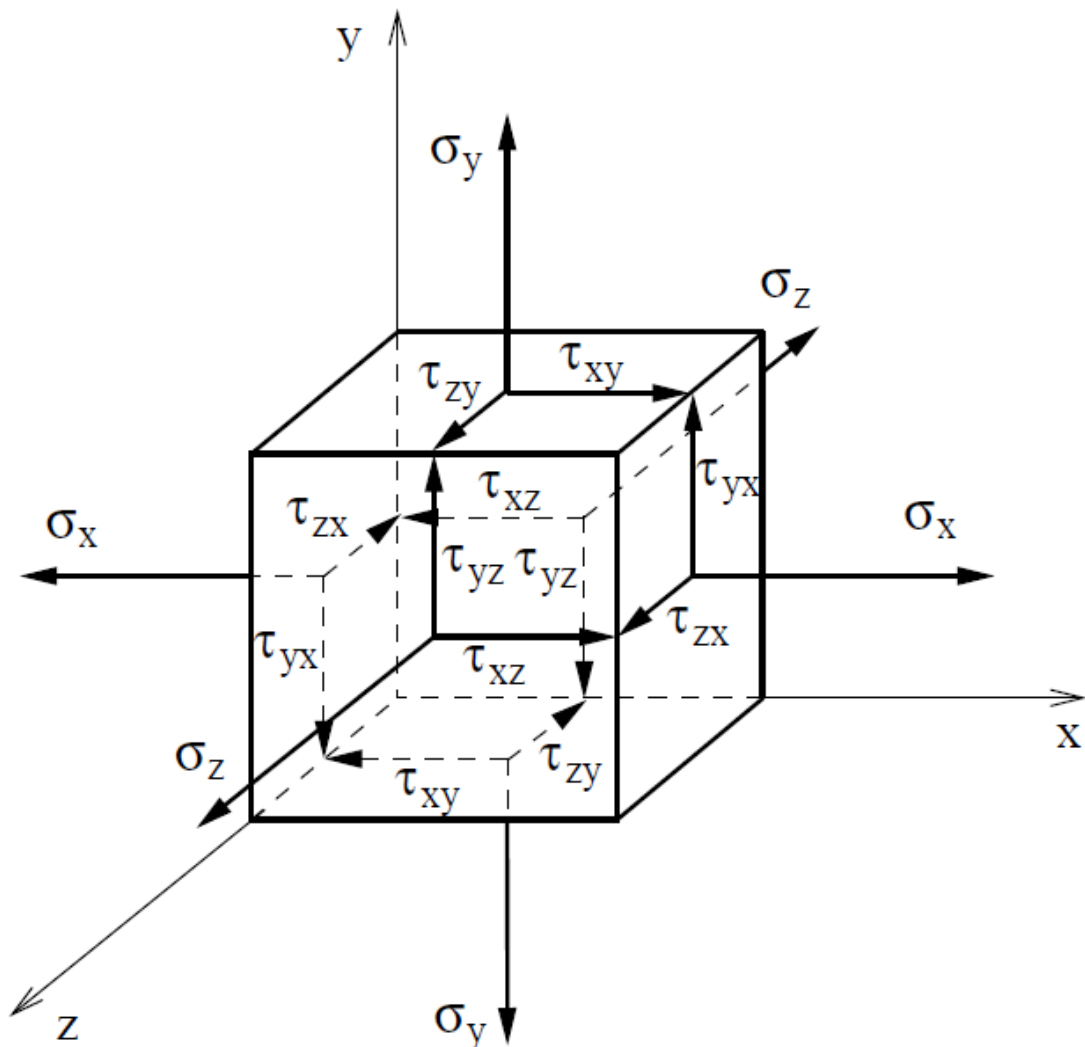
$$f = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2} \quad \sigma = \sqrt{f^2 - \tau^2} \quad \tau = \sqrt{f^2 - \sigma^2} \quad (11)$$

3.1 Prostorová napjatost

V libovolném bodě tělesa v pravoúhlé soustavě souřadnic xyz je prostorová napjatost obecně definována devíti složkami napětí, které lze uspořádat do tenzoru napjatosti [19],[23]:

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad (12)$$

Prvky σ_x , σ_y a σ_z , které leží na hlavní diagonále, jsou složky normálového napětí. Prvky τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yx} , τ_{yz} , τ_{zy} a τ_{zx} , které neleží na hlavní diagonále, jsou složky smykových napětí. Orientace uvedených složek a roviny, v nichž působí, jsou znázorněny na Obr. 4, na kterém je zobrazený element vyjmutý z tělesa. [19],[23]



Obr. 4 Element zatíženého tělesa [19]

Pro smykové složky napětí platí tzv. zákon sdružených napětí, které lze zapsat ve tvaru:[19],[23]

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \tau_z \quad (13)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \tau_y \quad (14)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \tau_x \quad (15)$$

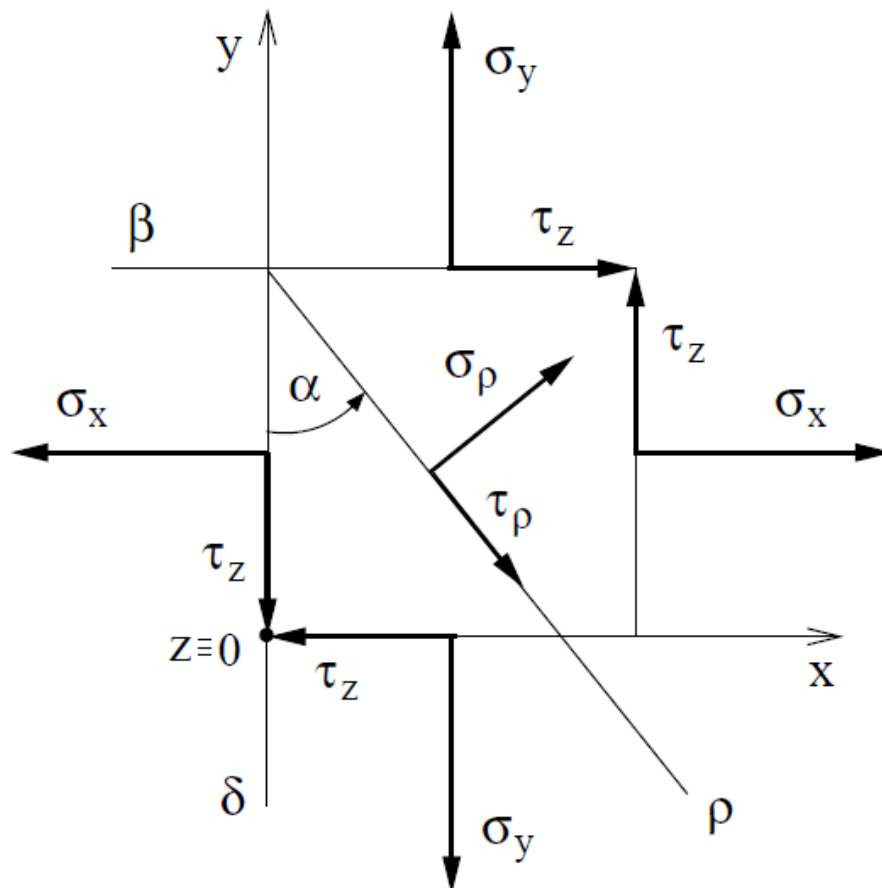
Z čehož vyplývá, že z 9 složek napětí zbývá pouze 6 různých složek. Prostorovou napjatost lze také popsat jednodušeji pomocí tzv. hlavních napětí σ_1 , σ_2 a σ_3 , což jsou normálová napětí působící v tzv. hlavních rovinách. Rovina, ve které jsou smykové složky napětí nulové, se nazývá hlavní rovinou. Velikost těchto napětí lze určit z podmínky [19]:

$$\begin{pmatrix} (\sigma_x - \sigma_i) & \tau_z & \tau_y \\ \tau_z & (\sigma_y - \sigma_i) & \tau_x \\ \tau_y & \tau_x & (\sigma_z - \sigma_i) \end{pmatrix} = 0, \text{ pro } i = 1,2,3, \quad (16)$$

kde i představuje index příslušného hlavního napětí. Vyčíslením determinantu se získá rovnice pro výpočet všech tří hlavních napětí. Speciálními případy prostorové napjatosti jsou jednoosá a rovinná napjatost. O jednoosou napjatost se jedná tehdy, když je jedna normálová složka napětí nenulová a ostatní normálové složky mají nulovou hodnotu. V takovém případě se jedná o tah či tlak. [19],[23]

3.2 Rovinná napjatost

Pokud je jedno z hlavních napětí rovno nule, jedná se o rovinnou napjatost. Příkladem je např. napjatost v rovině xy znázorněná na Obr. 5. Tato napjatost je popsána složkami napětí σ_x , σ_y a τ_z . [19]



Obr. 5 Rovinná napjatost [19]

Směr z je hlavním směrem a pro složky v hlavní rovině platí:

$$\sigma_z = 0 \quad \tau_{zx} = \tau_{zy} = 0 \quad (17)$$

V tomto případě má tenzor napětí T_σ tvar:

$$T_\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{yx} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

4 VZTAH NAPĚTÍ A DEFORMACE

Závislost mezi složkami tenzoru deformace a tenzoru napětí ve sledovaném bodě tělesa je obecně popsána Hookovým zákonem. Pro deformačně-napět'ové chování lineárně pružného materiálu platí mezi složkami napětí a deformace lineární závislost. Hookův zákon můžeme v jednorozměrném případě psát ve tvaru [21]:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (19)$$

Při zobecnění Hookova zákona na vícerozměrný systém se vychází z předpokladu, že jsou deformace charakterizovány složkami tenzoru malých deformací T_ε a složky tenzoru napětí T_σ jsou jejich lineárními funkcemi. Vzhledem k symetrii tenzorů T_ε a T_σ tak lze rovnici zapsat následujícími tvary: [21]

$$T_{\varepsilon_{ij}} = C_{ijkl} \cdot T_{\sigma_{ij}} \quad (20)$$

$$T_{\sigma_{ij}} = S_{ijkl} \cdot T_{\varepsilon_{ij}} \quad (21)$$

Rovnici (20) je pak možné přepsat jako tenzor tuhosti v maticovém tvaru následovně [20]:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (22)$$

Analogicky lze rovnici (21) přepsat jako tenzor poddajnosti v maticovém tvaru [20]:

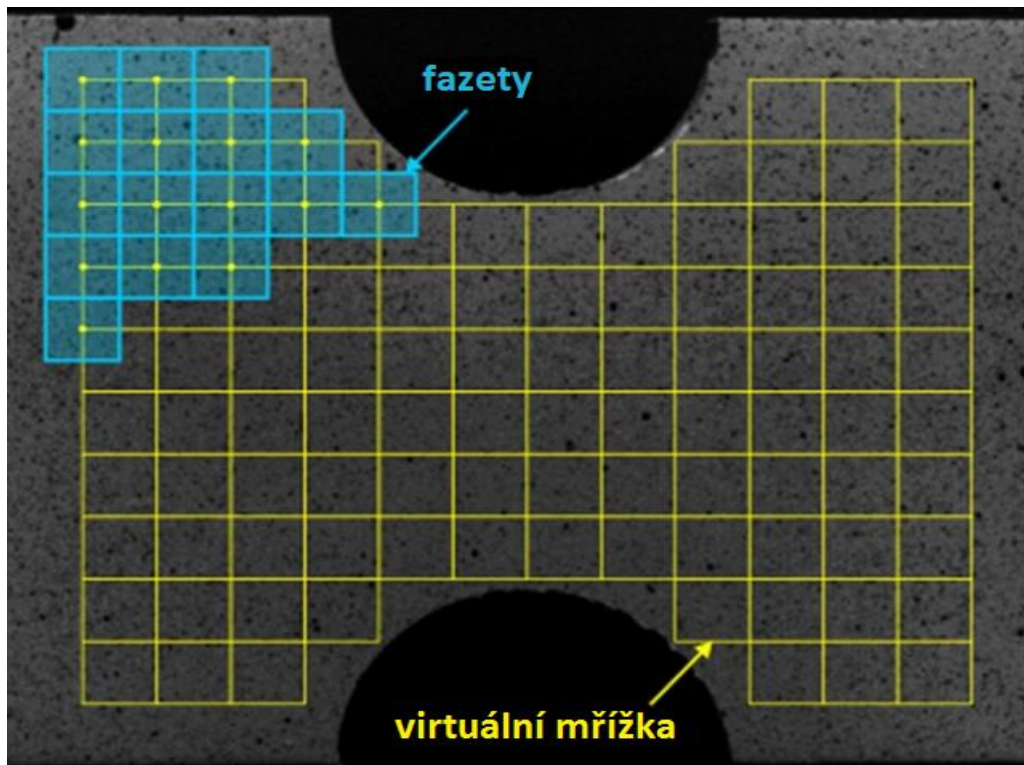
$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \quad (23)$$

5 METODA DIC (DIGITAL IMAGE CORRELATION)

Metoda digitální obrazové korelace (DIC) patří mezi nejmodernější a nejkomplexnější bezkontaktní metody měření deformací. Její největší výhodou je právě bezkontaktnost a vysoká citlivost spolu se širokou variabilitou měření. Jedná se o optickou metodu, která se využívá k měření prostorových poměrných deformací a posunutí za využití techniky digitální korelace obrazu. Ačkoliv je tato metoda známá již dlouho, až v posledních letech došlo k jejímu výraznějšímu vylepšení, za což lze vděčit pokroku v oblasti digitálních fotografií a výpočetní techniky. [17]

Samotná metoda poskytuje možnosti sledování různých jevů v průběhu deformace, přičemž je aplikovatelná pro testování široké škály různých druhů materiálů. Korelační systémy jsou schopny sledovat široký okruh bodů na povrchu, což umožňuje zobrazit měřené veličiny na celé sledované oblasti. Měřicí systémy operující s metodou DIC mají vůči konvenčním metodám řadu výhod a předností [17]:

- Bez kontaktu s měřeným vzorkem
- Možnost měření v libovolném místě sledované oblasti
- Schopnost zachytit nehomogenní pole deformací v celé oblasti
- Aplikace na místech, kde je měření konvenčními metodami obtížné nebo nemožné



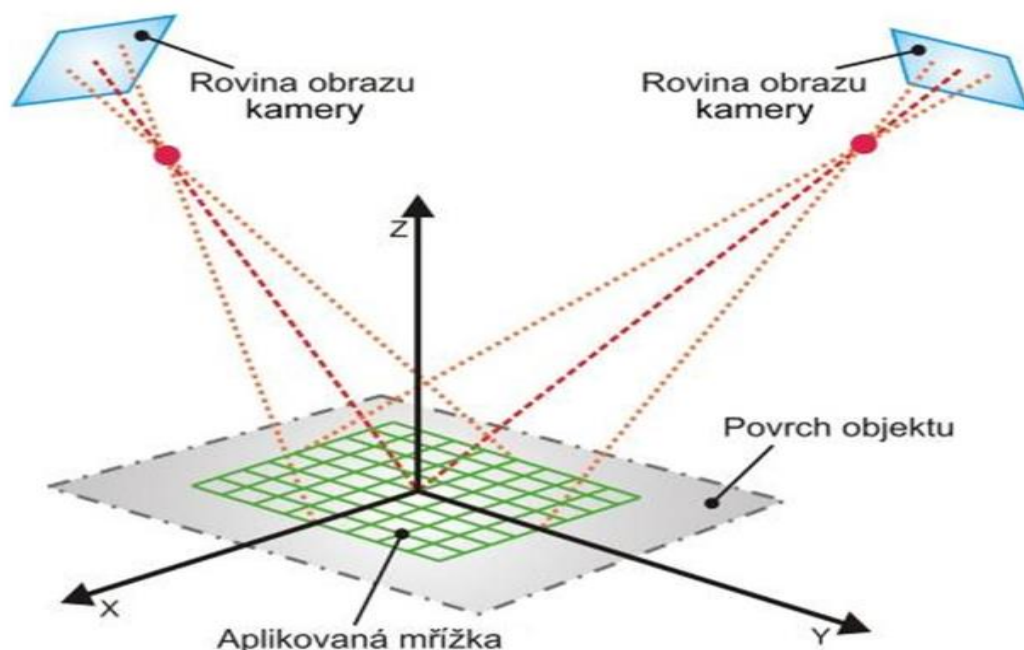
Obr. 6 Černobílý skvrnitý vzor na povrchu testovaného vzorku [17]

Princip

Podstata metody spočívá ve snímání náhodného černobílého skvrnitého vzoru vytvořeného na povrchu zkoušeného vzorku např. nástřikem černé barvy na bílý podklad (Obr. 6). Pozorovaná oblast se rozdělí virtuální mřížkou na menší podoblasti tzv. fazety tak, aby každá z nich obsahovala charakteristickou část vzoru s dostatečným kontrastem. [17]

Na základě korelace odpovídajících fazet před a po deformaci se určí posunutí a poměrná deformace jednotlivých bodů. V případě rovinné obrazové korelace jsou deformace vzorku určeny pozorováním přes jednu kameru namířenou kolmo na povrch objektu. Tento proces umožňuje stanovit deformaci vzorku v rovině rovnoběžné s obrazovou rovinou kamery. Při prostorové analýze se využívá stereoskopické (ve speciálních případech i trioskopické) uspořádání senzorů. Když je vzorek pozorovaný ze dvou různých směrů, pozice každého bodu povrchu je zaostřena na určitý pixel v obrazové rovině příslušné kamery. [17]

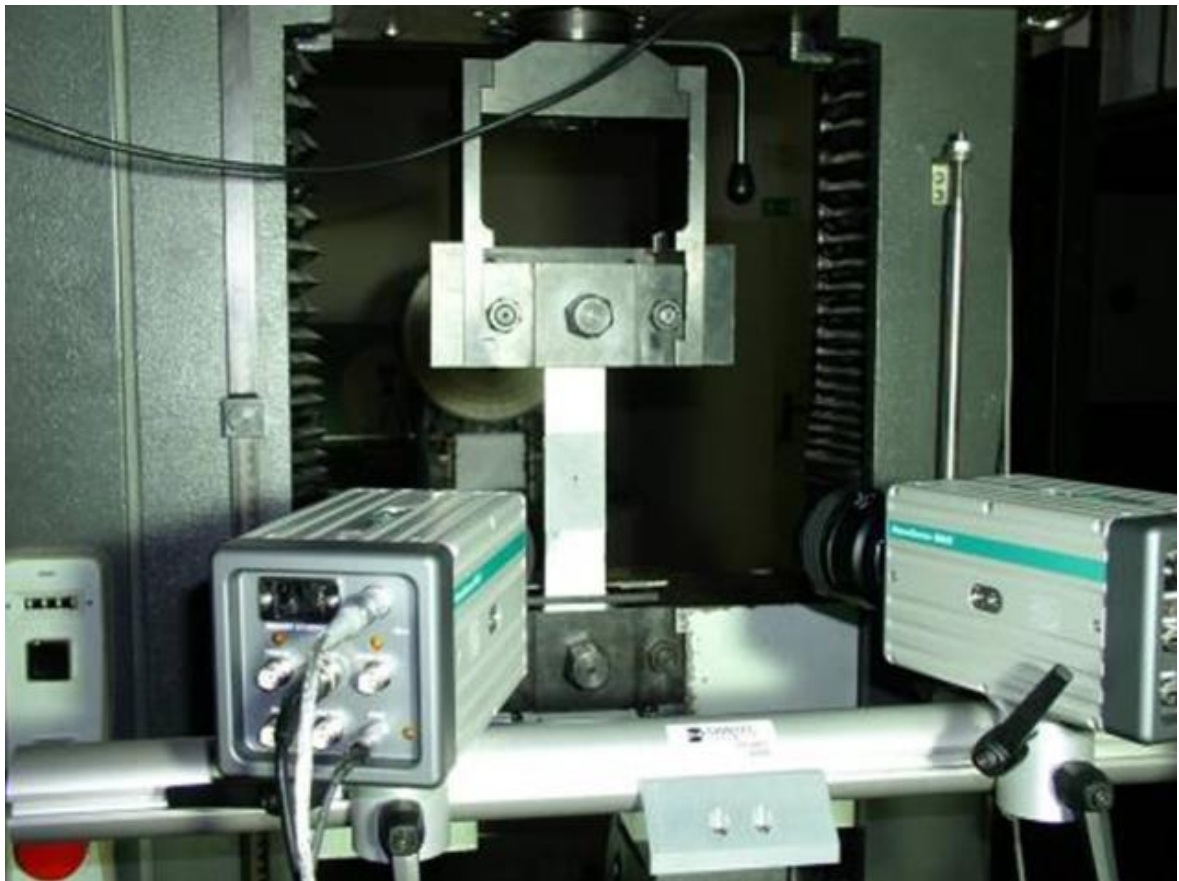
Když jsou známy polohy obou kamer vůči sobě, zvětšení objektivů a všechny parametry obrazu (tzv. kalibrační parametry), systém vypočítá absolutní trojrozměrné souřadnice každého bodu povrchu a vytvoří jeho virtuální prostorový obrys. Digitalizované snímky zachycené v jednotlivých krocích měření, kdy se body na povrchu přemísťují vlivem zatížení, jsou v procesu korelace porovnávány se zvoleným referenčním krokem. Výsledkem těchto porovnání jsou deformační pole a pole posunutí povrchových bodů v jednotlivých časových okamžicích. [17]



Obr. 7 Princip obrazové 3D korelace se dvěma kamerami [17]

Příklad struktury DIC systému

Příkladem měřících zařízení pracujících na principu metody DIC je vysokorychlostní korelační systém, který kombinuje vysoké obrazové rozlišení s vysoce přesným časovým rozlišením. Dynamické měření je možné vykonávat (v závislosti na hardwarové konfiguraci a podmínkách měření) v rozsahu frekvencí od 0 až po 20 000Hz. Systém je schopný měřit prostorové posunutí s přesností na desítky centimetrů až mikrometry a poměrné deformace v rozsahu od 100 $\mu\text{m}/\text{m}$ do několika stovek procent. Přesnost měření závisí na rozlišení CCD senzoru. V současnosti jsou dostupné kamery s rozlišením 5Mpx. Maximální délka nabývaného intervalu je limitovaná paměťovou kapacitou pro záznam obrazu z kamer, která se pohybuje v rozmezí od 4 do 32GB. [17]



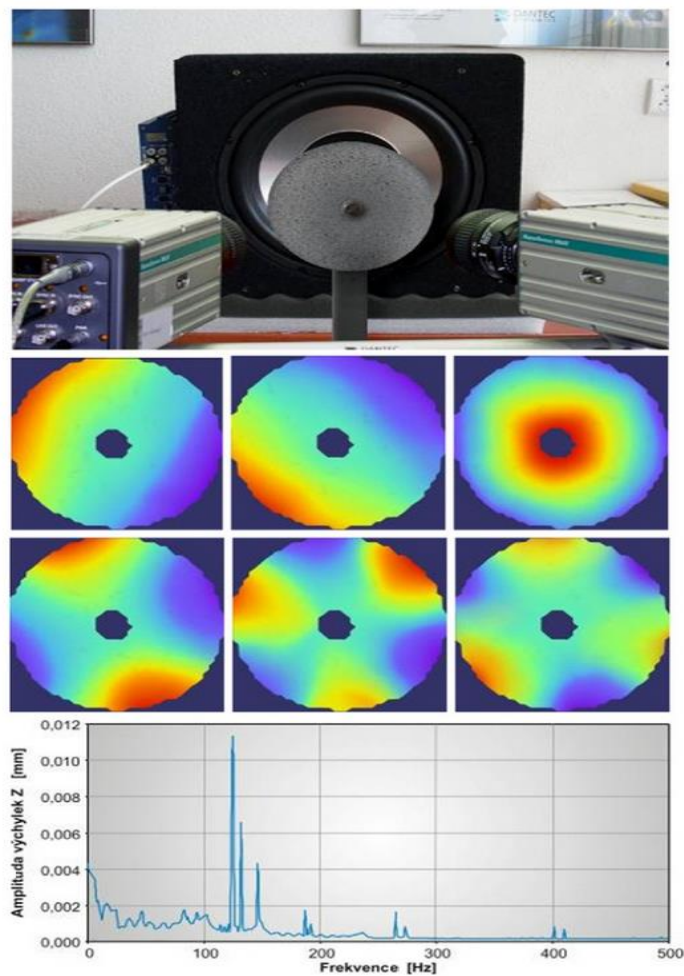
Obr. 8 Aplikace systému při určování materiálových vlastností [17]

Základní rysy systému

- Flexibilní oblast měření: mm² až m²
- Materiálová a geometrická nezávislost
- Plně automatizované kalibrování
- 3D vizualizace výsledků v různých souřadnicových systémech
- Statické a vysokorychlostní měření posunutí a povrchových poměrných deformací

Praktické možnosti využití systému

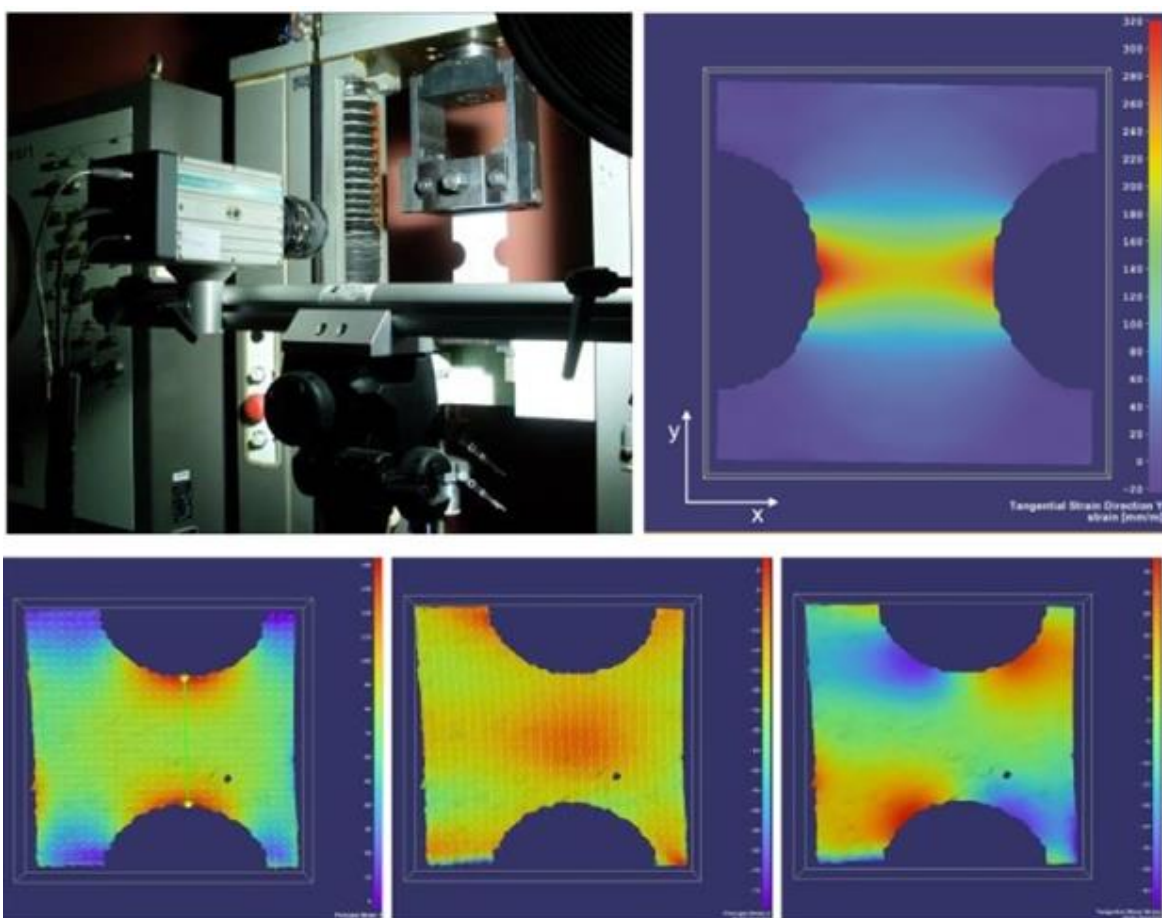
- Testování součástek (posunutí, poměrné deformace...)
- Testování materiálových vlastností (modul pružnosti, Poissonovo číslo...)
- Měření tvaru objektu
- Lomová mechanika
- Analýza vibrací
- Pohybová analýza



Obr. 9 Modální analýza kruhové desky [17]

Flexibilní konstrukce systému rozšiřuje možnosti jeho využití i na mikroskopické měření na mikroelektronických anebo biomechanických materiálech a také pro měření součástech z kosmických, automobilových, námořních či železničních strojů. [17]

Metoda DIC je stejně úspěšně využívána při určování plastických vlastností válcovaných ocelových plechů a při deformační analýze součástek namáhaných nad mezí kluzu. Systém též umožňuje exportovat virtuální prostorovou geometrii povrchu součástky do souboru STL, který je kompatibilní s většinou CAD aplikací. To je efektivně využíváno při tvorbě konečně prvkových modelů, především lisovaných součástek, jejichž geometrie není známa. [17]



Obr. 10 Určování mechanických vlastností tažných plechů [17]

Metoda digitální korelace patří k vysoce progresivním optickým metodám nacházejícím čím dál tím větší uplatnění v oblasti experimentálního testování mechanických soustav. Vývoj v této oblasti jde stále kupředu a současné korelační systémy jsou schopné vyhodnocovat měřené velikosti s podstatně vyšší přesností, což rozšiřuje prostor pro jejich uplatnění. [17]

6 SOFTWARE MOIRE

První verze softwaru Moire byla vytvořena čínským profesorem Zhaoyangem Wangem v roce 1997. Software se postupem času neustále zdokonaloval a vyvíjel. V současné době nese jeho nejnovější verze, vydána 2.12.2015, označení V0.956b. Je volně dostupná ke stažení pro běžné uživatele, kteří svými názory a připomínkami přispívají k jeho neustálému zdokonalování. [22]

Software obsahuje velké množství funkcí určených k analýze a zpracování obrazu, deformace, tvaru a měření posunutí. U jeho uživatelů je ale zdaleka nejvyužívanější funkcí možnost analýzy metodou DIC. [22]

DIC analýza vychází ze dvou snímků, které je potřeba v programu otevřít. Referenční snímek musí být vždy umístěn v popředí. V pozadí je pak otevřen druhý snímek, na kterém je zachycena deformace vzorku, která má být určena. [22]

Aby mohla DIC analýza proběhnout, je nutno provést patřičnou úpravu snímků, u kterých chceme analýzu provádět. Snímky, ze kterých analýza vychází, musí splňovat následující předpoklady: [22]

- 1) musí být ve formátu .bmp
- 2) musí být v odstínech šedi
- 3) musí mít 256 barev

Výstupem DIC analýzy je posunutí vyjádřené v pixelech a to jak ve směru příčném, tak ve směru podélném. V obou směrech lze také vypočítat poměrnou deformaci vyjádřenou v procentech. Výsledky analýz je možné zpřesňovat pomocí nastavení vyššího počtu iterací u jednotlivých výpočtů. [22]

7 DALŠÍ METODY MĚŘENÍ DEFORMACE

Výsledkem tahových zkoušek je tahový diagram, který je vykreslován pomocí záznamového zařízení, jenž snímá a zaznamenává velikosti síly a deformace v daný okamžik. Z takto vytvořeného diagramu lze vyčíst mez kluzu, mez pevnosti a mez elasticity. Ke zpřesnění měření těchto hodnot se využívá měřících zařízení označovaných jako průtahoměry, které dokážou zaznamenat již velmi malé deformace. [2]

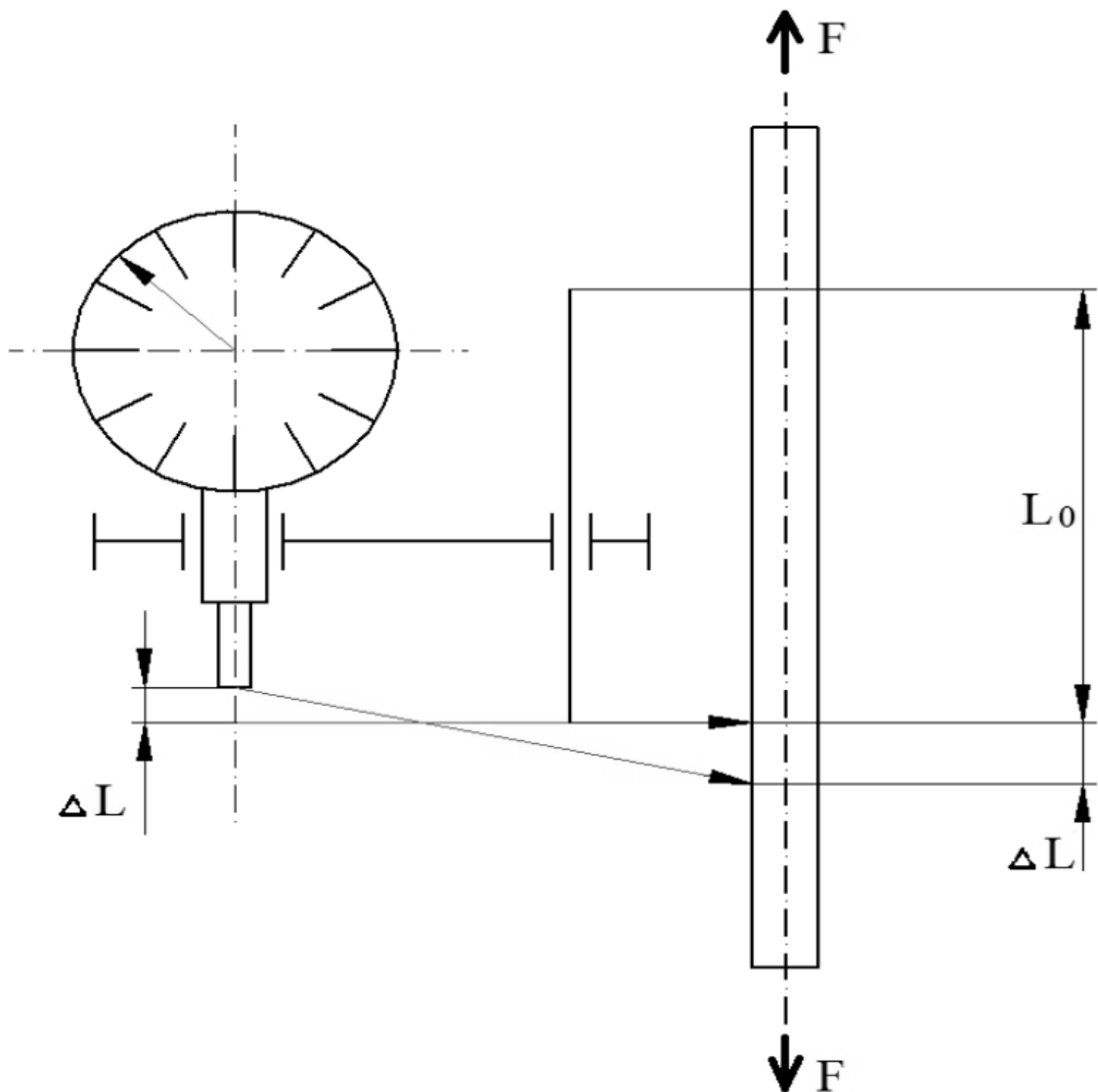
Požadavky při zkoušení převážně vyžadují takové zkušební metody, které jsou citlivé a šetrné vůči zkoušenému vzorku a při zkoušení vzorku nedojde k jeho znehodnocení. Těmto požadavkům se dá vyhovět volbou takové metody, při jejíž aplikaci nedochází ke kontaktu zkoušeného vzorku se zkoušecím zařízením. Z tohoto hlediska lze metody měření deformací rozdělit do dvou skupin a to konkrétně na metody kontaktní (mechanické) a metody bezkontaktní (optické), které jsou v praxi využívány daleko více než metody kontaktní. [3]

7.1 Mechanické snímače

Jedná se o metodu kontaktní, kdy jsou snímače v přímém kontaktu s měřeným vzorkem. Snímače jsou umístěny na průtahoměru tak, aby zaznamenávaly materiálovou deformaci průtahoměru. Tyto deformace vyvolají změny elektrického odporu při průchodu elektrického proudu tenzometrem a tím vyvolávají změnu výstupního napětí, které se dále zpracovává. Měřidla se vyrábějí s danými měřicími rozsahy, které nemohou být překročeny, jinak by došlo k nenávratnému poškození měřidla. Výhodami mechanických snímačů jsou: přímý kontakt se vzorkem, jednoduché kalibrování, rychlá příprava pro měření, rychlé upínání, vysoká přesnost a úspora místa. Nevýhodou je neuniverzálnost měřidel, vycházející z rozsahu měření a teplot, při kterých se měřidla používají. [3]

7.1.1 Mechanický průtahoměr

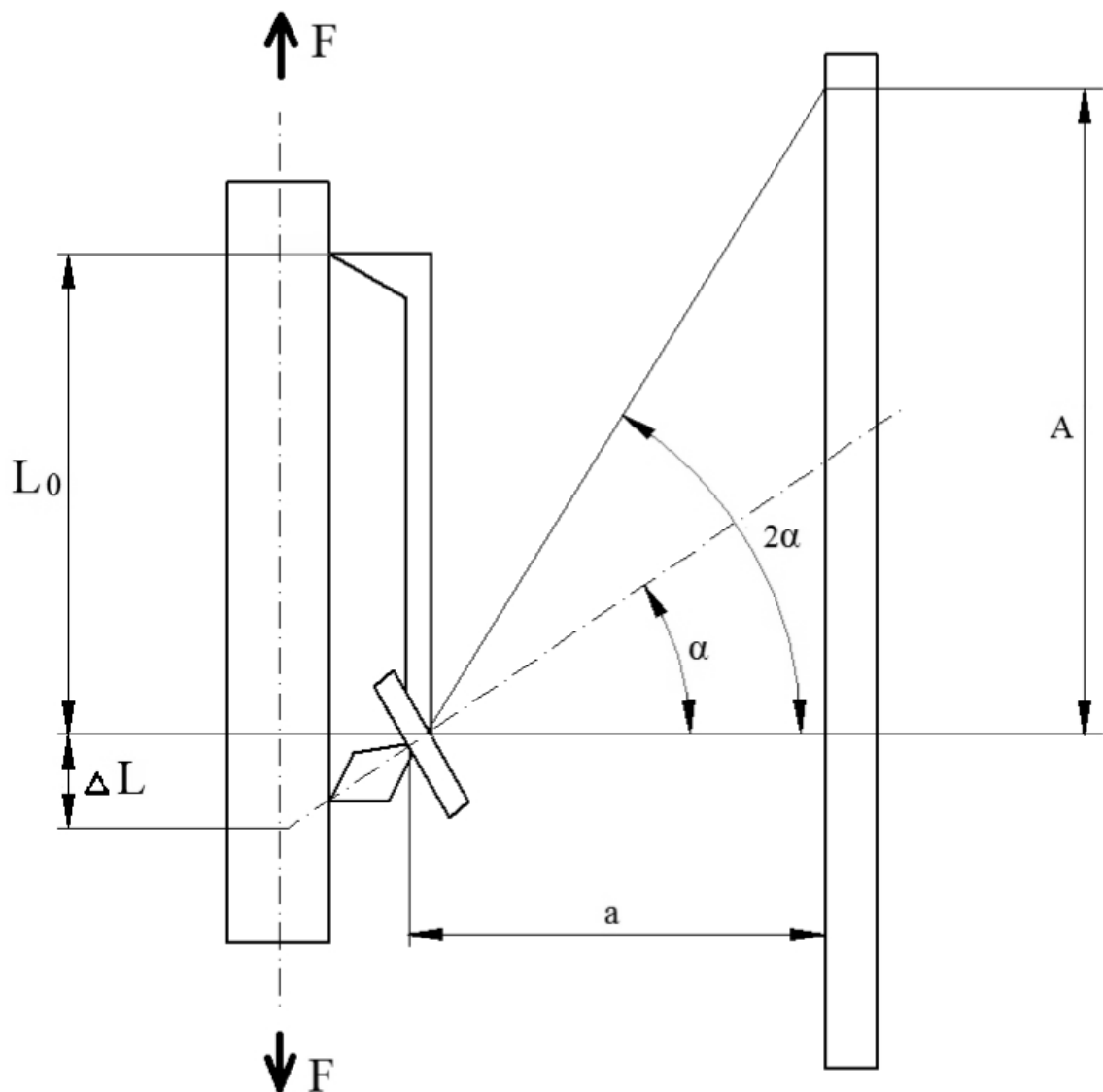
V dnešní době již téměř nepoužívaný typ průtahoměru. Je založen na principu mechanického převodu absolutní hodnoty deformace tělesa ΔL . Přímou na zkušební vzorku je umístěn mechanismus převodu, jehož zkušební hrot se při deformaci vychyluje a tím převádí deformaci na ručičkový indikátor. [4],[5]



Obr. 11 Měření deformace mechanickým průtahoměrem [2]

7.1.2 Martensův optický průtahoměr

Na pracovní části zkušební tělesa jsou v určité vzdálenosti od sebe přidržovány dva břity. Protážením zkušební tělesa vyvolanou tahovou silou zapříčiní, že se pevně spojené pohyblivé části břitů se zrcátka naklopí. To způsobí, že se odraz stupnice průtahoměru v zrcátku, který byl na začátku měření nastavený na nulovou hodnotu, posune na hodnotu prodloužení. [4]



Obr. 12 Schéma Martensova optického průtahoměru [2]

7.1.3 Kapacitní extenzometr

Základním principem tohoto typu snímače je změna vzdálenosti mezi elektrodami. Elektrodotový systém bývá dvou až několika elektrodotový. Parametry systému se mění působením měřené neelektrické veličiny. [6]

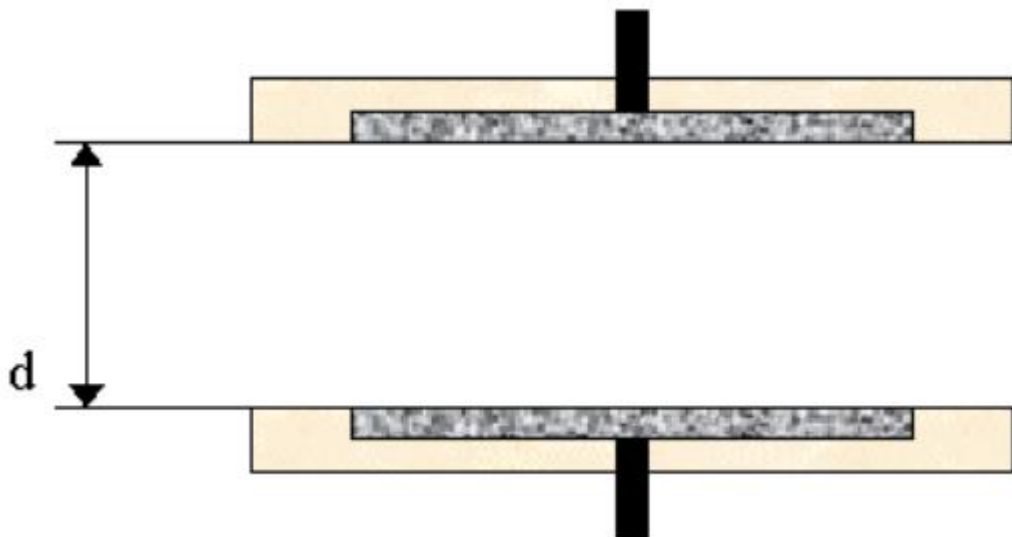
Snímač může být připevněn na zkoušené těleso pomocí tvarového nasazení, gumiček, stavečního šroubu, kleštin nebo nalepením. Při materiálové zkoušce tahem bývá nejčastější způsob upnutí tělesa pomocí gumiček nebo se využívá vhodného tvaru tělesa (například výstupky určené přesně pro daný snímač). [2]

Nejjednodušším kapacitním snímačem je deskový kapacitor s proměnnou mezerou mezi deskami. Za předpokladu, že jsou plocha a relativní permitivita konstantní, platí při změně vzdálenosti elektrod o vzdálenost Δd pro kapacitu vztah [7]:

$$C_1 = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d + \Delta d} \quad (24)$$

Potom platí:

$$\frac{C_1}{C} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta d}{d}} \quad (25)$$



Obr. 13 Princip senzoru se změnou vzdálenosti elektrod [7]

Tento typ snímače má nelineární charakteristiku a každou hodnotu prodloužení při tahové zkoušce je nutno přepočítat podle výše uvedených vztahů. [2]

7.1.4 Tenzometr

Princípem tenzometrického snímače je změna odporu v závislosti na velikosti působící síly. Protážení tělesa vyvolané soustavou zatěžujících vnějších sil vyvolá změnu elektrického odporu tenzometru, kterou lze změřit. Ze získané hodnoty elektrického odporu lze vypočítat velikost deformace. [8]

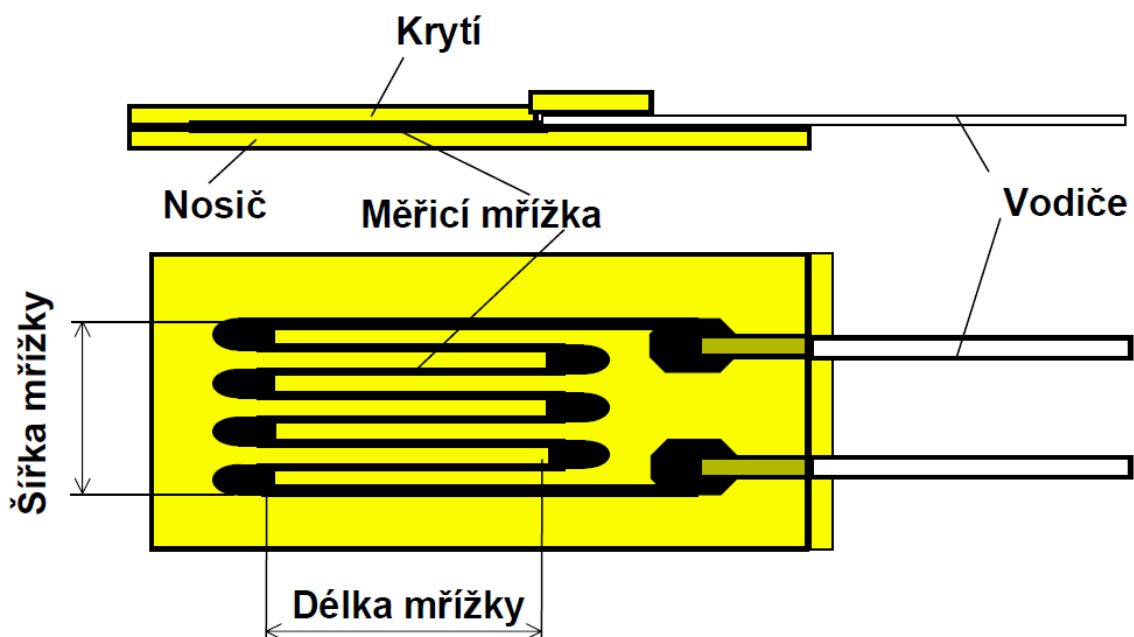
Tenzometry se připevňují na zkoušené těleso nalepením. Neměří se tedy deformace tělesa, ale snímána je pouze deformace tenzometru. Lze jej použít pro snímání prodloužení i smrštění zkoušeného tělesa. Mezi výhody patří nízká hmotnost a malé rozměry. Nevýhodou je teplotní závislost a fakt, že po nalepení je již nelze přelepit na jiné těleso. [8]

Kovový tenzometr

Většinou jsou vyráběny z konstantanu (60% Cu a 40% Ni) nebo z chromniklové slitiny (80% Cr a 20%Ni). Základním parametrem tenzometru je koeficient k vyjadřující poměr mezi relativní změnou odporu a relativní změnou délky. Funkce tenzometru je charakterizována vztahem [9]:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \cdot \varepsilon_i \quad (26)$$

Kovové tenzometry se uplatňují hlavně v aplikacích, kde se vyžaduje vysoká přesnost. Jedná se zejména o měření povrchových deformací kriticky namáhaných součástí. [9]

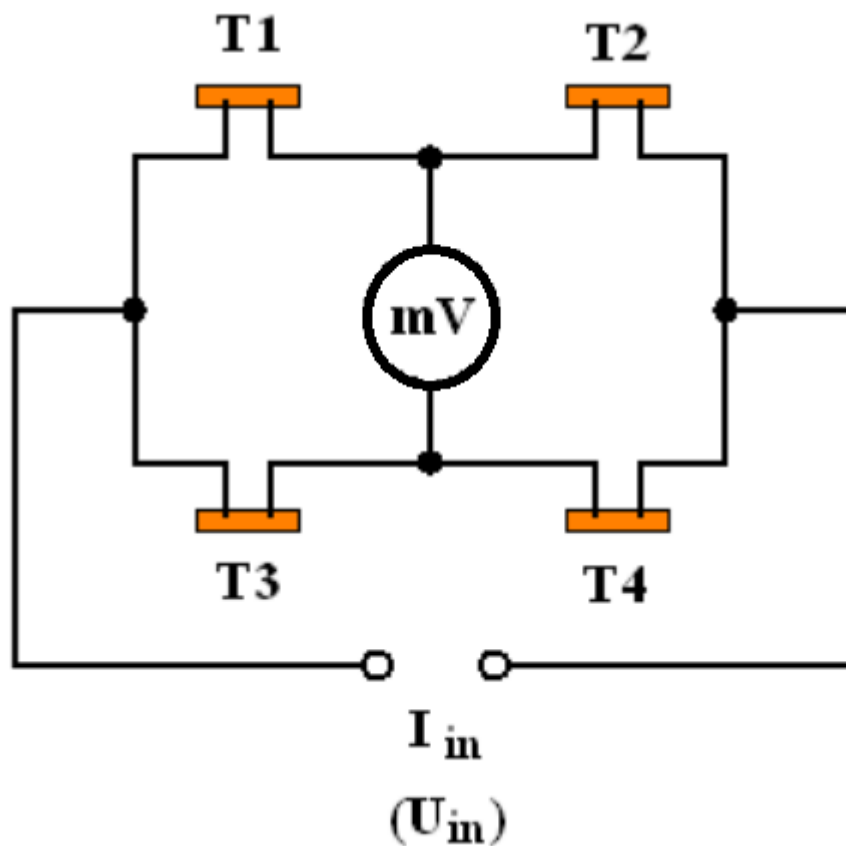


Obr. 14 Schéma foliového tenzometru [10]

Polovodičový tenzometr

Podstata polovodičového tenzometru spočívá ve výrazné změně jeho elektrického odporu s mechanickou deformací. Působením mechanického namáhání v difuzní vrstvě polovodiče dochází ke změně elektrické vodivosti. Změna odporu je závislá na koncentraci příměsí a typu polovodiče. Proužek z polovodiče je nalepen na plochu, která se bude deformovat. Polovodičový tenzometr vykazuje nelineární závislost odporu na deformaci. Přesnost měření je ovlivněna parazitními vlivy, jako jsou např. teplota nebo velikost procházejícího proudu. Ke kompenzaci takových vlivů se používá zapojení do můstku s kompenzačním členem teploty. [11]

Nejběžnější zapojení polovodičového tenzometru je do Wheatstoneova můstku, který kompenzuje vliv teploty při statických měřeních. Měření elektrického odporu jednoho tenzometru lze použít tehdy, pokud není třeba kompenzovat vliv teploty. Navíc se při použití Wheatstoneova můstku zvyšuje citlivost na čtyřnásobek v porovnání s použitím jednoho tenzometru. [11]



Obr. 15 Zapojení tenzometru do Wheatstoneova můstku [11]

7.2 Optické snímače

Tato skupina snímačů pracuje bez přímého kontaktu se zkoušeným vzorkem. Neměří se přímo délka vzorku, ale pouze se vizuálně zaznamenává vzorek a ze získaných snímků se poté určí deformace. Vzorek je před začátkem zkoušky potřeba připravit. To je zajištěno buď nástřikem nebo nakreslením mřížky na vzorek. [2],[3]

Typickou vlastností těchto snímačů je univerzální vzdálenost snímacího zařízení od snímaného vzorku. U většiny optických snímačů lze také provádět vyhodnocování zkoušky ze záznamu. Rozsah délky měřených vzorků se pohybuje v rozmezí několika jednotek až stovek milimetrů. Nevýhodami jsou náchylnost i na malou změnu podmínek v prostředí měření (osvětlení, vibrace) a také vysoká pořizovací cena. [2],[3]

7.2.1 Videoextenzometr

Záběr videokamery je zaměřen na zkušební vzorek, na kterém musejí být vyznačeny body. V průběhu měření se kontinuálně mění vzdálenost mezi vyznačenými body, což je zaznamenáváno příslušnou kamerou. Získané snímky jsou díky softwaru analyzovány v reálném čase a přímo se vypočítává deformace vzorku na základě počáteční délky vzorku a změně vzdálenosti bodů, které jsou na vzorku vyznačeny. Vztah pro výpočet poměrné deformace je potom [12]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

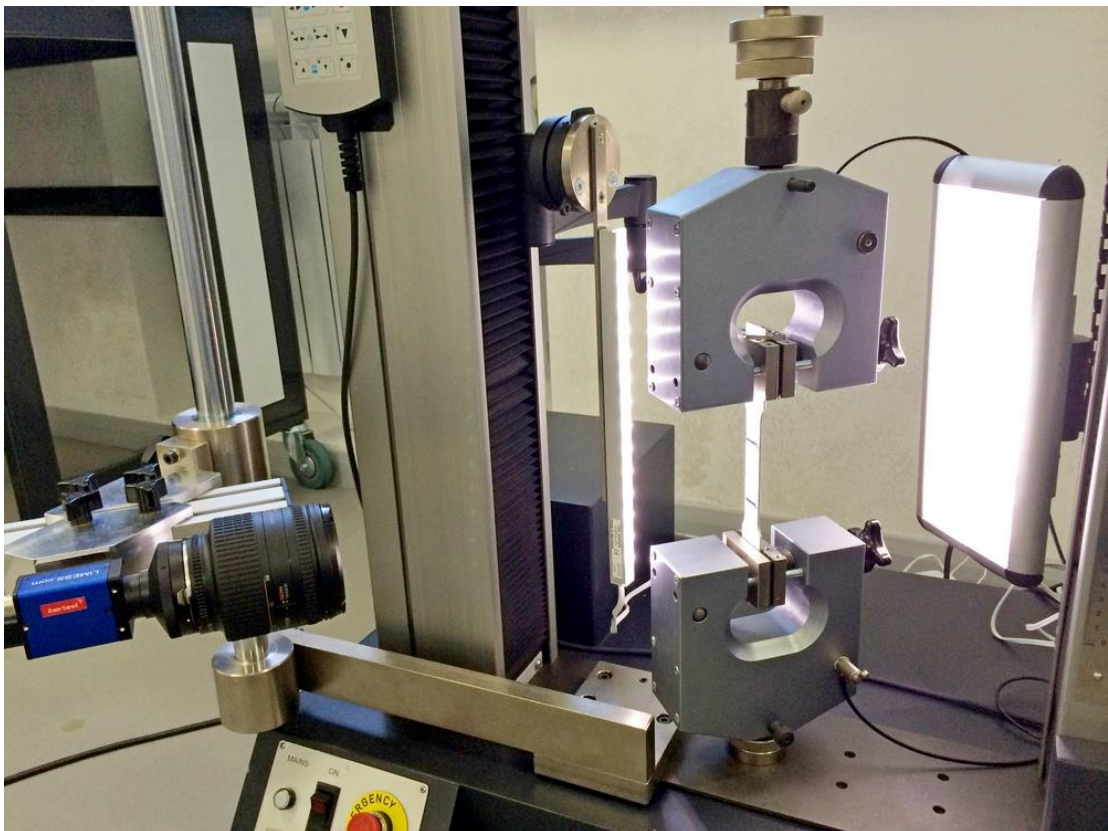


Obr. 16 Videoextenzometr [13]

V průběhu testování nesmí dojít ke změně vzdálenosti zkoušeného vzorku a videokamery, která ho snímá. V takovém případě by totiž změna vzdálenosti znamenala i změnu zorného pole, což by následně vedlo k chybnému vyhodnocení deformace softwarem, který by tuto změnu uvažoval jako deformaci zkoušeného vzorku. Přejetím tomuto problému se dá upevněním videokamery k rámu zkušebního stroje. [3]

Snímaný obraz je přenášen optickým kabelem do počítače. Optického kabelu se využívá pro jeho schopnost rychlého datového přenosu, což je u tohoto zařízení nezbytné. Vysoká kvalita záznamového zařízení a vysoká rychlost přenosu dat, jsou předpoklady pro přesnost výsledků zkoušky, za využití algoritmů užitých v programu vyhodnocujícím prováděnou zkoušku. [2]

Algoritmy obsažené v programu skenují středy značek na zkoušených vzorcích. Lze sledovat podélnou i příčnou deformaci, v takovém případě budou tyto středy čtyři. Důvod sledování středů značek je ten, že při vysokém protažení vzorku může dojít k jejich porušení. Výsledná hodnota, kterou program určí, se vypočítá jako rozdíl hodnot délky středů značek před začátkem zkoušky a po jejím konci. Původní délka vzorku je strojem zaznamenána ještě před začátkem zkoušky. [2]



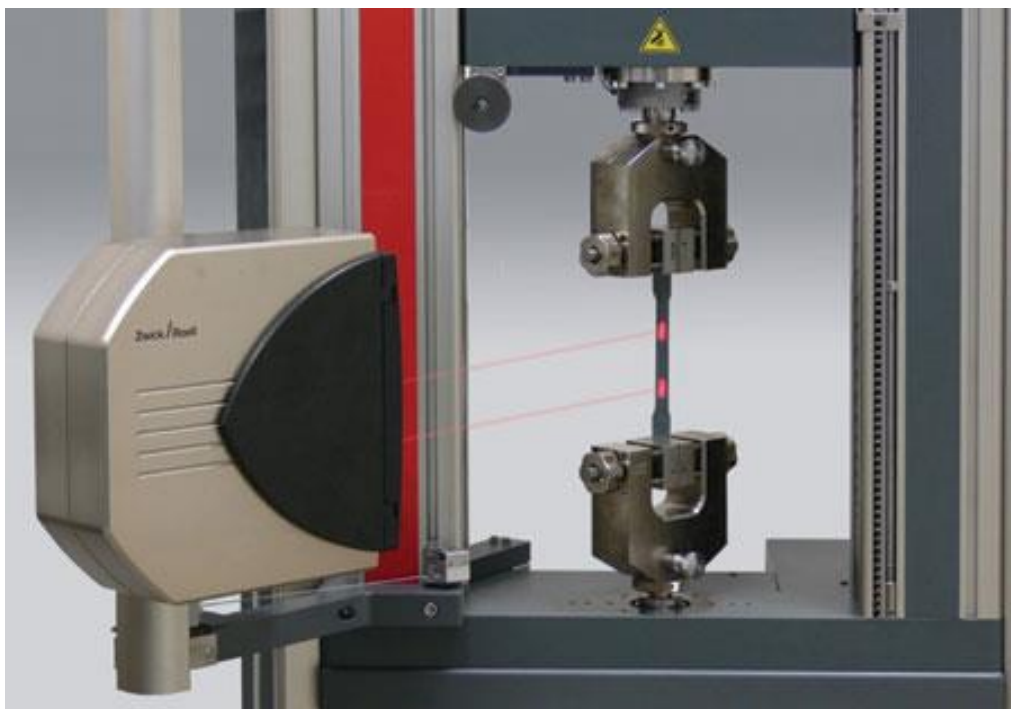
Obr. 17 Tahová zkouška prováděná videoextenzometrem [14]

7.2.2 Laserový extenzometr

Laserové extenzometry měří plynule a bezkontaktně deformaci vzorku od začátku zkoušky až do porušení vzorku. Mají velkou univerzálnost v rozsahu použití měřených oblastí. Vyznačují se také velmi vysokou přesností. Tento způsob je vhodný pro měření za jakýchkoli teplot. Lze měřit příčné i podélné deformace zkoušeného vzorku. Další výhodou je, že zkoušený vzorek nemusí být opatřen značkami, což zkracuje čas přípravy vzorku a tím i ekonomickou náročnost. Laser při měření provede skenování povrchu vzorku a mírné nerovnosti zaznamená jako souřadnicový systém, ve kterém si vyhodnotí stěžejní body pro vyhodnocení deformace. [2],[3],[15]

Laserový extenzometr obsahuje dvě vysílací a dvě snímací zařízení. Lasery, použité jako vysílací zařízení osvětlují povrch vzorku. Osvícený povrch se pomocí snímacích zařízení naskenuje. Zachycený obraz plochy, detailně snímáný dvěma digitálními kamerami, se jeví jako zrnitý. Systém si na základě této zrnitosti sám vytvoří tzv. virtuální značky. Na základě jejich nepřetržitého snímání bude poté pomocí příslušného počítačového softwaru vyhodnocovat výsledky prováděné zkoušky. [2]

K určení posunutí se vychází ze dvou po sobě jdoucích snímcích zaznamenaných pomocí videokamer. Záznamová rychlost kamery určuje jemnost pozorování a je pro zkoušku velmi důležitá. Tento parametr se udává v počtu snímků za sekundu, zkráceně fps. [2]



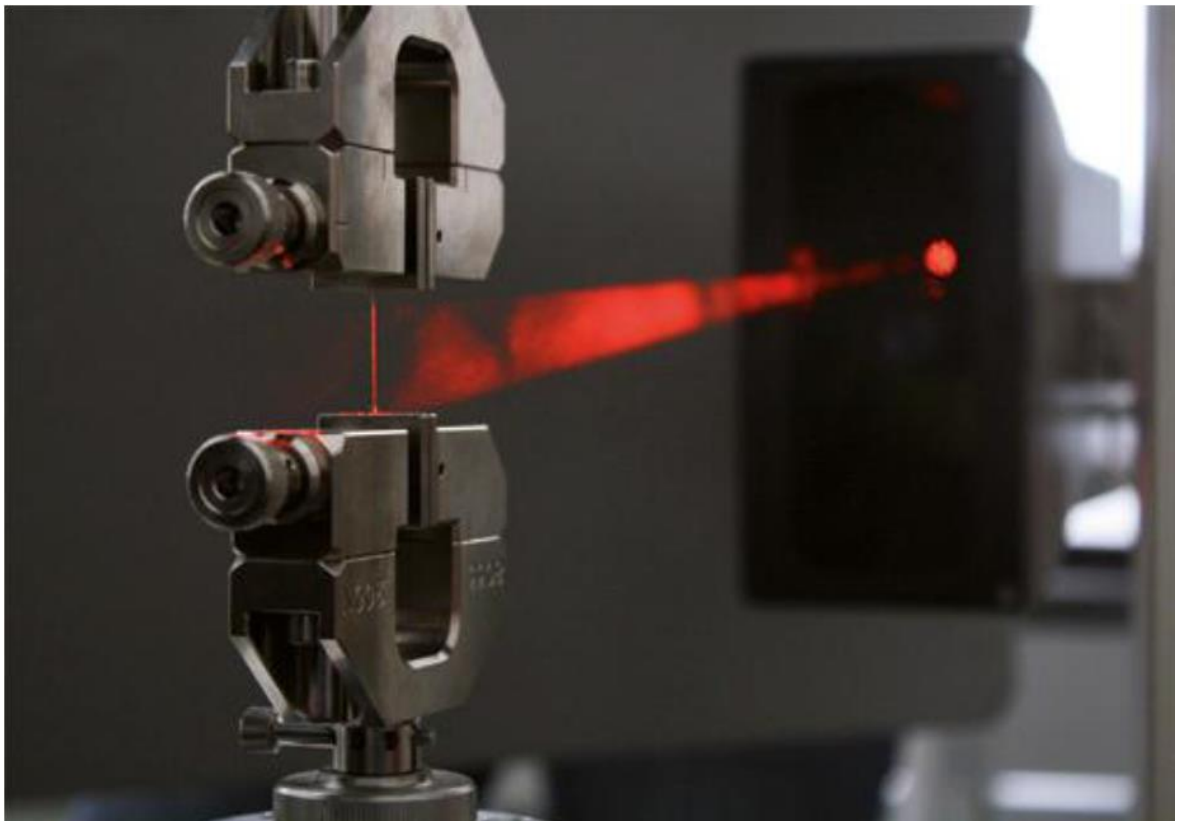
Obr. 18 Zkouška pomocí dvou laserových snímačů [16]

Metodu snímání dvěma laserovými snímači nelze aplikovat pro zkoušky, kdy jsou zkoušené vzorky velmi malých rozměrů. V takovém případě je nutno použít metodu snímání jedním laserovým snímačem. [2]

Hlavice snímače disponuje zdrojem laserového paprsku a digitální kamerou, zachycující odražený paprsek. Metoda pracuje velmi podobně jako metoda se dvěma snímači, s tím rozdílem, že mapování zajišťuje pouze jeden snímač. [2]

Rozdíl oproti snímání dvěma snímači spočívá v nemožnosti vytvoření vlastních značek po celou délku podélné deformace zkoušeného vzorku. Lze tak snímat pouze omezenou oblast vzorku. Oblast snímání udává zorné pole kamery. Nelze tedy přesně určit výslednou deformaci celého vzorku, ale pouze jeho sledované části. [2]

Eliminaci tohoto problému řeší dva pracovní režimy, ve kterých zařízení pracuje. V prvním režimu dochází ke sledování virtuálních značek na vzorku až do chvíle jejich opuštění zorného pole. Pokud nastane tato situace, zařízení přepíná na druhý režim, ve kterém sleduje tok materiálu. Režimy jsou dobře sladěné a tak lze i tímto způsobem získat výsledky s velmi vysokou přesností. [2]



Obr. 19 Zkouška pomocí jednoho laserového snímače [2]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

8 CÍL PRÁCE

Cílem práce je zjistit vhodnost použití DIC metody pro snímání deformace při tahových a smykových zkouškách v laboratořích UVI.

Bude testován vliv hodnot kombinací jas/kontrast a velikosti rozlišení na míru vykreslení v procentech. Dále se bude zkoumat, jaká hustota nástřiku je pro analýzu nejvhodnější a určí se, jestli je tato metoda za daných podmínek vhodná.

9 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Testované vzorky bylo potřeba připravit s ohledem na výpočet DIC analýzou. Tato příprava spočívala v nástřiku bílého spreje na pryžové vzorky, přičemž byla snaha vytvořit sprejem shluk malých bodů, které jsou nezbytné pro danou metodu snímání deformace. Jak vzorky určené pro tahovou zkoušku, tak vzorky pro zkoušku čistým smykem byly nástříkány vždy ve více variantách, z nichž bylo vybráno 6 kusů, které byly poté podrobeny příslušným zkouškám.

9.1 Vzorky pro zkoušku tahem

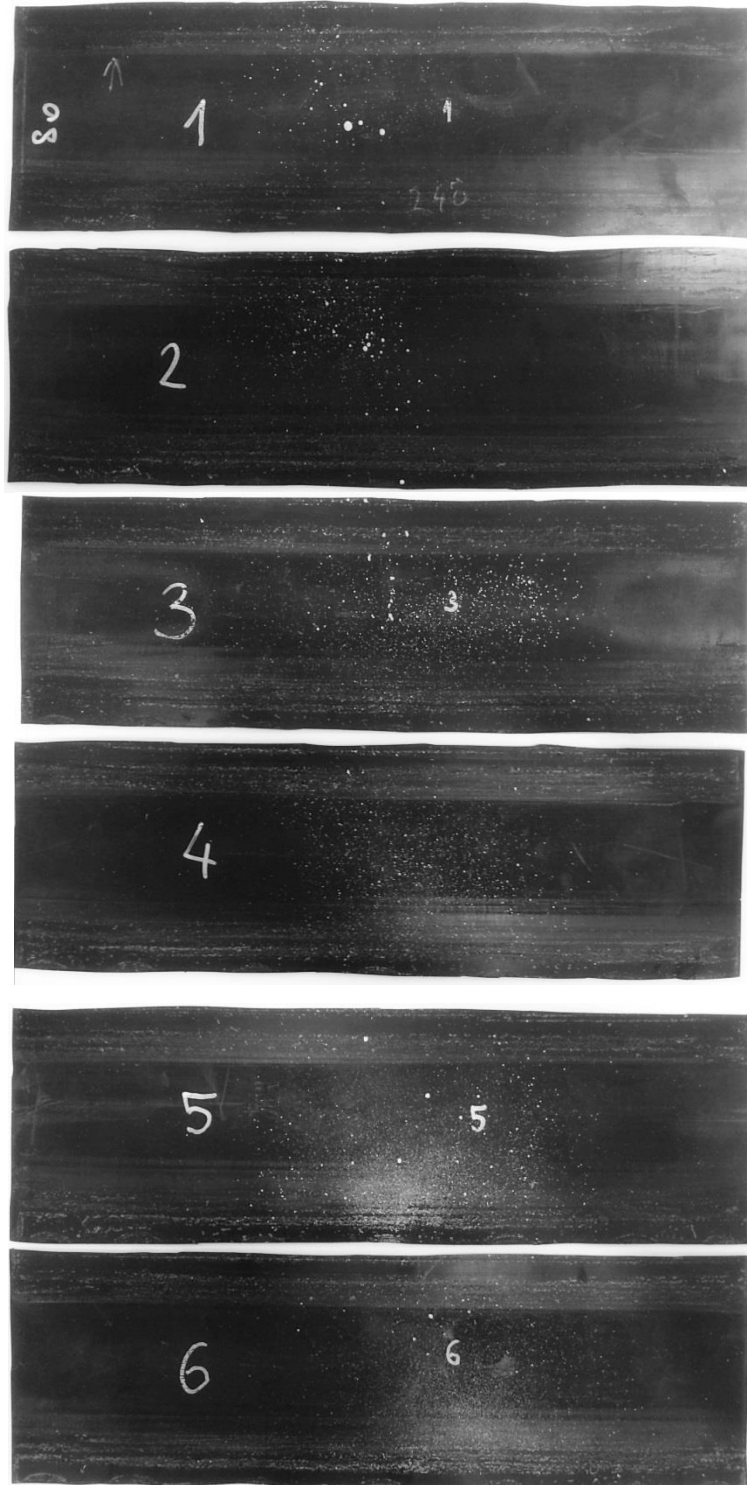
Nastříknuto bylo celkem 21 vzorků určených pro tahovou zkoušku, z nichž bylo vybráno 6 vzorků s různým rozptýlením kapiček spreje. Vybrané vzorky, které byly podrobeny tahovým zkouškám, jsou znázorněny na Obr. 20.



Obr. 20 Vybrané vzorky ke zkoušce tahem

9.2 Vzorky pro zkoušku čistým smykem

Vzorků pro zkoušku čistým smykem bylo celkově nastříknuto 9, z nichž bylo poté rovněž 6 vzorků (Obr. 21) podrobeno zkoušce čistým smykem.



Obr. 21 Vybrané vzorky pro zkoušku čistým smykem

10 TAHOVÁ ZKOUŠKA

10.1 Princip zkoušky

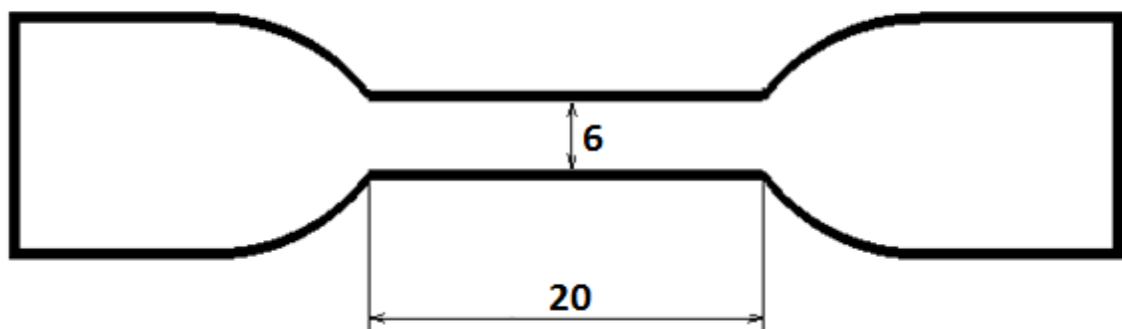
Tahové zkoušky byly provedeny v souladu s normou ČSN ISO 37 na univerzálním trhacím stroji ZWICK 1456. Přípravené vzorky byly upnuty do upínacích čelistí a konstantním zatěžováním byly natahovány ve svislém směru. Po dobu zatěžování stroj zaznamenával zatěžovací sílu a pomocí mechanických snímačů také prodloužení vzorku.



Obr. 22 Univerzální trhací stroj ZWICK 1456

10.2 Zkušební vzorky

Celkem bylo testováno tahovou zkouškou 6 vybraných vzorků. Vzorky byly ve tvaru oboustranných lopatek o tloušťce 2 mm a šířce pracovní části 6 mm. Délka pracovní části lopatek byla 20 mm.



Obr. 23 Zkušební vzorek pro zkoušky tahem

10.3 Postup zkoušky

Zkušební vzorek byl upnut do čelistí trhacího stroje tak, aby bylo upnutí symetrické s ohledem na rovnoběžné části lopatek, čímž se docílilo rovnoměrného rozložení tahového zatížení vzorku vztaženého na jeho příčný průřez. Na pracovní části testovaného vzorku byly vždy upnuty mechanické snímače ve vzdálenosti 20 mm od sebe, které zaznamenávaly prodloužení pracovní části vzorku po celý průběh testování. Maximální prodloužení nastavené na trhacím stroji dosahovalo 10% pracovní části vzorku. Celý průběh tahové zkoušky zaznamenával digitální fotoaparát z důvodu potřeby snímků pro provedení DIC analýzy. Sekvence snímání nastavená na fotoaparátu byla v rozmezí jedné sekundy. Kvůli nedostatečnému nasvícení testovaných vzorků muselo být při všech zkouškách použito externí osvětlení.

11 ZKOUŠKA ČISTÝM SMYKEM

11.1 Princip zkoušky

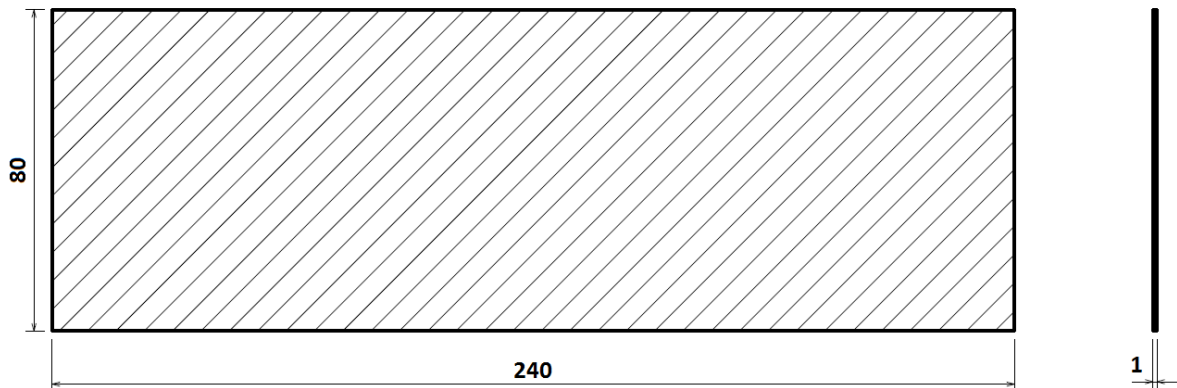
Provedení zkoušek čistým smykem se provádělo v souladu s normou ČSN ISO 37 na trhacím stroji SHIMADZU AGS-50kN XD. Zkušební vzorky byly upnuty v širokých upínacích čelistech stroje a natahovány konstantní rychlostí. Stroj zaznamenával zatěžovací sílu a prodloužení vzorků pomocí kamery, která byla součástí stroje. Kamera snímala body na vzorcích, které bylo před každým měřením nutné nalepit na vzorek. Stroji bylo poté nutné definovat oblast nalepených bodů, ze které vycházel výpočet prodloužení vzorků.



Obr. 24 Trhací stroj SHIMADZU AGS-50kN XD

11.2 Zkušební vzorky

Vzorků testovaných zkouškou čistým smykem bylo celkově šest. Testované vzorky byly ve tvaru obdélníku o šířce 240mm, výšce 80mm a tloušťce 1 mm.



Obr. 25 Zkušební vzorek pro zkoušku čistým smykem

11.3 Postup zkoušky

Zkušební vzorek byl upevněn do širokých čelistí stroje s ohledem na symetričnost upnutí, čímž se zajistilo rovnoměrné rozložení tahového zatížení na příčný průřez testovaného vzorku. Testované vzorky musely být pře začátkem zkoušky opatřeny body. Opatření bodů spočívalo v nalepení černých pásků, na kterých bylo natištěno pět bodů ve tvaru čtverců vedle sebe. Tyto pásky se nalepily na vzorek vždy dva, v určité vzdálenosti od sebe. Maximální prodloužení bylo na stroji nastaveno tak, že při prodloužení vzorku o 10 mm došlo k ukončení zkoušky. Celý průběh tahové zkoušky zaznamenával digitální fotoaparát z důvodu potřeby snímků pro provedení DIC analýzy. Sekvence snímání nastavená na fotoaparátu byla v rozmezí jedné sekundy.



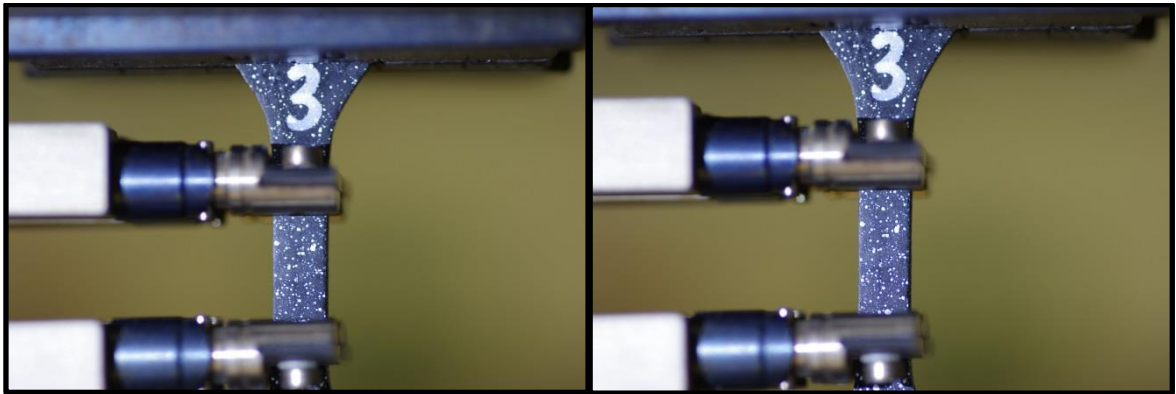
Obr. 26 Pásek s body potřebnými ke snímání deformace

12 PRÁCE V SOFTWARE MOIRE

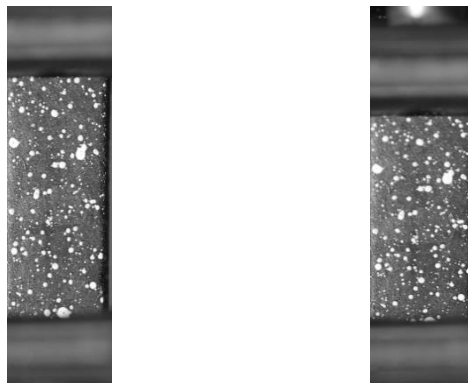
Snímky třetího vzorku podrobeného tahové zkoušce byly použity jako výchozí při testování softwaru Moire. Ze získaných snímků (Obr. 27) byl v příslušném programu vyříznut obdélník (Obr. 28), jehož výška a šířka odpovídaly rozměrům pracovní části zkušebního tělesa. Vyříznutý obdélník disponoval rozměry 400x1450 pixelů. Dále se provedly úpravy velikosti výřezu v pěti variantách a to konkrétně na 80% rozlišení (320x1160), 60% rozlišení (240x870), 40% rozlišení (160x580) a 20% rozlišení (80x290).

U každé varianty velikosti rozlišení snímků byly rovněž provedeny úpravy týkající se jasu a kontrastu. V případě jasu byly jako extrémní určeny hodnoty -80 a 50. Variant týkajících se jasu bylo celkově pět a to konkrétně -80, -48, -15, 18, 50. Extrémní určené pro kontrast byly 20 a 100, které byly provedeny ve variantách 20, 40, 60, 80, 100.

Každá varianta kombinace jas/kontrast byla použita u všech pěti variant rozlišení. Celkem bylo tedy metodou DIC analyzováno 125 dvojic snímků. Počet iterací při jednotlivých analýzách byl ponechán na základní hodnotě 30 iterací. Předmětem testování bylo zjistit míru vykreslení deformace v pixelech, která se následně přepočítala na procenta.



Obr. 27 Testovaný vzorek před (vlevo) a po deformaci (vpravo)



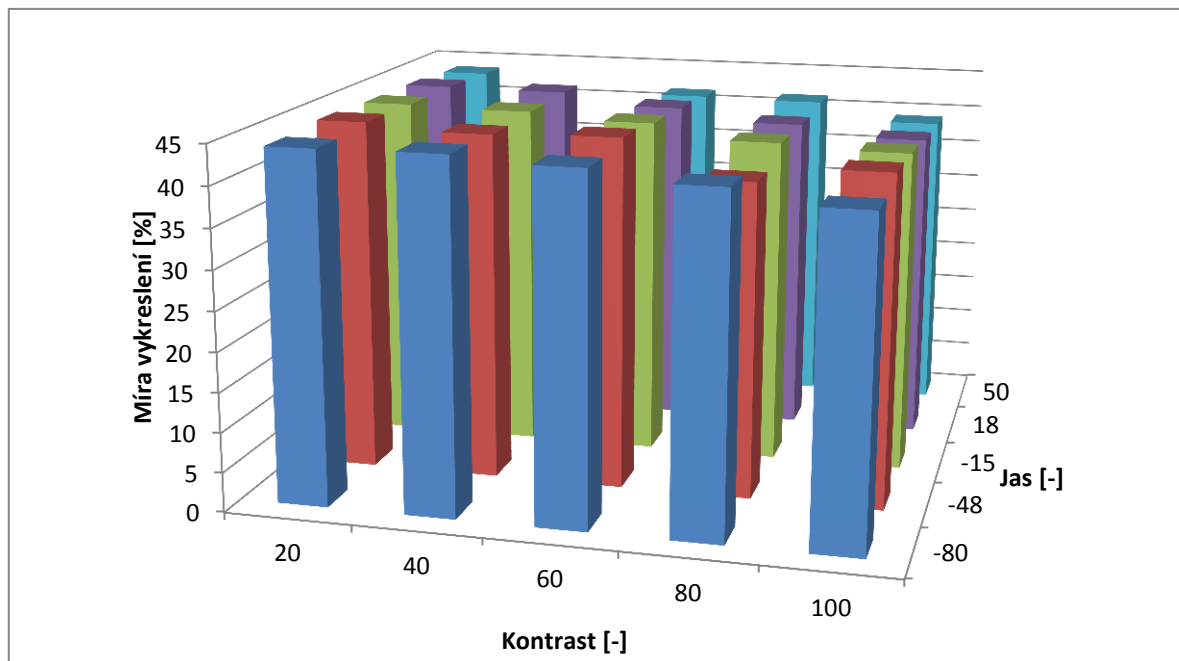
Obr. 28 Výřezy pro DIC analýzu

12.1 Výsledky DIC analýz při 20% rozlišení

Výsledky míry vykreslení snímků deformovaných vzorků podrobených DIC analýze s rozlišením 80x290 pixelů jsou uvedeny v (Tab. 1). Z pětadvaceti variant snímků s různými variantami podílu jas/kontrast disponovalo čtyřicet výsledků nenulovou hodnotu. Nejvyšší míru vykreslení vykazovala varianta s hodnotami kontrastu 20 a jasu -48, a to konkrétně 44,47 %.

Tab. 1 Míra vykreslení při 20% rozlišení

Míra vykreslení [%]		Kontrast [-]				
		20	40	60	80	100
Jas [-]	-80	44,07	44,20	43,45	42,11	40,41
	-48	44,47	43,69	44,05	39,52	41,49
	-15	44,14	43,88	43,09	41,32	40,78
	18	44,05	43,93	42,46	40,93	39,59
	50	43,57	0,00	41,54	41,39	39,06



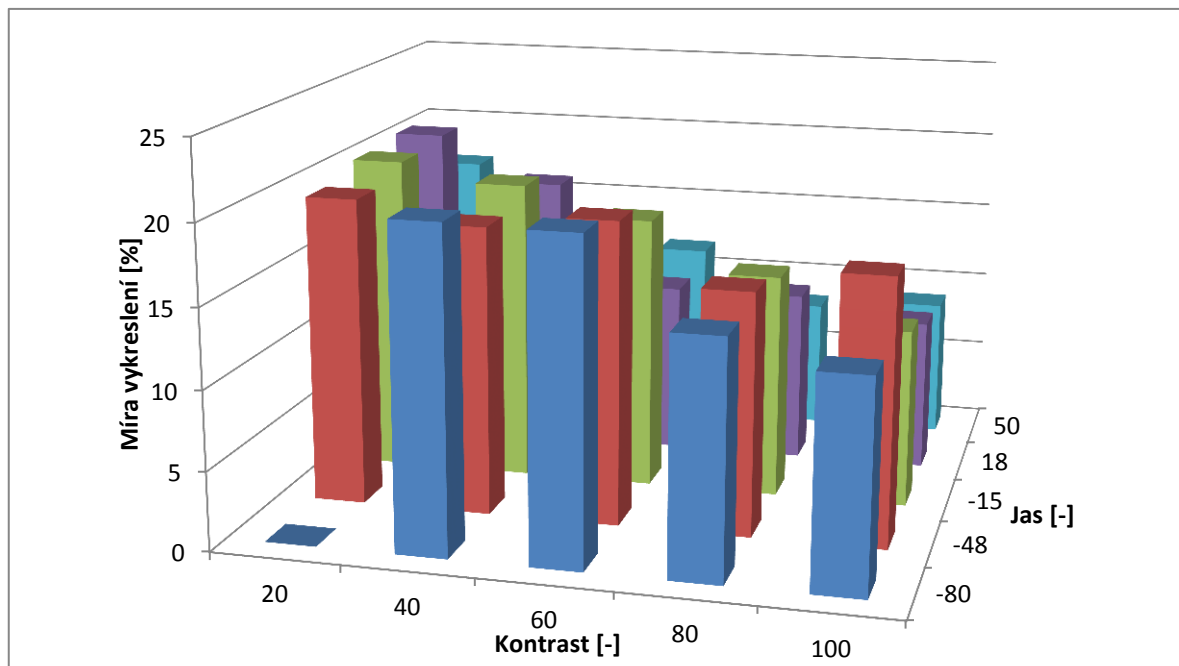
Obr. 29 Grafické znázornění míry vykreslení při 20% rozlišení

12.2 Výsledky DIC analýz při 40% rozlišení

Výsledky míry vykreslení snímků deformovaných vzorků podrobených DIC analýze s rozlišením 160x580 pixelů jsou uvedeny v (Tab. 2). Z pětadvaceti variant snímků s různými variantami podílu jas/kontrast disponovalo čtyřicet výsledků nenulovou hodnotu. Nejvyšší míru vykreslení vykazovala varianta s hodnotami kontrastu 20 a jasu 18, a to konkrétně 20,65 %.

Tab. 2 Míra vykreslení při 40% rozlišení

Míra vykreslení [%]		Kontrast [-]				
		20	40	60	80	100
Jas [-]	-80	0,00	20,32	20,17	14,78	13,13
	-48	19,52	18,26	19,12	15,31	16,79
	-15	20,33	19,20	17,37	14,23	11,31
	18	20,65	17,67	10,98	11,01	9,67
	50	17,16	9,53	11,76	8,30	8,89



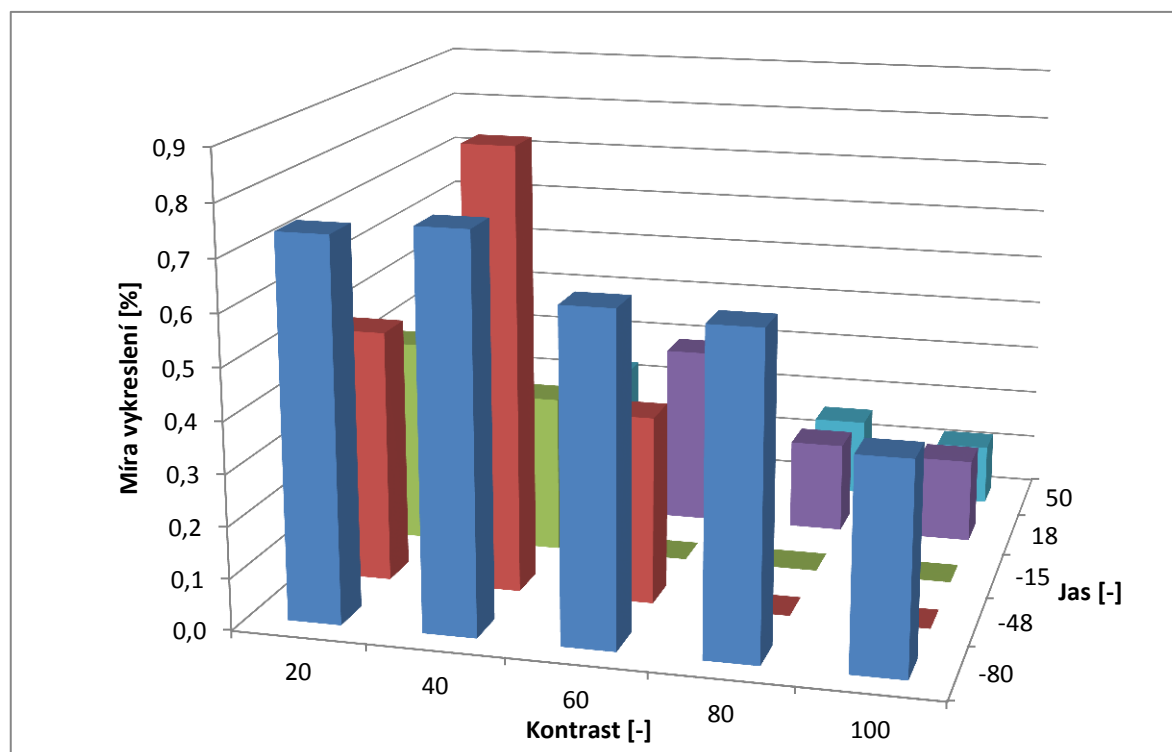
Obr. 30 Grafické znázornění míry vykreslení při 40% rozlišení

12.3 Výsledky DIC analýz při 60% rozlišení

Výsledky míry vykreslení snímků deformovaných vzorků podrobených DIC analýze s rozlišením 240x870 pixelů jsou uvedeny v (Tab. 3). Z pětadvaceti variant snímků s různými variantami podílu jas/kontrast disponovalo dvacet výsledků nenulovou hodnotu. Nejvyšší míru vykreslení vykazovala varianta s hodnotami kontrastu 40 a jasu -48, a to konkrétně 0,86 %.

Tab. 3 Míra vykreslení při 60% rozlišení

Míra vykreslení [%]		Kontrast [-]				
		20	40	60	80	100
Jas [-]	-80	0,74	0,76	0,64	0,62	0,40
	-48	0,49	0,86	0,36	0,00	0,00
	-15	0,40	0,31	0,00	0,00	0,00
	18	0,31	0,20	0,36	0,18	0,17
	50	0,19	0,23	0,17	0,16	0,12



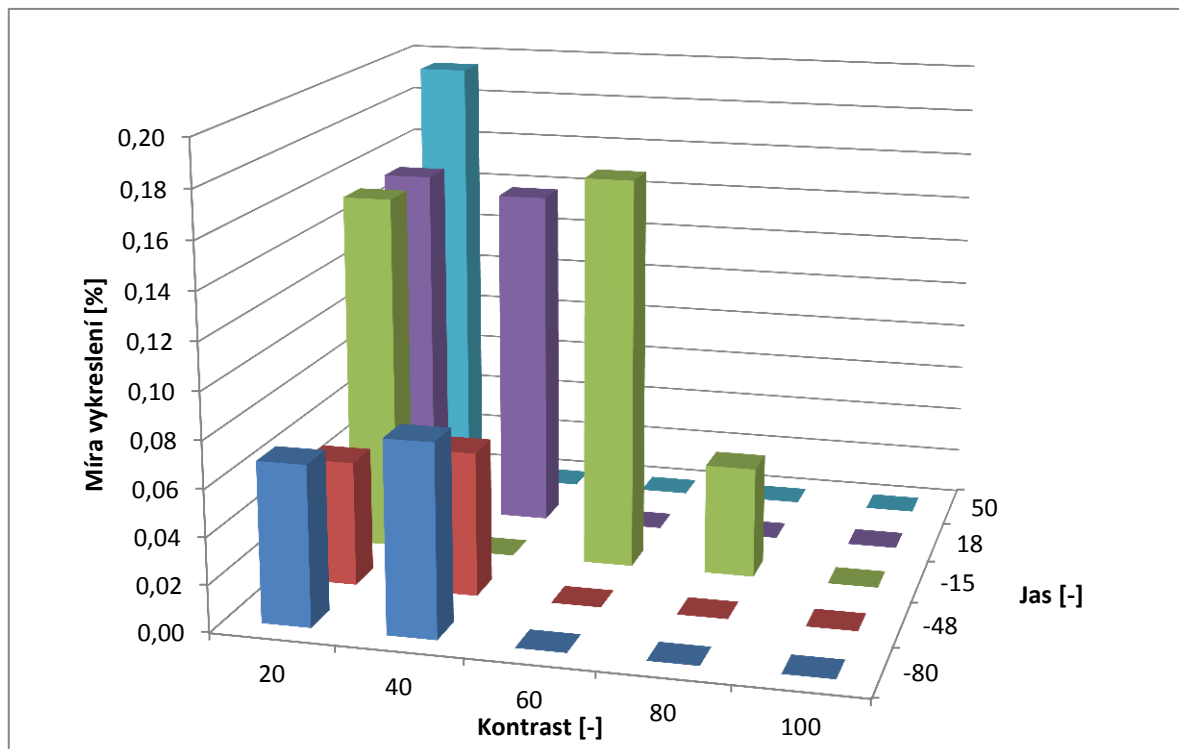
Obr. 31 Grafické znázornění míry vykreslení při 60% rozlišení

12.4 Výsledky DIC analýz při 80% rozlišení

Výsledky míry vykreslení snímků deformovaných vzorků podrobených DIC analýze s rozlišením 320x1160 pixelů jsou uvedeny v (Tab. 4). Z pětadvaceti variant snímků s různými variantami podílu jas/kontrast disponovalo deset výsledků nenulovou hodnotu. Nejvyšší míru vykreslení vykazovala varianta s hodnotami kontrastu 20 a jasu 50, a to konkrétně 0,19 %.

Tab. 4 Míra vykreslení při 80% rozlišení

Míra vykreslení [%]		Kontrast [-]				
		20	40	60	80	100
Jas [-]	-80	0,07	0,08	0,00	0,00	0,00
	-48	0,05	0,06	0,00	0,00	0,00
	-15	0,15	0,00	0,17	0,05	0,00
	18	0,15	0,15	0,00	0,00	0,00
	50	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00



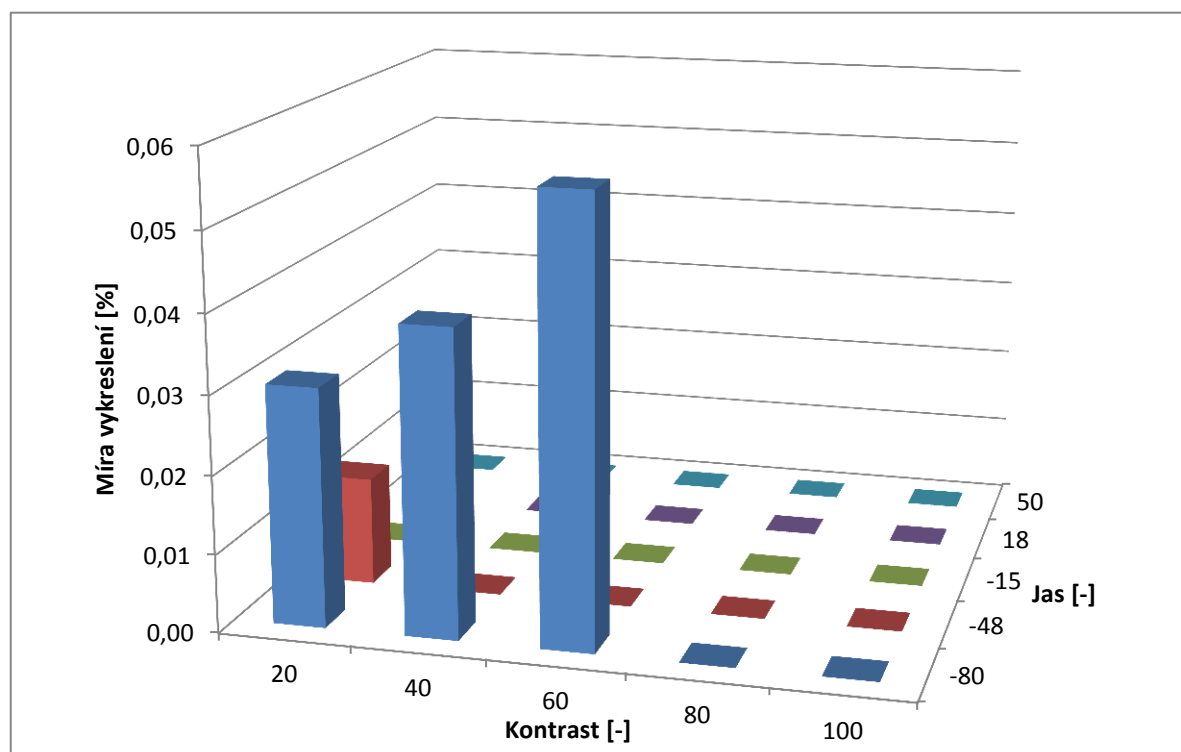
Obr. 32 Grafické znázornění míry vykreslení při 80% rozlišení

12.5 Výsledky DIC analýz při 100% rozlišení

Výsledky míry vykreslení snímků deformovaných vzorků podrobených DIC analýze s rozlišením 400x1450 pixelů jsou uvedeny v (Tab. 5). Z pětadvaceti variant snímků s různými variantami podílu jas/kontrast disponovaly nenulovou hodnotou pouze čtyři. Nejvyšší míru vykreslení vykazovala varianta s hodnotami kontrastu 60 a jasu -80, a to konkrétně 0,06 %.

Tab. 5 Míra vykreslení při 100% rozlišení

Míra vykreslení [%]		Kontrast [-]				
		20	40	60	80	100
Jas [-]	-80	0,03	0,04	0,06	0,00	0,00
	-48	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	-15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



Obr. 33 Grafické znázornění míry vykreslení při 100% rozlišení

13 DIC ANALÝZY PRO ZKOUŠKU TAHEM

DIC analýza byla prováděna celkem u šesti vzorků nasnímaných při zkoušce tahem. Jako výchozí snímky pro analýzu byly použity vždy první snímek před začátkem tahové zkoušky a snímek při maximálním zatížení. Hodnota nastavená jako maximální zatížení byla nastavena přibližně na 10 % prodloužení pracovní části vzorku. Ze snímků byl vždy udělán výřez pracovní části daného vzorku o jednotné velikosti snímků 380x750 pixelů.

Snímky byly zpracovány do pětadvaceti variant s různými hodnotami jasu a kontrastu. U každé z variant byla provedena DIC analýza, při které se zjišťovala míra vykreslení v procentech. U variant s nejvyššími hodnotami míry vykreslení byl proveden výpočet poměrných deformací v podélném i příčném směru. U některých vzorků bylo procento míry vykreslení nedostačující a tak musely být použity snímky s nižším rozlišením.

Dále již bylo pracováno pouze s variantami snímků vykazujícími nejvyšší míru vykreslení. Zjišťovaly se spodní hranice počtu iterací, při kterých byla míra vykreslení nenulová a maximální hodnota iterací, při nichž už nedocházelo k výrazné změně závislosti míry vykreslení na počtu iterací.

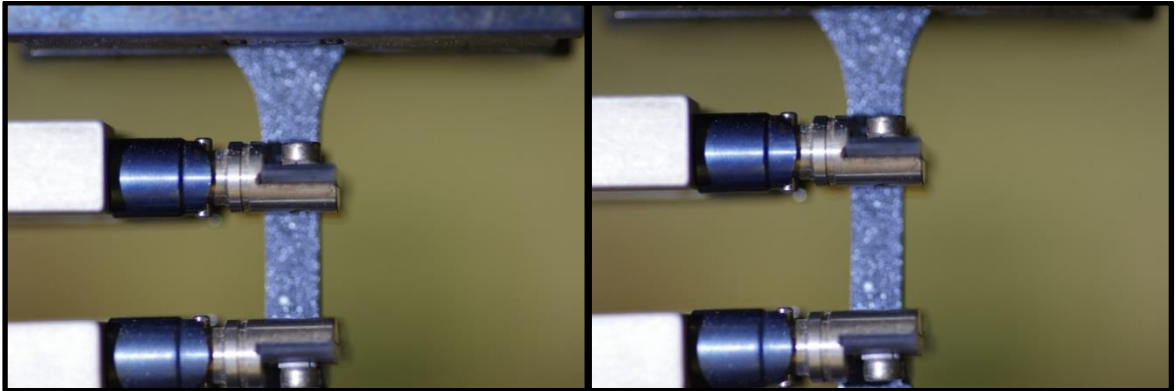
U výsledků poměrných deformací jak v příčném, tak v podélném směru se vždy vynechaly extrémní hodnoty, čehož se docílilo vybráním regionu, ve kterém nebyly tyto hodnoty zahrnuty. Z hodnot obsažených v tomto regionu byl vypočten průměr s příslušnou směrodatnou odchylkou.

Všechna získaná data byla pečlivě zaznamenávána a sestavena do přehledných tabulek.

V tabulkách byly kromě výsledků DIC analýz zahrnuty také reálné hodnoty podélných poměrných deformací, naměřených extenzometrem trhacího stroje a hodnoty poissonových čísel vypočtených podle vztahu (1).

13.1 Vzorek 1

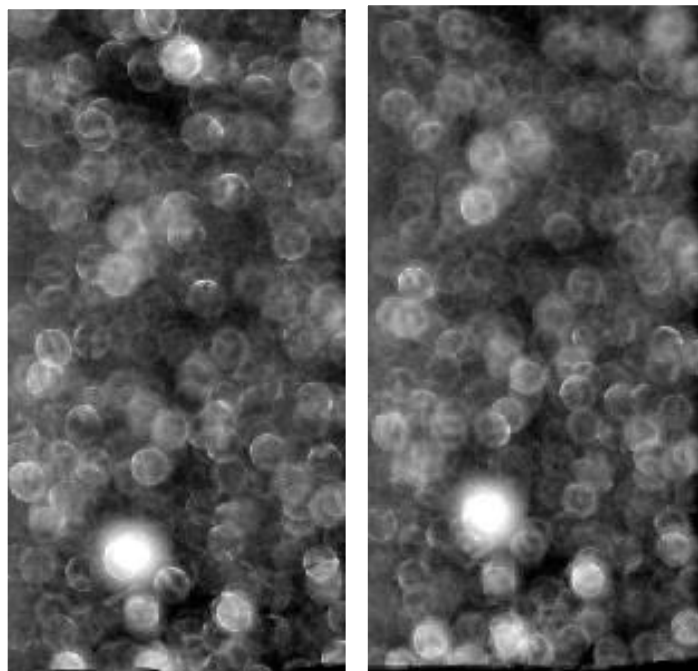
13.1.1 Snímky tahové zkoušky



Obr. 34 Snímky tahové zkoušky 1. vzorku před (vlevo) a po deformaci (vpravo)

13.1.2 Výřezy snímků

Nejvyšší možné rozlišení pro dostačující míru vykreslení bylo u prvního vzorku 152x300 pixelů, tedy 40% původního. Snímky v tomto rozlišení byly podrobeny DIC analýze v celkem 25 variantách kombinací jas/kontrast. Nejvyšší míry vykreslení dosahovala varianta s hodnotami kontrastu 60 a jasu -48, se kterou bylo dále pracováno.



Obr. 35 Výřezy 1. vzorku pro DIC analýzu u zkoušky tahem

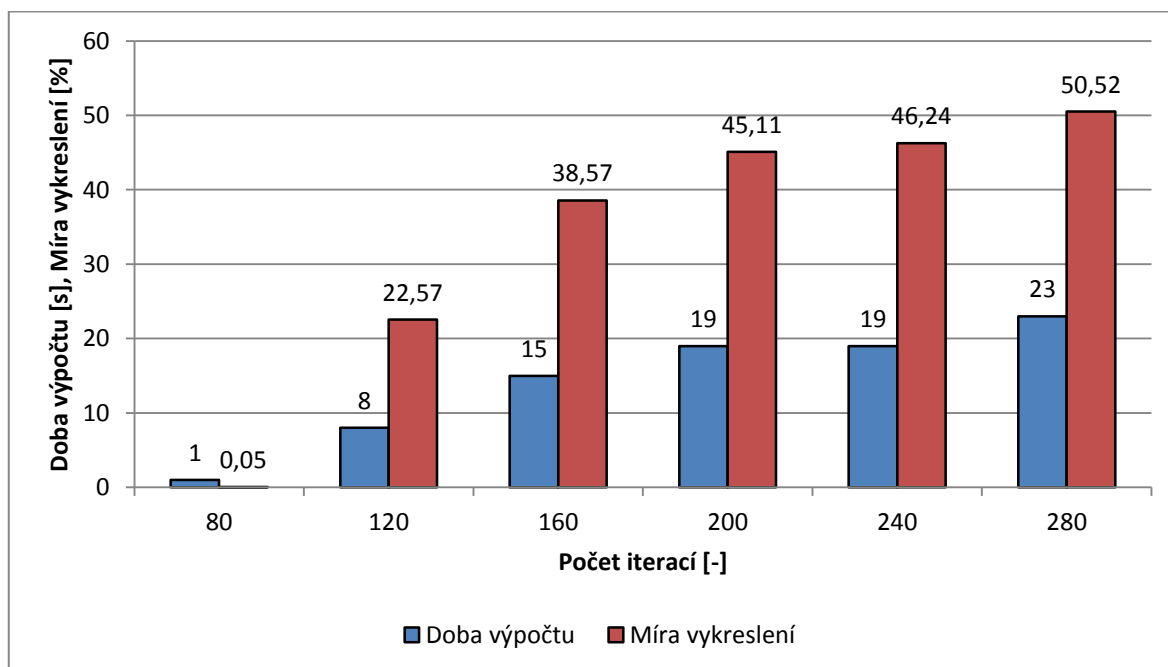
13.1.3 Výsledky analýzy

Spodní hranice počtu iterací, při které analýza vykazovala nenulovou hodnotu míry vykreslení, byla pro první vzorek stanovena na 80 iterací. Hodnota maximálního počtu iterací, kdy již nedocházelo k výrazné změně závislosti míry vykreslení na počtu iterací, byla stanovena na 280 iterací. Data z DIC analýzy, získaná při šesti různých variantách počtu iterací jsou uvedena v Tab. 6.

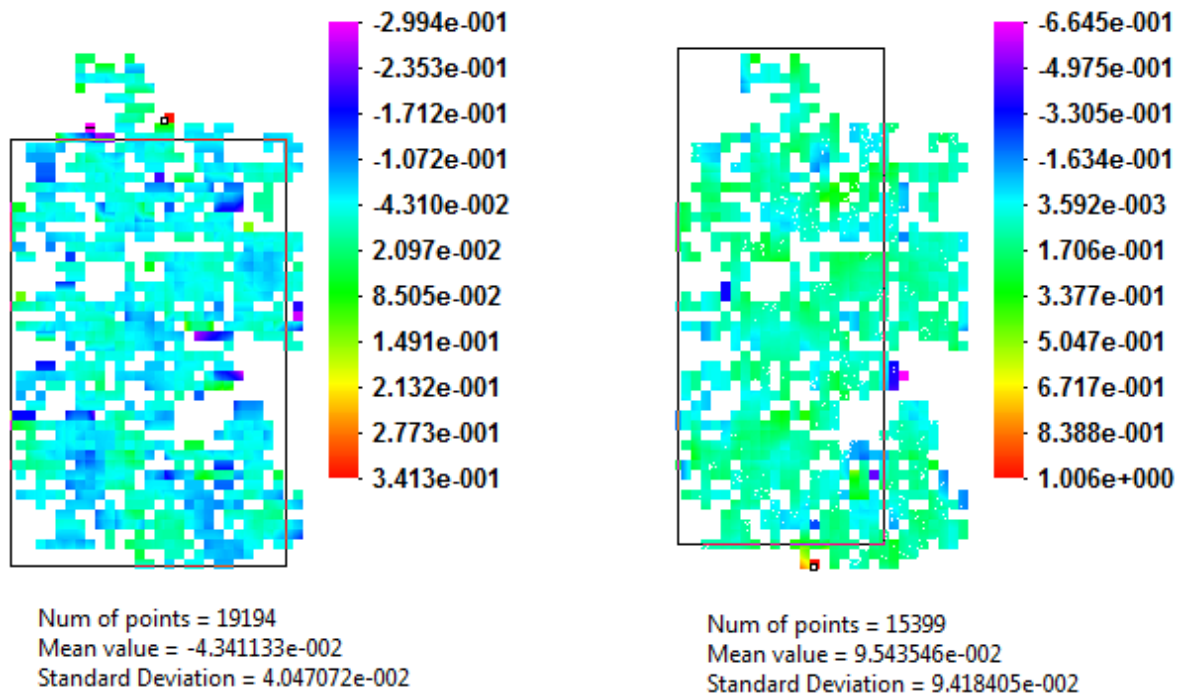
Tab. 6 Přehled výsledků pro 1. vzorek při zkoušce tahem

Počet iterací [-]	80	120	160	200	240	280
Doba výpočtu [s]	1	8	15	19	19	23
Míra vykreslení [%]	0,05	22,57	38,57	45,11	46,24	50,52
Příčná poměrná deformace [%]	5,19	3,84	4,37	4,37	4,34	4,3
Směrodatná odchylka [-]	$2 \cdot 10^{-8}$	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04
Podélná poměrná deformace [%]	7,17	8,96	9,15	9,52	9,54	9,34
Směrodatná odchylka [-]	0	0,102	0,09	0,09	0,09	0,09
Poissonovo číslo [-]	0,72	0,43	0,48	0,46	0,45	0,46
Změřená podélná deformace [%]	9,9					

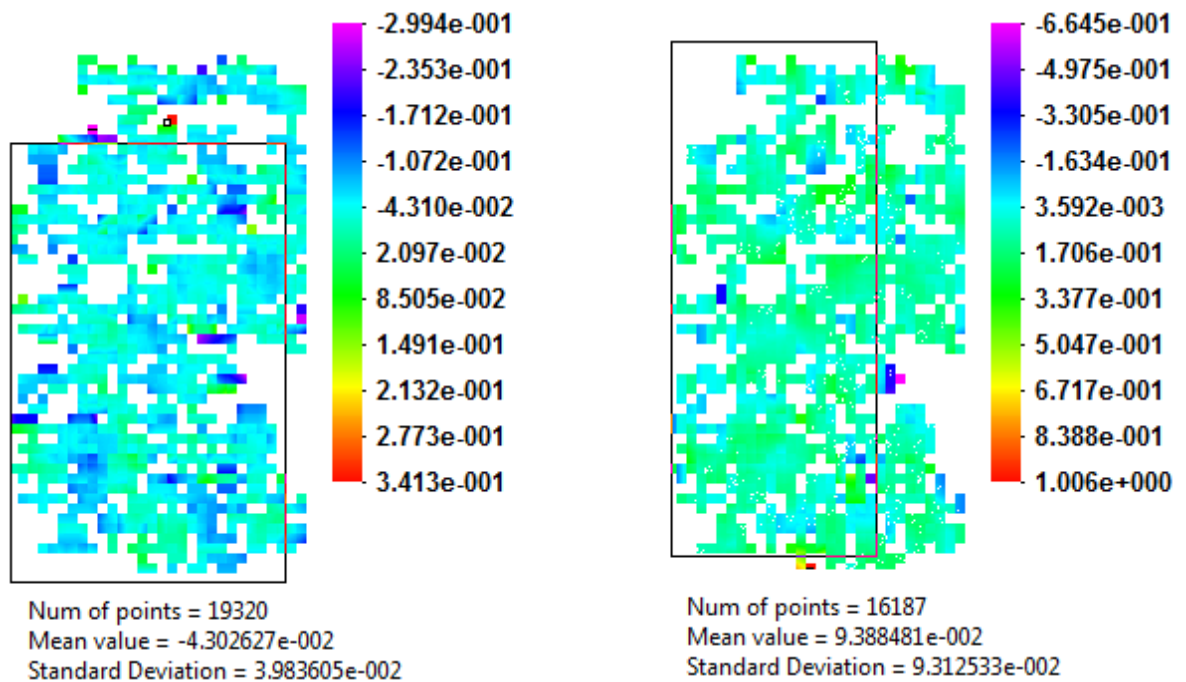
13.1.4 Grafické znázornění získaných dat



Obr. 36 Závislost míry vykreslení a doby výpočtu na počtu iterací u 1. vzorku při zkoušce tahem



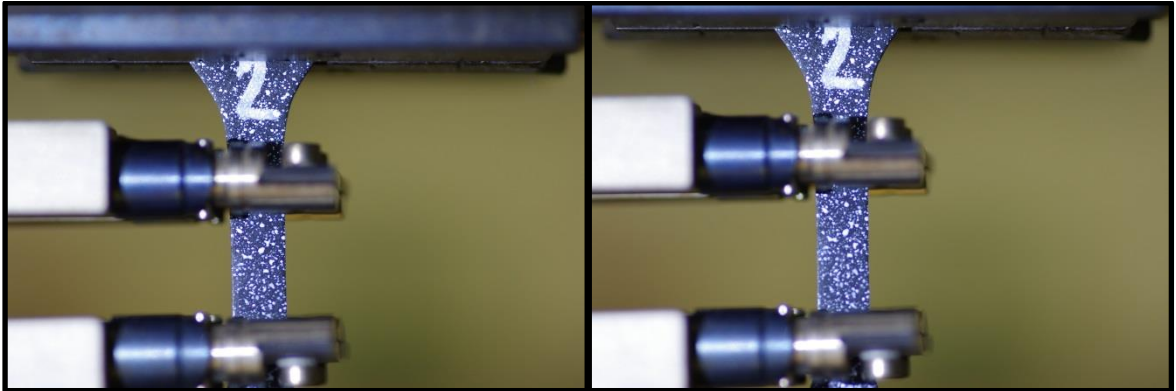
Obr. 37 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 1.vzorku při 240 iteracích u zkoušky tahem



Obr. 38 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 1.vzorku při 280 iteracích u zkoušky tahem

13.2 Vzorek 2

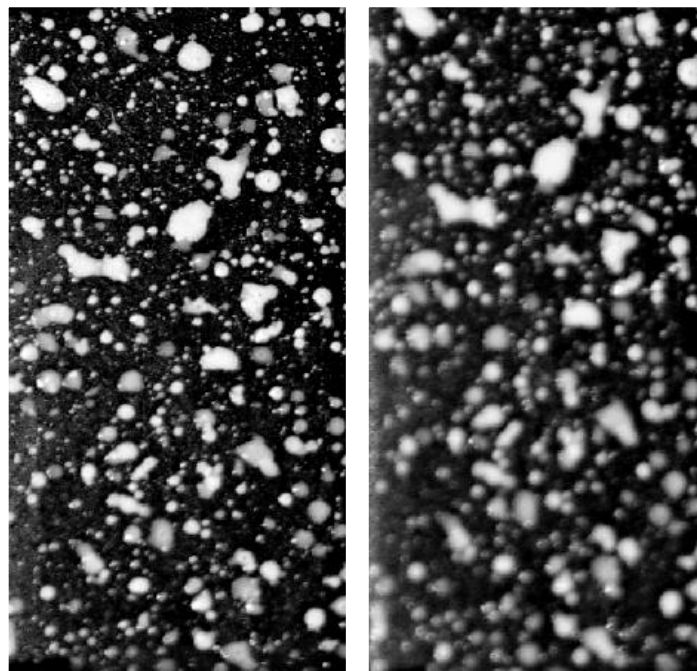
13.2.1 Snímky tahové zkoušky



Obr. 39 Snímky tahové zkoušky 2. vzorku před (vlevo) a po deformaci (vpravo)

13.2.2 Výřezy snímků

Nejvyšší možné rozlišení pro dostačující míru vykreslení bylo u druhého vzorku 228x450 pixelů, tedy 60% původního. Snímky v tomto rozlišení byly podrobeny DIC analýze v celkem 25 variantách kombinací jas/kontrast. Nejvyšší míry vykreslení dosahovala varianta s hodnotami kontrastu 20 a jasu -48, se kterou bylo dále pracováno.



Obr. 40 Výřezy 2. vzorku pro DIC analýzu u zkoušky tahem

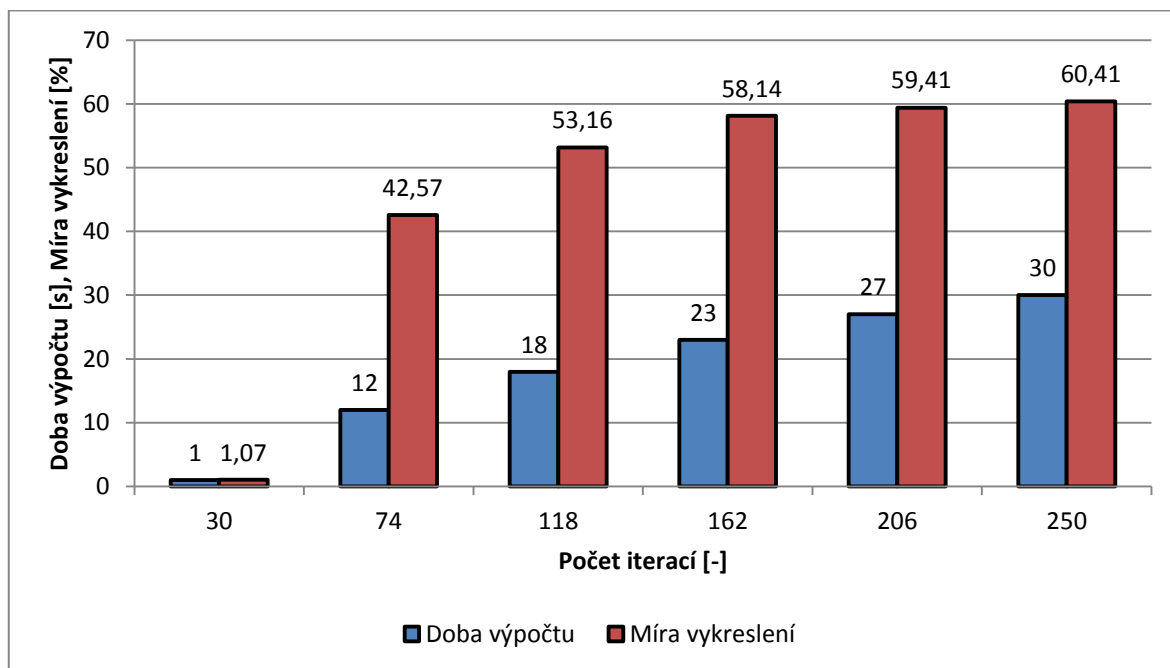
13.2.3 Výsledky analýzy

Spodní hranice počtu iterací, při které analýza vykazovala nenulovou hodnotu míry vykreslení, byla pro druhý vzorek stanovena na 30 iterací. Hodnota maximálního počtu iterací, kdy již nedocházelo k výrazné změně závislosti míry vykreslení na počtu iterací, byla stanovena na 250 iterací. Data z DIC analýzy, získaná při šesti různých variantách počtu iterací jsou uvedena v Tab. 7.

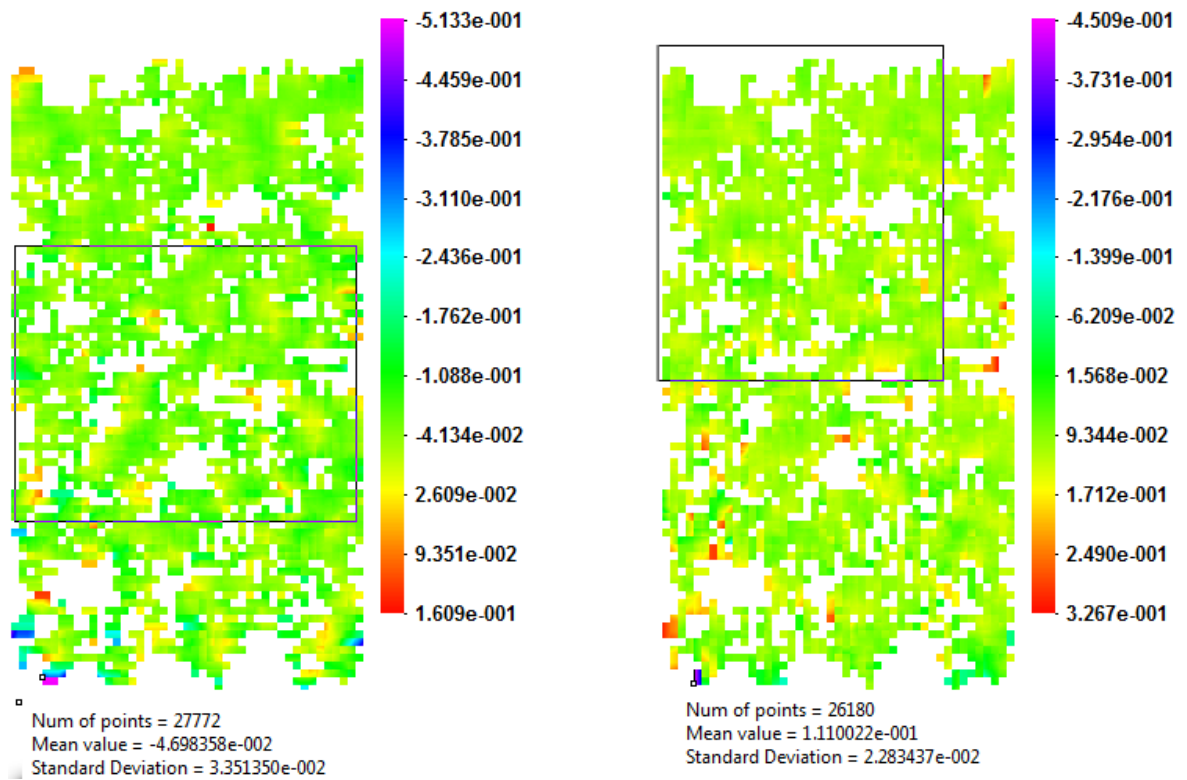
Tab. 7 Přehled výsledků pro 2. vzorek při zkoušce tahem

Počet iterací [-]	30	74	118	162	206	250
Doba výpočtu [s]	1	12	18	23	27	30
Míra vykreslení [%]	1,07	42,57	53,16	58,14	59,41	60,41
Příčná poměrná deformace [%]	2,35	4,43	4,59	4,54	4,69	4,63
Směrodatná odchylka [-]	0,013	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03
Podélná poměrná deformace [%]	11,16	11,26	11,35	11,12	11,1	11,12
Směrodatná odchylka [-]	0,009	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
Poissonovo číslo [-]	0,21	0,39	0,40	0,41	0,42	0,42
Změřená podélná deformace [%]	9,6					

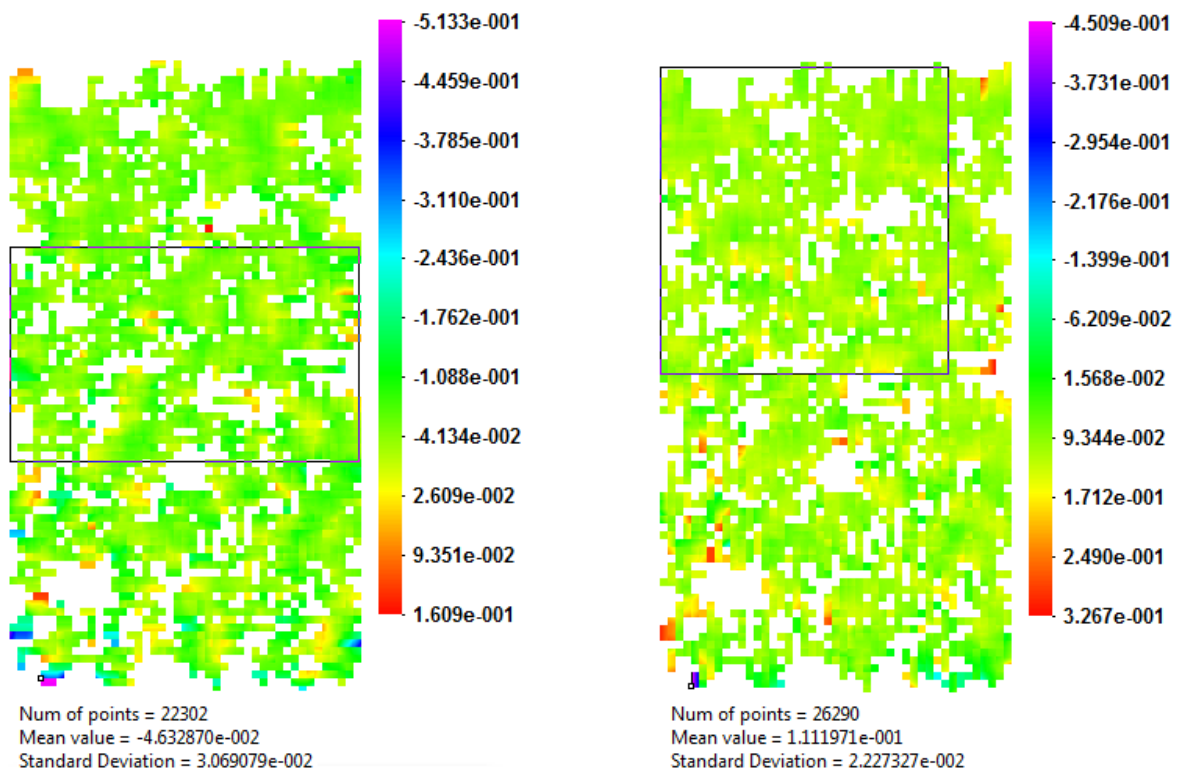
13.2.4 Grafické znázornění získaných dat



Obr. 41 Závislost míry vykreslení a doby výpočtu na počtu iterací u 2. vzorku při zkoušce tahem



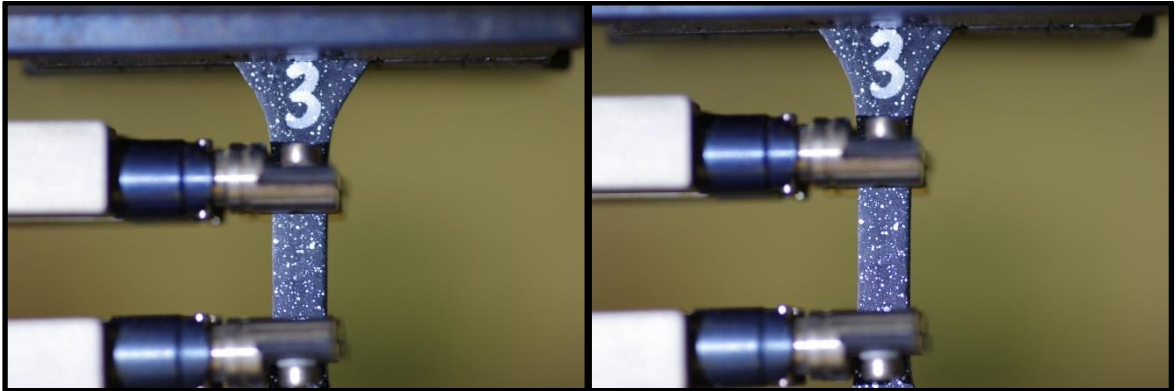
Obr. 42 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 2.vzorku při 206 iteracích u zkoušky tahem



Obr. 43 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 2.vzorku při 250 iteracích u zkoušky tahem

13.3 Vzorek 3

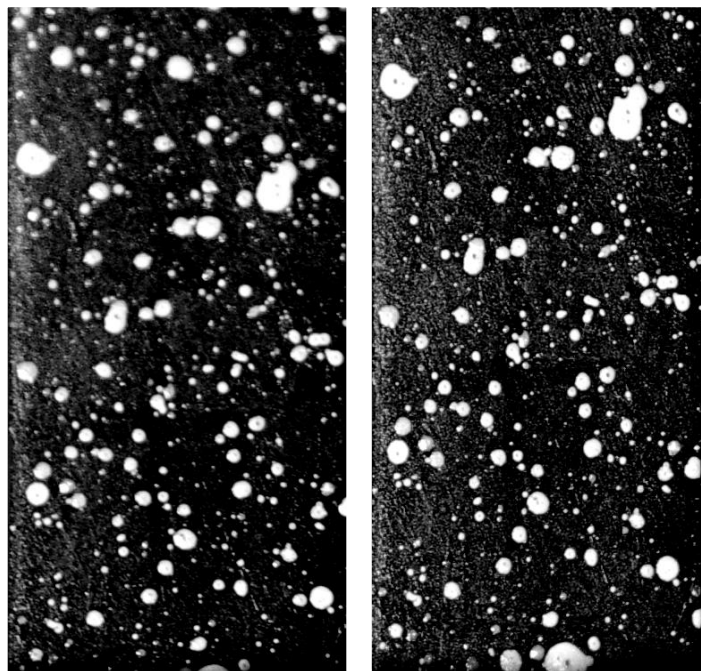
13.3.1 Snímky tahové zkoušky



Obr. 44 Snímky tahové zkoušky 3. vzorku před (vlevo) a po deformaci (vpravo)

13.3.2 Výřezy snímků

Míra vykreslení pro 3. vzorek byla dostačující i v plném rozlišení 380x750 pixelů. Snímky v tomto rozlišení byly podrobeny DIC analýze v celkem 25 variantách kombinací jas/kontrast. Nejvyšší míry vykreslení dosahovala varianta s hodnotami kontrastu 40 a jasu -80, se kterou bylo dále pracováno.



Obr. 45 Výřezy 3. vzorku pro DIC analýzu
u zkoušky tahem

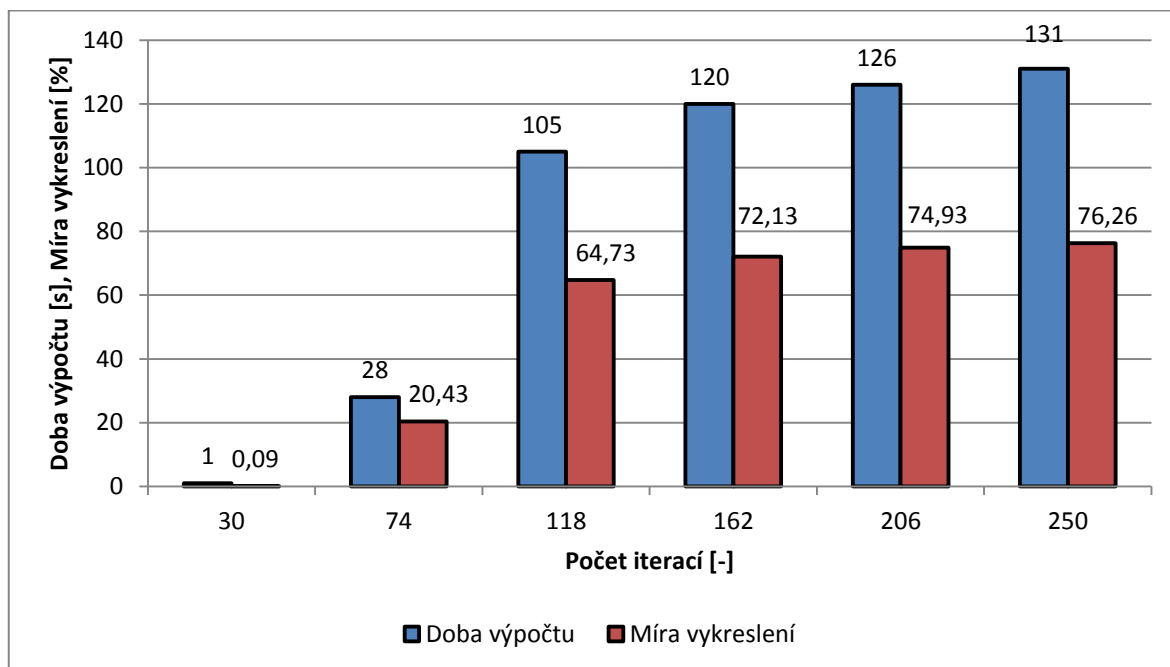
13.3.3 Výsledky analýzy

Spodní hranice počtu iterací, při které analýza vykazovala nenulovou hodnotu míry vykreslení, byla pro třetí vzorek stanovena na 30 iterací. Hodnota maximálního počtu iterací, kdy již nedocházelo k výrazné změně závislosti míry vykreslení na počtu iterací, byla stanovena na 250 iterací. Data z DIC analýzy, získaná při šesti různých variantách počtu iterací jsou uvedena v Tab. 8.

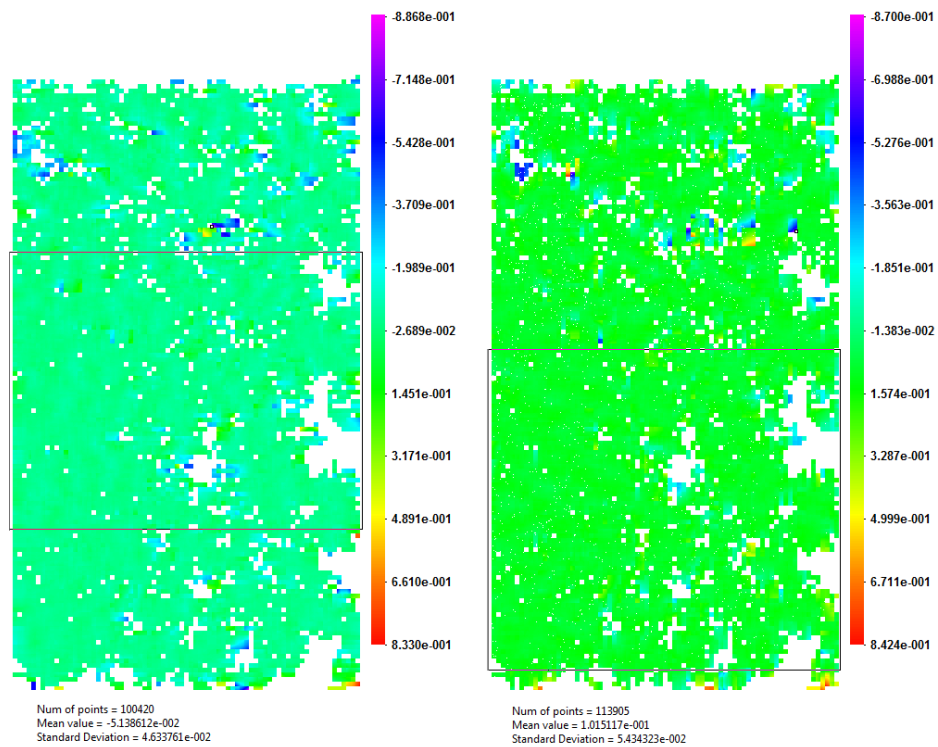
Tab. 8 Přehled výsledků pro 3. Vzorek při zkoušce tahem

Počet iterací [-]	30	74	118	162	206	250
Doba výpočtu [s]	1	28	105	120	126	131
Míra vykreslení [%]	0,09	20,43	64,73	72,13	74,93	76,26
Příčná poměrná deformace [%]	6,69	4,9	4,99	4,86	5,13	5,16
Směrodatná odchylka [-]	0,012	0,02	0,03	0,02	0,05	0,04
Podélná poměrná deformace [%]	8,74	10,61	10,34	10,2	10,15	10,16
Směrodatná odchylka [-]	0,009	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05
Poissonovo číslo [-]	0,77	0,46	0,48	0,48	0,51	0,51
Změřená podélná deformace [%]	9,8					

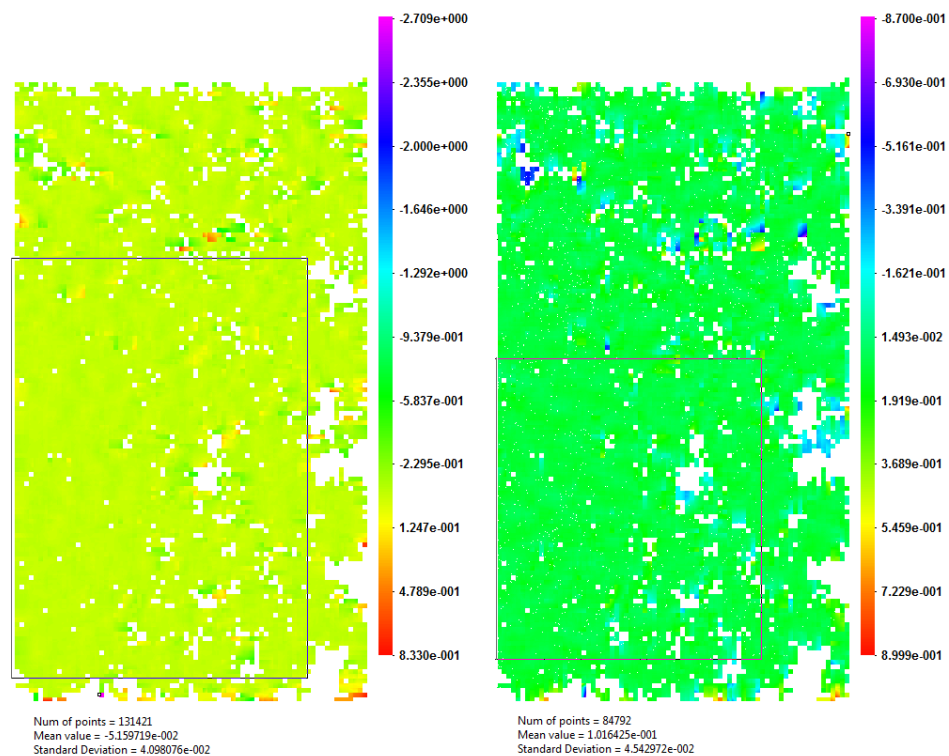
13.3.4 Grafické znázornění získaných dat



Obr. 46 Závislost míry vykreslení a doby výpočtu na počtu iterací u 3. vzorku při zkoušce tahem



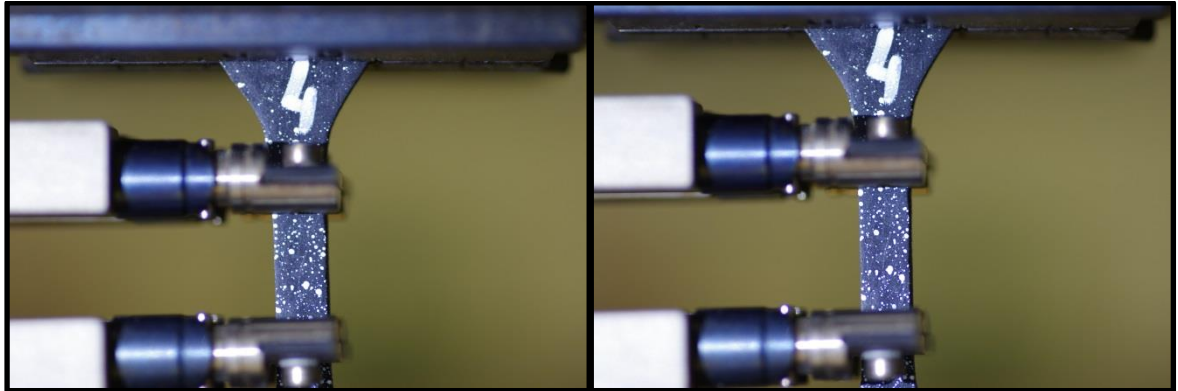
Obr. 47 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo)
 3.vzorku při 206 iteracích u zkoušky tahem



Obr. 48 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo)
 3.vzorku při 250 iteracích u zkoušky tahem

13.4 Vzorek 4

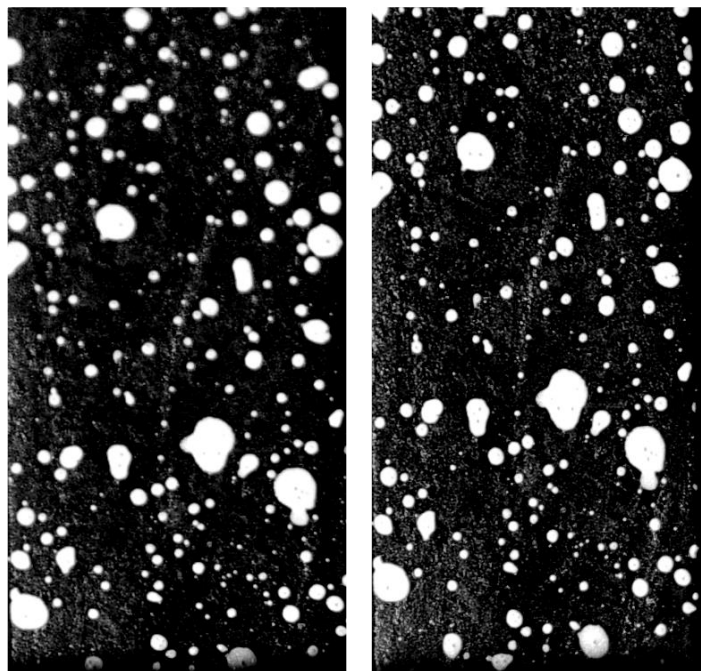
13.4.1 Snímky tahové zkoušky



Obr. 49 Snímky tahové zkoušky 4. vzorku před (vlevo) a po deformaci (vpravo)

13.4.2 Výřezy snímků

Míra vykreslení pro 4. vzorek byla dostačující i v plném rozlišení 380x750 pixelů. Snímky v tomto rozlišení byly podrobeny DIC analýze v celkem 25 variantách kombinací jas/kontrast. Nejvyšší míry vykreslení dosahovala varianta s hodnotami kontrastu 40 a jasu -80, se kterou bylo dále pracováno.



Obr. 50 Výřezy 4. vzorku pro DIC analýzu
u zkoušky tahem

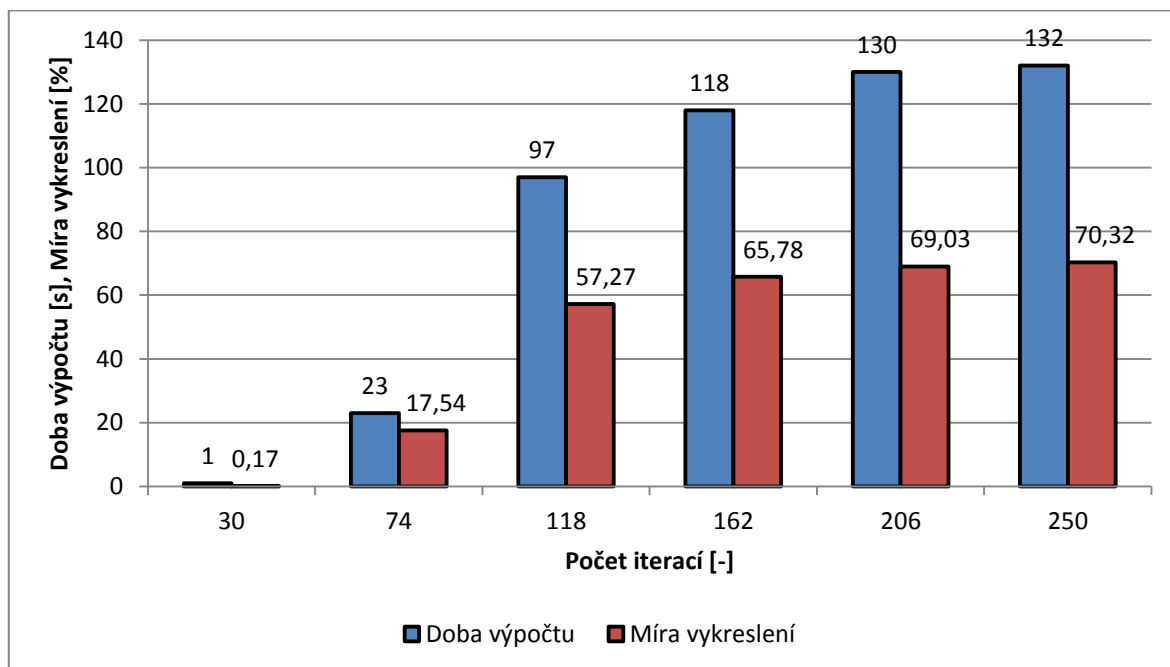
13.4.3 Výsledky analýzy

Spodní hranice počtu iterací, při které analýza vykazovala nenulovou hodnotu míry vykreslení, byla pro čtvrtý vzorek stanovena na 30 iterací. Hodnota maximálního počtu iterací, kdy již nedocházelo k výrazné změně závislosti míry vykreslení na počtu iterací, byla stanovena na 250 iterací. Data z DIC analýzy, získaná při šesti různých variantách počtu iterací jsou uvedena v Tab. 9.

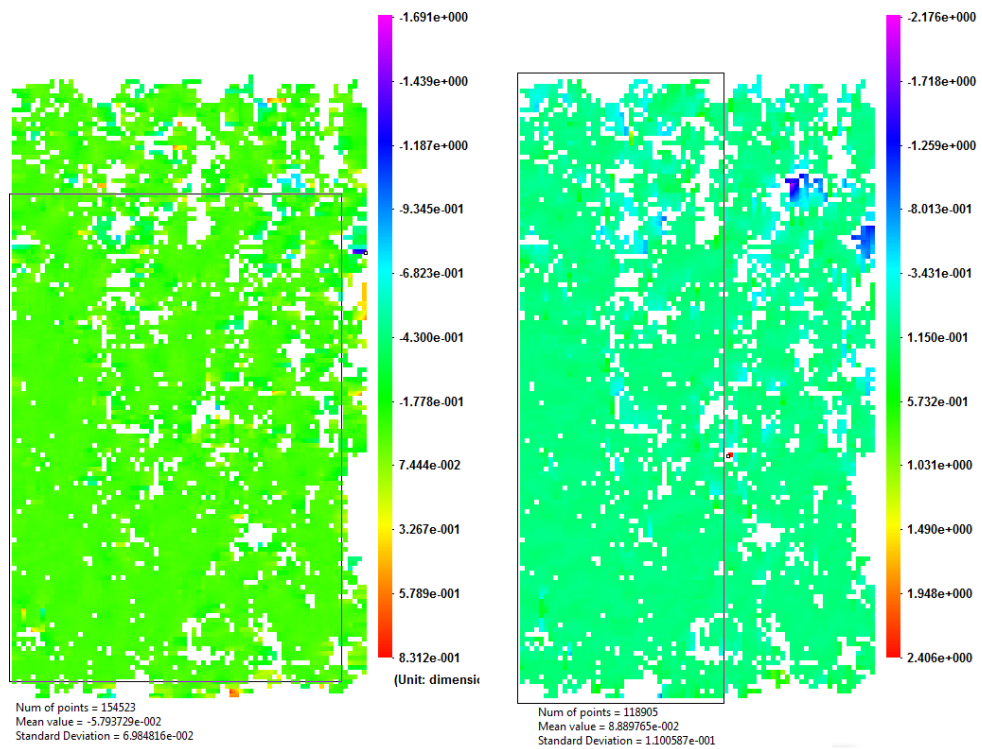
Tab. 9 Přehled výsledků pro 4. vzorek při zkoušce tahem

Počet iterací [-]	30	74	118	162	206	250
Doba výpočtu [s]	1	23	97	118	130	132
Míra vykreslení [%]	0,17	17,54	57,27	65,78	69,03	70,32
Příčná poměrná deformace [%]	6,07	4,91	5,24	5,32	5,79	6,28
Směrodatná odchylka [-]	0,009	0,02	0,05	0,07	0,07	0,09
Podélná poměrná deformace [%]	10,75	10,56	8,97	8,83	8,88	8,44
Směrodatná odchylka [-]	0,02	0,04	0,08	0,11	0,11	0,11
Poissonovo číslo [-]	0,56	0,46	0,58	0,60	0,65	0,74
Změřená podélná deformace [%]	10					

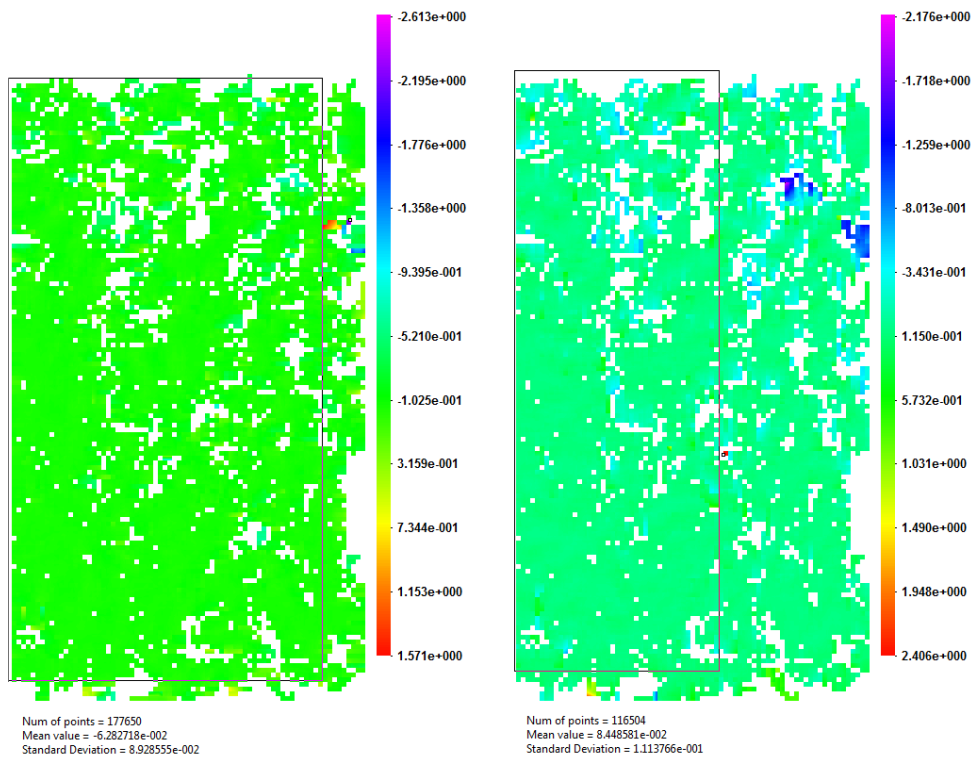
13.4.4 Grafické znázornění získaných dat



Obr. 51 Závislost míry vykreslení a doby výpočtu na počtu iterací u 4. vzorku při zkoušce tahem



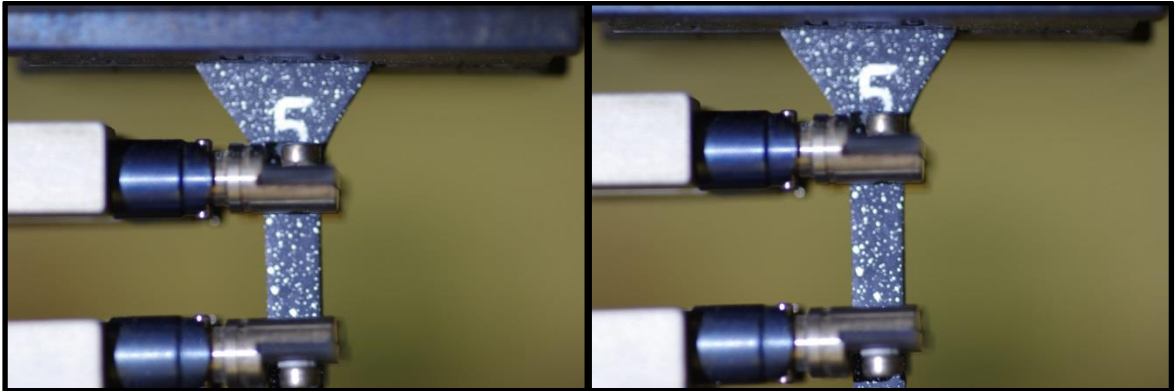
Obr. 52 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo)
 4.vzorku při 206 iteracích u zkoušky tahem



Obr. 53 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo)
 4.vzorku při 250 iteracích u zkoušky tahem

13.5 Vzorek 5

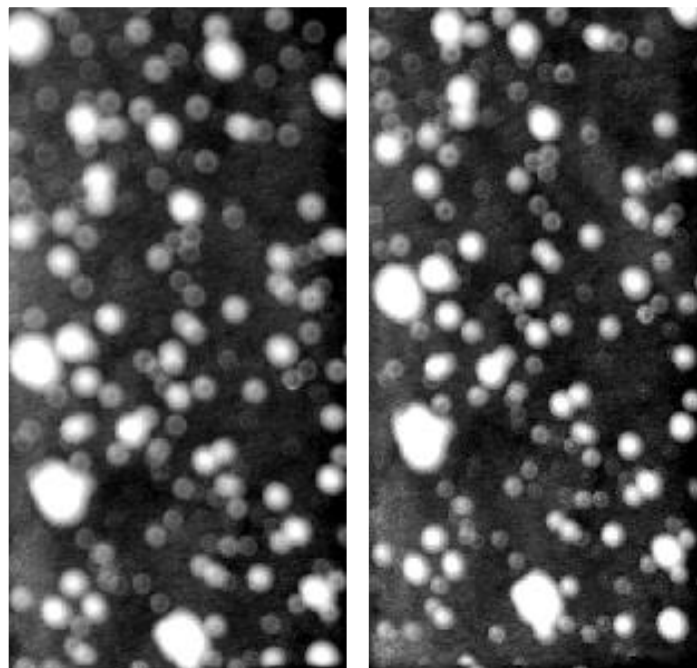
13.5.1 Snímky tahové zkoušky



Obr. 54 Snímky tahové zkoušky 5. vzorku před (vlevo) a po deformaci (vpravo)

13.5.2 Výřezy snímků

Nejvyšší možné rozlišení pro dostačující míru vykreslení bylo u pátého vzorku 152x300 pixelů, tedy 40% původního. Snímky v tomto rozlišení byly podrobeny DIC analýze v celkem 25 variantách kombinací jas/kontrast. Nejvyšší míry vykreslení dosahovala varianta s hodnotami kontrastu 40 a jasu -48, se kterou bylo dále pracováno.



Obr. 55 Výřezy 5. vzorku pro DIC analýzu u zkoušky tahem

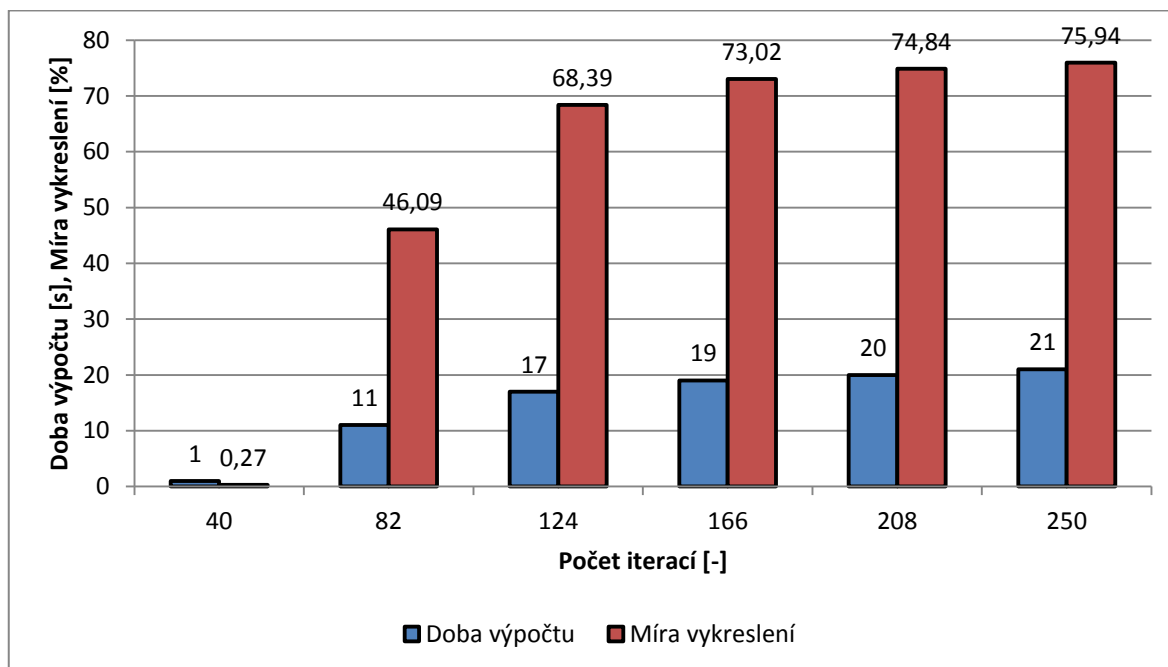
13.5.3 Výsledky analýzy

Spodní hranice počtu iterací, při které analýza vykazovala nenulovou hodnotu míry vykreslení, byla pro pátý vzorek stanovena na 40 iterací. Hodnota maximálního počtu iterací, kdy již nedocházelo k výrazné změně závislosti míry vykreslení na počtu iterací, byla stanovena na 250 iterací. Data z DIC analýzy, získaná při šesti různých variantách počtu iterací jsou uvedena v Tab. 10.

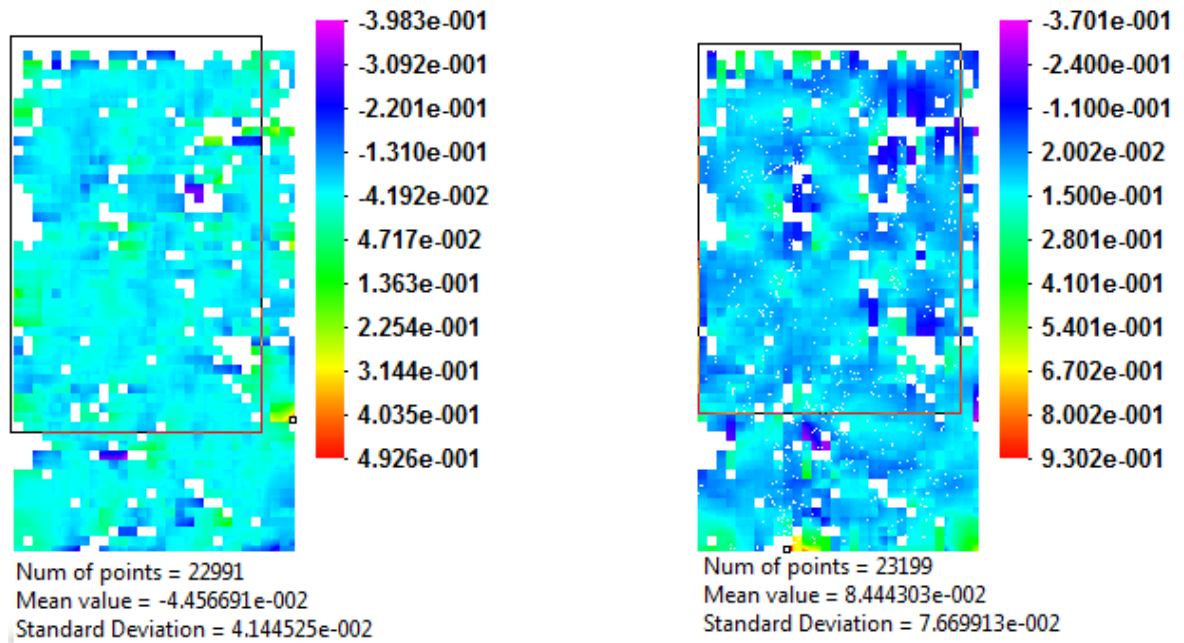
Tab. 10 Přehled výsledků pro 5. Vzorek při zkoušce tahem

Počet iterací [-]	40	82	124	166	208	250
Doba výpočtu [s]	1	11	17	19	20	21
Míra vykreslení [%]	0,27	46,09	68,39	73,02	74,84	75,94
Příčná poměrná deformace [%]	5,95	4,82	4,55	4,2	4,45	4,47
Směrodatná odchylka [-]	0,006	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04
Podélná poměrná deformace [%]	2,72	8,86	8,12	8,65	8,44	9,13
Směrodatná odchylka [-]	0,011	0,06	0,07	0,07	0,08	0,07
Poissonovo číslo [-]	2,18	0,54	0,56	0,49	0,53	0,49
Změřená podélná deformace [%]	9,9					

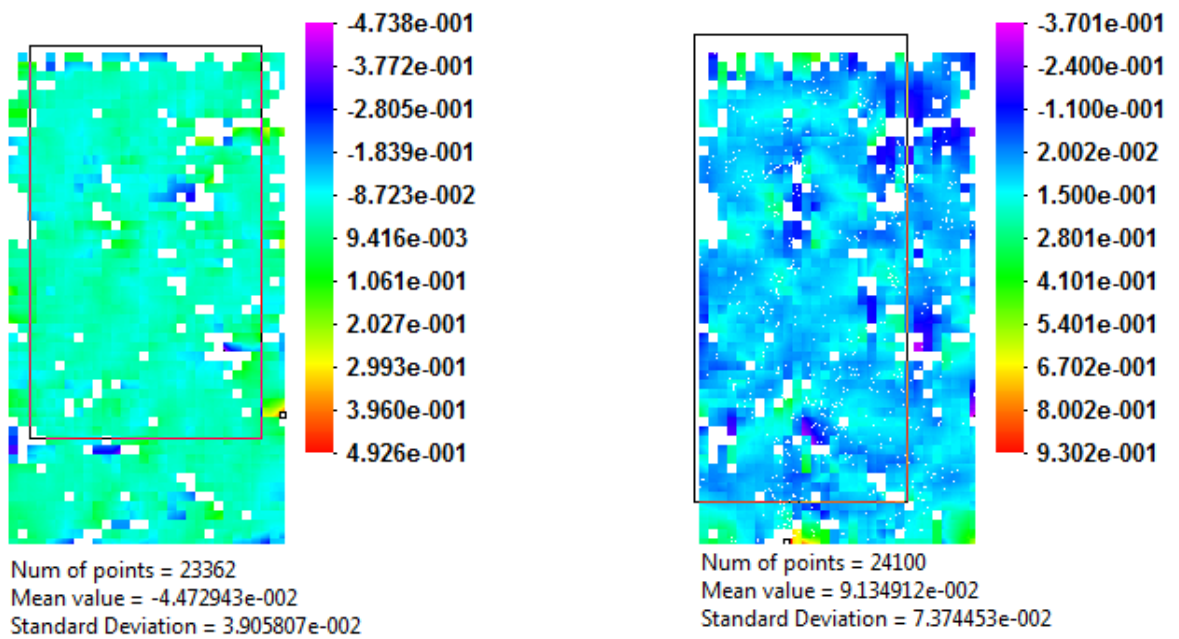
13.5.4 Grafické znázornění získaných dat



Obr. 56 Závislost míry vykreslení a doby výpočtu na počtu iterací u 5. vzorku při zkoušce tahem



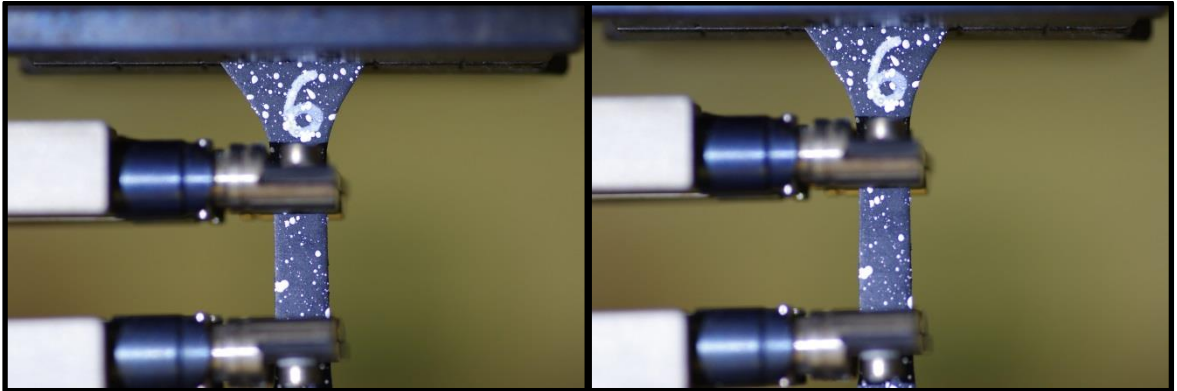
Obr. 57 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 5.vzorku při 206 iteracích u zkoušky tahem



Obr. 58 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 5.vzorku při 250 iteracích u zkoušky tahem

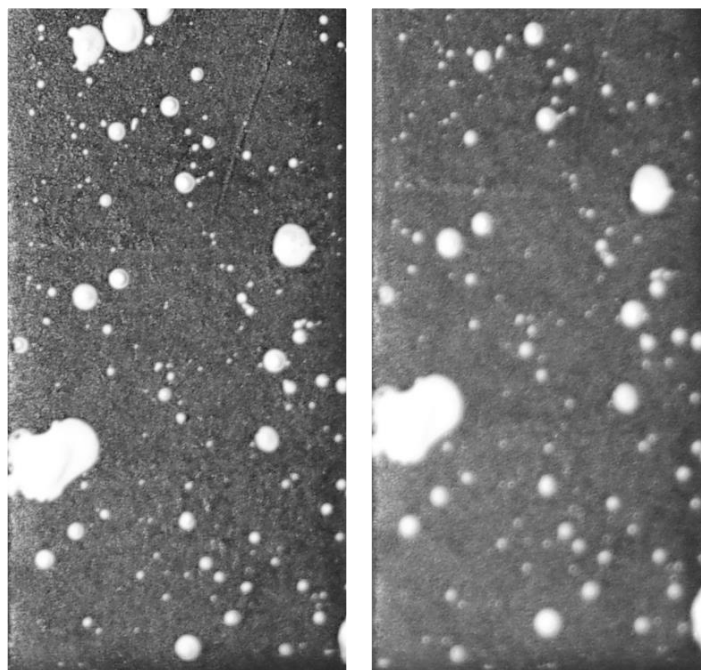
13.6 Vzorek 6

13.6.1 Snímky tahové zkoušky



Obr. 59 Snímky tahové zkoušky 6. vzorku před (vlevo) a po deformaci (vpravo)

13.6.2 Výřezy snímků



Obr. 60 Výřezy 6. vzorku pro DIC analýzu
u zkoušky tahem

13.6.3 Výsledky analýzy

U šestého vzorku se nepodařilo dosáhnout nenulové hodnoty míry vykreslení v žádné z variant kombinací jas/kontrast ani u jedné z pěti variant rozlišení. Je pravděpodobné, že to bylo zapříčiněno nedostatečným nástřikem.

14 DIC ANALÝZY PRO ZKOUŠKU ČISTÝM SMYKEM

DIC analýza byla prováděna celkem u šesti vzorků nasnímaných při zkoušce čistým smykem. Jako výchozí snímky pro analýzu byly použity vždy první snímek před začátkem tahové zkoušky a snímek při maximálním zatížení. Hodnota nastavená jako maximální zatížení byla nastavena přibližně na 10 mm prodloužení vzorku. Ze snímků byl vždy udělán čtvercový výřez z místa, které mělo nejlepší předpoklady pro co nejvyšší míru vykreslení. Jednotná velikost výřezů u jednotlivých snímků byla 570x570 pixelů.

Snímky byly zpracovány do pětadvaceti variant s různými hodnotami jasu a kontrastu. U každé z variant byla provedena DIC analýza, při které se zjišťovala míra vykreslení v procentech. U variant s nejvyššími hodnotami míry vykreslení byl proveden výpočet poměrných deformací v podélném i příčném směru. U některých vzorků bylo procento míry vykreslení nedostačující a tak musely být použity snímky s nižším rozlišením.

Dále již bylo pracováno pouze s variantami snímků vykazujícími nejvyšší míru vykreslení. Zjišťovaly se spodní hranice počtu iterací, při kterých byla míra vykreslení nenulová a maximální hodnota iterací, při nichž už nedocházelo k výrazné změně závislosti míry vykreslení na počtu iterací.

U výsledků poměrných deformací jak v příčném, tak v podélném směru se vždy vynechaly extrémní hodnoty, čehož se docílilo vybráním regionu, ve kterém nebyly tyto hodnoty zahrnuty. Z hodnot obsažených v tomto regionu byl vypočten průměr s příslušnou směrodatnou odchylkou.

Všechna získaná data byla pečlivě zaznamenávána a sestavena do přehledných tabulek. V tabulkách byly kromě výsledků DIC analýz zahrnuty také reálné hodnoty podélných poměrných deformací, naměřených extenzometrem trhacího stroje.

14.1 Vzorek 1

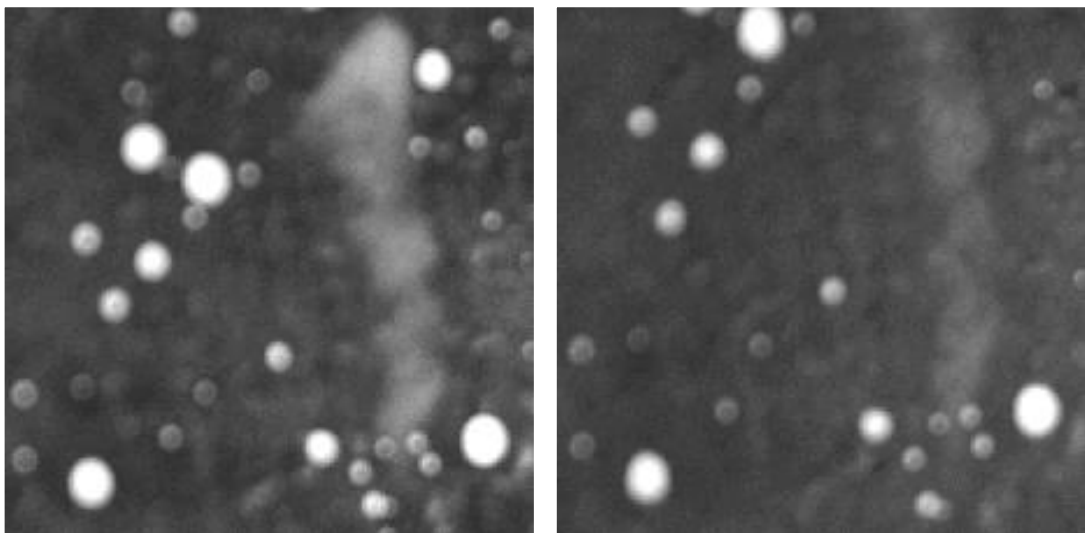
14.1.1 Snímky zkoušky čistým smykem



Obr. 61 Snímky smykové zkoušky 1. vzorku před (vlevo) a po deformaci (vpravo)

14.1.2 Výřezy snímků

Nejvyšší možné rozlišení pro dostačující míru vykreslení bylo u prvního vzorku 228x228 pixelů, tedy 40% původního. Snímky v tomto rozlišení byly podrobeny DIC analýze v celkem 25 variantách kombinací jas/kontrast. Nejvyšší míry vykreslení dosahovala varianta s hodnotami kontrastu 40 a jasu 18, se kterou bylo dále pracováno.



Obr. 62 Výřezy 1. vzorku pro DIC analýzu u zkoušky smykem

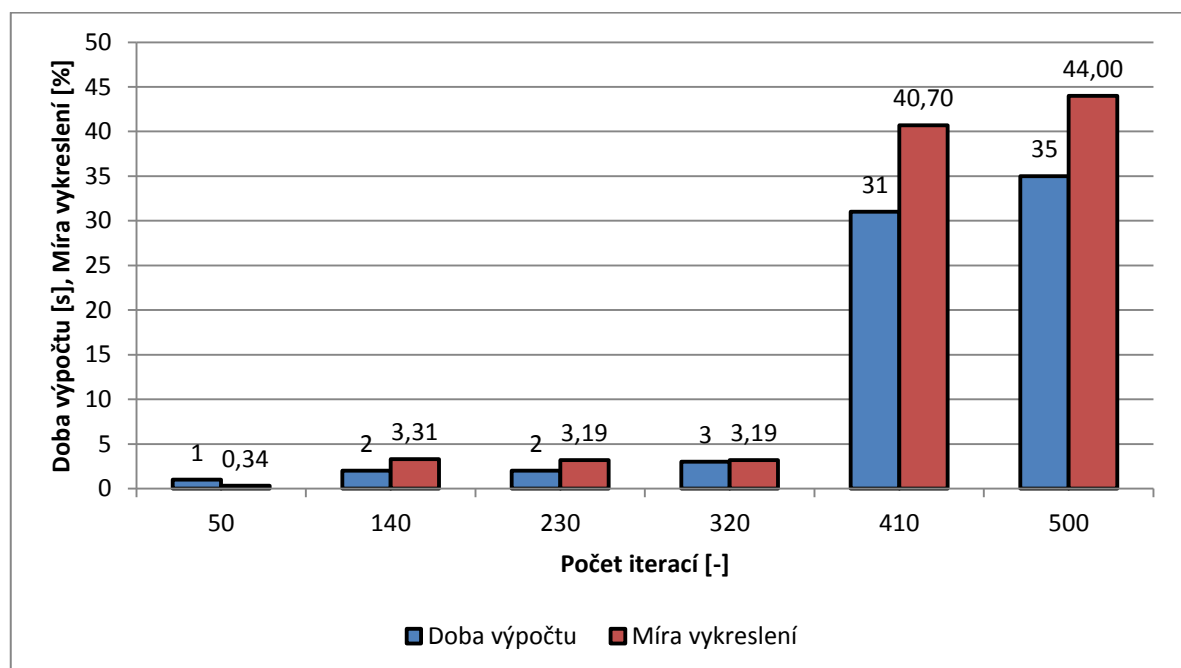
14.1.3 Výsledky analýzy

Spodní hranice počtu iterací, při které analýza vykazovala nenulovou hodnotu míry vykreslení, byla pro první vzorek stanovena na 50 iterací. Hodnota maximálního počtu iterací, kdy již nedocházelo k výrazné změně závislosti míry vykreslení na počtu iterací, byla stanovena na 500 iterací. Data z DIC analýzy, získaná při šesti různých variantách počtu iterací jsou uvedena v Tab. 11.

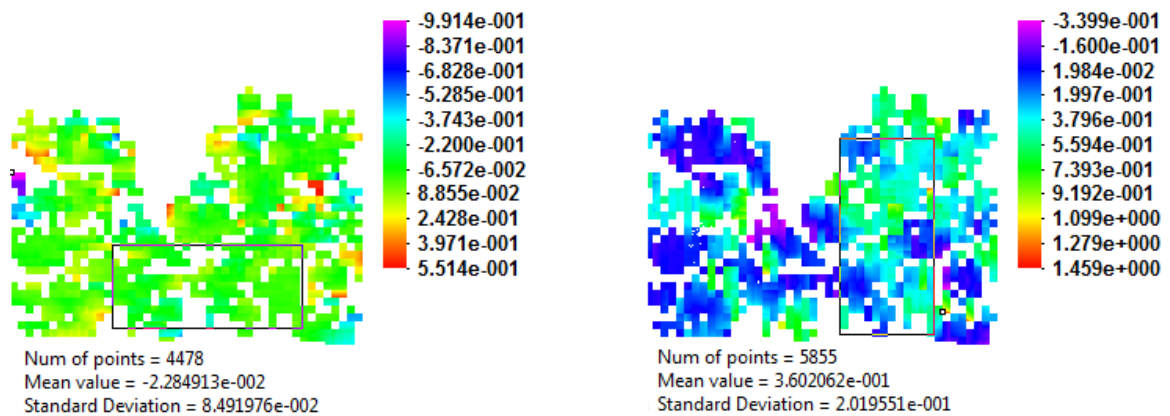
Tab. 11 Přehled výsledků pro 1. vzorek při zkoušce smykem

Počet iterací [-]	50	140	230	320	410	500
Doba výpočtu [s]	1	2	2	3	31	35
Míra vykreslení [%]	0,34	3,31	3,19	3,19	40,70	44,00
Příčná poměrná deformace [%]	4,04	9,69	6,96	6,58	2,28	1,23
Směrodatná odchylka [-]	0,02	0,09	0,07	0,07	0,08	0,07
Podélná poměrná deformace [%]	0,33	18,1	16,51	16,29	36	32,01
Směrodatná odchylka [-]	0,0008	0,2	0,11	0,11	0,2	0,2
Změřená podélná deformace [%]	48,19					

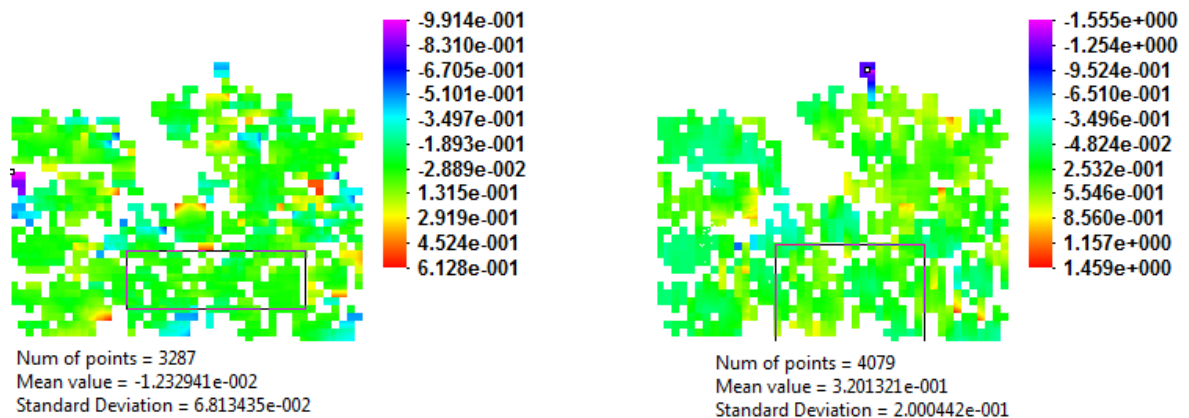
14.1.4 Grafické znázornění získaných dat



Obr. 63 Závislost míry vykreslení a doby výpočtu na počtu iterací u 1. vzorku při zkoušce smykem



Obr. 64 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 1.vzorku při 410 iteracích u zkoušky smykem



Obr. 65 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 1.vzorku při 500 iteracích u zkoušky smykem

14.2 Vzorek 2

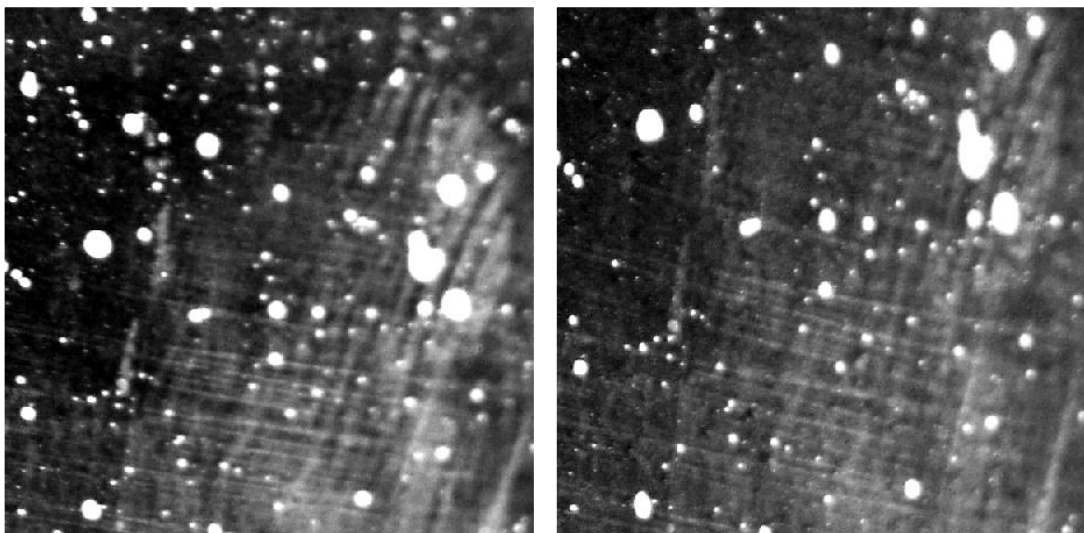
14.2.1 Snímky zkoušky čistým smykem



Obr. 66 Snímky smykové zkoušky 2. vzorku před (vlevo) a po deformaci (vpravo)

14.2.2 Výřezy snímků

Nejvyšší možné rozlišení pro dostačující míru vykreslení bylo u prvního vzorku 456x456 pixelů, tedy 80% původního. Snímky v tomto rozlišení byly podrobeny DIC analýze v celkem 25 variantách kombinací jas/kontrast. Nejvyšší míry vykreslení dosahovala varianta s hodnotami kontrastu 100 a jasu 18, se kterou bylo dále pracováno.



Obr. 67 Výřezy 2. vzorku pro DIC analýzu u zkoušky smykem

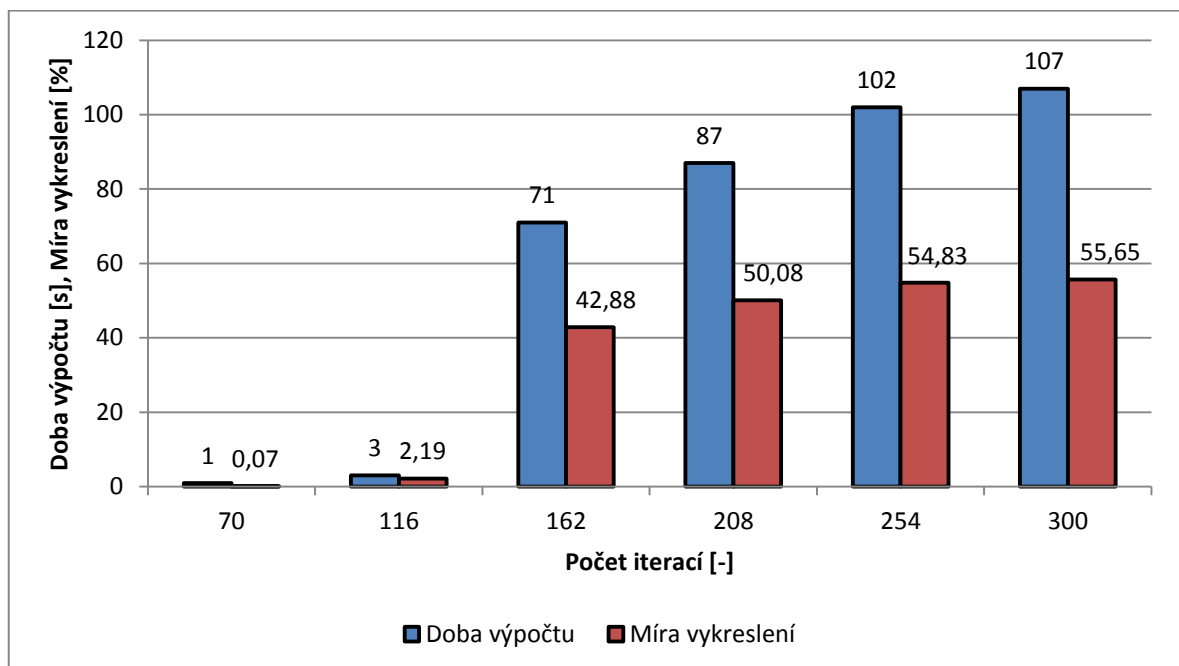
14.2.3 Výsledky analýzy

Spodní hranice počtu iterací, při které analýza vykazovala nenulovou hodnotu míry vykreslení, byla pro druhý vzorek stanovena na 70 iterací. Hodnota maximálního počtu iterací, kdy již nedocházelo k výrazné změně závislosti míry vykreslení na počtu iterací, byla stanovena na 300 iterací. Data z DIC analýzy, získaná při šesti různých variantách počtu iterací jsou uvedena v Tab. 12.

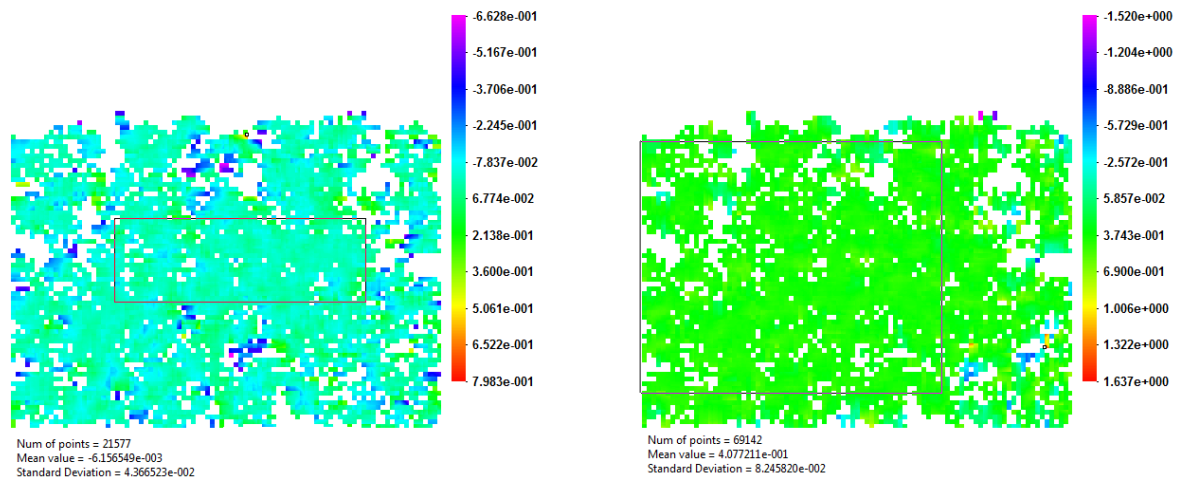
Tab. 12 Přehled výsledků pro 2. vzorek při zkoušce smykem

Počet iterací [-]	70	116	162	208	254	300
Doba výpočtu [s]	1	3	71	87	102	107
Míra vykreslení [%]	0,07	2,19	42,88	50,08	54,83	55,65
Příčná poměrná deformace [%]	1,97	0,32	1,42	0,65	0,62	0,64
Směrodatná odchylka [-]	0,03	0,07	0,04	0,04	0,04	0,04
Podélná poměrná deformace [%]	33,55	39,92	41,2	41,61	40,77	41,58
Směrodatná odchylka [-]	0,03	0,04	0,06	0,06	0,08	0,07
Změřená podélná deformace [%]	41,73					

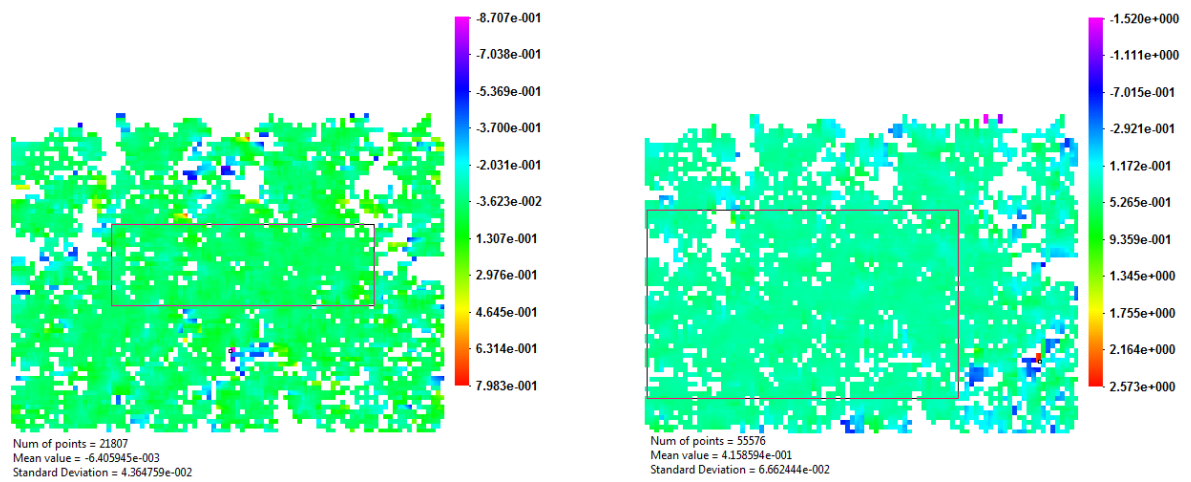
14.2.4 Grafické znázornění získaných dat



Obr. 68 Závislost míry vykreslení a doby výpočtu na počtu iterací 2. vzorku při zkoušce smykem



Obr. 69 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 2.vzorku při 254 iteracích u zkoušky smykem



Obr. 70 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 2.vzorku při 300 iteracích u zkoušky smykem

14.3 Vzorek 3

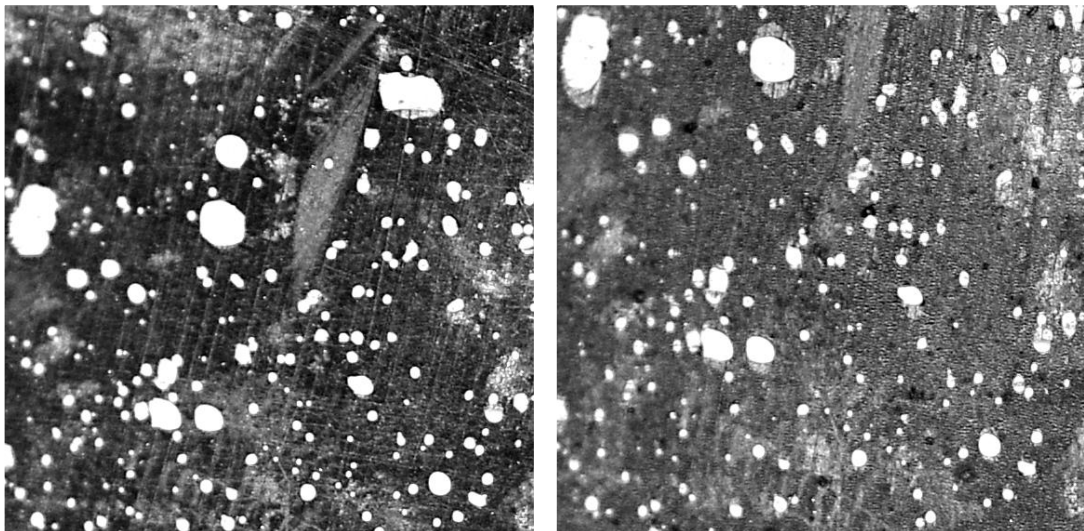
14.3.1 Snímky zkoušky čistým smykem



Obr. 71 Snímky smykové zkoušky 3. vzorku před (vlevo) a po deformaci (vpravo)

14.3.2 Výřezy snímků

Míra vykreslení pro 3. vzorek byla dostačující i v plném rozlišení 570x570 pixelů. Snímky v tomto rozlišení byly podrobeny DIC analýze v celkem 25 variantách kombinací jas/kontrast. Nejvyšší míry vykreslení dosahovala varianta s hodnotami kontrastu 60 a jasu 18, se kterou bylo dále pracováno.



Obr. 72 Výřezy 3. vzorku pro DIC analýzu u zkoušky smykem

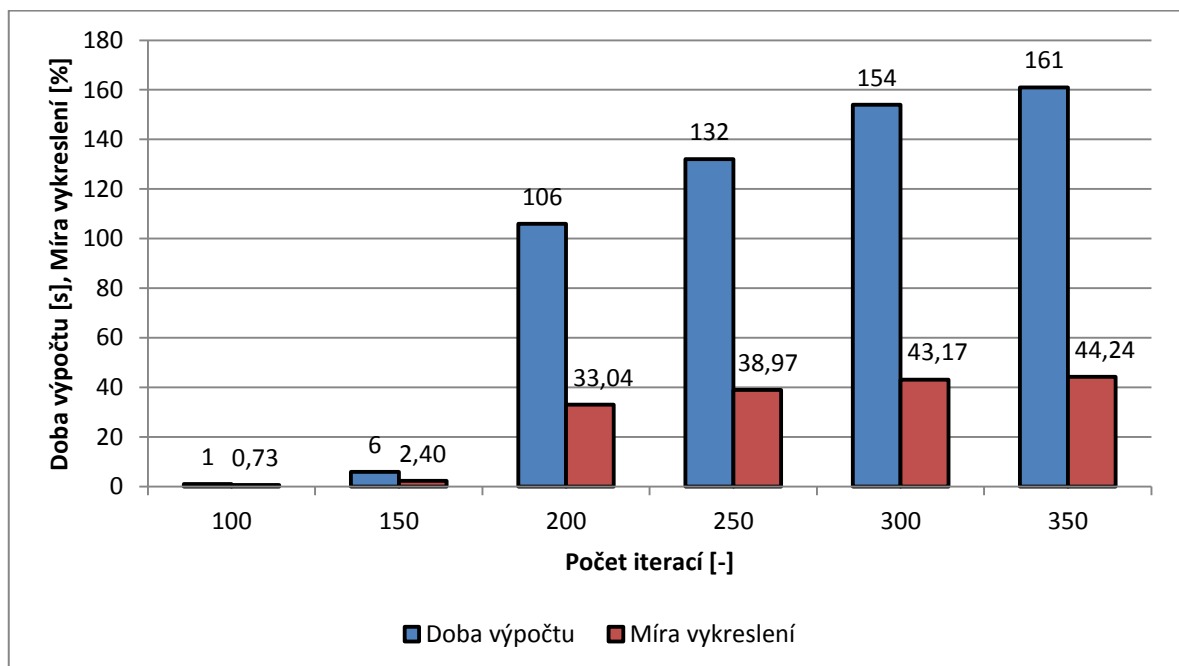
14.3.3 Výsledky analýzy

Spodní hranice počtu iterací, při které analýza vykazovala nenulovou hodnotu míry vykreslení, byla pro třetí vzorek stanovena na 100 iterací. Hodnota maximálního počtu iterací, kdy již nedocházelo k výrazné změně závislosti míry vykreslení na počtu iterací, byla stanovena na 350 iterací. Data z DIC analýzy, získaná při šesti různých variantách počtu iterací jsou uvedena v Tab. 13.

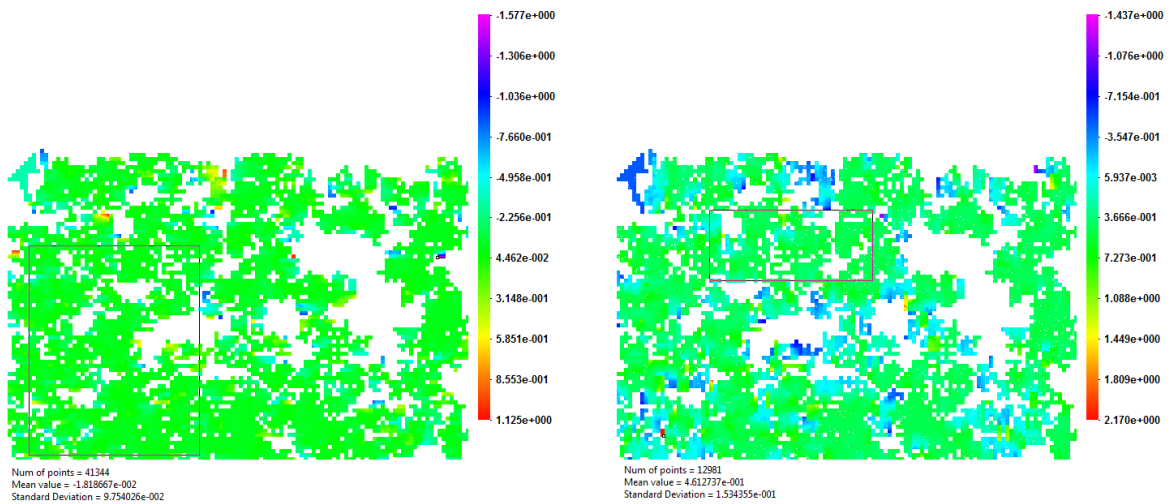
Tab. 13 Přehled výsledků pro 3. vzorek při zkoušce smykem

Počet iterací [-]	100	150	200	250	300	350
Doba výpočtu [s]	1	6	106	132	154	161
Míra vykreslení [%]	0,73	2,40	33,04	38,97	43,17	44,24
Příčná poměrná deformace [%]	1,04	1,48	3,34	2,58	1,81	1,58
Směrodatná odchylka [-]	0,02	0,04	0,011	0,11	0,09	0,104
Podélná poměrná deformace [%]	50	49,24	42,33	39,33	46,12	44,06
Směrodatná odchylka [-]	0,02	0,05	0,02	0,03	0,15	0,2
Změřená podélná deformace [%]	54,02					

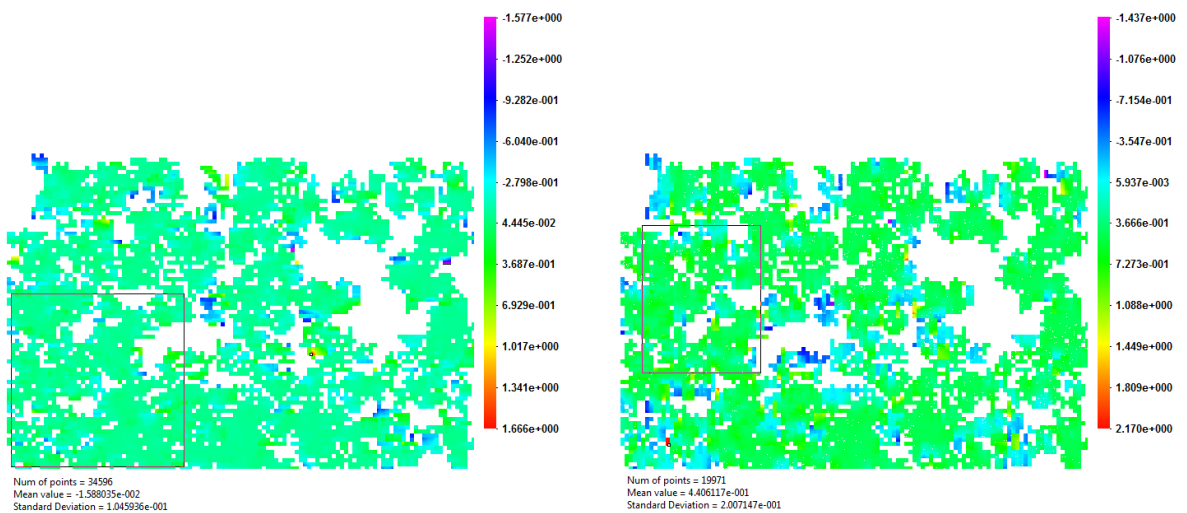
14.3.4 Grafické znázornění získaných dat



Obr. 73 Závislost míry vykreslení a doby výpočtu na počtu iterací u 3. vzorku při zkoušce smykem



Obr. 74 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 3.vzorku při 300 iteracích u zkoušky smykem



Obr. 75 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 3.vzorku při 350 iteracích u zkoušky smykem

14.4 Vzorek 4

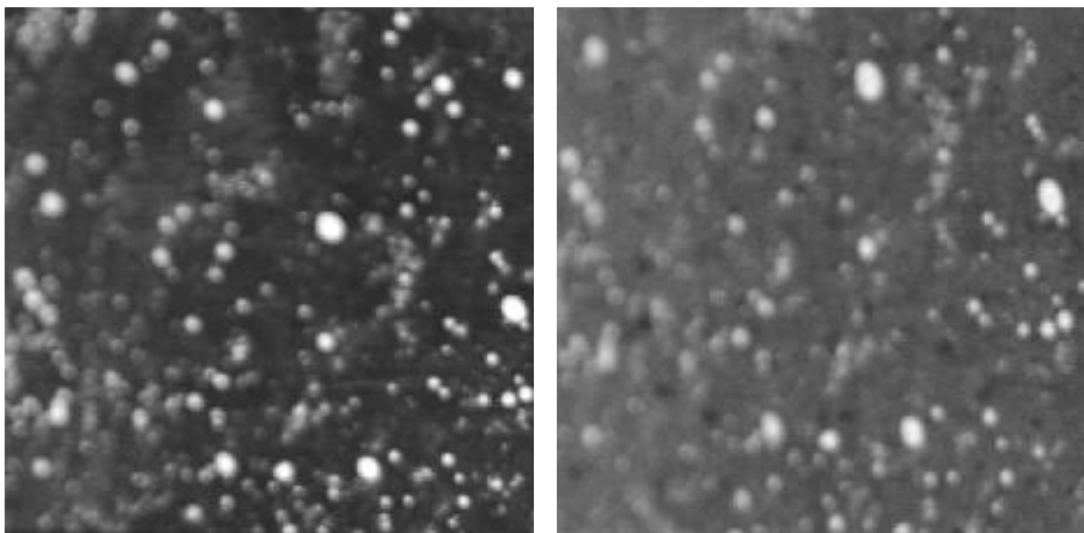
14.4.1 Snímky zkoušky čistým smykem



Obr. 76 Snímky smykové zkoušky 4. vzorku před (vlevo) a po deformaci (vpravo)

14.4.2 Výřezy snímků

Nejvyšší možné rozlišení pro dostačující míru vykreslení bylo u prvního vzorku 228x228 pixelů, tedy 40% původního. Snímky v tomto rozlišení byly podrobeny DIC analýze v celkem 25 variantách kombinací jas/kontrast. Nejvyšší míry vykreslení dosahovala varianta s hodnotami kontrastu 20 a jasu 18, se kterou bylo dále pracováno.



Obr. 77 Výřezy 4. vzorku pro DIC analýzu u zkoušky smykem

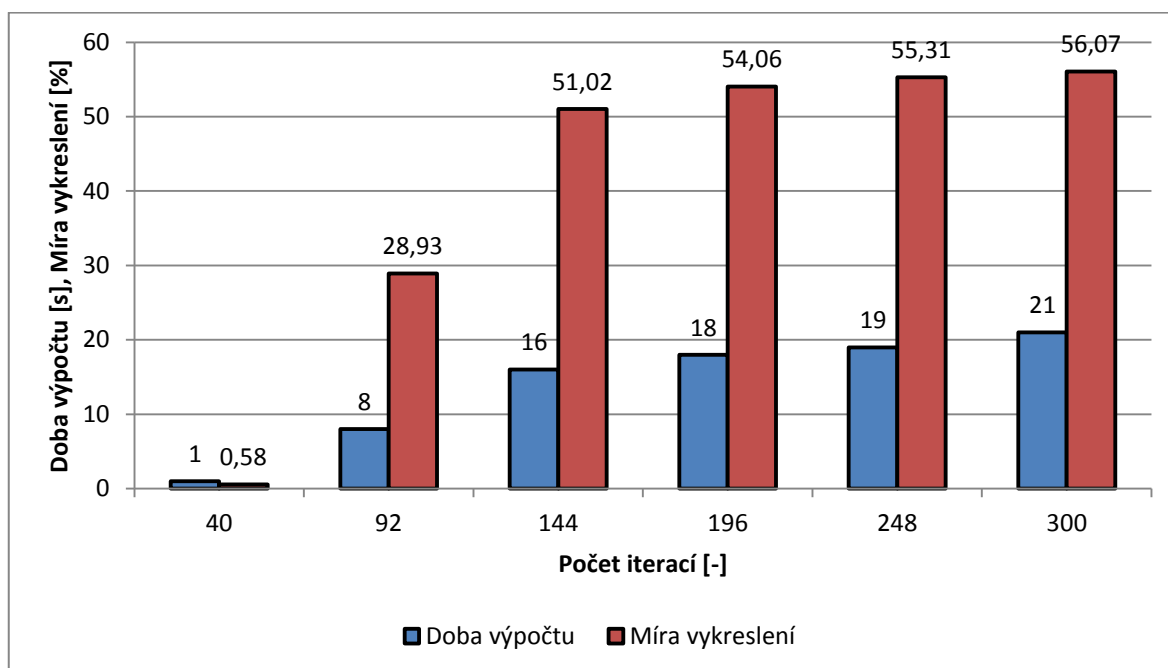
14.4.3 Výsledky analýzy

Spodní hranice počtu iterací, při které analýza vykazovala nenulovou hodnotu míry vykreslení, byla pro čtvrtý vzorek stanovena na 40 iterací. Hodnota maximálního počtu iterací, kdy již nedocházelo k výrazné změně závislosti míry vykreslení na počtu iterací, byla stanovena na 300 iterací. Data z DIC analýzy, získaná při šesti různých variantách počtu iterací jsou uvedena v Tab. 14.

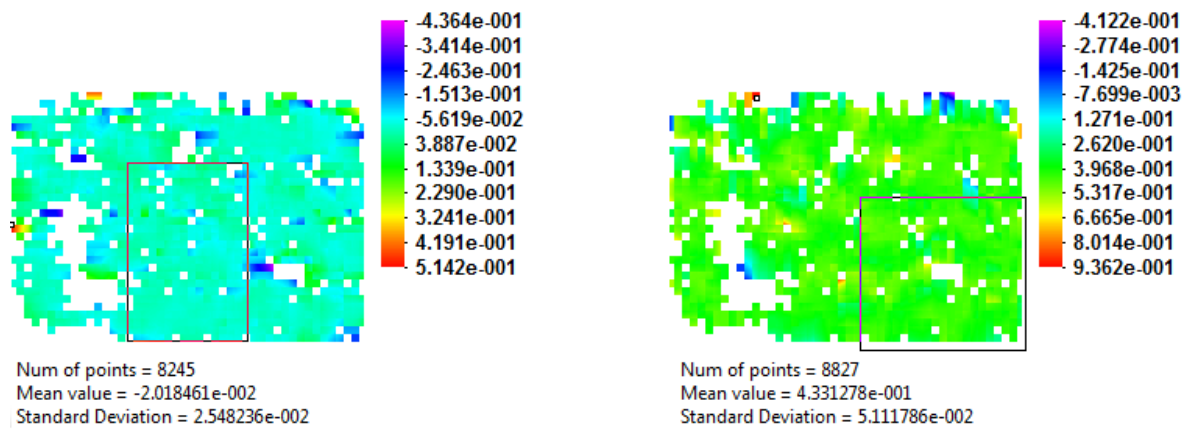
Tab. 14 Přehled výsledků pro 4. vzorek při zkoušce smykem

Počet iterací [-]	40	92	144	196	248	300
Doba výpočtu [s]	1	8	16	18	19	21
Míra vykreslení [%]	0,58	28,93	51,02	54,06	55,31	56,07
Příčná poměrná deformace [%]	1,47	1,3	1,75	1,88	2,01	2,2
Směrodatná odchylka [-]	0,018	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03
Podélná poměrná deformace [%]	42,47	42,88	43,41	43,57	43,31	43,44
Směrodatná odchylka [-]	0,02	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05
Změřená podélná deformace [%]	51,49					

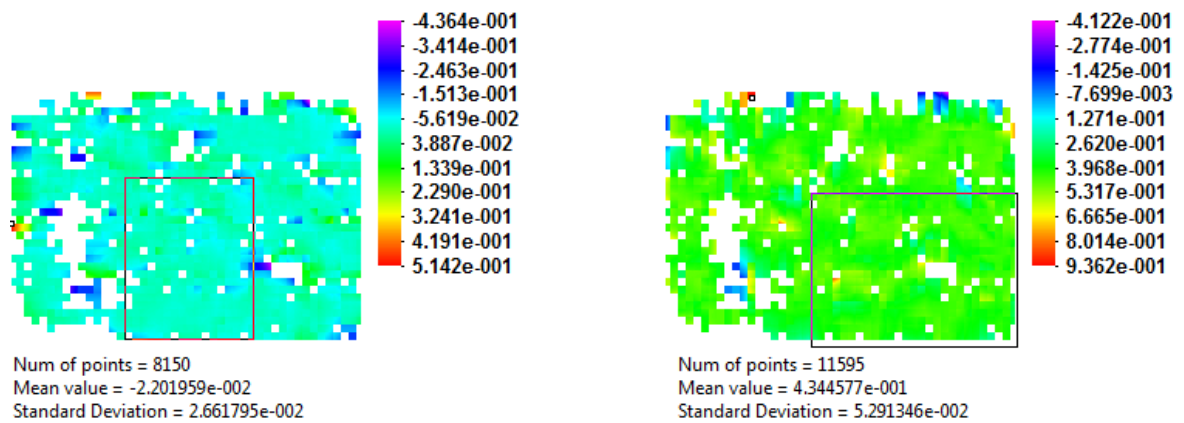
14.4.4 Grafické znázornění získaných dat



Obr. 78 Závislost míry vykreslení a doby výpočtu na počtu iterací u 4. vzorku při zkoušce smykem



Obr. 79 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 4.vzorku při 248 iteracích u zkoušky smykem



Obr. 80 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 4.vzorku při 300 iteracích u zkoušky smykem

14.5 Vzorek 5

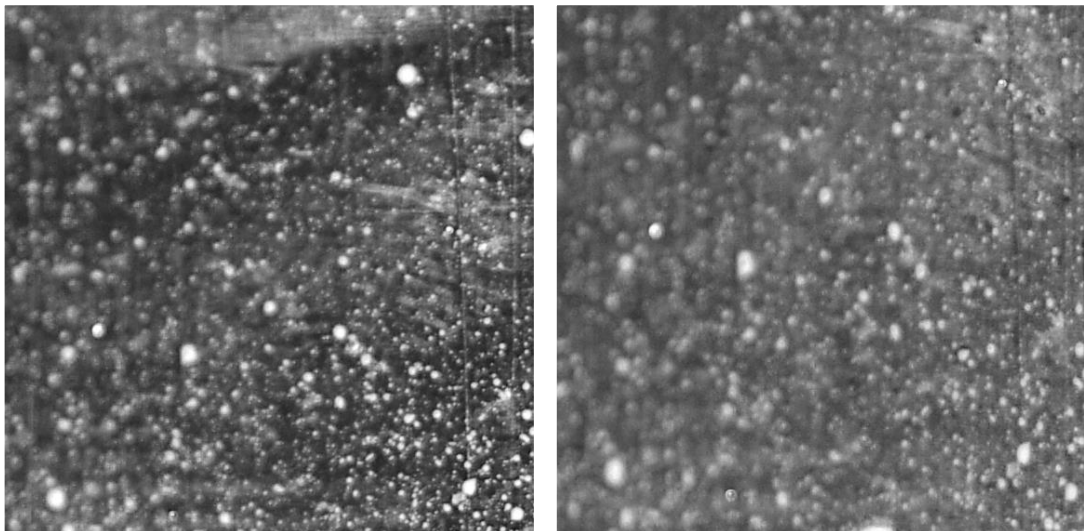
14.5.1 Snímky zkoušky čistým smykem



Obr. 81 Snímky smykové zkoušky 5. vzorku před (vlevo) a po deformaci (vpravo)

14.5.2 Výřezy snímků

Míra vykreslení pro 5. vzorek byla dostačující i v plném rozlišení 570x570 pixelů. Snímky v tomto rozlišení byly podrobeny DIC analýze v celkem 25 variantách kombinací jas/kontrast. Nejvyšší míry vykreslení dosahovala varianta s hodnotami kontrastu 20 a jasu 18, se kterou bylo dále pracováno.



Obr. 82 Výřezy 5. vzorku pro DIC analýzu u zkoušky smykem

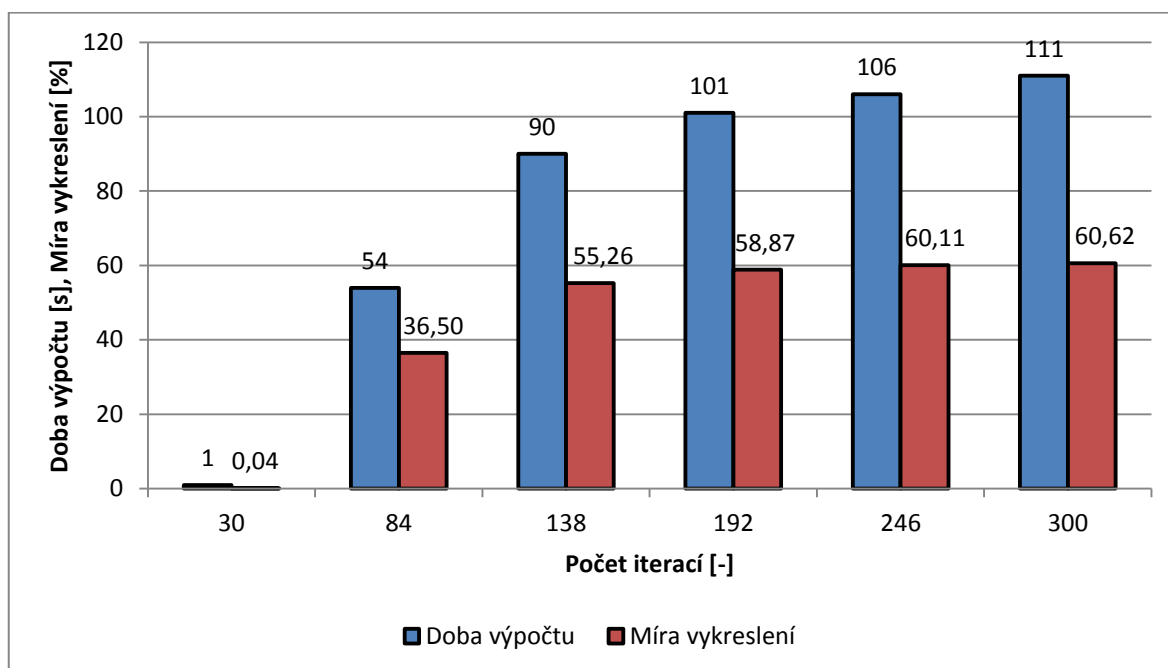
14.5.3 Výsledky analýzy

Spodní hranice počtu iterací, při které analýza vykazovala nenulovou hodnotu míry vykreslení, byla pro pátý vzorek stanovena na 30 iterací. Hodnota maximálního počtu iterací, kdy již nedocházelo k výrazné změně závislosti míry vykreslení na počtu iterací, byla stanovena na 300 iterací. Data z DIC analýzy, získaná při šesti různých variantách počtu iterací jsou uvedena v Tab. 15.

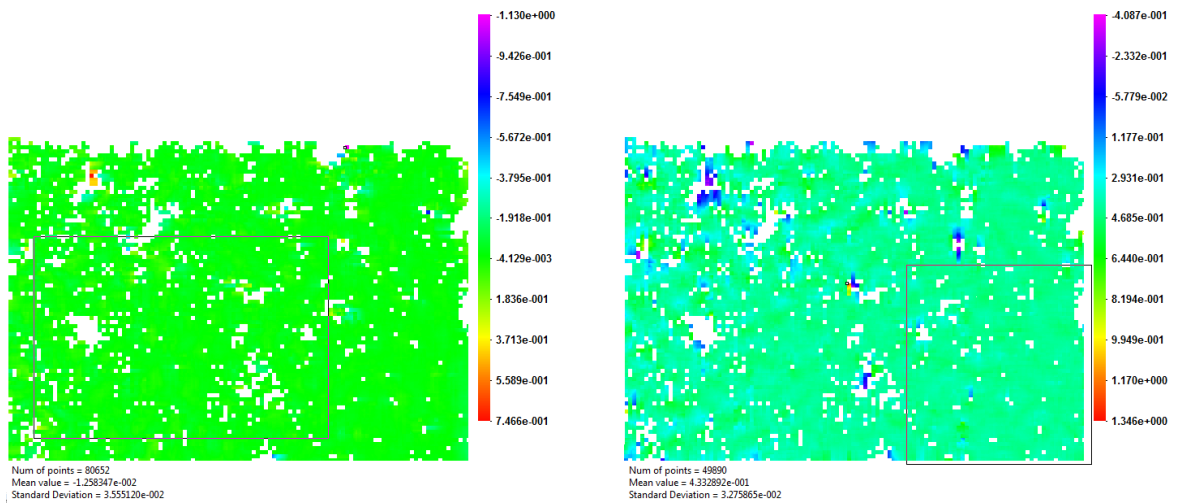
Tab. 15 Přehled výsledků pro 5. vzorek při zkoušce smykem

Počet iterací [-]	30	84	138	192	246	300
Doba výpočtu [s]	1	54	90	101	106	111
Míra vykreslení [%]	0,04	36,50	55,26	58,87	60,11	60,62
Příčná poměrná deformace [%]	5,44	1,23	1,15	1,13	1,25	1,39
Směrodatná odchylka [-]	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03
Podélná poměrná deformace [%]	40,92	43,44	42,68	42,47	43,32	43,26
Směrodatná odchylka [-]	0,02	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05
Změřená podélná deformace [%]	46,80					

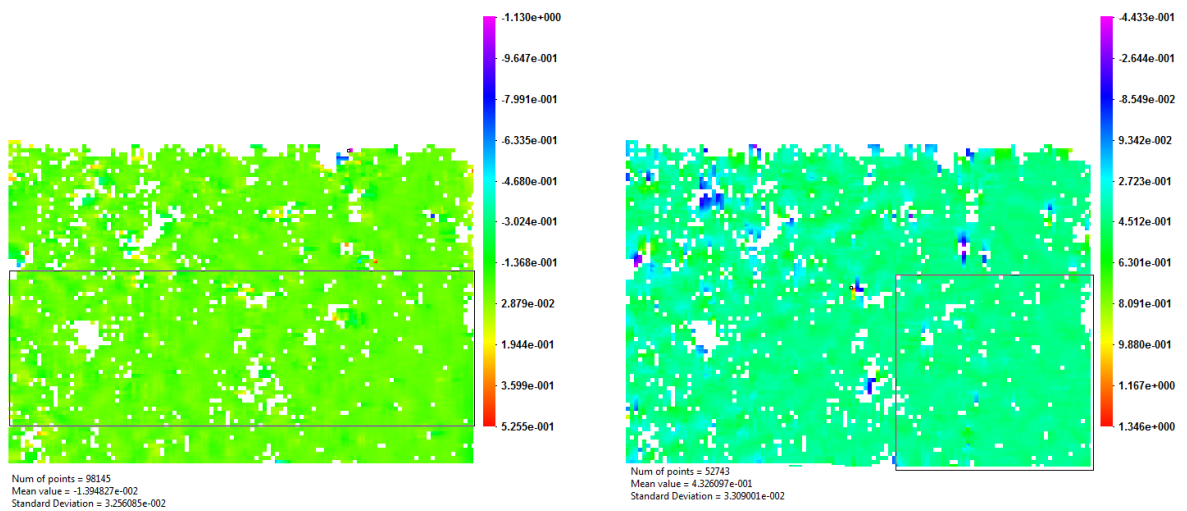
14.5.4 Grafické znázornění získaných dat



Obr. 83 Závislost míry vykreslení a doby výpočtu na počtu iterací u 5. vzorku při zkoušce smykem



Obr. 84 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 5.vzorku při 246 iteracích u zkoušky smykem



Obr. 85 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 5.vzorku při 300 iteracích u zkoušky smykem

14.6 Vzorek 6

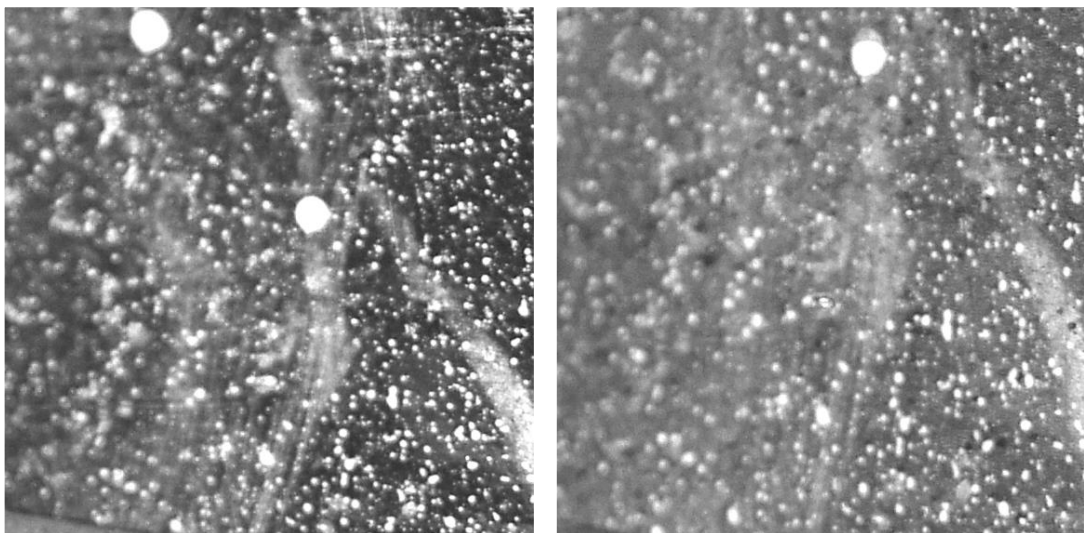
14.6.1 Snímky zkoušky čistým smykem



Obr. 86 Snímky smykové zkoušky 6. vzorku před (vlevo) a po deformaci (vpravo)

14.6.2 Výřezy snímků

Míra vykreslení pro 5. vzorek byla dostačující i v plném rozlišení 570x570 pixelů. Snímky v tomto rozlišení byly podrobeny DIC analýze v celkem 25 variantách kombinací jas/kontrast. Nejvyšší míry vykreslení dosahovala varianta s hodnotami kontrastu 40 a jasu 50, se kterou bylo dále pracováno.



Obr. 87 Výřezy 6. vzorku pro DIC analýzu u zkoušky smykem

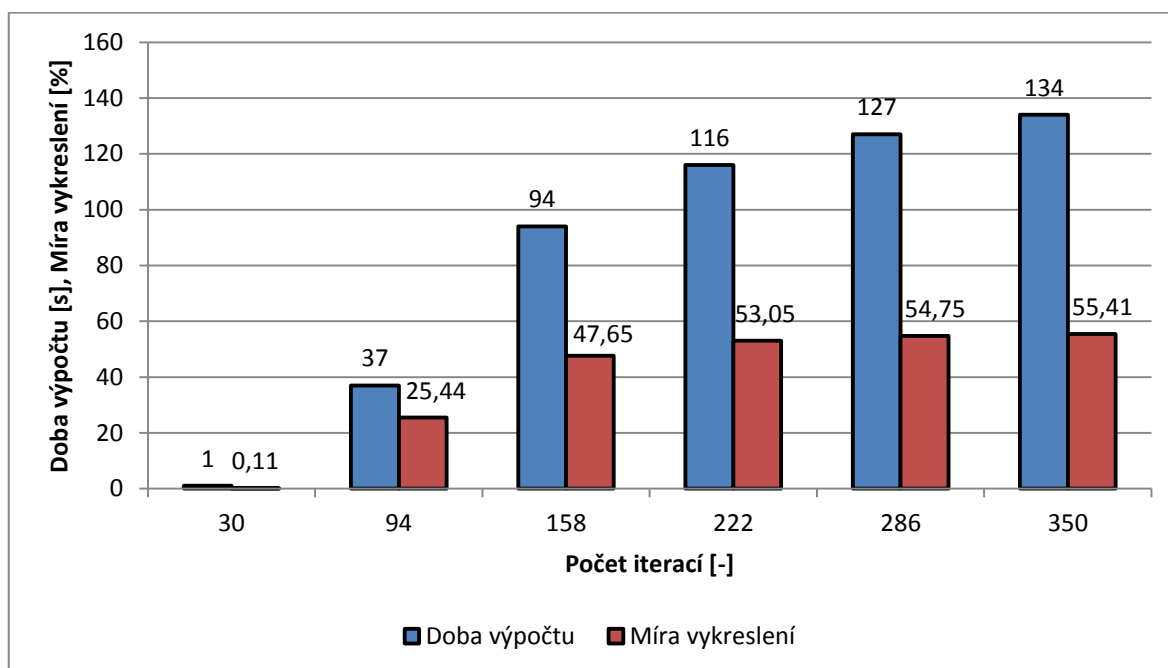
14.6.3 Výsledky analýzy

Spodní hranice počtu iterací, při které analýza vykazovala nenulovou hodnotu míry vykreslení, byla pro šestý vzorek stanovena na 30 iterací. Hodnota maximálního počtu iterací, kdy již nedocházelo k výrazné změně závislosti míry vykreslení na počtu iterací, byla stanovena na 350 iterací. Data z DIC analýzy, získaná při šesti různých variantách počtu iterací jsou uvedena v Tab. 16.

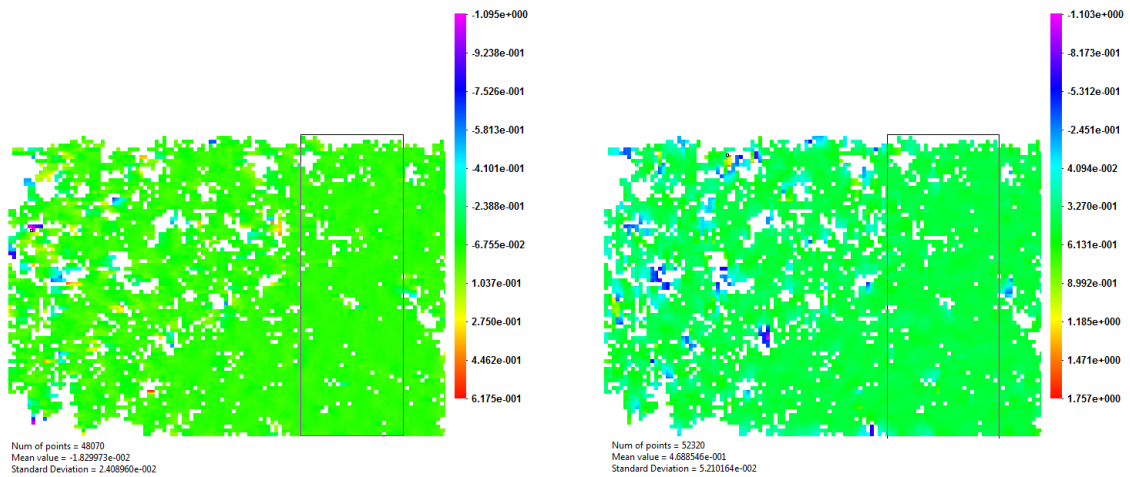
Tab. 16 Přehled výsledků pro 6. vzorek při zkoušce smykem

Počet iterací [-]	30	94	158	222	286	350
Doba výpočtu [s]	1	37	94	116	127	134
Míra vykreslení [%]	0,11	25,44	47,65	53,05	54,75	55,41
Příčná poměrná deformace [%]	1,32	1,48	1,72	1,81	1,82	1,82
Směrodatná odchylka [-]	0,012	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02
Podélná poměrná deformace [%]	48,23	46,94	46,77	46,93	46,88	47,08
Směrodatná odchylka [-]	0,019	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05
Změřená podélná deformace [%]	55,38					

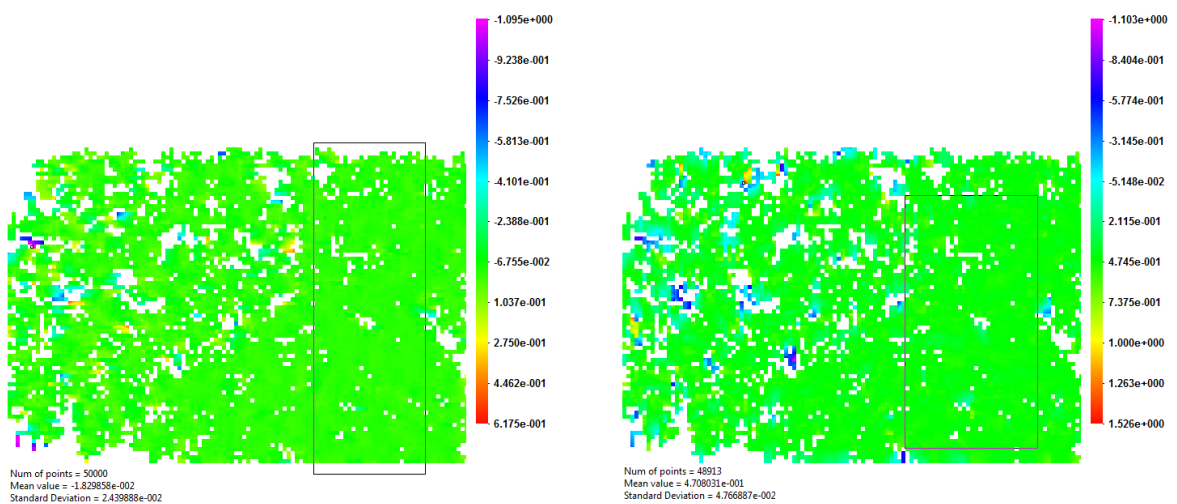
14.6.4 Grafické znázornění získaných dat



Obr. 88 Závislost míry vykreslení a doby výpočtu na počtu iterací u 6. vzorku při zkoušce smykem



Obr. 89 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 6.vzorku při 286 iteracích u zkoušky smykem



Obr. 90 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 6.vzorku při 350 iteracích u zkoušky smykem

ZÁVĚR

Na základě provedených DIC analýz lze konstatovat, že se zmenšujícím se rozlišením jednotlivých snímků se zvyšuje míra vykreslení. Taktéž platí, že čím menší je rozlišení snímků, tím kratší je doba potřebná pro průběh analýzy. U variant kombinací jas/kontrast nebyly zaznamenány žádné souvislosti mezi jednotlivými rozlišeními a nejvyšší hodnoty míry vykreslení vykazovaly různé kombinace jasů a kontrastu pro různé vzorky. Dále z analýz také vyplývá, že u snímků s vysokou ostrostí lze získat dostačující míru vykreslení pro výpočet poměrné deformace i při 100% rozlišení, kdežto u snímků s nízkou ostrostí to možné není. Míru vykreslení je možné zvýšit nastavením vyššího počtu iterací pro průběh analýzy. Nutností pro výpočet je také dostatečná hustota nástřiku sprejem.

Z DIC analýz pro snímky získané při tahových zkouškách vyplývá, že pokud mají snímky dostatečnou ostrost a jsou opatřeny optimálním nástřikem spreje, pak je možné s dostatečnou přesností tuto metodu použít.

Hodnoty poměrných podélných deformací z DIC analýz snímků získaných při zkouškách čistým smykem vykazovaly poměrně velké odchylky od skutečných podélných deformací a pro použití by bylo v tomto případě zapotřebí provést další testy a dopracovat se k optimálním podmínkám zkoušek.

Kvůli nutnosti opatřit zkoušený vzorek nástřikem, zaznamenání snímků pomocí digitálního fotoaparátu, výřezům snímků, jejich úpravě, aby vůbec mohla DIC analýza proběhnout a průběhu samotné DIC analýzy je tato metoda oproti konvenčním metodám daleko více časově náročnější a pracnější. Je výhodné ji použít tam, kde je provedení konvenčních metod měření deformací velmi obtížné nebo není možné vůbec.

Další možností je využití kompletního komerčního systému pracujícího na principu digitální obrazové korelace.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Deformace pevného tělesa* [online]. [cit. 2015-10-25]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/629-deformace-pevneho-telesa>
- [2] SOUKUP, Karel. *Měření mechanických vlastností konstrukčních materiálů s využitím optických metod měření deformace*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [3] PROCHÁZKA, Radek. *Měření mechanických vlastností konstrukčních materiálů pomocí miniaturních zkušebních vzorků*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [4] SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005, 175 s. ISBN 80-704-3417-1.
- [5] VESELÝ, Zdeněk. *Modul pružnosti v tahu*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně.
- [6] *SENZORY SÍLY, TLAKU A HMOTNOSTI* [online]. [cit. 2015-10-25]. Dostupné z: http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-mn-s-12_senzory_sily_tlaku_hmotnosti.pdf
- [7] *Kapacitní senzory - obecné vlastnosti* [online]. [cit. 2015-10-25]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/DATA/s_4_1.htm
- [8] *Úvod do tenzometrů* [online]. [cit. 2015-11-03]. Dostupné z: <http://www.omegaeng.cz/prodinfo/StrainGages.html>
- [9] *Tenzometry* [online]. [cit. 2015-11-03]. Dostupné z: <http://www.aterm.cz/Tenzometry.htm>
- [10] *Tenzometry HBM* [online]. [cit. 2015-11-03]. Dostupné z: [http://bacula.nti.tul.cz/~petr.sidlof/vyuka/LA1/Materialy%20k%20prednaskam%20\(cesky\)/tenzometryHBM_CZ.pdf](http://bacula.nti.tul.cz/~petr.sidlof/vyuka/LA1/Materialy%20k%20prednaskam%20(cesky)/tenzometryHBM_CZ.pdf)
- [11] *Polovodičové tenzometry* [online]. [cit. 2015-11-04]. Dostupné z: <http://www.vtsz.cz/polovodicove-tenzometry.php#vlastnosti>
- [12] *Video extensometer* [online]. [cit. 2015-11-18]. Dostupné z: http://www.messphysik.com/fileadmin/messphysikdaten/Download/Video_extensometer_en.pdf

- [13] *CCD Camera / compact* [online]. [cit. 2015-11-18]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/allied-vision-technologies/product-34506-717087.html>
- [14] *IBERTEST* [online]. [cit. 2015-11-18]. Dostupné z: <http://www.ibertest-russia.ru/about/news/novyy-videoekstenzometr-ibertest-v-demo-zale-kompanii-uralsibpromservis>
- [15] *Zkušební technika* [online]. [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: <http://www.labortech.cz/clanek/prislusenstvi-extenzometry-laserovy/42/>
- [16] *Quality manufacturing* [online]. [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: http://www.qmtmag.com/display_edc.cfm?edno=25438
- [17] *Metóda digitálnej obrazovej korelácie* [online]. [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: <http://www.engineering.sk/clanky2/stroje-a-technologie/434-metoda-digitalnej-obrazovej-korelacie>
- [18] PLÁNIČKA, F., M. ZAJÍČEK a V. ADÁMEK. *Napjatost a hypotézy pevnosti*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Katedra mechaniky, 2007.
- [19] VRBKA, Jan. *Pružnost a pevnost I*. Brno: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2011.
- [20] JAVOŘÍK, Jakub. *Aplikace výpočetních metod*. UTB Zlín: přednášky, 2015.
- [21] *Hookův zákon* [online]. [cit. 2016-02-17]. Dostupné z: <http://kfe.fjfi.cvut.cz/~sinor/r/lisa/h2005/h-ms-html/node11.html>
- [22] *A free 2D & 3D DIC (Digital Image Correlation) MOIRE software* [online]. [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: <http://www.opticist.org/node/73>
- [23] VOLEK, František. *Základy pružnosti a pevnosti*. Vyd. 2. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2006. ISBN 80-7318-440-0.
- [24] BRDIČKA, Miroslav, Ladislav SAMEK a Bruno SOPKO. *Mechanika kontinua*. Vyd. 2., opr. Praha: Academia, 2000. ISBN 80-200-0772-5.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**Seznam symbolů**

μ	Poissonovo číslo.
ε_T	Poměrná příčná deformace [MPa].
ε_L	Poměrná podélná deformace [MPa].
ε_i	Délkové přetvoření ve směru osy i .
γ_i	Úhlové přetvoření v rovině i .
Ω	Deformované těleso.
\vec{f}	Obecná napětí.
σ_i	Normálová napětí v ose i .
τ_{ij}	Smyková napětí v rovině ij .
ω	Řez tělesa.
$d\vec{F}_A$	Elementární síla vzájemného působení.
T_σ	Tenzor napjatosti.
T_ε	Tenzor deformace.
E	Modul pružnosti [MPa].
ε	Poměrné prodloužení [%].
C	Kapacita [F].
ΔR	Rozdíl odporů [Ω].
R_0	Odpor při nezátíženém stavu [Ω].
k	Konstanta tenzometru.
d	Vzdálenost elektrod [m].
Δd	Změna vzdálenosti elektrod [m].
C_{ijkl}	Elastický koeficient.
S_{ijkl}	Elastický koeficient.

ε_r Relativní permitivita [$\text{N.m}^2.\text{C}^{-2}$].

ε_0 Permitivita vakua [$\text{N.m}^2.\text{C}^{-2}$].

Seznam zkratek

DIC Digital image correlation.

Fps Frames per seconds.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Matematické vyjádření deformace elementu tělesa [18].....	14
Obr. 2 Relativní změna rozměrů a tvaru elementu [18]	14
Obr. 3 Uvolnění tělesa [18].....	16
Obr. 4 Element zatíženého tělesa [19]	17
Obr. 5 Rovinná napjatost [19].....	19
Obr. 6 Černobílý skvrnitý vzor na povrchu testovaného vzorku [17]	21
Obr. 7 Princip obrazové 3D korelace se dvěma kamerami [17].....	22
Obr. 8 Aplikace systému při určování materiálových vlastností [17]	23
Obr. 9 Modální analýza kruhové desky [17]	24
Obr. 10 Určování mechanických vlastností tažných plechů [17]	25
Obr. 11 Měření deformace mechanickým průtahoměrem [2]	28
Obr. 12 Schéma Martensova optického průtahoměru [2].....	29
Obr. 13 Princip senzoru se změnou vzdálenosti elektrod [7]	30
Obr. 14 Schéma foliového tenzometru [10].....	31
Obr. 15 Zapojení tenzometru do Wheatstoneova můstku [11].....	32
Obr. 16 Videoextenzometr [13]	33
Obr. 17 Tahová zkouška prováděná videoextenzometrem [14]	34
Obr. 18 Zkouška pomocí dvou laserových snímačů [16]	35
Obr. 19 Zkouška pomocí jednoho laserového snímače [2]	36
Obr. 20 Vybrané vzorky ke zkoušce tahem.....	39
Obr. 21 Vybrané vzorky pro zkoušku čistým smykem	40
Obr. 22 Univerzální trhací stroj ZWICK 1456	41
Obr. 23 Zkušební vzorek pro zkoušky tahem.....	42
Obr. 24 Trhací stroj SHIMADZU AGS-50kN XD.....	43
Obr. 25 Zkušební vzorek pro zkoušku čistým smykem.....	44
Obr. 26 Pásek s body potřebnými ke snímání deformace.....	44
Obr. 27 Testovaný vzorek před (vlevo) a po deformaci (vpravo)	45
Obr. 28 Výřezy pro DIC analýzu.....	45
Obr. 29 Grafické znázornění míry vykreslení při 20% rozlišení	46
Obr. 30 Grafické znázornění míry vykreslení při 40% rozlišení	47
Obr. 31 Grafické znázornění míry vykreslení při 60% rozlišení	48
Obr. 32 Grafické znázornění míry vykreslení při 80% rozlišení	49

Obr. 33 Grafické znázornění míry vykreslení při 100% rozlišení.....	50
Obr. 34 Snímky tahové zkoušky 1. vzorku před (vlevo) a po deformaci (vpravo)	52
Obr. 35 Výřezy 1. vzorku pro DIC analýzu u zkoušky tahem.....	52
Obr. 36 Závislost míry vykreslení a doby výpočtu na počtu iterací u 1. vzorku při zkoušce tahem	53
Obr. 37 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 1.vzorku při 240 iteracích u zkoušky tahem	54
Obr. 38 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 1.vzorku při 280 iteracích u zkoušky tahem	54
Obr. 39 Snímky tahové zkoušky 2. vzorku před (vlevo) a po deformaci (vpravo)	55
Obr. 40 Výřezy 2. vzorku pro DIC analýzu u zkoušky tahem.....	55
Obr. 41 Závislost míry vykreslení a doby výpočtu na počtu iterací u 2. vzorku při zkoušce tahem	56
Obr. 42 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 2.vzorku při 206 iteracích u zkoušky tahem	57
Obr. 43 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 2.vzorku při 250 iteracích u zkoušky tahem	57
Obr. 44 Snímky tahové zkoušky 3. vzorku před (vlevo) a po deformaci (vpravo)	58
Obr. 45 Výřezy 3. vzorku pro DIC analýzu u zkoušky tahem.....	58
Obr. 46 Závislost míry vykreslení a doby výpočtu na počtu iterací u 3. vzorku při zkoušce tahem	59
Obr. 47 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 3.vzorku při 206 iteracích u zkoušky tahem	60
Obr. 48 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 3.vzorku při 250 iteracích u zkoušky tahem	60
Obr. 49 Snímky tahové zkoušky 4. vzorku před (vlevo) a po deformaci (vpravo)	61
Obr. 50 Výřezy 4. vzorku pro DIC analýzu u zkoušky tahem.....	61
Obr. 51 Závislost míry vykreslení a doby výpočtu na počtu iterací u 4. vzorku při zkoušce tahem	62
Obr. 52 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 4.vzorku při 206 iteracích u zkoušky tahem	63
Obr. 53 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 4.vzorku při 250 iteracích u zkoušky tahem	63

Obr. 54 Snímky tahové zkoušky 5. vzorku před (vlevo) a po deformaci (vpravo)	64
Obr. 55 Výřezy 5. vzorku pro DIC analýzu u zkoušky tahem.....	64
Obr. 56 Závislost míry vykreslení a doby výpočtu na počtu iterací u 5. vzorku při zkoušce tahem	65
Obr. 57 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 5.vzorku při 206 iteracích u zkoušky tahem	66
Obr. 58 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 5.vzorku při 250 iteracích u zkoušky tahem	66
Obr. 59 Snímky tahové zkoušky 6. vzorku před (vlevo) a po deformaci (vpravo)	67
Obr. 60 Výřezy 6. vzorku pro DIC analýzu u zkoušky tahem.....	67
Obr. 61 Snímky smykové zkoušky 1. vzorku před (vlevo) a po deformaci (vpravo)	69
Obr. 62 Výřezy 1. vzorku pro DIC analýzu u zkoušky smykem.....	69
Obr. 63 Závislost míry vykreslení a doby výpočtu na počtu iterací u 1. vzorku při zkoušce smykem.....	70
Obr. 64 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 1.vzorku při 410 iteracích u zkoušky smykem	71
Obr. 65 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 1.vzorku při 500 iteracích u zkoušky smykem	71
Obr. 66 Snímky smykové zkoušky 2. vzorku před (vlevo) a po deformaci (vpravo)	72
Obr. 67 Výřezy 2. vzorku pro DIC analýzu u zkoušky smykem.....	72
Obr. 68 Závislost míry vykreslení a doby výpočtu na počtu iterací u 2. vzorku při zkoušce smykem.....	73
Obr. 69 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 2.vzorku při 254 iteracích u zkoušky smykem	74
Obr. 70 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 2.vzorku při 300 iteracích u zkoušky smykem	74
Obr. 71 Snímky smykové zkoušky 3. vzorku před (vlevo) a po deformaci (vpravo)	75
Obr. 72 Výřezy 3. vzorku pro DIC analýzu u zkoušky smykem.....	75
Obr. 73 Závislost míry vykreslení a doby výpočtu na počtu iterací	76
Obr. 74 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 3.vzorku při 300 iteracích u zkoušky smykem	77
Obr. 75 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 3.vzorku při 350 iteracích u zkoušky smykem	77

Obr. 76 Snímky smykové zkoušky 4. vzorku před (vlevo) a po deformaci (vpravo)	78
Obr. 77 Výřezy 4. vzorku pro DIC analýzu u zkoušky smykem.....	78
Obr. 78 Závislost míry vykreslení a doby výpočtu na počtu iterací u 4. vzorku při zkoušce smykem.....	79
Obr. 79 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 4.vzorku při 248 iteracích u zkoušky smykem	80
Obr. 80 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 4.vzorku při 300 iteracích u zkoušky smykem	80
Obr. 81 Snímky smykové zkoušky 5. vzorku před (vlevo) a po deformaci (vpravo)	81
Obr. 82 Výřezy 5. vzorku pro DIC analýzu u zkoušky smykem.....	81
Obr. 83 Závislost míry vykreslení a doby výpočtu na počtu iterací u 5. vzorku při zkoušce smykem.....	82
Obr. 84 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 5.vzorku při 246 iteracích u zkoušky smykem	83
Obr. 85 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 5.vzorku při 300 iteracích u zkoušky smykem	83
Obr. 86 Snímky smykové zkoušky 6. vzorku před (vlevo) a po deformaci (vpravo)	84
Obr. 87 Výřezy 6. vzorku pro DIC analýzu u zkoušky smykem.....	84
Obr. 88 Závislost míry vykreslení a doby výpočtu na počtu iterací u 6. vzorku při zkoušce smykem.....	85
Obr. 89 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 6.vzorku při 286 iteracích u zkoušky smykem	86
Obr. 90 Příčná deformace (vlevo) a podélná deformace (vpravo) 6.vzorku při 350 iteracích u zkoušky smykem	86

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Míra vykreslení při 20% rozlišení	46
Tab. 2 Míra vykreslení při 40% rozlišení	47
Tab. 3 Míra vykreslení při 60% rozlišení	48
Tab. 4 Míra vykreslení při 80% rozlišení	49
Tab. 5 Míra vykreslení při 100% rozlišení	50
Tab. 6 Přehled výsledků pro 1. vzorek při zkoušce tahem	53
Tab. 7 Přehled výsledků pro 2. vzorek při zkoušce tahem	56
Tab. 8 Přehled výsledků pro 3. Vzorek při zkoušce tahem	59
Tab. 9 Přehled výsledků pro 4. vzorek při zkoušce tahem	62
Tab. 10 Přehled výsledků pro 5. Vzorek při zkoušce tahem	65
Tab. 11 Přehled výsledků pro 1. vzorek při zkoušce smykem	70
Tab. 12 Přehled výsledků pro 2. vzorek při zkoušce smykem	73
Tab. 13 Přehled výsledků pro 3. vzorek při zkoušce smykem	76
Tab. 14 Přehled výsledků pro 4. vzorek při zkoušce smykem	79
Tab. 15 Přehled výsledků pro 5. vzorek při zkoušce smykem	82
Tab. 16 Přehled výsledků pro 6. vzorek při zkoušce smykem	85