

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní



Diplomová práce

Experimentální stanovení zbytkové napjatosti kombinací odvrtávací metody a
metody digitální korelace obrazu

Vedoucí práce :

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.

Vypracoval:

Bc., Jiří Svárovský

Praha 2021



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Svárovský** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **458887**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Aplikovaná mechanika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Experimentální stanovení zbytkové napjatosti kombinací odvrtávací metody a metody digitální korelace obrazu.

Název diplomové práce anglicky:

Residual stress assessment combining both Hole-Drilling Method and digital image correlation method.

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s podstatou odvrtávací metody a metody digitální korelace obrazu.
2. Navrhněte experimentální stanoviště pro aplikaci odvrtávací metody s využitím modelářské frézky a DIC aparatury Dantec Dynamics.
3. Sestavte a odlaďte samoistatně aparaturu pro vlastní frézování. Aparaturu pro DIC instalujte ve spolupráci s odborným pracovníkem ústavu.
4. Proveďte a vyhodnoťte měření zbytkových pnutí na dodaných vzorcích.
5. Zformulujte závěry a sepište diplomovou práci.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications. Michael A. Sutton, Jean Jose Ortu, Hubert Schreier, Springer Science & Business Media, 2009
- [2] ASTM E837-13a, Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org
- [3] Istra 4D. Manuál k software

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc., odbor pružnosti a pevnosti FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **19.10.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **15.01.2021**

Platnost zadání diplomové práce: _____

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

27.11.2020
Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotační list

Jméno autora:	Jiří Svárovský
Název BP:	Experimentální stanovení zbytkové napjatosti kombinací odvrtávací metody a metody digitální korelace obrazu.
Anglický název:	Residual stress assessment combining both Hole-Drilling Method and digital image correlation method.
Akademický rok:	2020/2021
Studijní program:	Aplikovaná mechanika
Zadávací ústav:	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky
Vedoucí BP:	Doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 56 Počet obrázků: 35 Počet tabulek: 5
Klíčová slova:	Zbytkové napětí, odvrtávací metoda, digitální korelace obrazu
Keywords	Residual stress, hole-drilling method, digital image correlation
Abstrakt:	Předmětem diplomové práce je verifikace sestaveného experimentálního pracoviště k aplikaci odvrtávací metody ve spojení s digitální obrazovou korelací. Odvrtání proběhlo na tyči zatížené čtyřbodovým ohybem a vyhodnocení bylo provedeno v souladu s normou ASTM E837.
Abstract:	The aim of the Master's Thesis is the verification of assembled workplace for the application of the hole drilling method using digital image correlation. Drilling was performed on a bar loaded with a four-point bend and evaluation was carried out in accordance with ASTM E837.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Miroslava Španiela, CSs., Ing. Karla Doubravy, PhD. a Ing. Jiřího Kuželky, PhD. a s použitím uvedené literatury.

V Praze 15.1.2021



Jiří Svárovský

Poděkování

Děkuji Ing. Miroslavu Španielovi, CSs., Ing. Karlu Doubravovi, PhD. a Ing. Jiřímu Kuželkovi, PhD. za vedení a cenné rady při tvorbě diplomové práce. Dále bych rád poděkoval své rodině, která mě podporovala v průběhu celého studia.

Obsah

Seznam zkratk a značení	3
Úvod.....	4
1 Teoretická a metodologická východiska práce.....	6
1.1 Zbytková napětí.....	6
1.2 Měření zbytkových napětí.....	8
1.2.1 Destruktivní a polodestruktivní metody.....	8
1.2.2 Nedestruktivní metody.....	10
1.3 Odvrtávací metoda.....	12
1.3.1 Historie.....	12
1.3.2 Princip	12
1.3.3 Měření.....	13
1.3.4 Vyhodnocení	15
1.4 Digitální korelace obrazu.....	20
1.4.1 Princip 2D DIC	21
2 Cíle práce	24
3 Návrh a výstavba experimentálního stanoviště	25
3.1 Požadavky na experimentální stanoviště.....	25
3.2 Přestavba modelářské frézky na CNC	26
3.3 Metodika experimentu	31
3.3.1 Příprava vzorku	31
3.3.2 Odvrtávací metoda	32
3.3.3 Digitální korelace obrazu	33
4 Experimentální verifikace navrženého stanoviště.....	34
4.1 Popis vzorku	34
4.2 Naměřená data a vyhodnocení	35

4.3	Numerické modelování verifikačního experimentu	39
4.3.1	MKP model.....	39
4.3.2	Analytický výpočet	41
4.4	Výsledky	43
4.4.1	Naměřená a numericky vypočítaná pole posuvů	43
4.4.3	Průběhy hlavních napětí	46
4.5	Diskuse	47
	Závěr	51
	LITERATURA	52
	Seznam tabulek.....	54
	Seznam obrázků.....	55

Seznam zkratek a značení

Symbol	Jednotky	Význam
\bar{a}	[1]	Kalibrační konstanta pro izotropní napětí
\bar{b}	[1]	Kalibrační konstanta pro smykové napětí
D	[mm]	Průměr tenzometrické růžice
D_0	[mm]	Průměr vyvrtaného otvoru
E	[MPa]	Youngův modul pružnosti v tahu
P	[MPa]	Izotropní napětí
p	[1]	Izotropní poměrná deformace
Q	[MPa]	45° smykové napětí
q	[1]	45° smyková poměrná deformace
T	[MPa]	x-y smykové napětí
t	[1]	x-y smyková poměrná deformace
ε_r	[1]	Radiální deformace
ε_t	[1]	Tangenciální deformace
σ_{max}	[MPa]	Maximální hlavní napětí
σ_{min}	[MPa]	Minimální hlavní napětí
σ_x	[MPa]	Napětí ve směru x
σ_y	[MPa]	Napětí ve směru y
τ	[MPa]	Smykové napětí
ν	[1]	Poissonovo číslo

Úvod

Zbytková napětí vznikají v průběhu výroby součástí, jsou přítomna téměř v každém výrobku. Vzhledem k tomu, že zároveň ovlivňují mechanické vlastnosti, životnost materiálu, je při návrhu dílů či konstrukcí nasnadě mít o jejich přítomnosti a charakteru přehled. K měření zbytkových napětí existuje mnoho metod, které lze rozčlenit do dvou hlavních kategorií: destruktivní a nedestruktivní. Jak již napovídá název, při metodách první kategorie dochází k poškození součástí. Podstata těchto přístupů spočívá v měření deformace, jejímž důsledkem je záměrné odstranění části materiálu, nebo částečné či úplné porušení integrity součásti. Odebráním materiálu z tělesa, případně jeho rozříznutím se porušuje rovnováha pole zbytkových napětí. Aby bylo dosaženo nového rovnovážného stavu, je nutná deformace, kterou lze měřit různými metodami. V případě nedestruktivních metod se zbytková napětí vyhodnocují na základě změn jimi vyvolaných změn vnitřní struktury materiálu, změn, k jejichž měření se využívají různé fyzikální principy.

Odvrtávací metoda patří k destruktivním metodám, přesněji k polodestruktivním, neboť při její aplikaci dochází pouze k malému poškození, se kterým může obvykle součást fungovat v dalším provozu. Díky malé míře poškození a relativně snadné aplikaci hraje v oblasti měření zbytkových napětí prim. Spočívá v odvrtání malého otvoru a sledování deformací v jeho okolí. Je standardizovaná pod normou ASTM E837. Standardizovaný postup popsany v normě používá k měření deformací tenzometrické růžice několika typů, ke kterým jsou známy semianalytické vztahy pro vyjádření zbytkových napětí a s nimiž jsou dodávány příslušné koeficienty potřebné k jejich výpočtu.

Odporové tenzometry se jeví jako spolehlivé, léty ověřené senzory pro měření deformací. Jejich použití ovšem zahrnuje časově náročnou instalaci, a navíc poskytují pouze limitované informace o průběhu deformací. S vývojem techniky v posledních desetiletích se otevřely dveře pro řadu optických metod, které dokážou měřit celá pole deformací. Patří k nim například holografická interferometrie, interferometrické moaré, ESPI a další. Tyto metody se prokázaly jako vhodné k měření deformací, jsou však citlivé k vibracím okolí, a z toho důvodu se hodí

převážně pro laboratorní účely. Alternativní optickou metodou je digitální obrazová korelace, která spočívá v nanesení kontrastního vzoru na povrch zkoumaného tělesa a následném zaznamenávání jednotlivých fází deformace pomocí digitálního fotoaparátu. Poté jsou pomocí vhodného softwaru vyhodnoceny deformace na povrchu tělesa.

Cílem této diplomové práce je vytvoření levného experimentálního stanoviště pro určení zbytkových napětí materiálových vzorků odvrtávací metodou v kombinaci s měřením deformací metodou digitální korelace obrazu s využitím komerční modelářské frézky Proxxon MF70 přestavěné na malý přenosný CNC stroj. Účel pracoviště původně spočíval v jeho využití pro měření zbytkových napětí na plochých vzorcích s vrubem, které byly přetíženy jednoosým tahem za pokojových i zvýšených teplot (vzorky z projektu TN01000029/07 AUTOFRETTAGE-NCK pro letectví a kosmonautiku). Při měření se nepovedlo uvolnit deformace dostatečné ve vztahu k citlivosti použité DIC aparatury (patrně v důsledku relativně velkého průměru odvrtaného otvoru v poměru k poloměru vrubu). Vzhledem k sérii zdržení na projektu i vlastní práci autora v důsledku pandemie COVID-19 nebylo možné včas s ohledem na tuto práci zajistit nové vzorky. Po dohodě s vedoucím diplomové práce tedy došlo ke zvolení alternativního postupu – provedení verifikace vytvořeného stanoviště pomocí experimentálního stanovení simulovaných zbytkových napětí (odvrtání a měření uvolněné deformace bylo provedeno na hliníkové tyči obdélníkového průřezu pod zatížením čtyřbodovým ohybem) tak, aby v okolí odvrtaného otvoru byla deformace dobře měřitelná. Správnou funkci vytvořeného stanoviště se podařilo ověřit.

1 Teoretická a metodologická východiska práce

1.1 Zbytková napětí

Zbytková napětí jsou taková, která existují v materiálu nezávisle na přítomnosti vnějšího zatížení. Vnitřní pnutí se samo dostává do rovnovážného stavu, tahová a tlaková napětí se sčítají v celém objemu materiálu tak, že jejich průměrná hodnota v celém systému se rovná nule. Lze je kategorizovat dle velikostí oblastí, na kterých dosahují rovnovážného stavu:

I. druhu – makroskopická napětí, homogenní v oblastech řádově v *mm* a více;

II. druhu – mikroskopická napětí, homogenní v oblastech řádově o velikosti zrn;

III. druhu – submikroskopická napětí, nehomogenní i v oblastech řádově o velikosti několika atomárních vzdáleností.

[1, 2]

Zbytková napětí vznikají společným působením času, teploty, deformace a mikrostruktury, a to téměř při každém výrobním postupu. Vlivem technologických procesů, jako je obrábění, kování, tepelná úprava aj. dochází ke vzniku nehomogenních plastických deformací, jež generují vnitřní pnutí [8].

Mezi hlavní mechanismy vzniku zbytkových napětí patří:

- 1) Nehomogenní plastické deformace. U výrobních procesů, při kterých dochází ke změně tvaru, například při kování, válcování, ohýbání aj.
- 2) Povrchová úprava. Například při obrábění, broušení, kuličkování či v důsledku provozních podmínek – oxidace, koroze.
- 3) Fázové přeměny v materiálu. Jsou často spojeny s velkými teplotními gradienty. Například během sváření, kalení, lití aj.
- 4) Různé koeficienty roztažnosti a mechanické vlastnosti jednotlivých komponentů kompozitu.

Při většině technologických procesů se však jedná o sdružený proces, kdy působí více vlivů zároveň [1, 8].

V praxi neexistuje těleso bez přítomnosti mikroskopických zbytkových napětí. Zbytková napětí prvního druhu jsou v určitém rozsahu též přítomna v téměř každém

tělese, ale v určitých případech lze vhodným tepelným ošetřením eliminovat do zanedbatelné velikosti. Při měření zbytkových napětí hrají prim napětí I. druhu, ta vznikají majoritně v důsledku technologických procesů. Při jejich uvolnění dochází ke změně tvaru a rozměrů zkoumaného tělesa. Pnutí II. a III. druhu se pojí převážně s fázovými přeměnami [8].

Zbytková napětí je třeba uvažovat již při návrhu součásti, neboť značně ovlivňují životnost výrobků. Mají významný vliv na únavovou pevnost materiálu, jelikož lze pokládat za přídavné střední napětí k provoznímu cyklickému namáhání. S rostoucím středním napětím únavová pevnost klesá. Pro zahrnutí vlivu vnitřního pnutí k výpočtu únavové pevnosti lze využít lineárního vztahu Goodmanovského typu:

$$\sigma_a = \sigma_D - \frac{\sigma_D}{R_m} (\sigma_m + \sigma_R) \quad (2.1)$$

kde σ_a – amplituda přípustného napětí, σ_m – střední napětí, σ_D – mez únavy v tahu, R_m – mez pevnosti, σ_R – zbytková napjatost měřena ve směru působícího provozního napětí [1, 8].

Vnitřní pnutí může mít jak prospěšné, tak nežádoucí efekty. Obecně se uvažují tahová napětí jako nežádoucí, naopak tlakové jako přínosné. Tahová napětí snižují únavovou pevnost, což má za následek předčasné porušení součásti. Vzniká jako vedlejší efekt výrobních procesů, například při broušení, v důsledku ohybu a krutu, či tuhnutí materiálu. Může způsobit inicializaci trhlin na povrchu součásti. Naopak následkem vhodného zavedení tlakového zbytkového napětí do povrchové oblasti materiálu je zvýšení celkové únavové pevnosti součásti, což pozitivně ovlivňuje odolnost vůči koroznímu praskání. Záměrně se vnášejí do povrchové vrstvy z toho důvodu, že právě tam obvykle dochází k iniciaci trhliny. Tlakové napětí má tendenci trhliny uzavírat, na rozdíl od napětí tahového. Do povrchové vrstvy materiálu se vnáší pomocí technologií jako kuličkování, laserové zpevňování a další [1, 3, 4].

1.2 Měření zbytkových napětí

Metody pro měření zbytkových napětí se rozdělují dle charakteru do tří skupin – destruktivní, polodestruktivní a nedestruktivní. První dvě zmíněné metody operují na stejném principu, dělí se dle míry poškození součásti. U nedestruktivních metod nedochází k poškození součásti, vyhodnocují zbytkovou napjatost v závislosti na fyzikálních a krystalografických vlastnostech materiálu. Měření zbytkových napětí komplikuje fakt, že pnutí, které je uzamčeno uvnitř materiálu, není přímo měřitelné. Měření mohou být pouze deformace či posuvy vyvolané změnou stavu vnitřního pnutí. Po získání naměřených údajů lze vhodným matematickým aparátem zjistit stav zbytkové napjatosti [1, 8].

1.2.1 Destruktivní a polodestruktivní metody

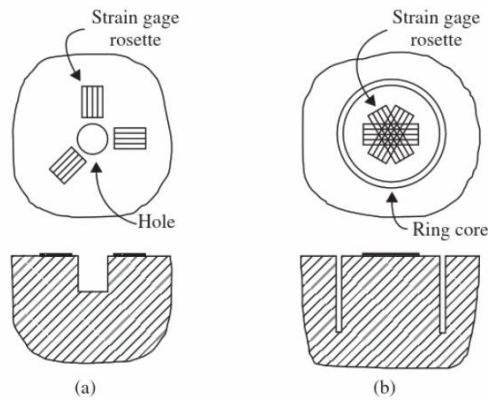
Principem destruktivních a polodestruktivních metod je odstranění/odříznutí části obehmu součásti, čímž dojde k uvolnění zbytkového napětí, které se nachází v dané oblasti. Ve zbylé části jsou měřeny deformace, jakožto reakce na toto uvolnění [1, 2].

Odvrtávací metoda

Odvrtávací metoda hraje důležitou roli v oblasti měření zbytkových pnutí. Spočívá v odvrtání malého otvoru na povrchu tělesa a měření okolní deformace. Této metodě bude věnována větší pozornost v následujících kapitolách. [1]

Ring-core method

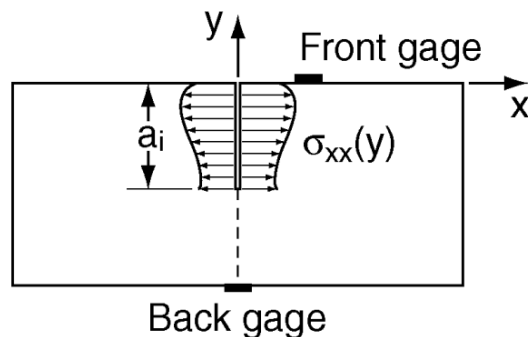
Tuto metoda lze pokládat za příbuznou k metodě odvrtávací. U odvrtávací metody dochází k vrtání otvoru a měření okolní deformace. U ring-core metody se vyfrézuje prstenec a měří se uvolněné deformace v centrální oblasti. Její výhoda oproti odvrtávací metodě spočívá v tom, že uvnitř prstence dojde k úplnému uvolnění povrchových deformací. Na druhou stranu při ní však dochází k většímu poškození materiálu, proto je méně používaná [1, 6].



Obrázek 1 Porovnání metod (a) odvrtávací, (b) ring-core [1]

Metoda řezu

Princip této metody stojí na uvolnění zbytkových napětí postupným rovinným řezem. Zkoumané těleso je opatřeno dvojicí tenzometrů umístěných na svrchním a spodním povrchu (viz obr. 2). Pomocí nich jsou měřeny deformace v blízkosti řezu, zapříčiněny uvolněním vnitřního pnutí, jako funkce hloubky řezu. Z naměřených dat lze určit zbytkové napětí (před řezem) kolmé k řezu v závislosti na hloubce. K řezání se běžně používá elektroerozivní obrábění (EDM) [1, 5, 9].



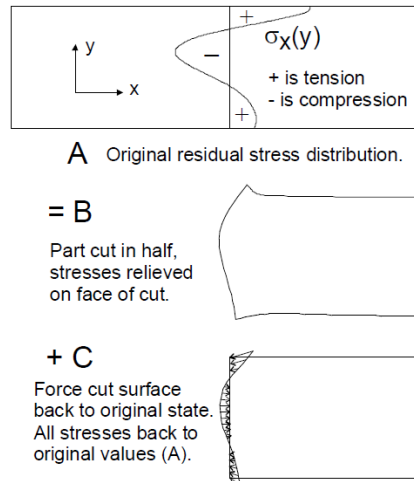
Obrázek 2 Metoda řezu [9]

Metoda kontur

K novějším metodám sloužícím k zjišťování vnitřních pnutí patří metoda kontur. Spočívá v rozříznutí tělesa na dvě části za pomoci elektroerozivního obrábění (EDM). Po rozříznutí se vlivem redistribuce zbytkového napětí těleso zdeformuje. Deformace v rovině řezu se měří použitím souřadnicových měřících strojů či laserovým profilometrem. Takto naměřené deformace slouží jako okrajové podmínky do MKP modelu, který se používá k vyhodnocení původní zbytkové napjatosti v tělese [1, 7].

Princip metody je ilustrován na obrázku 3. Vlivem původní zbytkové napjatosti

se těleso v rovině řezu zdeformuje dle charakteru tohoto pnutí (tahová napětí táhnou materiál směrem dovnitř, tlaková vyboulí materiál ven). V MKP modelu se posléze namodeluje napětí potřebné k tomu, abychom rovinu řezu vrátili do původního nezdeformovaného tvaru. Průnikem napjatosti ve stavu B se změnou napětí ve stavu C, získáváme původní zbytkové pnutí ve vzorku [7].



Obrázek 3 Metoda kontur [7]

1.2.2 Nedestruktivní metody

Difrakční metody

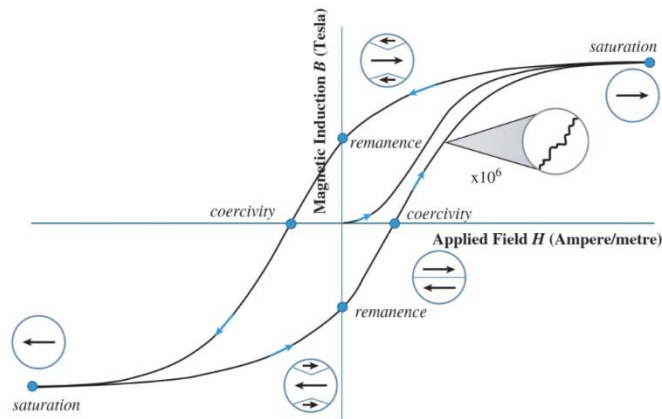
Tyto metody měří deformace pomocí interakce elektromagnetického záření a krystalické mřížky a umožňují určit vzdálenosti rovin atomů v krystalické mřížce. Pokud je zkoumané těleso zatížené pod mez pružnosti a elasticky deformováno, lze tuto deformaci určit ze změny meziatomové vzdálenosti. Vztah mezi meziatomovou vzdáleností a vlnovou délkou záření je popsán Braggovo zákonem:

$$n\lambda = 2d\sin(\theta) \quad (2. 2)$$

K samotnému měření se používají difraktometry, kdy dojde k vystavení vzorku rentgenovému záření, jenž interaguje s krystalovou mřížkou materiálu, čímž vznikají difrakční vzory. Pro daný materiál existuje charakteristický difrakční vzor, který se vlivem deformace posune. Přesným změřením tohoto posuvu je možné určit změnu ve vzdálenosti rovin atomů, a tím pádem deformaci materiálu [1,12].

Magnetická metoda

Magnetická metoda je aplikovatelná na feromagnetické materiálech a funguje na principu Barkhausenova šumu. Feromagnetické materiály tvoří malé podoblasti, domény, které si lze představit jako malé tyčové magnety. Při procesu magnetizace feromagnetického materiálu dochází ke změně orientace těchto domén. Obrázek znázorňuje nelineární vztah mezi magnetickou indukcí a silou magnetického pole při magnetizaci. Podrobným zkoumáním bylo zjištěno, že průběh není hladký, ale dochází k malým skokům odpovídajícím změnám orientace magnetických domén. Tyto změny jsou ovlivněny rozložením elastických deformací uvnitř materiálu; analýzou Barkhausenova šumu lze tedy indikovat zbytková napětí uvnitř feromagnetických materiálů [1].



Obrázek 4 Proces magnetizace – hystereze [1]

Ultrazvuková metoda

Tato metoda využívá akustickoelastického efektu, kdy se vlivem přítomnosti napětí uvnitř materiálu změnil rychlost šíření zvukové vlny, která cestuje materiálem. Přesným měřením změny rychlosti akustických vln lze získat přehled o napjatosti nacházející se v materiálu [1].

1.3 Odvrtávací metoda

Díky své jednoduchosti a širokému poli použitelnosti se odvrtávací metoda stala nejpoužívanějším způsobem určování zbytkových napětí. Jelikož zde nedochází k výraznému porušení součásti, nese přívlastek polodestruktivní. Metoda je navíc rychlá a přenosná, krom laboratoří ji lze využít i v terénu.

1.3.1 Historie

Počátky odvrtávací metody se datují k roku 1930, stál za nimi Prof. J. Mathar. Prvotní verze limitovala dobová technologie využívající mechanické tenzometry, které nedosahovaly dostatečné přesnosti a spolehlivosti. O dekádu později byly vynalezeny tenzometrické růžice. Soete roku 1950 představil spojení odvrtávací metody s využitím tenzometrických růžic, čímž došlo k výraznému zlepšení přesnosti a také k možnosti vrtání otvorů menších průměrů. K dalšímu vývoji odvrtávací metody se zasloužil Kelsey, jenž zkoumal závislost napjatosti na hloubce pomocí postupného odvrtávání. Randler a Vigness sestavili přehledný a opakovatelný postup, spolu se standardizovanou geometrií tenzometrické růžice k měření vnitřních pnutí. To se stalo základem pro standardizovanou metodu ASTM E837, představenou v roce 1981, která stále prochází aktualizacemi. Nejvýznamnější pokrok v této normě přinesl příchod metody konečných prvků [1].

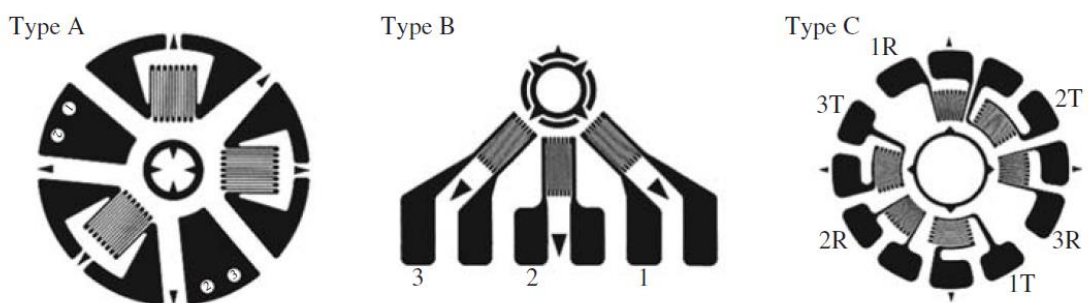
1.3.2 Princip

Princip metody spočívá v odvrtání malého otvoru na povrchu tělesa a měření deformace v okolí vrtu. Odstraněním části materiálu, kde byla přítomna zbytková napjatost, dojde k deformaci v okolí otvoru vlivem redistribuce napětí ve zbylé části materiálu [1].

1.3.3 Měření

Norma ASTM předepisuje postup měření zbytkových pnutí. Spočívá v instalaci normou standardizovaných tenzometrických růžic v místě měření. Tyto růžice jsou propojeny s měřicí stanicí. Ve středu růžice je odvrtán malý otvor, obvykle o průměru mezi 0.8 až 4.8 mm. Naměřené deformace po uvolnění vnitřního pnutí slouží k výpočtu původní zbytkové napjatosti [10].

Tenzometrické růžice určené k měření vnitřních pnutí odvrtávací metodou se obvykle skládají ze tří radiálně rozmístěných tenzometrů pod úhly $0^\circ - 135^\circ - 270^\circ$ nebo $0^\circ - 45^\circ - 90^\circ$ tak, aby zachytily všechny tři složky rovinné napjatosti $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$. Norma E837 předepisuje tři typy tenzometrických růžic (viz Obrázek 5). Nejčastěji vhodnou geometrií pro obecné použití představuje typ A. Typ B má rozmístěné tenzometry pouze na jedné straně, hodí se tedy v případech, kde je omezení instalace růžice z hlediska geometrie vzorku. Typ B se vyznačuje vyšší citlivostí na excentricitu otvoru, měl by být používán jen v případech, kdy je to nutné. K měření malých zbytkových napětí na materiálech s nízkou tepelnou vodivostí se doporučuje růžice typu C. Speciální geometrie zajišťuje jak vyšší citlivost růžice, tak kompenzaci tepelných deformací. To je však vykoupeno vyšší cenou a náročnější instalací. Tyto růžice jsou komerčně dostupné; kalibrační konstanty nutné k přepočtu deformací na napětí jsou také normované, což přináší výrazné usnadnění při zpracování dat [1, 10].



Obrázek 5 [1]

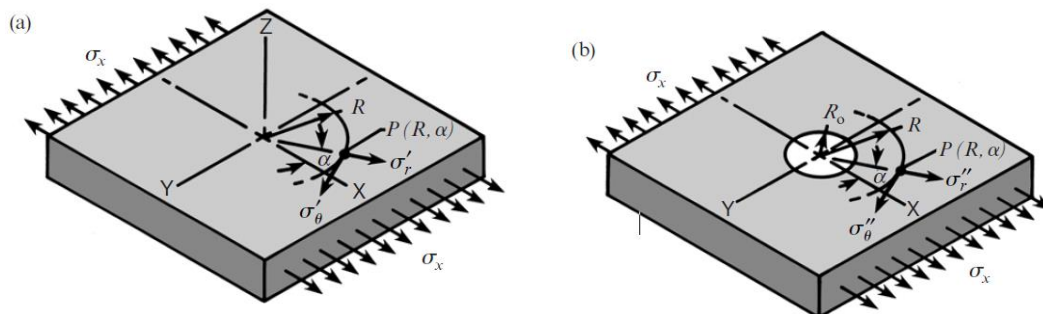
Příprava povrchu pro instalaci tenzometrů hraje zásadní roli. Na jedné straně je ve snaze pro správnou funkci tenzometrické růžice připravit hladký, čistý povrch ke kvalitní vazbě mezi vzorkem a růžicí. Vazba musí být tenká a pevná, aby přenášela vzniklé deformace na povrchu tělesa. Na straně druhé musí být zachována původní zbytková napjatost, které existovala ve vzorku, čili nenarušit ji mechanickými či chemickými úpravami. Odstraněním části materiálu by došlo k přetvoření stavu zbytkové napjatosti na povrchu vzorku, stejně jako použitím nevhodné chemické úpravy povrchu.

Vrtaný otvor ve středu tenzometrické růžice může být jak průchozí, tak slepý. Průchozí otvor se používá pouze u tenkých vzorků, jejichž tloušťka nepřekračuje $0.2 \cdot D$ pro tenzometrické růžice typu A, B a pro typ C $0.24 \cdot D$ (pod D rozumíme průměr růžice). Pro slepé otvory je konfigurace následovná – pro typy A a B musí být tloušťka vzorku minimálně stejně velká jako průměr růžice, pro typ C alespoň $1,2 \cdot D$. Hloubky vrtů jsou spolu s maximálními a minimální průměry otvorů v závislosti na použitém typu tenzometrické růžice a jejím průměru tabelovány v normě ASTM E837. Střed otvoru by měl být vrtán na hladkém a rovném povrchu ve vzdálenosti alespoň $1,5 \cdot D$ od okrajů a jiných překážek. V případě růžice typu B by měl otvor být umístěn alespoň o $0,5 \cdot D$ od překážek ze strany, kde nejsou umístěny tenzometry.

K samotnému odvrtání se nejčastěji používají karbidové vrtáky poháněné elektromotorem nebo vzduchovou turbínou. Aby nedošlo k tvorbě dalších zbytkových napětí vlivem procesu vrtání, norma doporučuje použití vysokorychlostního vrtání nad $20\,000\text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Ideální případ předepsaný normou je pro homogenní, izotropní a lineárně elastický materiál. Otvor by měl být odvrtán na hladkém povrchu v dostatečné vzdálenosti od veškerých hran, jiných povrchů, otvorů a dalších geometrických prvků [1, 10, 11].

1.3.4 Vyhodnocení

Řešení pro desku s průchozím otvorem zatíženou jednoosou napjatostí, představené G. Kirschem, tvoří základ pro výpočet zbytkových napětí pomocí odvrtávací metody.



Obrázek 6a) před otvrtáním b) po odvrtání [10]

V počátečním stavu před vyvrtáním otvoru (Obrázek 6a) lze popsat stav napjatosti desky zatížené jednoosou napjatostí v libovolném bodě $P(R, \alpha)$ pomocí polárních souřadnic následovně:

$$\sigma'_r = \frac{\sigma_x}{2} (1 + \cos 2\alpha) \quad (2.3)$$

$$\sigma'_\theta = \frac{\sigma_x}{2} (1 \pm \cos 2\alpha) \quad (2.4)$$

$$\tau'_{r\theta} = -\frac{\sigma_x}{2} \sin 2\alpha \quad (2.5)$$

Po odvrtání jsou napětí $\sigma_r, \tau_{r\theta}$ v místě otvoru rovné nule. Stav napjatosti lze vyjádřit jako:

$$\sigma''_r = \frac{\sigma_x}{2} \left(1 - \frac{1}{r^2}\right) + \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{3}{r^4} \pm \frac{4}{r^2}\right) \cos 2\alpha \quad (2.6)$$

$$\sigma''_\theta = \frac{\sigma_x}{2} \left(1 - \frac{1}{r^2}\right) \pm \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{3}{r^4}\right) \cos 2\alpha \quad (2.7)$$

$$\tau''_{r\theta} = \pm \frac{\sigma_x}{2} \left(1 - \frac{3}{r^4} + \frac{4}{r^2}\right) \sin 2\alpha \quad (2.8)$$

kde

$$r = \frac{R_0}{R} \text{ pro } R \geq R_0, R_0 - \text{poloměr otvoru, } R - \text{vzdálenost od středu otvoru}$$

Odečtením konečné napjatosti po odvrtní od počáteční dostaneme změnu v napjatosti v bodě P

$$\Delta\sigma_r = \sigma_r'' - \sigma_r' \quad (2.9)$$

$$\Delta\sigma_\theta = \sigma_\theta'' - \sigma_\theta' \quad (2.10)$$

$$\Delta\tau_{r\theta} = \tau_{r\theta}'' - \tau_{r\theta}' \quad (2.11)$$

Dosažením rovnic (2.3)-(2.5) a (2.6)-(4.8) do rovnic (2.9)-(2.11) dostaneme vztahy pro uvolněná napětí. V případě homogenního a izotropního materiálu s lineárně-elastickou závislostí deformací na napětí můžeme získané rovnice dosadit do Hookova zákona pro dvojosou napjatost, čímž se získají vztahy pro uvolněné deformace v bodě $P(R, \alpha)$

$$\varepsilon_r = -\frac{\sigma_x(1+\nu)}{2E} \left[\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \cos 2\alpha + \frac{4}{r^2(1+\nu)} \cos 2\alpha \right] \quad (2.12)$$

$$\varepsilon_\theta = -\frac{\sigma_x(1+\nu)}{2E} \left[-\frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4} \cos 2\alpha - \frac{4}{r^2(1+\nu)} \cos 2\alpha \right] \quad (2.13)$$

Zavedením koeficientů A, B, C lze vztahy pro deformace zjednodušit do podoby

$$\varepsilon_r = \sigma_x(A + B \cos 2\alpha) \quad (2.14)$$

$$\varepsilon_\theta = \sigma_x(-A + C \cos 2\alpha) \quad (2.15)$$

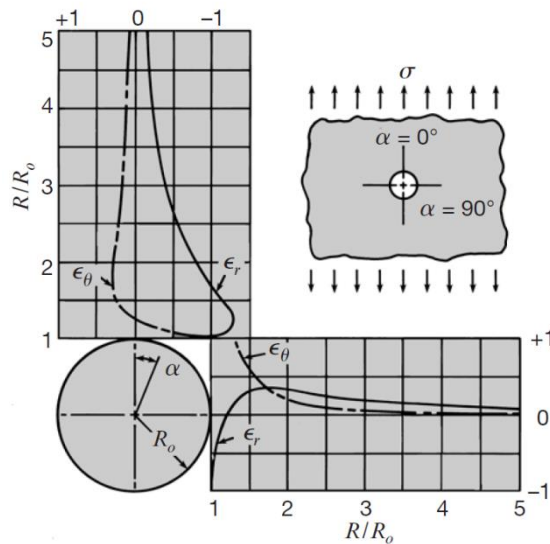
Kde jsou konstanty vyjádřena jako

$$A = -\frac{(1+\nu)}{2E} \left(\frac{1}{r^2} \right) \quad (2.16)$$

$$B = -\frac{(1+\nu)}{2E} \left[\left(\frac{4}{1+\nu} \right) \left(\frac{1}{r^2} \right) - \frac{3}{r^4} \right] \quad (2.17)$$

$$C = -\frac{(1+\nu)}{2E} \left[-\left(\frac{4}{1+\nu} \right) \left(\frac{1}{r^2} \right) + \frac{3}{r^4} \right] \quad (2.18)$$

Obrázek č. 7 zobrazuje průběh radiálních a tečných deformací pro desku zatíženou jednoosou napjatostí v závislosti na vzdálenosti od otvoru. Obecně deformace klesají ze vzdáleností od středu, je tedy nasnadě mít tenzometry umístěné co nejblíže okraji otvoru, avšak musí se počítat s parazitickými vlivy odvrtání v bezprostřední blízkosti otvoru; optimální rozsah poměrného poloměru byl normou ustanoven jako $0.3 < r < 0.45$.



Obrázek 7 Radiální a tečné deformace v závislosti na vzdálenosti od středu [10]

Vztahy (2.14) a (2.15) vyjadřují deformace pro jednoosou napjatost. U reálného tělesa však napjatost bývá rovinná s dvojicí nenulových hlavních napětí. Budeme-li uvažovat lineárně-elastické chování materiálu, poté je možné získat složku radiální deformace pomocí principu superpozice. V bodě $P(R, \alpha)$ bude napjatost ve směru Y rovna:

$$\epsilon_r^y = \sigma_y(A - B\cos 2\alpha) \quad (2.19)$$

superpozicí poté získáme:

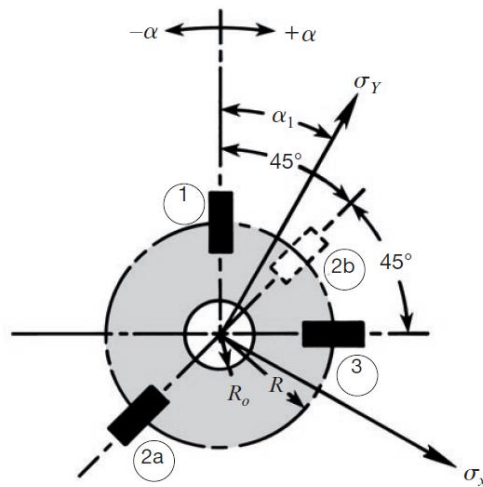
$$\epsilon = \sigma_x(A + B\cos 2\alpha) + \sigma_y(A - B\cos 2\alpha) \quad (2.20)$$

či ve tvaru

$$\epsilon = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\alpha \quad (2.21)$$

Tato rovnice představuje základ k vyhodnocení zbytkových napětí odvrtávací metodou pro výpočet dvou hlavních napětí a úhlu jejich natočení. K získání tří neznámých je potřeba trojice měření radiálních deformací. Toho lze dosáhnout trojicí tenzometrů rozmístěných do tenzometrické růžice. Na Obrázku 8 je zobrazena 45°

tenzometrická růžice, kterou lze považovat za výhodnou z hlediska jednoduchosti výpočtu.



Obrázek 8 Tenzometrická růžice [10]

Pro jednotlivé tenzometry poté může sepsat rovnice ve tvaru:

$$\varepsilon_1 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\alpha \quad (2.22)$$

$$\varepsilon_2 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2(\alpha + 45^\circ) \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_3 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2(\alpha + 90^\circ) \quad (2.24)$$

Jejichž vyřešením získáme rovnice:

$$\sigma_{max} = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{4A} + \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{((\varepsilon_1 - \varepsilon_2))^2 + ((\varepsilon_2 - \varepsilon_3))^2} \quad (2.25)$$

$$\sigma_{min} = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{4A} - \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{((\varepsilon_1 - \varepsilon_2))^2 + ((\varepsilon_2 - \varepsilon_3))^2} \quad (2.26)$$

$$\tan 2\alpha = (\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3)/(\varepsilon_3 - \varepsilon_1) \quad (2.27)$$

Postup výpočtu předepsaný normou ASTM E837-13a pro tenkou desku s průchozím otvorem spočívá v první řadě ve výpočtu kombinací deformací:

$$p = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1}{2} \quad (2.28)$$

$$q = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{2} \quad (2.29)$$

$$t = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2}{2} \quad (2.30)$$

V dalším kroku se z tabulky uvedené normou odečtou numerické hodnoty kalibračních koeficientů \bar{a} , \bar{b} příslušných použitému typu tenzometrické růžice a průměru otvoru. Posléze se vypočítají kombinace napětí odpovídající kombinacím deformací:

$$P = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} = -\frac{E \cdot p}{\bar{a}(1 + \nu)} \quad (2.31)$$

$$Q = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} = -\frac{E \cdot q}{\bar{b}} \quad (2.32)$$

$$P = \tau_{xy} = -\frac{E \cdot t}{\bar{b}} \quad (2.33)$$

Kde P – izotropní napětí; Q – 45° smykové napětí; T – axiální smykové napětí

Z nich je možné zjistit složky rovinné napjatosti v kartézských souřadnicích:

$$\sigma_x = P - Q \quad (2.34)$$

$$\sigma_y = P + Q \quad (2.35)$$

$$\tau_{xy} = T \quad (2.36)$$

A posléze hodnoty hlavních napětí:

$$\sigma_{max}, \sigma_{min} = P \pm \sqrt{Q^2 + T^2} \quad (2.37)$$

Úhel α (obrázek 8) mezi osou tenzometru 1 a největším hlavním tahovým napětím odpovídá vztahu:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{-T}{-Q}\right) \quad (2.38)$$

Takto odvozené vztahy platí pouze pro rozlehlou tenkou rovinnou desku, kde se otvor vrtá průchozí. V praxi se však častěji vyskytují tělesa větší tloušťky a rozmanitějších tvarů. V takovém případě se vrtá neprůchozí otvor do konečné hloubky rozdělený po krocích. Analogicky s případem tenké desky se spočítají kombinace deformací pro každý krok pomocí rovnic (2.28) – (2.30) a odečtou se numerické hodnoty koeficientů kalibračních koeficientů \bar{a} , \bar{b} . Ze získaných vztahů dopočítáme kombinace napětí:

$$P = -\frac{E \sum(\bar{a} \cdot p)}{1 + \nu \sum(\bar{a}^2)} \quad (2.39)$$

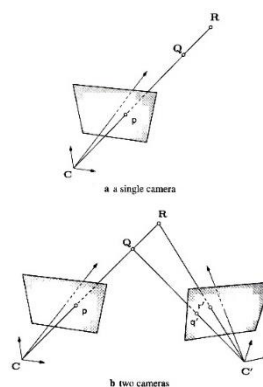
$$Q = -E \frac{\sum(\bar{b} \cdot q)}{\sum(\bar{b}^2)} \quad (2.40)$$

$$T = -E \frac{\sum(\bar{b} \cdot t)}{\sum(\bar{b}^2)} \quad (2.41)$$

Dopočet hlavních napětí a úhlu α se provede pomocí rovnic (2.37) a (2.38) [10, 11].

1.4 Digitální korelace obrazu

Digitální korelace obrazu (digital image correlation – zkratka DIC) představuje neinterferometrickou optickou měřicí metodu s širokou škálou uplatnění. Ukázala se jako metoda vhodná kurčování polí povrchových deformací těles. Oproti interferometrickým metodám, například holografické interferometrii, moiré aj., je robustní vůči vibracím, a tedy lépe aplikovatelná i mimo laboratorní prostředí. Vyznačuje se jak snadným použitím, tak i tím, že kromě digitálního fotoaparátu s vysokým rozlišením nevyžaduje žádné speciální vybavení. Ke zkoumání rovinné deformace na rovném povrchu se využívá 2D DIC, která pomocí jedné kamery pevně umístěné kolmo nad zkoumaným povrchem poskytuje dvojrozměrnou perspektivní projekci – transformuje body na trojrozměrném tělesa do dvojrozměrné projekce. Tím se však ztrácí informace o poloze bodů tělesa v prostoru. V případě prostorové deformace, či zkoumání rovinné deformace na zakřiveném povrchu už tedy není dvojrozměrná digitální korelace obrazu dostačující. V takových případech se využívá trojrozměrná DIC, při níž jsou za potřebí 2 či více kamer pozorující zkoumaný objekt. Tento případ znázorňuje obrázek 8, ze kterého lze vidět, že v případě jedné kamery (9a) se body Q a R ležící na jednom projekčním paprsku promítnou jako jeden projekční bod p . Bodu p tedy odpovídá nekonečně bodů ležících na projekčním paprsku. V případě dvou kamer (9b) je získána druhá projekce, projekční body (p, q') a (p, r') poskytují informaci o reálné poloze bodů Q a R v prostoru. Tato práce využívá dvojrozměrnou digitální korelaci, a proto jí je vyhrazena větší pozornost [13, 14].

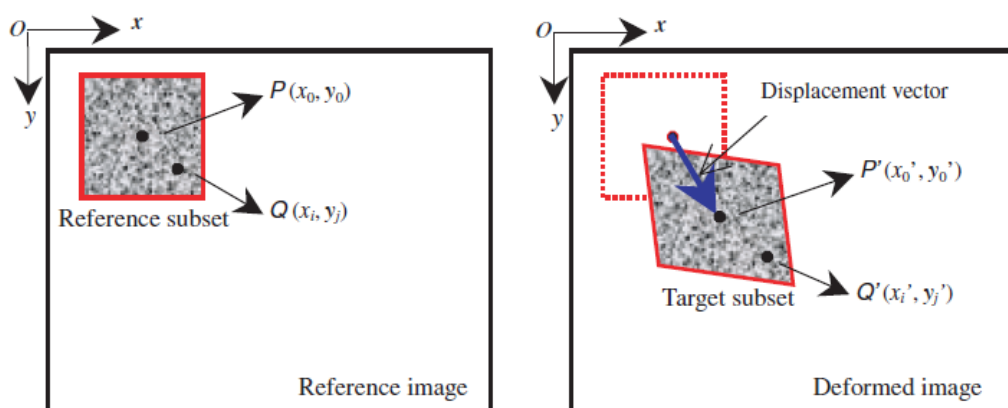


Obrázek 9 Porovnání 2D a 3D DIC a) jedna kamera b) dvě kamery [13]

1.4.1 Princip 2D DIC

Základní princip digitální korelace obrazu k vyhodnocení povrchových deformací spočívá v pořízení referenčního snímku, který se posléze porovná se snímek po deformaci. Aby bylo možné snímky porovnat, musí se povrch pokrýt kontrastním vzorem v různých odstínech šedi. Vzor může být dán přirozenou texturou materiálu, častěji se však používá nástřík barvy či jiné techniky. Většinou se na vzorek nanese podkladová černá/bílá barva, na kterou je pomocí např. airbrushové pistole nanesen bílý/černý vzor stochastického charakteru. Tento vzor se deformuje společně s tělesem. V případě dvojrozměrné DIC se optická osa kamery snímající pozorovaný objekt umístí kolmo na jeho povrch. Aby nedošlo ke zkreslení, musí být CCD senzor kamery ve vodorovné poloze vůči rovině povrchu tělesa a pohyb, který vzorek vykonává, by měl být pouze v této rovině.

Jak již bylo řečeno, DIC porovná jednotlivé snímky v různých stádiích deformace. Při vyhodnocování snímků se nejdříve určí oblast zájmu měření (region of interest – ROI). Tato oblast se rozdělí virtuální sítí na podoblasti, též fazety, většinou čtvercového tvaru. Důvod tohoto rozdělení tkví ve vytvoření unikátní nezaměnitelné podoblasti. Kdyby se porovnávaly přímo pixely o nějaké hodnotě na škále šedi, došlo by s největší pravděpodobností k duplicitním shodám. Ukázka fazety před a po deformaci se středem v bodě $P(x, y)$ je na obrázku 10 [13, 14].



Obrázek 10 Podoblast v referenčním snímku a na snímku po deformaci [14]

Tvarové funkce

Deformací tělesa dojde k deformaci jednotlivých fazet. Z chování pevného tělesa při deformaci lze usoudit, že body v referenční oblasti zůstanou v cílové oblasti po deformaci. Posuv bodu $Q(x_i, y_j)$ (obrázek 9) v okolí středu fazety o velikosti $(2M + 1) \times (2M + 1)$ lze vyjádřit pomocí tvarových funkcí:

$$\begin{aligned}x'_i &= x_i + \xi(x_i, y_j) \\x'_j &= y_j + \eta(x_i, y_j)\end{aligned}\tag{2.42}$$

Pro $i, j \in (-M; M)$

Dle řádu je možné tvarové funkce dále klasifikovat. Tvarová funkce nultého řádu:

$$\xi_0(x_i, y_j) = u ; \eta_0(x_i, y_j) = v\tag{2.43}$$

Tvarovou funkcí nultého řádu lze vyjádřit posuv tuhého tělesa ve směru x a y , to ovšem nestačí k popsání deformace fazety. K vyjádření translace, rotace, zkosení a normálové deformace a jejich kombinací lze využít tvarovou funkci prvního řádu:

$$\begin{aligned}\xi_1(x_i, y_j) &= u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \\ \eta_1(x_i, y_j) &= v + v_x \Delta x + v_y \Delta y\end{aligned}\tag{2.44}$$

V případě složitějších případů deformace může být využito tvarové funkce druhého řádu:

$$\begin{aligned}\xi_2(x_i, y_j) &= u + u_x \Delta x + u_y \Delta y + \frac{1}{2} u_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{2} u_{yy} \Delta y^2 \\ &\quad + u_{xy} \Delta x \Delta y \\ \eta_2(x_i, y_j) &= v + v_x \Delta x + v_y \Delta y + \frac{1}{2} v_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{2} v_{yy} \Delta y^2 \\ &\quad + v_{xy} \Delta x \Delta y\end{aligned}\tag{2.45}$$

V těchto rovnicích (2.43) – (2.45) jsou pomocí proměnných $u, v, \Delta x = x_i - x_0, \Delta y = y_j - y_0$ vyjádřeny posuvy středu fazety $P(x_0, y_0)$ ve směru x a y (obrázek 10). Gradienty posuvů prvního řádu zkoumané fazety jsou potom vyjádřeny pomocí u_x, u_y, v_x, v_y a druhého řádu pomocí $u_{xx}, u_{yy}, v_{xx}, v_{yy}, u_{xy}, v_{xy}$ [13, 14].

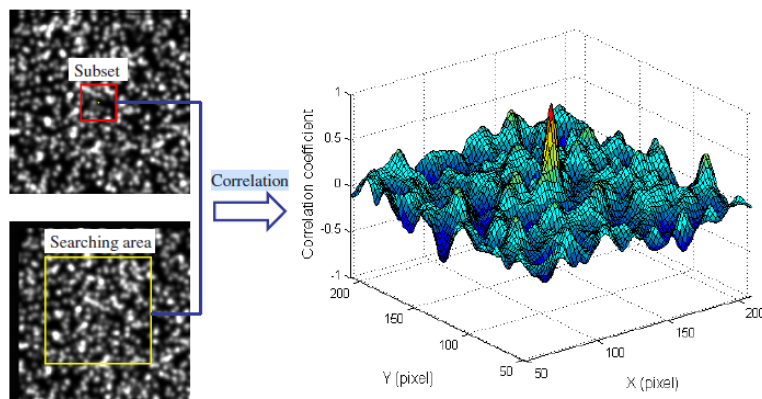
Korelační kritéria

Jednotlivé fazety lze interpretovat jako matici o diskrétních hodnotách na škále stupni šedi. Abychom našli fazetu zadanou v referenčním snímku na fotografii po deformaci, je potřeba vyjádřit míru shody pomocí korelačního kritéria. Ta se obecně dělí na dvě skupiny: cross-correlation (CC) a sum of squared differences (SSD). Jejich příklady jsou uvedeny na obrázku 11. Pro vyhodnocení změny polohy fazety slouží mapovací proces, který probíhá tak, že hledá polohy extrémů v rozložení korelačních koeficientů. Nalezením maxima CC kritéria nebo minima SSD korelačního kritéria je určena poloha fazety po deformaci (viz Obrázek 12) [14].

CC correlation criterion	Definition
Cross-correlation (CC)	$C_{CC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j)g(x'_i, y'_j)]$
Normalized cross-correlation (NCC)	$C_{NCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j)g(x'_i, y'_j)}{\bar{f}\bar{g}} \right]$
Zero-normalized cross-correlation (ZNCC)	$C_{ZNCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left\{ \frac{[f(x_i, y_j) - f_m] \times [g(x'_i, y'_j) - g_m]}{\Delta f \Delta g} \right\}$

SSD correlation criterion	Definition
Sum of squared differences (SSD)	$C_{SSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - g(x'_i, y'_j)]^2$
Normalized sum of squared differences (NSSD)	$C_{NSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j)}{\bar{f}} - \frac{g(x'_i, y'_j)}{\bar{g}} \right]^2$
Zero-normalized sum of squared differences (ZNSSD)	$C_{ZNSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j) - f_m}{\Delta f} - \frac{g(x'_i, y'_j) - g_m}{\Delta g} \right]^2$

Obrázek 11 Korelační kritéria [14]



Obrázek 12 Nalezení extrému CC korelačního kritéria [14]

2 Cíle práce

Tato diplomová práce si klade za cíl vytvoření levného experimentálního stanoviště pro určení zbytkových napětí materiálových vzorků odvrťovací metodou v kombinaci s měřením deformací metodou digitální korelace obrazu. K tomu byla využita komerčně prodávaná modelářská frézka Proxxon MF70 přestavěná na malý přenosný CNC stroj. Účel pracoviště původně spočíval v jeho využití pro měření zbytkových napětí na plochých vzorcích s vrubem, které byly přetíženy jednoosým tahem za pokojových i zvýšených teplot (vzorky z projektu TN01000029/07 AUTOFRETTAGE-NCK pro letectví a kosmonautiku). Při měření se nepovedlo uvolnit deformace dostatečné ve vztahu k citlivosti použité DIC aparatury (patrně v důsledku relativně velkého průměru odvrtného otvoru v poměru k poloměru vrubu). Vzhledem k sérii zdržení na projektu i vlastní práci autora v důsledku pandemie COVID-19 nebylo možné včas s ohledem na tuto práci zajistit nové vzorky. Po dohodě s vedoucím DP tedy došlo ke zvolení alternativního postupu – provedení verifikace vytvořeného stanoviště pomocí experimentálního stanovení simulovaných zbytkových napětí (odvrtní a měření uvolněné deformace bylo provedeno na hliníkové tyči obdélníkového průřezu pod zatížením čtyřbodovým ohybem) tak, aby v okolí odvrtného otvoru byla deformace dobře měřitelná.

3 Návrh a výstavba experimentálního stanoviště

3.1 Požadavky na experimentální stanoviště

K provedení odvrtávací metody musela být nejdříve obstarána aparatura schopná vysokorychlostního vrtání s přesným automatickým posuvem ve svislém směru. To zajistila mikro frézka Proxxon MF70, která nalézá využití pro laboratorní účely, oční optiku, modelářské aplikace a další. Aby byla schopná automatického posuvu, byla přestavěna pomocí krokových motorů na malý CNC stroj. Bližší informace ohledně přestavby budou prezentovány dále v samostatné kapitole.

K zaznamenávání snímků pro digitální obrazovou korelaci byla využita 16 megapixelová kamera Pike F-1600 od firmy Allied Vision s CCD snímačem. Detailní informace o zařízení jsou uvedeny v tabulce. Ke kameře byl připevněn objektiv značky Sigma a mezi objektiv a CCD senzor byly umístěny dva telekonvertory sloužící ke zvětšení obrazu. Telekonvertory prodlužují ohniskovou vzdálenost, tím pádem na senzor dopadne pouze zvětšená část původního obrazu, na druhou stranu nedopadá na senzor stejné množství světla, tím se tedy ztrácí světelnost. K vynahrazení byl použit osvětlovací LED kroužek a delší čas uzávěrky. Takto připravené zařízení bylo připevněno na stativ Manfrotto 055. Použitým softwarem pro vyhodnocení byl Istra 4D od firmy Dantec Dynamics.

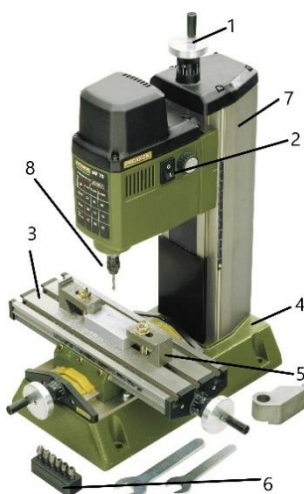
Tabulka 1 Parametry použité kamery

PARAMETRY PIKE F-1600

ROZHRANÍ	IEEE 1394b - 800 Mb/s, 2 porty, daisy chain, GOF
ROZLIŠENÍ	4872 (H) × 3248 (V)
SENZOR	ON Semi KAI-16000
TYP SENZORU	CCD Progressive
VELIKOST SENZORU	Type 35 mm
VELIKOST PIXELU	7.4 μm × 7.4 μm
BAJONET	F-Mount
MAX. SNÍMKOVACÍ FREKVENCE	3 FPS

3.2 Přestavba modelářské frézky na CNC

K odvrtávací metodě byla využita modelářská frézka Proxxon MF70. Frézka je vyráběna s ručním ovládním pojezdu ve všech osách a uvnitř motorové skříně z tlakového hliníkového odlitku se nachází 24 pólový motor pro pohon vrtačky. K vyrobení podstavce slouží šedá tlaková litina; křížový stůl a vertikální vedení bylo vyrobeno z vysokopevnostního hliníku. Stůl je opatřen třemi T drážkami pro uchycení stupňovitých upínek. Dodává se včetně kleštinových upínacích pouzder v rozsahu od 1 do 3,2 mm. Detailní technické parametry stroje jsou uvedeny v tabulce.



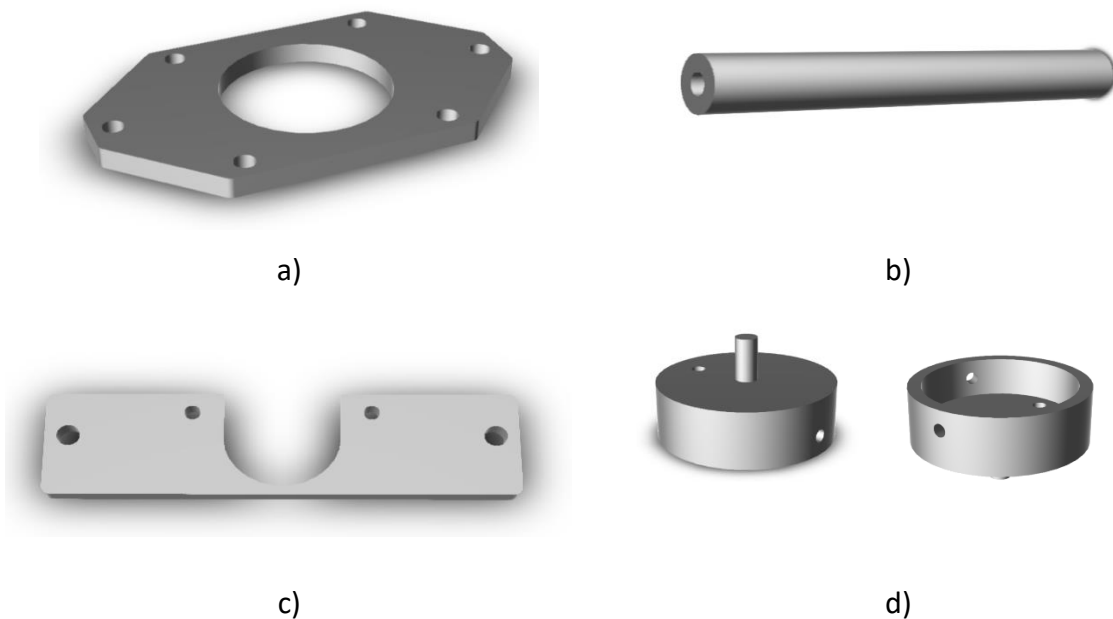
Obrázek 13 Frézka PROXXON MF70 1 - ruční ovládní, 2 – motorová skřín, 3 – stůl s dvojosým pojezdem, 4 – podstavec, 5 – stupňovité upínáky, 6 – kleštinová upínací pouzdra, 7 – vertikální vedení, 8 – kleštiny pro upínání [18]

Tabulka 2 Technické parametry PROXXON MF70 [18]

Provozní napětí	230 V
Příkon	100 W
Rozsah otáček	5.000 ÷ 20.000 $ot \cdot min^{-1}$
Hmotnost	7 kg
Rozsah pojezdu	Směry: X = 134 mm, Y = 46 mm, Z = 80 mm
Velikost podstavce	134 x 225 mm
Výška	370 mm
Posuv na 1 otáčku	1 mm

V tomto provedení se jedná o jemnou a přesnou frézku s širokým rozsahem využití. Nevýhodou pro použití k odvrtací metodě však představoval ruční pojezd os. Proto byla autorem této práce přestavěna na malý přenosný CNC stroj, čehož dosáhl pomocí tří krokových motorů ovládajících osy a tří driverů pro řízení motorů, které připojil do jednodeskového počítače Arudino UNO.

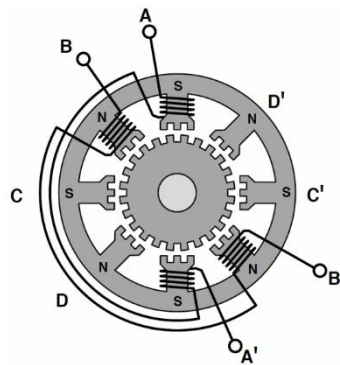
Prvním krokem přestavby se stala nutnost sestrojít mechanické spoje (viz Obrázek 14) mezi frézku a krokovými motory, jež byly namodelovány v programu Autodesk Inventor. Součást 14a se pomocí čtyř šroubů připevnila ke krokovým motorům, poté pomocí dvou trubek (14b) vybavenými vnitřním závitem přimontována k desce (14c), která byla upevněna k těle frézky. Vzhledem ke geometrii frézky v jednotlivých osách došlo k navržení těchto součástí ve třech variantách.



Obrázek 14 Navržené díly pro přestavbu frézky

Součást 14d slouží k propojení ručního kolečka ovládající posuv os s hřídelí krokového motoru pomocí pružné spojky. Součást byla ke kolečku upevněna šroubem se svrchní strany tak, že se šroub umístil v otvoru po páčce k ručnímu ovládní, která byla odstraněna. Aby došlo k co nejpevnějšímu uchycení, opatřila se součást po jejím obvodu třemi otvory se závitem pro stavěcí šrouby.

K samotnému pohonu os byly použity bipolární hybridní krokové motory NEMA23 od firmy LDO MOTORS. Krokové motory se hojně využívají k pohonu CNC strojů, 3D tiskáren a dalších strojů vyžadující přesné polohování. Hybridní krokový motor, schematicky ukázán na Obrázku, má rotor tvořen permanentními magnety s ocelovým drážkováním – rotorové zuby. Stator se skládá obvykle ze dvou fázových vinutí rozdělých do 8 pólů, které jsou také opatřeny drážkami. Motor se potom vlivem změny napětí proudící do jednotlivých pólů pohybuje mezi polohami, jež určují počty zubů rotoru a statoru. Toto natočení se nazývá krok a v případě motoru použitého v tomto experimentu se rovná pootočení o $1,8^\circ$, tedy plná otáčka se dělí na 200 kroků. Úhel natočení je přímo úměrný počtu vstupních impulsů, čehož se využívá právě k dosažení přesného polohování.



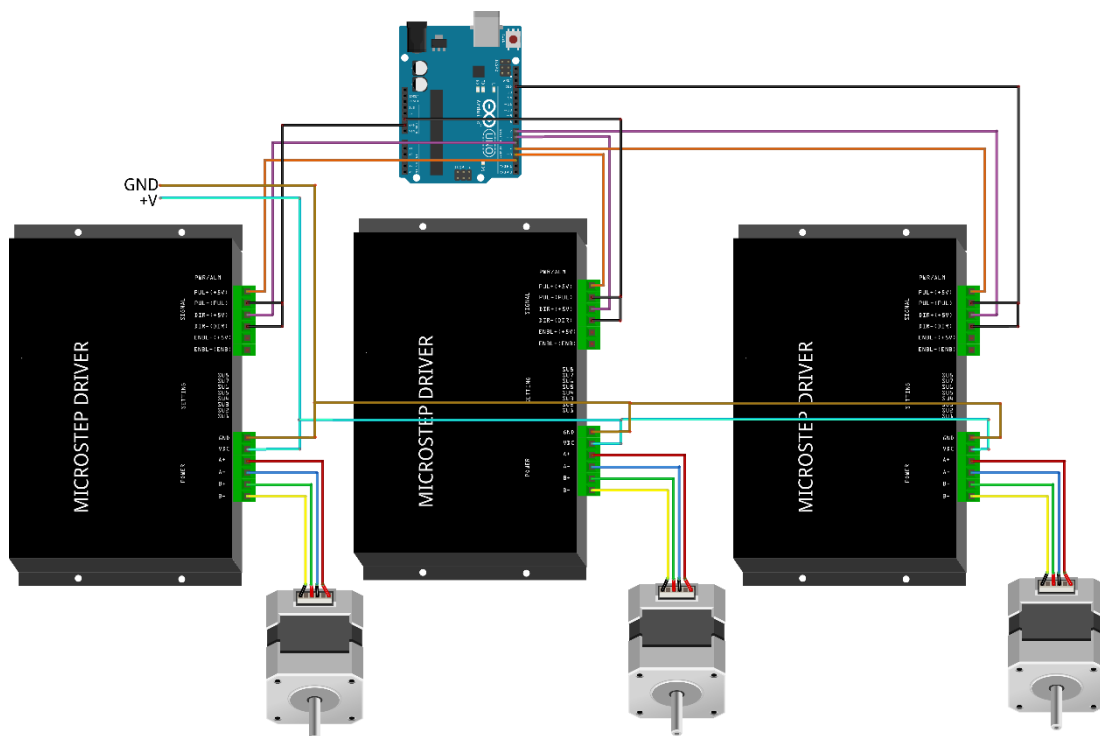
Obrázek 15 Schéma hybridního krokového motoru [16]

Defaultní počet kroků na otáčku však často pro danou aplikaci nestačí, jelikož takový pohyb je většinou trhaný, neplynulý. Úhel natočení jednoho kroku se dá dále rozdělit, tento proces se nazývá mikrokrokování. Při mikrokrokování dochází k plynulejšímu chodu motoru, také však k výraznému snížení přídržného momentu. V experimentu bylo zvoleno 1/16 mikrokrokování k zachování dostatečného momentu a zajištění plynulého pohybu.

K dosažení mikrokrokování, neboli rozdělení kroku na menší části, je potřeba přesně přerozdělit napětí mezi fázová vinutí motoru. K tomu slouží drivery pro krokové motory. Motory použité k přestavbě vyžadují napájení 2.8 A/fázi. Pro ně byly zvoleny LDO MOTORS drivery M542, který mají výstupní proud až 4.2 A a jsou

schopny rozdělit kroky od 2 do 128 mikrokroků. K napájení driverů byl použit 24 V průmyslový zdroj napětí.

K ovládání samotných driverů bylo zvoleno Arduino UNO. Jedná se o základní model z rodiny jednodeskových počítačů Arduino. Mozek tohoto počítače tvoří mikrokontroler ATmega od firmy Atmel, který je umístěn na PCB desce vybavené řadou analogových a digitálních vstupů, napájecích konektorů a dalších součástek. Napájen může být ze sítě, nebo pomocí USB kabelu, jenž zároveň slouží ke komunikaci s počítačem. K ovládání Arduina pomocí počítače se využívá vývojové prostředí Arduino IDE, využívající programovací jazyk Wiring postavený na C++, pomocí kterého se dají do Arduina nahrát i další softwary. Mezi ně patří i GRBL vyvinutý k ovládání CNC strojů. Vstupem pro GRBL jsou G-kódy, jež slouží k programování dráhy nástroje v kartézském souřadnicovém systému. V tomto projektu byla využita open-source platforma Universal G-Code Sender kompatibilní s GRBL. Výhodou platformy představuje přehledné grafické prostředí a jednoduchá změna potřebných parametrů.



Obrázek 16 Schéma zapojení motorů, driverů a arduina - vytvořeno v programu FRITZING

V neposlední řadě bylo nutné provést zapojení všech komponent, které schematicky vyobrazuje obrázek 15. Lze vidět, že se logický obvod oddělil od napájecího pro zachování bezpečnosti. Vinutí obou cívek je přivedeno do driverů spolu s napájením ze zdroje. Při využití softwaru GRBL primárně určeným pro řízení CNC strojů jsou digitální vstupy rozděleny na Arduino UNO, a to podle ovládání jednotlivých os. V tomto případě posílalo Arduino signály do DIR a PUL vstupů na driverech, které odpovídají orientaci otáčení a vysílaným pulzům. Na závěr se přimontovaly k frézce motory pomocí navržených mechanických spojů. Výsledek je na Obrázku 17.



Obrázek 17 Frézka PROXXON MF70 po CNC úpravě

3.3 Metodika experimentu

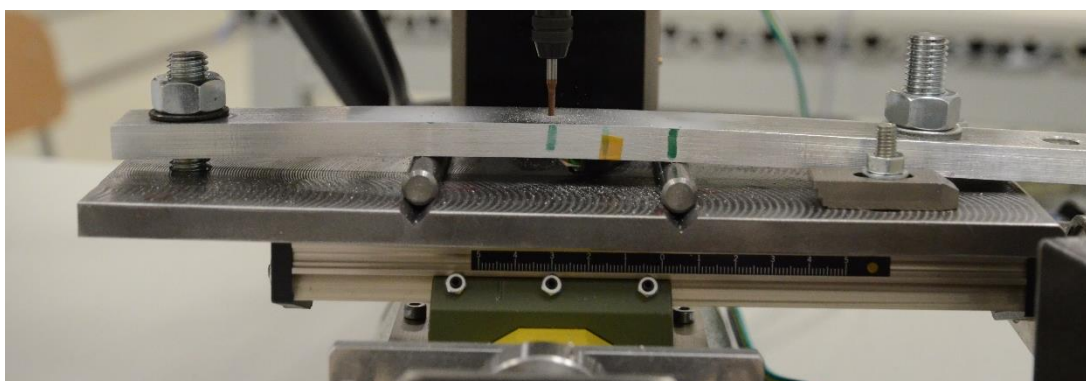
3.3.1 Příprava vzorku

S připravenou aparaturou k provedení odvrtávací metody měřenou pomocí digitální korelace obrazu se mohlo přistoupit k provedení experimentu. V první řadě bylo zapotřebí připravit vzorek k měření. Na hliníkovou tyč obdélníkového průřezu byl nanesen kontrastní vzor pomocí airbrush pistole – nejprve bílý podklad na místo zájmu, posléze černé skvrny stochastického charakteru (viz Obrázek 18).



Obrázek 18 Vzorek po nanesení kontrastního vzoru

Jak lze vidět z Obrázku 19, těleso je opatřené otvory pro uchycení k destičce s dvěma válečky k provedení čtyřbodového ohybu. Pomocí dvojice šroubů a matic byly okraje tyče napínány, velikost deformace byla měřena pomocí tenzometru ve spodní části vzorku. Napětí nepřesáhlo mez kluzu, došlo pouze k elastickým deformacím. Vzorek přichycený k desce byl pevně připevněn k frézce pomocí upínek a šroubů umístěných v T drážkách posuvného stolu.



Obrázek 19 Čtyřbodový ohyb

3.3.2 Odvrtávací metoda

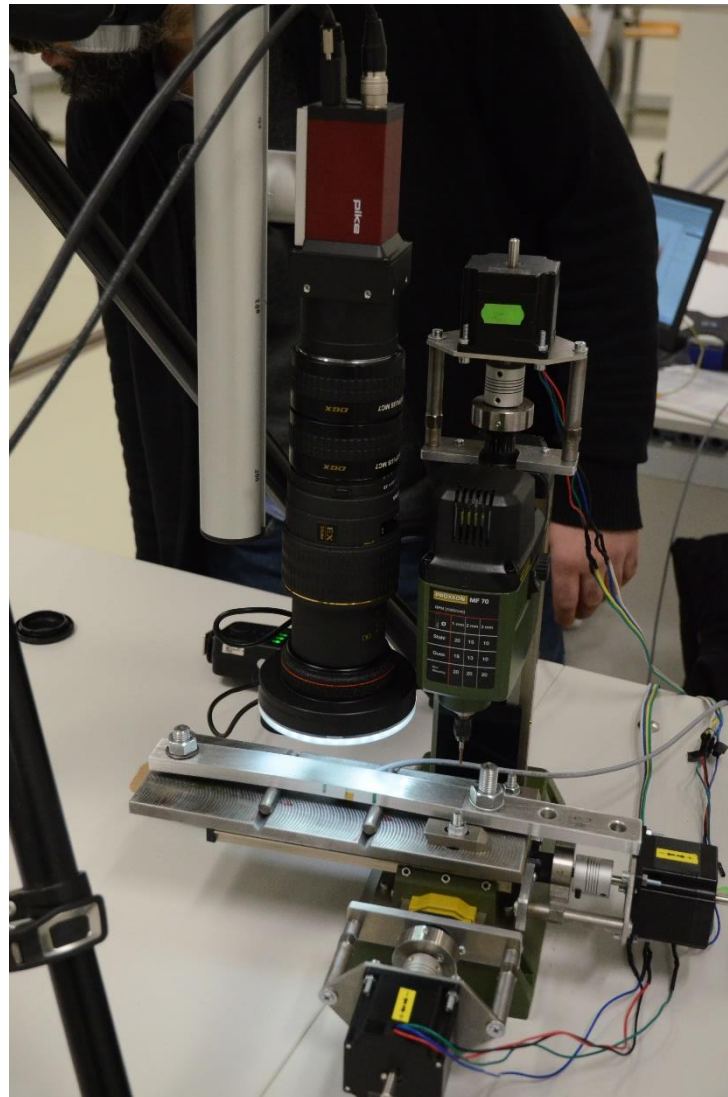
K odvrtávací metodě byla použitý sestavený CNC stroj ovládaný jednodeskovým počítačem Arduino Uno připojeným do laptopu se softwarem UGS (universal g-code sender). UGS disponuje grafickým rozhraním k ovládání posuvů jednotlivých os stroje. Vrtalo se pomocí $\varnothing 3 \text{ mm}$ karbidového vrtáku s rychlostí otáčení $20\,000 \text{ ot.} \cdot \text{min}^{-1}$ a rychlostí posuvu $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Otvor byl odvrtán vprostředku mezi válečkovými podporami, jak je ukázáno na Obrázku 18. Dle normy ASTM E837 se odvrtávání provedlo inkrementálně do hloubky $2,5 \text{ mm}$ s velikostmi kroků uvedených v tabulce. Proces spočíval v odvrtání jednoho kroku a poté automatickým posuvem vzorku tak, aby se otvor nacházel v pozici pod objektivem fotoaparátu (viz obrázek 19), kde byl pořízen snímek.

Tabulka 3 Velikosti kroků

Krok	Velikost [mm]	Hloubka [mm]
1	0.2	0.2
2	0.15	0.35
3	0.25	0.6
4	0.4	1
5	0.5	1.5
6	0.5	2
7	0.5	2.5

3.3.3 Digitální korelace obrazu

Měření digitální korelací obrazu bylo prováděno v softwarovém prostředí Istra 4D od Dantec Dynamics. V první řadě se před měřením musela provést kalibrace za pomoci dodaných kalibračních destiček. V případě použité 2D DIC je zapotřebí, aby se rovná plocha vzorku nacházela v rovnoběžné poloze s objektivem, resp. CCD senzorem, a v konstantní vzdálenosti ve svislém směru; kamera byla upevněna na stativu. Vzorek byl sice zatížen ohybem a plocha tyče tedy nebyla dokonale rovná, avšak díky použitým telekonvertorům byl snímán pouze malý výsek v bezprostřední blízkosti otvoru a takovou oblast lze uvažovat bez průhybu. Poté se každý krok odvrtní zaznamenal kamerou a vyhodnotil v programu Istra 4D.

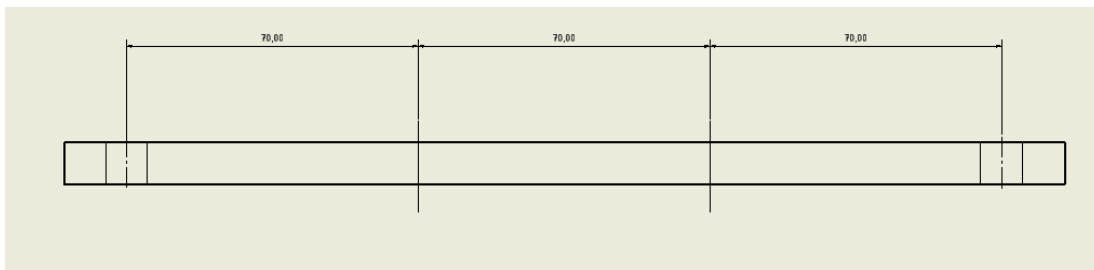


Obrázek 20 Kompletní sestava

4 Experimentální verifikace navrženého stanoviště

4.1 Popis vzorku

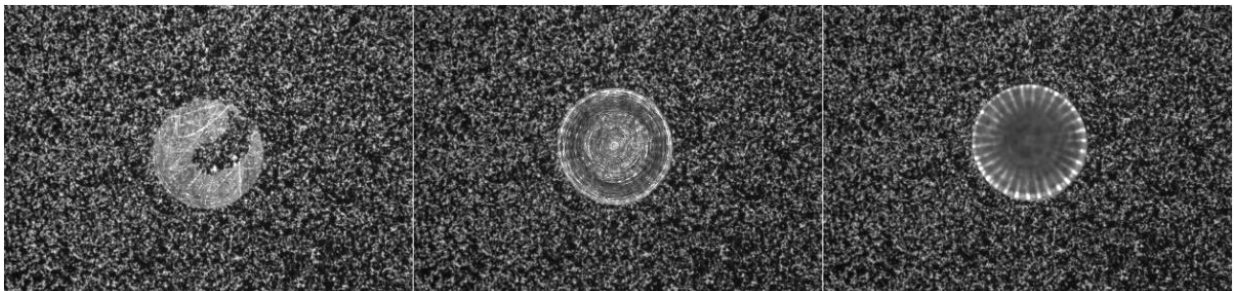
Experiment se prováděl na tyči obdélníkového průřezu o rozměrech $25 \times 10 \times 300 \text{ mm}$. Vzorek tvořila pevná hliníková slitina, ale přesné vlastnosti nebyly známy. K výpočtu se využily dva potřebné parametry, a to Youngův modul pružnosti, jehož hodnota byla odhadnuta na 70 GPa , a Poissonovo číslo (0,33). Vzorek byl opatřen dvěma otvory k uchycení pomocí šroubů a matic k desce, na které byl realizován čtyřbodový ohyb. Vzdálenost mezi otvory činila 210 mm , přičemž středy otvorů se nacházely od válečků ve vzdálenosti 70 mm . Rozteč mezi válečky byla také 70 mm (viz obrázek 21)



Obrázek 21 Schématické zobrazení vzorku s umístěním podpěr

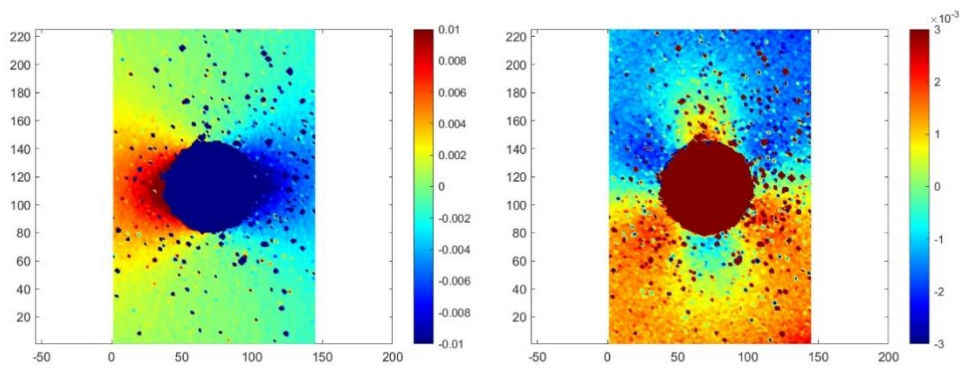
4.2 Naměřená data a vyhodnocení

Data byla naměřena v prostředí programu ISTR4 4D od společnosti Dantec Dynamics. Měření spočívalo v pořízení snímků po každém odvrtném kroku otvoru (ukázka na obrázku 22) a posléze ve vyhodnocení v použitém softwaru. Program ISTR4 4D umožňuje export dat ve hierarchickém datovém formátu hdf5, ve kterém jsou uloženy vyhodnocená pole posuvů a deformací pro daný snímek v různých variantách. Takto vyexportovaná data byla dále zpracovaná v programu Matlab.



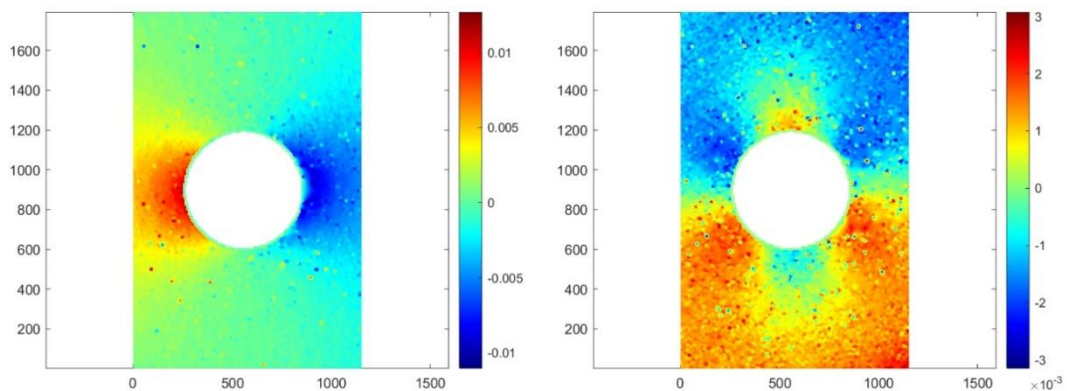
Obrázek 22 Snímky z DIC

Algoritmy digitální obrazové korelace popisují pomocí tvarových funkcí posuvy jednotlivých fazet, čímž se získá pole posuvů. Výpočet poměrných deformací program Istra 4D provádí z distorze jednotlivých fazet, nebo z výpočtu deformačního gradientu z pole posuvů. Tento postup vyžaduje diferenciální výpočet, který je značně náchylný k chybám vstupních dat. Obrázek 21 zobrazuje příklady vyhodnocených polí posuvů ve směru x a y pro jeden konkrétní krok. Z obrázku lze vidět, že jsou vyhodnocená data zatížená chybami. Tyto chyby jsou primárně způsobeny vadnými pixely na CCD senzoru použité kamery, jež se projevují jako nehybné body, a tedy narušují řešení celkového pole posuvů. Další šum je vnášen třískami z vrtání, které byly odstraňovány pomocí stlačeného vzduchu; nicméně nešlo zajistit stoprocentní očištění, a přitom nepoškodit nanesený nástřik na povrchu vzorku. Z dat do této míry zatížených šumem se programu ISTR4 4D nepovedlo kvalitně vyhodnotit pole poměrných deformací.



Obrázek 23 Pole posuvů – před interpolací a) směr x ; b) směr y

Data byla zpracována v programu Matlab. V první řadě se chybné hodnoty nahradily nečíselnými prvky NaN a následně byla použita funkce `inpaint_nans` [17], která za pomoci aproximačního řešení parciálních diferenciálních rovnic interpoluje nečíselné prvky; posléze byla data zahuštěna pomocí funkce `interp2`. K porovnání surových dat z obrázku 23 jsou prezentována stejná data po interpolaci na obrázku 24.



Obrázek 24 Interpolovaná pole posuvů a) směr x ; b) směr y

Z obrázku 24 je patrné, že se v datech stále vyskytují výchyly, a tedy průběh posuvů není hladký; ovšem oproti nezpracovaným datům se dosáhlo výrazného zlepšení. Interpolované posuvy ve směru x a y sloužily k výpočtu tenzoru malých deformací.

Nejprve bylo zapotřebí vypočítat gradient posunutí \mathbf{z} :

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} u_{xx} & u_{xy} \\ u_{yx} & u_{yy} \end{bmatrix} = \text{Grad } u \quad (5.1)$$

Z gradientu posunutí byl určen deformační gradient \mathbf{F} dle vztahu

$$\mathbf{F} = \mathbf{z} + \mathbf{I} \quad (5.2)$$

pro dosazení do vztahu pro tensor malých deformací $\boldsymbol{\epsilon}$:

$$\boldsymbol{\epsilon} = \frac{1}{2}(\mathbf{F} + \mathbf{F}^T) - \mathbf{I} \quad (5.3)$$

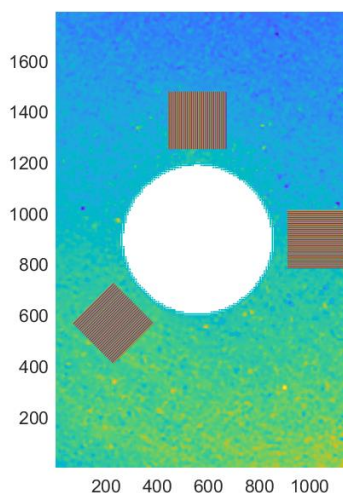
Kde u_{xx}, u_{yy}, u_{xy} představují parciální derivace posuvů a \mathbf{I} jednotkovou matici. Z tenzoru malých deformací byly zjištěny složky poměrných deformací $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{xy}$ potřebné k dalšímu výpočtu.

Norma ASTM E837 využívá k měření tenzometrické růžice standardizovaných dimenzí s odporovými tenzometry. Nejčastěji používanou geometrii představuje růžice typu A (viz obrázek 5) s rozměry uvedené v tabulce 4.

Tabulka 4 Rozměry tenzometrické růžice typu A

TYP A	Délka tenzometrů [mm]	Šířka tenzometrů [mm]	Vnitřní poloměr růžice [mm]	Vnější poloměr růžice [mm]
	1,59	1,59	1,77	3,36

Pro výpočet zbytkových napětí v souladu s touto normou byla v programu Matlab vytvořena virtuální tenzometrická růžice z plošných tenzometrů, které svými rozměry odpovídají ploše vinutí jednotlivých odporových tenzometrů růžice typu A (viz obrázek 25). Z polí poměrných deformací byla extrahovány data příslušející právě této virtuální růžici. Z těchto dat byly určeny střední hodnoty sloužící dalšímu výpočtu. Růžice byla vytvořena ve třech variacích pootočených od 90° proti směru hodinových ručiček.



Obrázek 25 Schématické zobrazení virtuální růžice

V souladu s normou ASTM 837 byl proveden výpočet zbytkových napětí integrální metodou pro nehomogenní závislost napětí na hloubce otvoru. Došlo k napačítání kombinace deformací p, q, t (2.28 – 2.30) pro jednotlivé inkrementy hloubky otvoru. Tyto kombinace se posléze dosadily do rovnic:

$$\bar{a}P = \frac{E}{1 + \nu} p \quad (5.4)$$

$$\bar{b}Q = Eq \quad (5.5)$$

$$\bar{b}T = Et \quad (5.6)$$

Kde \bar{a}, \bar{b} představují kalibrační matice, jejichž hodnoty jsou pro jednotlivé hloubky vrtu v normě tabelovány a P, Q, T jsou vektory kombinací napětí. Z takto získaných vztahů se již dle kapitoly 2.3.4 vypočítají hodnoty hlavních napětí a jejich úhel natočení v závislosti na hloubce [11].

$$(\sigma_{max})_k, (\sigma_{min})_k = P_k \pm \sqrt{Q_k^2 + T_k^2} \quad (5.7)$$

$$\beta_k = \text{atan} \left(\frac{-T_k}{-Q_k} \right) \quad (5.8)$$

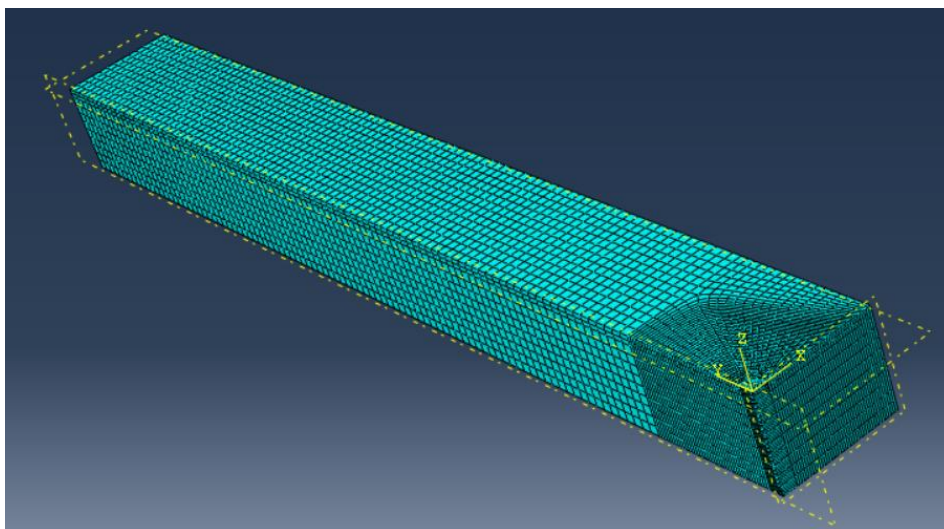
Dále byl proveden výpočet pro napětí s konstantním průběhem vzhledem k hloubce popsaný v kapitole 2.

4.3 Numerické modelování verifikačního experimentu

K numerickému modelování experimentu byl využit konečnoprvkový řešič Abaqus CAE 2019 umožňující vytvoření modelu, jeho analýzu a vizualizaci výsledků. Jak již bylo řečeno, prvotní záměr spočíval v měření zbytkových napětí na vzorcích s vrubem, u kterých však nedošlo k dostatečnému uvolnění deformací. Proto byl před alternativním postupem měření deformací na tyči zatížené čtyřbodovým ohybem vytvořen MKP model simulující takové podmínky, jež zajistí dostatečnou relaxaci deformací po odvrtání otvoru.

4.3.1 MKP model

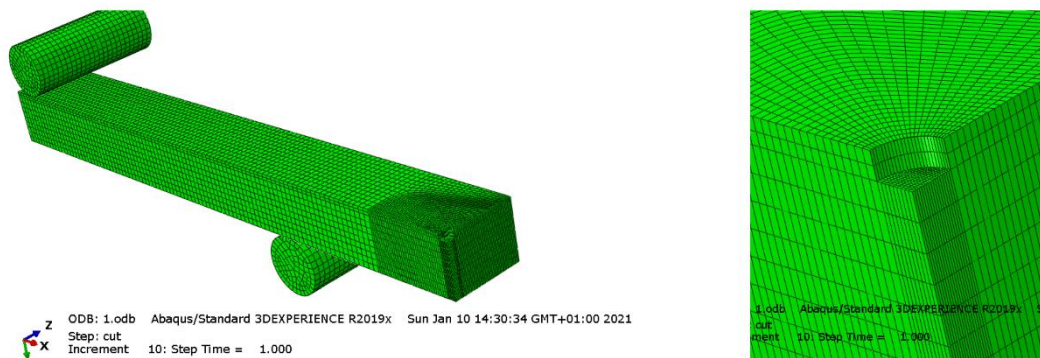
Vzhledem k symetrii problému a ušetření výpočtového času byl vytvořen čtvrtinový model. Roviny symetrie vzhledem k souřadnicovému systému na obrázku 28 byly yz a xz . Model tyče se vytvořil jako trojrozměrné deformovatelné těleso, válečkové podpěry k uskutečnění čtyřbodového ohybu jako 3-D tuhé těleso; tělesa spolu byla následně spojena pomocí general contact interaction.



Obrázek 26 Čtvrtmodel tyče

Simulace experimentu se rozdělila do dvou kroků: ohyb a odvrtání. V prvním kroku byl proveden ohyb posuvem levé krajní válečkové podpěry ve směru osy y (obrázek 29), přičemž pravá podpěra byla plně fixována v prostoru aplikací okrajové podmínky ENCASTRE, zamezující posuvu a rotaci ve všech směrech. Odvrtání simulovala deaktivace příslušných elementů (pomocí příkazu *model change*).

K vytvoření sítě modelu tyče byly zvoleny standardní lineární 8 uzlové elementy značené C3D8R. V blízkosti otvoru byla síť lokálně zahuštěna k zajištění detailnější analýzy v této oblasti (obrázek 29).



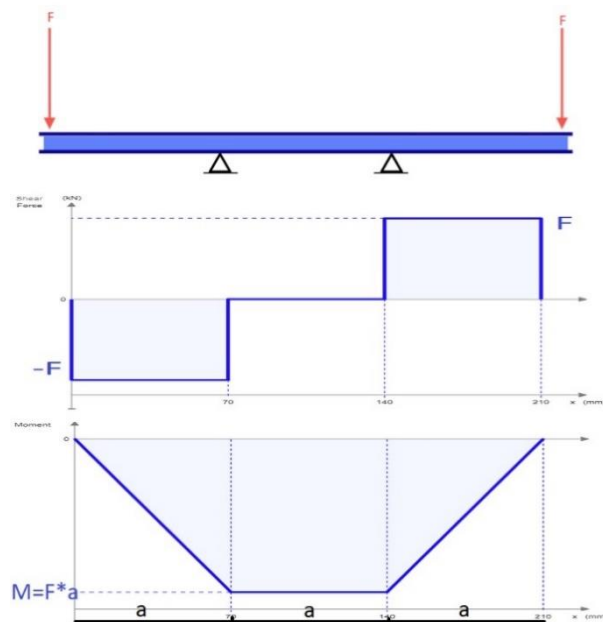
Obrázek 27 Model tyče - síť, detail

Po provedení výpočtu se v postprocesoru vytvořilo pole zbytkových deformací jako rozdíl deformací před a po odvrtání otvoru na tyči zatížené ohybem. Tímto způsobem se získaly informace o stavu deformací, které by se měly vzhledem k simulaci uvolnit po aplikaci odvrtávací metody.

4.3.2 Analytický výpočet

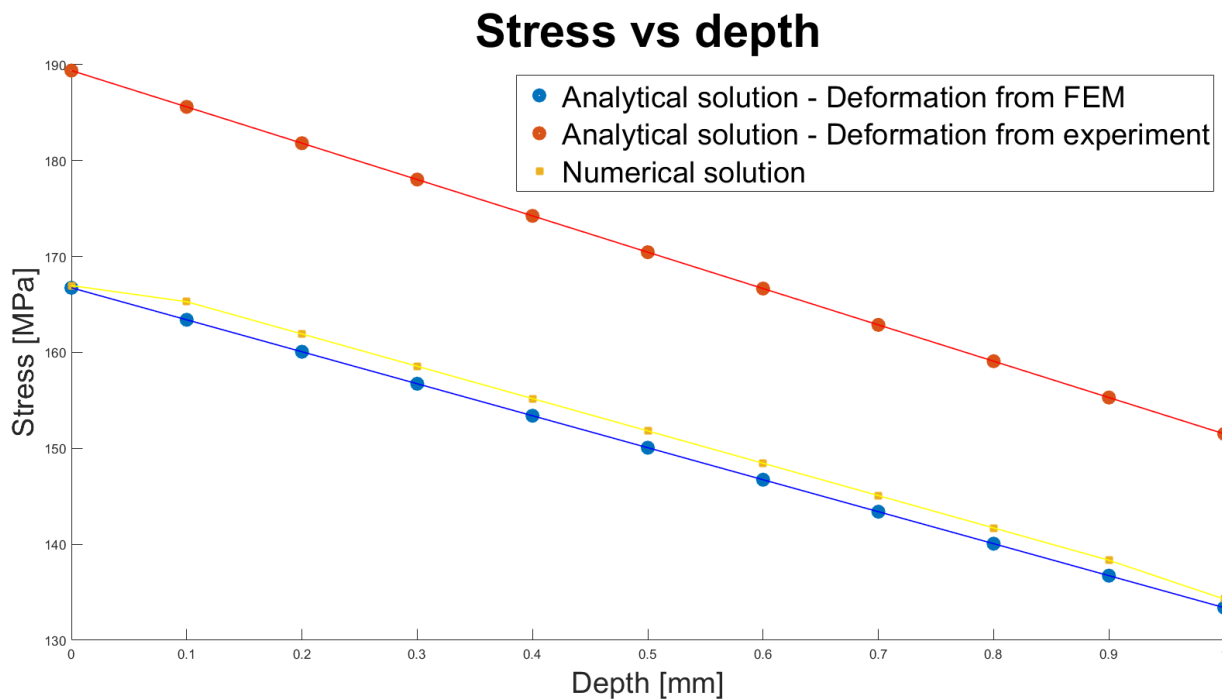
Z modelu byla zjištěna poměrná deformace v podélném směru x ve spodní části tyče pod místem odvrtání. Aby experiment bylo možno provést v souladu s vytvořeným MKP modelem, tak se reálném vzorku v tomto místě lokalizoval odporový tenzometr v podélném směru tyče. Pomocí tenzometrické stanice HMB byl snímán signál z tenzometru a za postupným utahováním krajních šroubů (obrázek 19) stála snaha dosáhnout hodnoty poměrné deformace, která byla zjištěna z MKP modelu. Hodnota poměrné deformace z modelu činila $-2\,705,6 \mu m \cdot m^{-1}$ a hodnota odečtena z tenzometru na skutečném vzorku $-2\,229 \mu m \cdot m$. Vzhledem k ručnímu utahování se nepodařilo dosáhnout přesné shody.

Pro ověření správnosti MKP modelu sloužil analytický výpočet čtyřbodového ohybu. Obrázek zachycuje schématické zobrazení problému spolu s průběhem posouvající síly a ohybového momentu, který je mezi válečkovými podpěrami konstantní. Z ohybového momentu bylo analyticky vypočítáno ohybové napětí v závislosti na vzdálenosti od neutrální osy průřezu nosníku a porovnáno s numerickým řešením získaným konečnoprvkovým řešičem. Síla vyvolaná šrouby na krajích vzorku byla spočítána ze známé deformace pomocí Hookova zákona.



Obrázek 28 Čtyřbodový ohyb

Porovnání numerického a analytického řešení s deformací odečtenou z modelu v Abaqusu je prezentováno v následujícím grafu. Průběh analyticky vypočteného ohybového napětí v závislosti na hloubce měřené od povrchu vzorku jsou v dobré shodě s numerickým modelem, průměrná odchylka mezi hodnotami činí 1,03 %. Tím je numerický model ověřen. Stejný analytický výpočet byl proveden i pro deformaci, jež byla odečtena pomocí odporového tenzometru umístěného na vzorku, kde byla vypočtena průměrná odchylka od numerického modelu 11,05 %.

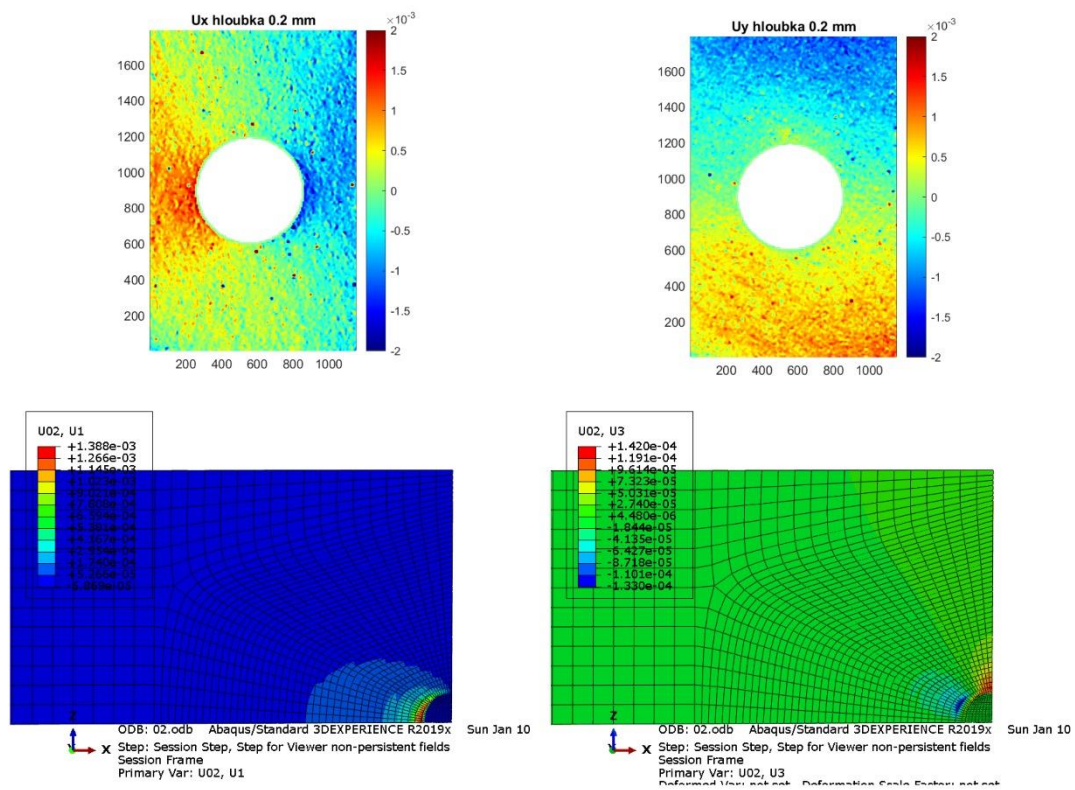


Obrázek 29 Analytické vs numerické řešení - deformace z modelu

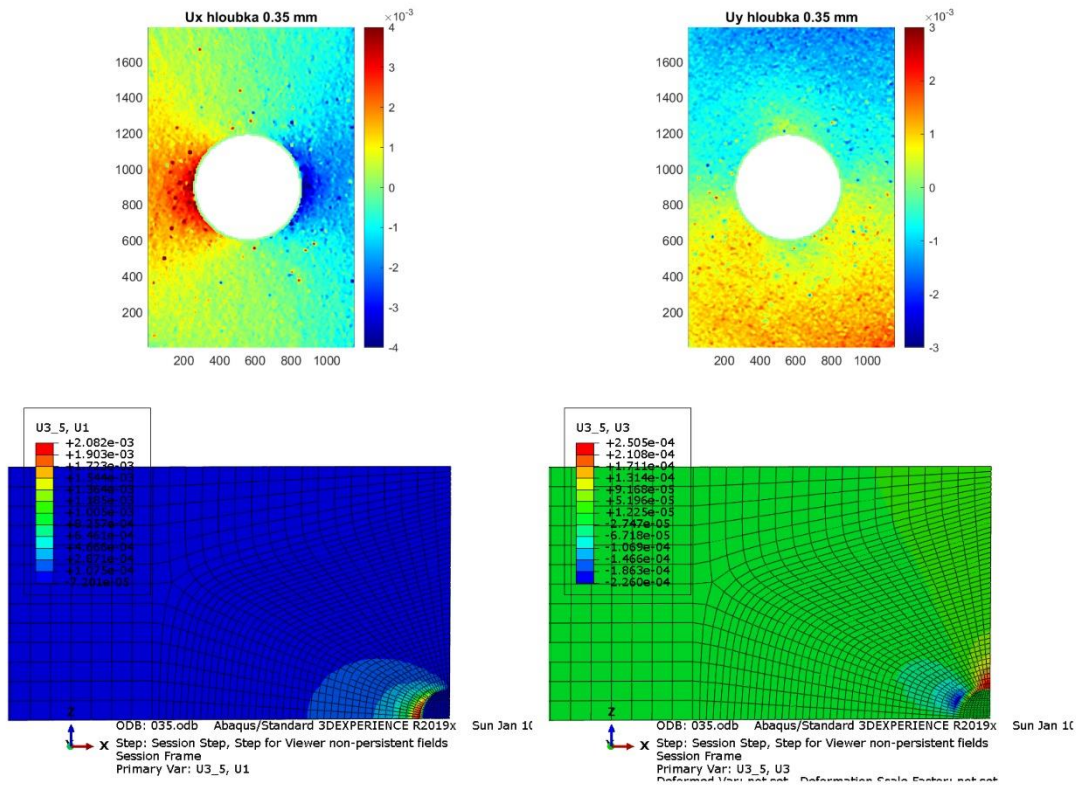
4.4 Výsledky

4.4.1 Naměřená a numericky vypočítaná pole posuvů

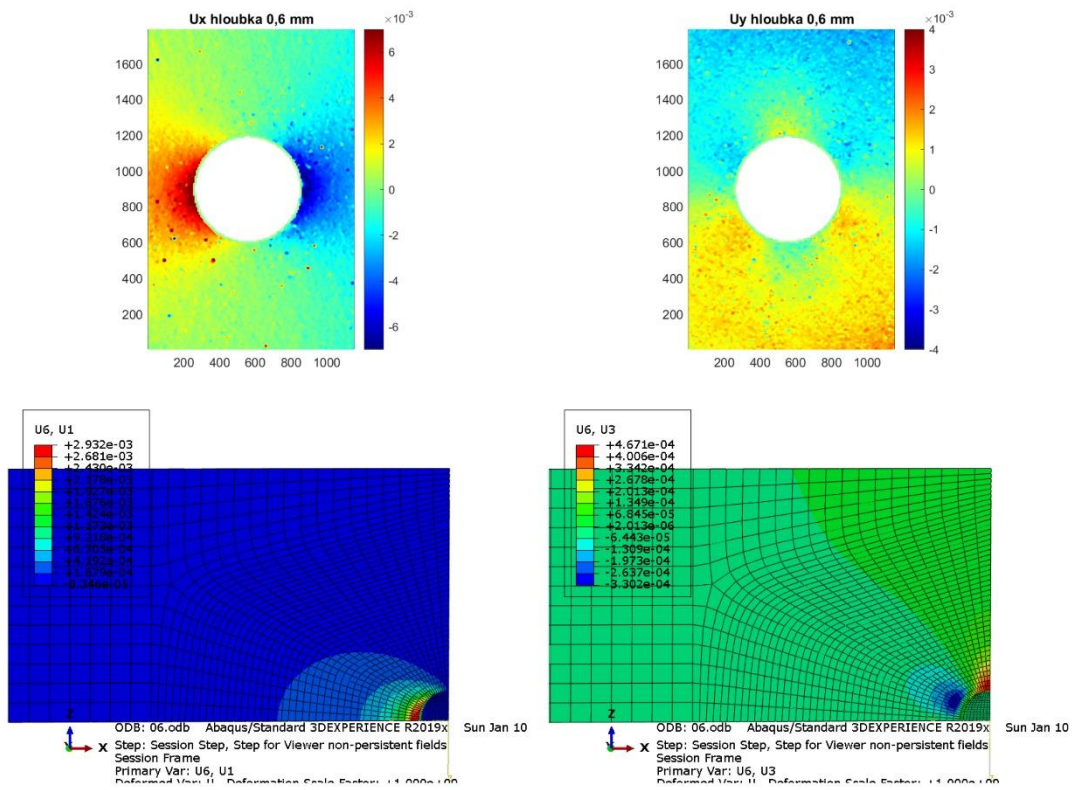
V následující stati jsou prezentovány výsledky experimentálního měření v porovnání s numerickým modelem vytvořeným v programu abaqus na obrázcích 30 až 33.



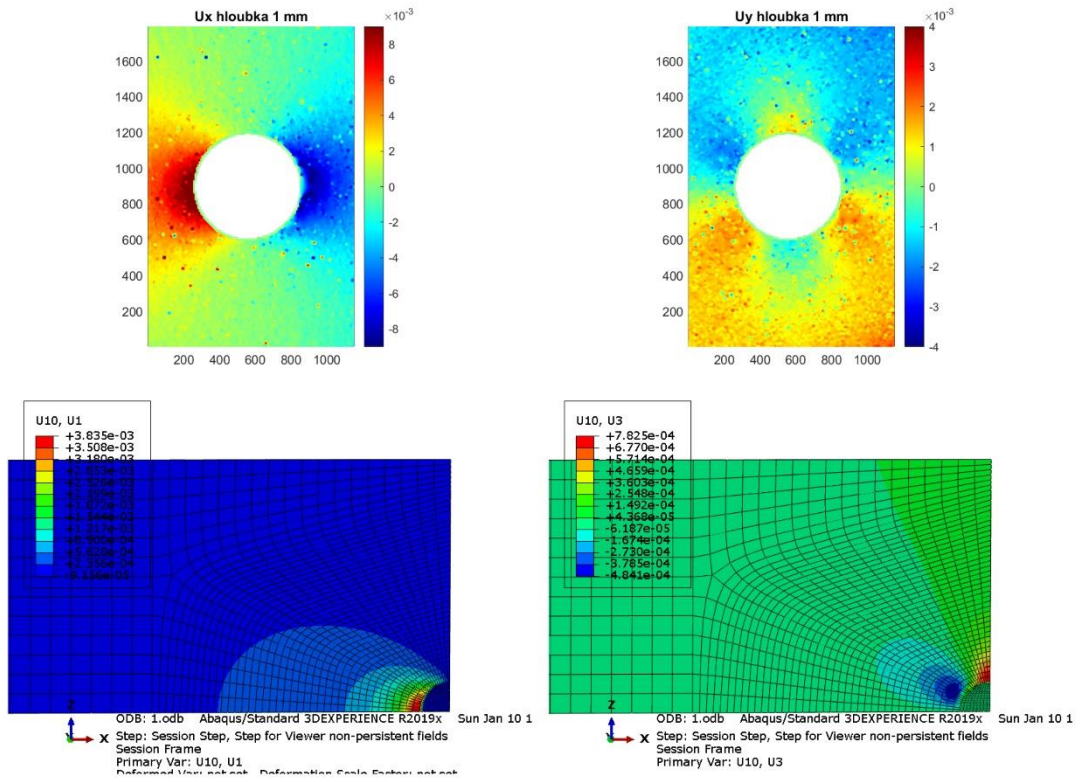
Obrázek 30 Naměřené posuvy ve srovnání s modelem – hloubka 0,2 mm



Obrázek 31 Naměřené posuvy ve srovnání s modelem – hloubka 0,35 mm



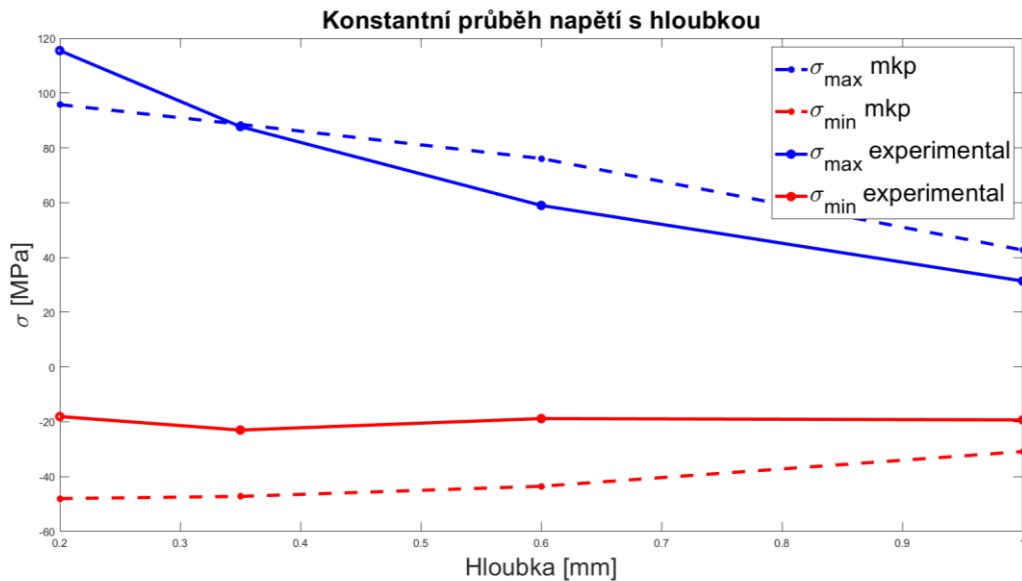
Obrázek 32 Naměřené posuvy ve srovnání s modelem – hloubka 0,6 mm



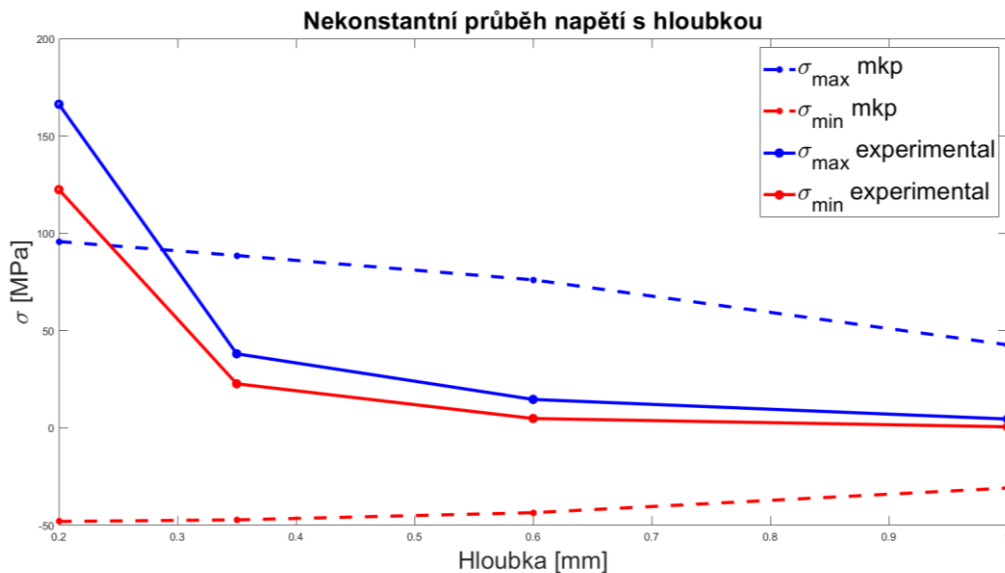
Obrázek 33 Naměřené posuvy ve srovnání s modelem – hloubka 1 mm

4.4.3 Průběhy hlavních napětí

Norma ASTM E837 poskytuje výpočetní řešení pro konstantní a nekonstantní průběh hlavních napětí s hloubkou z naměřených dat pomocí tenzometrické růžice. Byly provedeny oba výpočty a jejich řešení srovnané s numerickým modelem je zobrazeno v následujících grafech. Výpočty byly provedeny pro 3 varianty virtuálních tenzometrických růžic a poté vypočítány průměrné hodnoty hlavních napětí.



Obrázek 34 Konstantní průběh napětí s hloubkou



Obrázek 35 Nekonstantní průběh napětí s hloubkou

4.5 Diskuse

Autor sestavil levné experimentální pracoviště pro aplikaci odvrtávací metody ve spojení s digitální obrazovou korelací ke stanovení zbytkových napětí v materiálu pomocí laboratorní frézky, kterou přestavěl na malé přenosné CNC zařízení. Dále ověřil funkčnost stanoviště na hliníkové tyči obdélníkového průřezu zatížené čtyřbodovým ohybem.

K odvrtávací metodě se běžně využívá komerčně prodávaný systém MTS3000 – Restan od firmy SINT Technology, jehož parametry jsou uvedeny v tabulce 5. Jedná se o patentovaný automatický systém pro měření zbytkových napětí v souladu s normou ASTM E837, který umožňuje provedení a vyhodnocení metody. K systému je dodávaný software, který umožňuje plné vyhodnocení odvrtávací metody pro standardizované tenzometrické růžice a normovaný postup. Norma doporučuje vysokorychlostní vrtání od 20 000 do 400 000 $ot \cdot min^{-1}$. Dále předepisuje přípustnou excentricitu a přesnost odvratané hloubky v rozmezí $\pm 0,004 \cdot D$.

Tabulka 5 Parametry MTS3000

Rozměr	[mm]	270x160x175
Váha	[kg]	4,6
Maximální rychlost vrtání	[$ot \cdot min^{-1}$]	400 000
Rychlost posuvu	[$mm \cdot min^{-1}$]	0,03 až 1
Vertikální zdvih (ruční)	[mm]	60
Vertikální zdvih (krok. Motor)	[mm]	6
Horizontální pohyb (x,y)	[mm]	7-10

V přestavěné frézce Proxxon MF70 na CNC stroj byly pro pohony os využity krokové motory NEMA 23, které mají velikost kroku $1,80^\circ$ s přesností $\pm 5 \%$ a byly ovládány pomocí driverů pro krokové motory, které umožňují jemnější dělení kroků pomocí mikrokrokování. Vrtačka frézky dovoluje rychlost otáčení až 20 000 ot/min . Posuv dvojsoého stolu a vertikálního vedení frézky je uskutečněn vodíci šrouby, u kterých se v provozu objevil problém s menší hysterezí. K přesnému měření pojezdu ve vertikálním směru byl proto použit číselníkový úchylkoměr.

Sestavený CNC stroj nedosahuje přesnosti komerčně prodáváného systému MTS3000 a je omezen rychlostí vrtání do $20\,000\text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Dále je sestavený stroj omezený pouze na vzorky menších rozměrů, které lze uchytit na stolek frézky. Hlavní výhodou sestaveného stroje spočívá ve větším rozsahu pojezdu dvojosého stolu (viz tabulka 2) a výrazně nižší pořizovací ceně. Při měření pomocí digitální korelace obrazu bylo možné provést po každém odvrtání posuv vzorku pod optickou aparaturu, kde byl pořízen snímek, a to bez nutnosti ručně manipulovat se stativem či vzorkem. Tím se zajistila konstantní vzdálenost mezi povrchem vzorku a CCD senzorem, což je podstatná podmínka pro uskutečnění dvojrozměrně digitální korelace obrazu.

K zajištění dostatečného uvolnění deformací v závislosti na citlivosti použité DIC techniky byl vytvořen numerický model v programu Abaqus simulující vyhovující podmínky. Z modelu byla odečtena hodnota poměrné deformace v podélném směru tyče v místě pod oblastí odvrtání, kde byl na reálném vzorku umístěn odporový tenzometr. Ohýbáním vzorku pomocí dvou šroubů byla snaha dosáhnout co nejbližší shody poměrné deformace snímané odporovým tenzometrem na skutečném tělese s deformací odečtenou z MKP modelu. Vzhledem k ručnímu utahování šroubů nebylo dosaženo přesné shody. Pro ověření správnosti MKP modelu bylo provedeno analytické řešení ohybového napětí mezi válečkovými podpěrami při čtyřbodovém ohybu, které bylo porovnáno s příslušným odečteným napětím z numerického modelu (obrázek 29). Analytický výpočet byl proveden pro deformaci odečtenou z MKP modelu, kde se dosáhlo průměrné vzájemné odchylky 1,03 % a pro deformaci naměřenou odporovým tenzometrem, kde byla vypočtena průměrná odchylka 4,8 %. Průběh napětí s hloubkou z MKP modelu má očekávaný lineární průběh a je v dobré shodě s analytickým výpočtem.

Pomocí sestavené aparatury bylo provedeno měření na připraveném vzorku zatíženým ohybem a programem Istra 4D byla získána pole posuvů v jednotlivých fázích odvrtávací metody, odpovídajících jednotlivým krokům vrtání. Výsledky byly exportovány do hierarchického datového souboru HDF5 k dalšímu zpracování v programu Matlab. Pole posuvů před zpracováním (obrázek 23) obsahovala oblasti, které nebyly správně vyhodnoceny pomocí softwaru Istra. Hlavním důvodem byly poškozené pixely na CCD senzoru digitální kamery, které zavedly chybu ve

vyhodnocení deformace fazet obsahujících tyto pixely. Těmto fazetám byl přiřazen nulový posuv a v jejich okolí vznikly lokální extrémy. Další šum v datech byl způsoben třískami z vrtání ulpívajících na vzorku, které se i přes pravidelné očišťování povrchu stlačeným vzduchem nepodařilo odstranit v plném rozsahu. Pro interpolaci dat byla zvolena funkce `inpaint_nans`, které slouží k interpolaci nečíselných prvků, kterými byly nahrazeny nulové hodnoty v polích posuvů a vysoké extrémy v jejich okolí.

Na obrázcích 30 až 33 jsou zobrazeny interpolovaná pole posuvů z měření pomocí DIC a porovnány s numerickým MKP modelem. Naměřené posuvy ve směrech x a y jsou svým průběhem v souladu s numerickým modelem. Ve směru x dosahují naměřené hodnoty průměrně dvojnásobné velikosti v porovnání s daty, která byla získána výpočtem, přičemž ve směru y dosahují naměřená data přibližně o řád vyšších hodnot. Vyšší hodnoty naměřených dat byly očekávány vzhledem k vyšší aplikované deformaci na reálné těleso oproti numerickému modelu.

Vstupní data pro normovaný výpočet z ASTM E837 jsou poměrné deformace naměřené tenzometrickou různicí standardizovaných rozměrů. Pro vyhodnocení pomocí DIC byl zvolen postup s virtuální tenzometrickou různicí. Z interpolovaných polí posuvů byl vypočítán tensor malých deformací a určeny složky deformace $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{xy}$. Z nich byly odečteny střední hodnoty pomocí virtuální různice odpovídající svými rozměry ploše vinutí jednotlivých tenzometrů standardizované, komerčně prodávané různici typu A, definované normou ASTM E837. Tyto hodnoty byly poté použity k výpočtu hlavních napětí normovaným výpočtem jak pro konstantní, tak nekonstantní průběh napětí s hloubkou.

V grafech na obrázcích 34 a 35 jsou srovnány vypočítané průběhy zbytkových napětí pomocí normy ASTM E837 s hlavními napětími odečtenými z numerického modelu. V programu Abaqus bylo vytvořeno pole zbytkových napětí jako rozdíl napětí před a po odvrtní otvoru na tyči zatížené ohybem. Minimální a maximální hlavní napětí byla odečítána v řezech rovin xy a yz (obrázek 27) z cest odpovídajících odvrtným hloubkám kroků v experimentu. Průběh hlavních napětí se mění s vzdáleností od kraje otvoru, proto bylo vytvořeno více cest tak, aby pokryly plnou délku standardizovaného tenzometru a byl spočítán průměr těchto napětí. Průběh hlavních napětí získaný standardizovaným výpočtem pro konstantní průběh

zbytkových napětí s hloubkou sleduje trend odečtených hlavních napětí z MKP s průměrnou odchylkou 20,77 % pro maximální hlavní napětí a s průměrnou odchylkou 115,52 % pro minimální hlavní napětí. Nekonstantní průběh zbytkových napětí s hloubkou počítaný integrální metodou přiřazuje oběma hlavním napětím tahový charakter, což neodpovídá průběhu, jež byl získán numerickým výpočtem.

Výpočet poměrných deformací z posuvů a výpočet napětí integrální metodou jsou výpočetní operace, které jsou velmi citlivé na chyby vstupních dat. Vstupní data pro výpočet tenzoru deformace byla pole posuvů zatížené šumem, což se jeví jako hlavní důvod nepřesnosti ve výpočtu hlavních napětí integrální metodou. Dále byl výpočet ovlivněn volbou kroků odvrátání, které měly být stejné velikosti. Výpočet hlavních napětí pro konstantní průběh s hloubkou je v relativně dobré shodě s numerickým výpočtem. Hlavní zdroj odchylek je již zmíněný přepočtení posuvů na poměrné deformace a rozlišenost aplikované deformace vzorku oproti simulovaným podmínkám.

Závěr

Úkolem autora bylo sestavit levné experimentální stanoviště pro měření zbytkových napětí odvrtávací metodou ve spojení s digitální obrazovou korelací. K tomuto účelu úspěšně přestavěl modelářskou frézku na přenosný CNC stroj a sestavil pracoviště pro měření optickou metodou DIC. Stanoviště otestoval na vzorku zatíženém čtyřbodovým ohybem, na který aplikoval odvrtávací metodu a vyhodnotil ji v souladu s normou ASTM E837 pro případ konstantního i nekonstantního průběhu zbytkových napětí s hloubkou. Experiment byl numericky verifikován modelem vytvořeným v programu Abaqus. Vypočtená napětí s konstantním průběhem s hloubkou byly ve výrazně lepší shodě s numerickým modelem oproti výpočtu nekonstantního průběhu napětí s hloubkou.

Sestavené experimentální stanoviště je vhodné k aplikaci odvrtávací metody ve spojení s digitální obrazovou korelací. Je omezené na vzorky menších velikostí vzhledem k rozměrům frézky. Výhodou stroje je velký posuv v x-ovém směru, díky čemuž lze po každém odvrtání přivést vzorek pod optickou aparaturu k měření pomocí dvojrozměrné digitální korelace bez nutnosti ručně manipulovat se vzorkem či stativem.

Vyhodnocení odvrtávací metody pomocí DIC přináší nové možnosti ve vývoji měření zbytkových napětí. Výhodou oproti měření tenzometrickou růžicí je získání informace o kompletních polích deformací za současné eliminace nutnosti pracného instalování odporových tenzometrů.

LITERATURA

- [1] Schajer, Gary S., and Gary S. Schajer. , 'Practical Residual Stress Measurement Methods', Anonymous Translator(, New York, WILEY, 2013).
- [2] Ttp.zcu.cz. 2020. Odvrtávací Metoda (Metoda Otvoru) | Termomechanika Technologických Procesů. [online] Available at: <<https://ttp.zcu.cz/cz/laboratore/zbytkova-napeti/detaily-metody>> [Accessed 16 December 2020].
- [3] Schajer, G. S. 'Relaxation Methods for Measuring Residual Stresses: Techniques and Opportunities', Experimental Mechanics, vol. 50/no. 8, (2010), pp. 1117-1127.
- [4]2020.[online] Available at: <https://www.stresstech.com/download_file/view_inline/456/> [Accessed 16 December 2020].
- [5] Tebedge, N., G. Alpsten, and L. Tall. 'Residual-Stress Measurement by the Sectioning Method - A Procedure for Residual-Stress Measurements by the Sectioning Method is Described. Two Different Hole-Drilling Methods were Performed and the Results are Compared', Experimental Mechanics, vol. 13/no. 2, (1973), pp. 88-96.
- [6] Hu, Zhenxing, Huimin Xie, Jian Lu, et al. 'Residual Stresses Measurement by using Ring-Core Method and 3D Digital Image Correlation Technique', Measurement Science & Technology, vol. 24/no. 8, (2013), pp. 85604.
- [7] Prime, M. B. 'Cross-Sectional Mapping of Residual Stresses by Measuring the Surface Contour After a Cut', Journal of Engineering Materials and Technology, vol. 123/no. 2, (2001), pp. 162-168.
- [8] Totten, George E., Maurice Howes, and Tatsuo Inoue. , 'Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel', Anonymous Translator(, Materials Park, ASM International, 2002).
- [9] [online]. [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: https://hill-engineering.com/wp-content/uploads/2016/03/Hill-Eng_slitting_1pg_r1v2.pdf
- [10] Tech Note TN-503, Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method, Vishay Precision Group, 2010. [Online] <http://www.vishaypg.com/docs/11053/tn503.pdf>
- [11] ASTM E837-13a, Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013

- [12] Fitzpatrick, Michael & Fry, Antony & Holdway, Philip & Kandil, Fayez & Shackleton, J. & Suominen, L. (2002). Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction. 52.
- [13] Sutton, Michael A., Jean-Jos Orteu, and Hubert W. Schreier. , 'Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications', Anonymous Translator(, New York, Springer, 2009).
- [14] Pan, B., Qian, K., Xie, H. & Asundi, A. 2009, "Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review", Measurement science & technology, vol. 20, no. 6, pp. 062001.
- [15] Schajer, G.S., Schajer, G.S., Winiarski, B., Winiarski, B., Withers, P.J. & Withers, P.J. 2013, "Hole-Drilling Residual Stress Measurement with Artifact Correction Using Full-Field DIC", Experimental mechanics, vol. 53, no. 2, pp. 255-265.
- [16] [online]. [cit. 2021-01-13]. Dostupné z: <http://profirobot.cz/wp-content/uploads/2018/03/Krokov%C3%A9-motory.pdf>
- [17] John D'Errico (2021). inpaint_nans (https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/4551-inpaint_nans), MATLAB Central File Exchange. Retrieved January 15, 2021.
- [18] [online]. [cit. 2021-01-10]. Dostupné z: <https://www.proxxon.com/en/micromot/27110.php?search>

Seznam tabulek

Tabulka 1 Parametry použité kamery	25
Tabulka 2 Technické parametry PROXXON MF70 [18]	26
Tabulka 3 Velikosti kroků	32
Tabulka 4 Rozměry tenzometrické růžice typu A	37
Tabulka 5 Parametry MTS3000	47

Seznam obrázků

Obrázek 1 Porovnání metod (a) odvrtávací, (b) ring-core [1]	9
Obrázek 2 Metoda řezu [9]	9
Obrázek 3 Metoda kontur [7]	10
Obrázek 4 Proces magnetizace – hystereze [1]	11
Obrázek 5 [1].....	13
Obrázek 6a) před otvrtáním b) po odvrtání [10]	15
Obrázek 7 Radiální a tečné deformace v závislosti na vzdálenosti od středu [10]....	17
Obrázek 8 Tenzometrická růžice [10]	18
Obrázek 9 Porovnání 2D a 3D DIC a) jedna kamera b) dvě kamery [13]	20
Obrázek 10 Podoblast v referenčním snímku a na snímku po deformaci [14]	21
Obrázek 11 Korelační kritéria [14]	23
Obrázek 12 Nalezení extrému CC korelačního kritéria [14]	23
Obrázek 13 Frézka PROXXON MF70 1 - ruční ovládání, 2 – motorová skříň, 3 – stůl s dvojosým pojezdem, 4 – podstavec, 5 – stupňovité upínáky, 6 – kleštinová upínací pouzdra, 7 – vertikální vedení, 8 – kleštiny pro upínání [18]	26
Obrázek 14 Navržené díly pro přestavbu frézky.....	27
Obrázek 15 Schéma hybridního krokového motoru [16]	28
Obrázek 16 Schéma zapojení motorů, driverů a arduina - vytvořeno v programu FRITZING	29
Obrázek 17 Frézka PROXXON MF70 po CNC úpravě	30
Obrázek 18 Vzorek po nanesení kontrastního vzoru.....	31
Obrázek 19 Čtyřbodový ohyb	31
Obrázek 20 Kompletní sestava	33
Obrázek 21 Schématické zobrazení vzorku s umístěním podpěr	34
Obrázek 22 Snímky z DIC	35
Obrázek 23 Pole posuvů – před interpolací a) směr x; b) směr y	36
Obrázek 24 Interpolovaná pole posuvů a) směr x; b) směr y.....	36
Obrázek 25 Schématické zobrazení virtuální růžice	38
Obrázek 26 Čtvrtní model tyče	39
Obrázek 27 Model tyče - síť, detail.....	40

Obrázek 28 Čtyřbodový ohyb	41
Obrázek 29 Analytické vs numerické řešení - deformace z modelu.....	42
Obrázek 30 Naměřené posuvy ve srovnání s modelem – hloubka 0,2 mm	43
Obrázek 31 Naměřené posuvy ve srovnání s modelem – hloubka 0,35 mm	44
Obrázek 32 Naměřené posuvy ve srovnání s modelem – hloubka 0,6 mm	44
Obrázek 33 Naměřené posuvy ve srovnání s modelem – hloubka 1 mm	45
Obrázek 34 Konstantní průběh napětí s hloubkou	46
Obrázek 35 Nekonstantní průběh napětí s hloubkou.....	46