

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie



Bakalářská práce

Bezdotykové měřicí systémy pro měření povrchů

Oleg Touš

© 2024 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Oleg Touš

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

Bezdotykové měřicí systémy pro měření povrchů

Název anglicky

Non-contact measuring systems for surface measurement

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o měřicích systémech pro měření povrchu materiálu. Popsat jednotlivé metody měření s důrazem na bezdotykové systémy. Na základě závěrů z literárního rozboru předmětné problematiky stanoví bakalář přínos práce.

Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Cíle práce a metody jejího vypracování.

Přínos a závěry práce.

Doporučený rozsah práce

cca 30 stran

Klíčová slova

Drsnost, měření, souřadnice, rozměr, tvar

Doporučené zdroje informací

ALLEN, T.: Particle Size Measurement. Vol. 2, Surface area and pore size determination. London, 1997.

BUMBÁLEK, B., ODVODY, V., OŠŤÁDAL, B.: Drsnost povrchu. Praha, 1989.

Časopisy: Strojírenská technologie, MM průmyslové spektrum, TM Svařování – dělení – spojování materiálů, Technik.

CHRISTOPH, R., NEUMANN, J., H.: Multisenzorová souřadnicová měřicí technika, měření rozměrů, tvarů, polohy a drsnosti, Uherské Hradiště, PRIMA Bilavčák, 2008.

Měření drsnosti povrchu. Český Krumlov, 1981.

Souřadnicové měřicí stroje. České Budějovice, 1985.

Souřadnicové měřicí stroje, špičková technologie pro nejvyšší přesnost, Teplice, Mitutoyo Česko, 2006.

Předběžný termín obhajoby

2023/2024 LS – TF

Vedoucí práce

Bc. Ing. Petr Hrabě, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 15. 1. 2023

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 8. 3. 2023

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

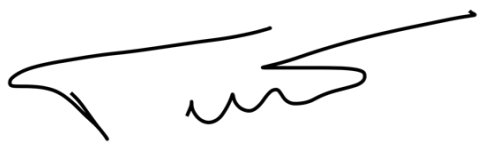
Děkan

V Praze dne 14. 02. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Bezdotykové měřicí systémy pro měření povrchů" jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 21.3.2024



Bezdotykové měřicí systémy pro měření povrchů

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zaměřuje na problematiku bezkontaktních měřicích systémů určených pro analýzu povrchových charakteristik. Cílem studie je provedení rešerše dostupných technologií v oblasti bezdotykového měření povrchů. Metodologie výzkumu zahrnuje detailní analýzu fyzikálních principů různých typů bezkontaktních měřicích technik, včetně optických, laserových, ultrazvukových a magnetických metod, a jejich aplikace v různých průmyslových odvětvích. Výsledkem práce je zmapování těchto technologií a návrh optimálního systému pro měření povrchů, s důrazem na přesnost, rychlost a náklady. Závěry práce poskytují doporučení pro výběr a nasazení bezkontaktních měřicích systémů v různých praktických aplikacích. Přínos této práce spočívá v posílení poznání a využití moderních technologií bezkontaktního měření povrchů v průmyslových procesech.

Klíčová slova: Měření, drsnost, tvar, rozměr, souřadnice, světlo, materiál, povrch, principy, metody, laser, ultrazvuk, bezkontaktní

Non-contact measuring systems for surface measurement

Abstract

This bachelor's thesis focuses on the issue of non-contact measuring systems designed for the analysis of surface characteristics. The aim of the study is to conduct a review of available technologies in the field of non-contact surface measurement. The research methodology includes a detailed analysis of the physical principles of various types of non-contact measuring techniques, including optical, laser, ultrasonic and magnetic methods, and their application in various industrial sectors. The outcome of the work is a charting of these technologies and the proposal of an optimal system for surface measurement, with an emphasis on accuracy, speed, and cost-effectiveness. The conclusions of the thesis provide recommendations for the selection and deployment of non-contact measuring systems in various practical applications. The contribution of this work lies in enhancing the understanding and utilization of modern contactless surface measurement technologies in industrial processes.

Keywords: Measurement, roughness, shape, dimension, coordinates, light, material, surface, principles, methods, laser, ultrasonic, contactless

Obsah

1 Úvod.....	10
1.1 Cíle a metodika.....	11
2 Fyzikální principy bezdotykových měřících systémů	12
2.1 Fyzikální principy optických bezdotykových měřících systémů	12
2.1.1 Reflexe a lom světla.....	12
2.1.2 Interference	13
2.1.3 Absorpce a emise světla.....	13
2.2 Fyzikální principy laserových bezdotykových měřících systémů.....	14
2.2.1 Odraz a detekce	14
2.2.2 Princip triangulace	15
2.2.3 Princip interference	15
2.2.4 Rozptyl světla.....	16
2.2.5 Spektroskopické metody	16
2.3 Fyzikální principy ultrazvukových bezdotykových měřících systémů	17
2.3.1 Generování ultrazvukových vln	17
2.3.2 Interakce ultrazvukových vln s materiálem	18
2.4 Fyzikální principy elektromagnetických bezdotykových měřících systémů ...	19
2.4.1 Odrážení a absorpce	19
2.4.2 Rozptyl a lom	19
2.4.3 Absorpce a emise elektromagnetického záření	20
2.5 Fyzikální princip akustického měření povrchu	20
2.6 Fyzikální princip magnetického měření povrchu	21
3 Metody měření pomocí bezdotykových měřících systémů	22
3.1 Optické a laserové metody	22
3.1.1 Měření pomocí CLA snímače	22
3.1.2 Interferometrie	23
3.1.3 Laserová triangulace	24
3.1.4 Konfokální mikroskopie	26
3.2 Ultrazvukové metody	27
3.2.1 Akustická mikroskopie	28
3.2.2 Akustická emisní zkouška (AE).....	28
3.2.3 Ultrazvuková interferometrie	29
3.2.4 Akustická impedanční spektroskopie (AIS)	30
3.2.5 Laserová ultrazvuková technika (LU).....	31
3.3 Magnetické metody	31
3.3.1 Magnetoresistence.....	31
3.3.2 Magnetická pohybová detekce.....	32

4	Omezení bezdotykových měřících systémů pro měření povrchu	33
4.1	Omezení optických měřících systémů	33
4.2	Omezení laserových měřících systémů	33
4.3	Omezení ultrazvukových měřících systémů	34
4.4	Omezení magnetických měřících systémů	34
5	Závěr.....	35
6	Seznam použitých zdrojů	36
7	Seznam obrázků	38

1 Úvod

V dnešní době se automatizace stává stále klíčovějším prvkem ve většině odvětvích techniky a průmyslu, a jednou z těchto klíčových oblastí je měření povrchů. Přesnost a efektivita při tomto měření mají zásadní vliv na kvalitu výrobků a konečné výsledky. S příchodem bezdotykových měřících systémů se otevírají nové možnosti pro zvýšení přesnosti a efektivitu měření povrchů, což má významné dopady na různá odvětví průmyslu a zlepšují tak nejen efektivitu výrobních procesů, ale i kvalitu finálních výrobků.

Bezdotykové měřící systémy představují inovativní přístup k analýze a charakterizaci povrchů bez nutnosti fyzického kontaktu s měřeným objektem. Tato technologie se stala nezbytnou součástí moderního průmyslu a výzkumu díky své schopnosti poskytovat přesné a detailní informace o povrchových vlastnostech materiálů a struktur. Avšak vzhledem k neustálému technologickému pokroku a rostoucím požadavkům na přesnost a efektivitu je vývoj bezdotykových měřících systémů neustále v procesu.

Nové technologie a inovace přinášejí možnosti pro dosažení ještě vyšší přesnosti, rychlosti a spolehlivosti, což přispívá k dalšímu rozvoji průmyslu a vědy. Cílem této bakalářské práce je poskytnutí přehledu a analýzy bezdotykových měřících systémů určených k měření povrchů. Zaměřuje se na podrobné prozkoumání současných technologií, fyzikálních principů, metod, a aplikací v této oblasti, s důrazem na jejich přesnost, spolehlivost a praktické využití v průmyslových a vědeckých kontextech.

Přesná a efektivní analýza povrchů prostřednictvím bezdotykových měřících systémů tak může otevřít nové dveře k inovacím a zlepšením ve mnoha oblastech lidské činnosti, přispívající k celkovému pokroku a rozvoji společnosti. Tyto systémy se stávají nedílnou součástí výrobních procesů, kde přispívají k optimalizaci výrobních operací a zvyšují konkurenceschopnost firem na trhu. Zároveň poskytují vědcům a inženýrům důležité nástroje pro výzkum a vývoj nových materiálů a technologií.

Bezdotykové měřící systémy jsou navrženy tak, aby byly flexibilní a mohly být použity v široké škále aplikací, od průmyslového měření až po vědecký výzkum. Jejich schopnost adaptace a přizpůsobení různým podmínkám a potřebám uživatelů je klíčová pro jejich široké uplatnění. Správnou kombinací těchto bezdotykových systémů lze docílit přesných a velice jakostně kvalitních výstupů měření.

1.1 Cíle a metodika

Cílem této bakalářské práce je poskytnout komplexní rešerši a analýzu bezdotykových měřících systémů využívaných pro měření povrchu. Hlavním cílem je detailně prozkoumat jednotlivé typy bezdotykových měřících systémů, včetně jejich fyzikálních a obecných principů, výhod a omezení, a následně tyto informace syntetizovat do srozumitelného a uceleného pohledu pro čtenáře.

Dílčím cílem práce je poskytnout čtenáři hlubší porozumění základním principům, na kterých tyto bezdotykové měřící systémy fungují. To zahrnuje analýzu fyzikálních zákonů a technických postupů, které jsou základem pro správné fungování těchto systémů. Důraz bude kladen na detailní vysvětlení principů měření povrchu, detekce a zpracování signálu, a dalších klíčových aspektů jako je například postup měření.

Prvním krokem bude důkladná rešerše dostupné literatury týkající se bezdotykových měřících systémů a jejich aplikací v měření povrchu. Budou studovány vědecké články, knihy, technické manuály a online zdroje.

Na základě rešerše literatury budou různé typy bezdotykových měřících systémů kategorizovány a detailně analyzovány. Budou zkoumány jejich fyzikální principy, výhody, omezení a aplikace. Dále bude provedena komparativní analýza různých typů bezdotykových měřících systémů, včetně optických, laserových, ultrazvukových, akustických a magnetických, s důrazem na jejich principy fungování, přesnost, rychlost a použitelnost v různých aplikacích.

V závěru práce bude provedeno zhodnocení výsledků analýzy jednotlivých typů bezdotykových měřících systémů a jejich principů. Budou diskutovány jejich výhody, nedostatky a potenciální oblasti využití. Tato práce poskytne ucelený přehled o stávajících bezdotykových měřících technologiích, což bude přínosem pro čtenáře z různých oborů, kteří se zajímají o měření povrchu a související aplikace.

2 Fyzikální principy bezdotykových měřících systémů

Základní princip bezdotykových měřících systému je založen na použití neinvazivních metod a systémů pro analýzu povrchu objektu bez kontaktu s ním. Princip se zakládá na využití různých fyzikálních jevů, jako jsou optické, laserové, ultrazvukové, elektromagnetické, akustické a magnetické k detekci a analýze charakteristik povrchu.

Bezdotykové měření povrchu umožňuje získávat data o geometrii, textuře, hrubosti, rovinnosti, profilu, defektů a celkové struktuře měřeného povrchu s vysokou přesností a bez nutnosti fyzické manipulace s měřeným objektem. Systémy se proto řadí do metod nedestruktivního zkoušení materiálu. Tento princip nachází široké uplatnění v různých odvětvích, včetně průmyslové výroby, vědeckého výzkumu, lékařství a dalších oblastech, kde je kritické získávat přesné informace o povrchových vlastnostech objektů.

2.1 Fyzikální principy optických bezdotykových měřících systémů

Fyzikální princip optických bezdotykových měřících systémů spočívá ve využití vlastností světla a jeho interakcí s povrchem objektu. Následně získání informací o jeho geometrii, textuře, rozměrech, defektů a chyb nebo spektrální charakteristiku měřeného povrchu. Tento princip je založen na základních optických jevech a zákonech, které řídí chování světla.

2.1.1 Reflexe a lom světla

Tento princip je založen na interakci světla s rozhraním mezi dvěma prostředími s různými indexy lomu, jako je například rozhraní vzduch-materiál.

Při dopadu světelného paprsku na povrch objektu dochází k jeho částečnému odrazu (reflexi) a částečnému průchodu do materiálu (lomu). Úhel, pod kterým světlo dopadá na povrch (tzv. dopadový úhel), a index lomu materiálu určují směr a charakter odraženého a lomeného světla. [3]

Tento jev je důležitý pro optické měřicí systémy, protože zpětně odražené světlo může poskytnout informace o odrazivosti, textuře a geometrii povrchu, zatímco lomené světlo může nabídnout informace o průhlednosti a vnitřní struktuře materiálu. Odražené a lomené světlo je poté zachyceno senzory a analyzováno k určení jeho vlastností. Tento princip je klíčový pro metody jako profilometrie, interferometrie, mikroskopie a další optické techniky používané k měření povrchové topografie, rovinnosti a textury materiálů.[3]

2.1.2 Interference

Princip vychází ze superpozice světelných vln, které vznikají, když se setkávají světelné paprsky z různých zdrojů nebo odražené od různých částí povrchu objektu. Interferenční vzory, které vznikají touto interakcí, poskytují důležité informace o geometrii a topografii povrchu. Při interferenci dochází ke zesílení (konstruktivní interferenci) nebo oslabení (destruktivní interferenci) světelných vln na základě jejich fázových rozdílů. Tento jev je založen na principu, že vlny se mohou posilovat nebo rušit, když jsou ve stejném nebo odlišném fázovém vztahu. [18]

V optických bezdotykových měřicích systémech se interferenční vzory využívají k vytvoření obrazu povrchu objektu. Typicky jsou využívány metody interferometrie, které zahrnují interferenci světelných vln z odražených nebo rozptýlených paprsků a referenčních paprsků. Tento proces umožňuje vytvořit detailní obraz povrchu s vysokým rozlišením a přesností. [3]

2.1.3 Absorpce a emise světla

Princip absorpce a emise světla je důležitým fyzikálním konceptem, který je využíván v optických bezdotykových měřicích systémech k získávání informací o vlastnostech materiálů a objektů. Tento princip souvisí s interakcí světla s materiálem a zahrnuje dva hlavní procesy: absorpci a emisi.

Absorpce světla je proces, při kterém materiál absorbuje energii světelných fotonů a přeměňuje ji na teplo nebo jiné formy energie. Každý materiál má charakteristické spektrum absorpce, což znamená, že různé materiály mají tendenci absorbovat světlo různých vlnových délek. Tento jev je využíván v optických spektroskopických metodách k identifikaci a analýze chemického složení materiálů z kterých je těleso vytvořené.

Na druhé straně emise světla se vyskytuje, když materiál vyzařuje energii ve formě světelných fotonů po absorpci energie. Tento jev může být spontánní (fluorescence) nebo vyvolaný (fosforescence) a je také charakteristický pro každý materiál. Emisní spektra mohou být využita k identifikaci látek a jejich vlastností. [3]

2.2 Fyzikální principy laserových bezdotykových měřících systémů

Fyzikální principy laserových bezdotykových měřících systémů spočívají ve využití vlastností laserového záření k detekci a analýze vzdáleností, tvarů, povrchových charakteristik a dalších vlastností objektů bez nutnosti fyzického kontaktu. Tento princip je založen na několika klíčových fyzikálních konceptech, které řídí chování laserového světla a jeho interakce s povrchem objektů.

Důležitým aspektem laserových měřících systémů je také použití interferenčních technik, jako je například laserová interferometrie. Tato technika využívá interferenčních jevů laserového světla k měření změn v délce dráhy paprsku způsobených změnami na povrchu objektu. To umožňuje velmi přesné měření mikrometrických a sub mikrometrických pohybů a deformací. [10]

2.2.1 Odraz a detekce

Tento princip představuje základní fyzikální koncept, který se využívá k získávání informací o vlastnostech povrchu objektů bez fyzického kontaktu. Tento princip je založen na interakci laserového světla s povrchem měřeného objektu a následné detekci odraženého světla. Za účelem velmi přesného měření vlastností objektu.

Princip odrazu spočívá v tom, že laserový paprsek je vyslán na povrch měřeného objektu, kde dochází k jeho odrazu. Úhel a charakter odraženého světla jsou ovlivněny vlastnostmi povrchu, jako je hrubost, textura, geometrie a optické vlastnosti materiálu. Odražené světlo nese informace o těchto vlastnostech a je zachyceno detekčním zařízením umístěným v měřícím systému.

Detekce odraženého světla je realizována pomocí senzorů, detektorů nebo fotoreceptorů, které jsou citlivé na intenzitu, vlnovou délku nebo fázový rozdíl přijatého světla. Detekční zařízení transformuje světelné signály na elektrické signály, které jsou následně zpracovány a interpretovány zařízením pro zpracování dat. Tento princip umožňuje měřícím systémům získat informace o vzdálenosti, tvaru, textuře a dalších povrchových vlastnostech objektu. Zpravidla se využívají modifikace tohoto principu, jako je například princip triangulace, který využívá úhly mezi vyslaným paprskem, odraženým paprskem a optickou osou měřícího zařízení k výpočtu vzdálenosti a tvaru objektu. [2]

2.2.2 Princip triangulace

Princip triangulace u laserových bezdotykových měřících systémů je založen na geometrickém konceptu triangulace, který využívá úhly mezi třemi body: laserovým zdrojem, detekčním zařízením a povrchem měřeného objektu k určení vzdálenosti a tvaru objektu. Tento princip umožňuje vytváření trojrozměrných map povrchu objektů s vysokou přesností. [6]

V měření za pomoci triangulačních laserových měřících systémů je laserový paprsek směřován na povrch měřeného objektu z určitého úhlu. Odražený paprsek je zachycen detekčním zařízením, které měří úhel, pod kterým se odražený paprsek vrací zpět k měřicímu zařízení. Na základě tohoto úhlu a znalosti úhlu mezi laserovým zdrojem a detekčním zařízením je možné vypočítat vzdálenost mezi měřicím zařízením a povrchem objektu. [6]

Princip triangulace předpokládá znalost geometrických parametrů systému, jako je poloha laserového zdroje a detekčního zařízení, stejně jako úhel mezi nimi. Na základě těchto parametrů a měřených úhlů je možné použít trigonometrické výpočty k určení polohy bodů na povrchu objektu. Tento proces se opakuje pro různé body na povrchu, což umožňuje vytvářet kompletní trojrozměrné mapy povrchu objektu. [6]

2.2.3 Princip interference

Tento princip se opírá o vlastnosti světla a jeho chování při interakci s povrchem objektu. Fyzikální principy interference jsou stejné jako u optických měřících systémů.

V laserových bezdotykových měřících systémech se interferenční jevy využívají k dosažení vyšší přesnosti a citlivosti při měření vzdáleností a deformací. Jedním z nejběžnějších příkladů je laserová interferometrie, která využívá interferenčního jevu k měření změn v délce dráhy laserového paprsku způsobených pohybem nebo deformací objektu.

V laserových interferometrických systémech se laserový paprsek rozdělí na referenční a měřicí paprsek. Referenční paprsek slouží jako stabilní základ pro porovnání s měřicím paprskem, který interaguje s měřeným objektem. Interferenční jevy, které vznikají mezi odraženými paprsky, jsou detekovány a analyzovány za účelem určení změn v délce dráhy a tím i vzdáleností nebo deformací objektu. [2]

2.2.4 Rozptyl světla

Princip je založen na vlastnostech světla při interakci s povrchem objektů, které mohou způsobit rozptyl a difuzi světelných paprsků. Tento princip je klíčovým faktorem při analýze textury, hrubosti a mikrostrukturních vlastností povrchů.

Při interakci s povrchem objektů může docházet k různým typům rozptylu světla, včetně difuzního rozptylu, rozptylu podél hrany, a dalších. Difuzní rozptyl je způsoben nerovnostmi povrchu a mikrostrukturou materiálu, které odrazí světelný paprsek ve všech směrech. Tento druh rozptylu vytváří homogenní a rozptýlené světelné pole, které je využíváno k analýze celkové textury a hrubosti povrchu. [18]

Rozptyl podél hrany vzniká na hranách objektů, kde dochází k odrazu světelného paprsku pod různými úhly v důsledku nerovností povrchu. Tento jev je často využíván k analýze geometrických vlastností a detailů na povrchu objektů.

Princip umožňuje získání informací o povrchu objektů bez nutnosti přímého kontaktu nebo dotyku, což je výhodné zejména v průmyslových aplikacích, vědeckém výzkumu a dalších oblastech, kde je nezbytné provádět detailní a přesné měření.

2.2.5 Spektroskopické metody

Tyto metody se zakládají na analýze spektrálních vlastností odraženého nebo rozptýleného laserového světla od povrchu měřených objektů. Tyto metody využívají rozkladu světla na jeho spektrální složky a identifikaci charakteristických spektrálních signálů, které poskytují informace o chemickém složení, struktuře, stavu a dalších vlastnostech materiálů.

Spektroskopické metody se dají dále rozdělit na Ramanovu metodu, která využívá stejnojmenného jevu. Tento jev nastává při interakci světelného paprsku s molekulami materiálu. Výsledkem je změna v frekvenci a fázovém posunu světla, což poskytuje informace o vibračních a rotačních stavů molekul a umožňuje identifikaci chemických látek.

Další z možných metod je fluorescenční spektroskopie, založená jevu při kterém je materiál excitován laserovým světlem a následně emituje světlo s odlišnou vlnovou délkou. Charakteristické spektrální vlastnosti fluorescence jsou používány k identifikaci látek a analýze jejich vlastností. [2]

Dále je možné využít absorpční spektroskopii, která měří absorpci laserového světla materiálem v závislosti na jeho vlnové délce. Charakteristické absorpční spektrální pásy poskytují informace o chemickém složení a koncentraci látek v materiálu.

V neposlední řadě je metoda zvaná librační spektroskopie. Metoda využívající jevu librace, který nastává, když jsou krystalické materiály excitovány laserovým světlem a vibrují při určitých frekvencích. Analýza frekvencí librace umožňuje identifikaci krystalové struktury a orientace krystalových os materiálu. Principy spektroskopických metod přináší možnost detailní analýzy chemického a strukturního složení materiálů a umožňují identifikaci látek, analýzu jejich vlastností a stanovení jejich stavu. [18]

2.3 Fyzikální principy ultrazvukových bezdotykových měřících systémů

Ultrazvukové bezdotykové měřících systémů používají aplikaci ultrazvukových vln k získávání informací o vlastnostech materiálů a objektů bez nutnosti fyzického kontaktu s nimi. Tento princip využívá vlastností ultrazvukových vln, jako je jejich schopnost pronikat materiály a detekovat změny v jejich struktuře a vlastnostech.

2.3.1 Generování ultrazvukových vln

Princip generování ultrazvukových vln u ultrazvukových bezdotykových měřících systémů je založen na využití piezoelektrického jevu, který umožňuje přeměnu elektrické energie na mechanické vibrace. Piezoelektrický jev se projevuje u některých materiálů, jako jsou například kvarty, keramika nebo polymery, a spočívá v jejich schopnosti generovat mechanické napětí při vystavení elektrickému poli a naopak generovat elektrický náboj při mechanickém stresu. [18]

V kontextu ultrazvukových měřících systémů jsou tyto piezoelektrické materiály využívány ve formě transduktorů, které jsou umístěny v měřící hlavici. Když je na transduktor přiveden elektrický signál, dochází k mechanickým vibracím generovaným piezoelektrickým efektem. Tyto vibrace se šíří v podobě ultrazvukových vln směrem k povrchu měřeného objektu.

Frekvence ultrazvukových vln, které jsou generovány transduktorem, závisí na frekvenci elektrického signálu, který je do něj přiveden. Zpravidla se v ultrazvukových měřících systémech pracuje s vysokými frekvencemi v rozmezí několika kHz až několika MHz, což umožňuje dosáhnout potřebné citlivosti a rozlišení při měření vlastností materiálů.

2.3.2 Interakce ultrazvukových vln s materiálem

Ultrazvukových vln s materiálem u ultrazvukových bezdotykových měřících systémů se zakládá na vlastnostech ultrazvukových vln a jejich reakcí na materiál, skrze který se šíří. Tato interakce umožňuje získání informací o vlastnostech materiálu, jako je jeho struktura, tloušťka, hustota, elasticita a přítomnost defektů.

Ultrazvukové vlny pronikají do materiálu a interagují s jeho strukturou. Během této interakce dochází k několika základním jevům. [18]

Odražení: část ultrazvukových vln může být odražena od hranic mezi různými vrstvami nebo odražecími plochami v materiálu. Odražené vlny jsou zachyceny detekčními prvky a analýzou jejich času trvání a intenzity lze získat informace o vlastnostech povrchu a podpovrchových struktur.

Absorpce: část ultrazvukových vln může být absorbována materiálem, což způsobuje jejich postupný úbytek při průchodu materiálem. Míra absorpce závisí na akustických vlastnostech materiálu, jako je tloušťka, hustota a materiálová absorpční schopnost.

Rozptýl: ultrazvukové vlny mohou být rozptýleny v důsledku mikrostruktur nebo defektů v materiálu, což může vést k změně směru jejich šíření a ovlivňovat jejich intenzitu. Analýza rozptýlených vln umožňuje získání informací o mikrostruktuře, hrubosti povrchu a přítomnosti defektů.

Lom: při průchodu ultrazvukových vln skrze materiál mohou tyto vlny změnit směr svého šíření v důsledku změny akustických vlastností materiálu nebo jeho geometrie.

Analyzováním odražených, absorbovaných, rozptýlených a lomených vln je možné provádět detailní charakterizaci materiálu a detekci případných vad nebo defektů.

2.4 Fyzikální principy elektromagnetických bezdotykových měřících systémů

Elektromagnetické bezdotykové měřící systémy využívají elektromagnetických vln pro získávání informací o vlastnostech materiálů a objektů bez fyzického kontaktu s nimi. Tyto systémy využívají elektromagnetického záření v různých částech spektra, jako je viditelné světlo, infračervené záření, mikrovlnné záření nebo rentgenové záření, a analyzují interakci tohoto záření s měřeným objektem.

2.4.1 Odražení a absorpce

Elektromagnetické záření dopadající na materiál může být částečně odraženo zpět do prostoru. Charakteristiky tohoto odraženého záření, jako je intenzita, fáze a polarizace, mohou poskytnout důležité informace o vlastnostech povrchu a optických vlastnostech materiálu. Odražené záření se může lišit v závislosti na indexu lomu, struktuře povrchu a jiných faktorech, což umožňuje identifikovat a charakterizovat materiály a objekty.

Materiály mohou dále absorbovat část elektromagnetického záření, což znamená, že energie záření je přeměněna na teplo nebo jiné formy energie v materiálu. Míra absorpce závisí na optických vlastnostech materiálu, jako je absorpční spektrum a absorpční koeficient. Analýza absorpčních vlastností umožňuje získat informace o chemickém složení, struktuře a fyzikálních vlastnostech materiálů. [2]

2.4.2 Rozptyl a lom

Rozptyl a lom elektromagnetického záření jsou klíčové fyzikální principy v elektromagnetických bezdotykových měřících systémech. Tyto principy se týkají změn směru a charakteristik elektromagnetického záření při průchodu materiálem.

Rozptyl elektromagnetického záření nastává, když je záření ovlivněno mikroskopickými nepravidelnostmi nebo strukturami v materiálu. V důsledku toho dochází ke změně směru šíření záření a ke změně jeho intenzity. Analýza rozptylu může poskytnout informace o mikrostruktuře materiálu, velikosti částic, povrchové hrubosti a dalších charakteristikách.

Lom elektromagnetického záření nastává, když záření vstupuje z jednoho materiálu do druhého s odlišným indexem lomu. Při této interakci dochází ke změně směru šíření záření a ke vzniku nového paprsku. Změna směru šíření je dána rozdílem v rychlostech záření v různých médiích. Analýza lomu může poskytnout informace o indexu lomu materiálu a o jeho optických vlastnostech. [2]

Porozumění těmto principům umožňuje provádět detailní charakterizaci materiálů a objektů a aplikovat tyto informace v širokém spektru oborů, včetně průmyslové kontroly, vědeckého výzkumu a lékařství.

2.4.3 Absorpce a emise elektromagnetického záření

Absorpce znamená, že materiál absorbuje elektromagnetické záření, což způsobuje přeměnu energie záření na jiné formy energie v materiálu, například na teplo. Míra absorpce závisí na vlastnostech materiálu a na vlnové délce záření. Různé materiály mají různé absorpční spektra, což umožňuje identifikovat a charakterizovat materiály na základě jejich absorpčních vlastností.

Emise se vyskytuje, když materiál vydává elektromagnetické záření po absorpci energie. Existuje několik typů emise, včetně fluorescence a fosforescence, které se liší v mechanismu a délce trvání. Analýza emise záření umožňuje identifikovat materiály na základě jejich charakteristických spekter emise a provádět studie o chemickém složení a struktuře materiálů.

2.5 Fyzikální princip akustického měření povrchu

Jedním z klíčových prvků akustických bezdotykových měřících systémů je generování a detekce zvukových vln. Zvukové vlny jsou vyzařovány do prostoru pomocí zvukových zdrojů, jako jsou ultrazvukové transducery, které přeměňují elektrickou energii na mechanické kmitání. Tyto zvukové vlny se šíří vzduchem nebo jiným médiem a interagují s povrchem a strukturou měřených objektů. [2]

Během měření se zvukové vlny odrazí od povrchu objektu a jsou zachyceny senzory nebo přijímači, které přeměňují mechanické kmitání zpět na elektrický signál. Z analýzy tohoto signálu lze získat informace o vlastnostech materiálu, jako je tloušťka, hustota, elasticita a přítomnost defektů.

Dalším důležitým principem je časová analýza odražených zvukových vln. Měření doby trvání a amplitudy odražených vln umožňuje získat informace o geometrii a struktuře měřeného objektu. Tento princip je založen na rychlosti šíření zvuku v daném médiu a času, který trvá, než se odražené zvukové signály vrátí zpět k senzorům.

Díky těmto fyzikálním principům jsou akustické bezdotykové měřicí systémy schopny poskytovat detailní informace o vlastnostech a struktuře materiálů a objektů, což má široké uplatnění v průmyslu, vědě a technologii pro kontrolu kvality, diagnostiku a výzkum.

2.6 Fyzikální princip magnetického měření povrchu

Fyzikální princip magnetických systémů spočívá ve využití magnetických polí k analýze a charakterizaci vlastností materiálů a objektů. Tato technologie se opírá o základní principy elektromagnetismu a magnetismu k provádění měření a analýzy povrchů a struktur.

Jedním z klíčových prvků magnetických bezdotykových měřicích systémů je generování magnetického pole. To může být dosaženo pomocí elektromagnetů nebo permanentních magnetů, za účelem vytvoření stabilního magnetického pole okolo objektu.

Když je magnetické pole aplikováno na materiál, dojde k interakci mezi magnetickým polem a vlastnostmi materiálu, jako je magnetická permeabilita, struktura a povrchová úprava. Tato interakce může ovlivnit magnetické vlastnosti materiálu, což je možné detekovat a analyzovat pomocí senzorů nebo detektorů umístěných v blízkosti měřeného objektu.

Dalším důležitým principem je analýza změn v magnetickém poli. Když je materiál vystaven magnetickému poli, dochází k deformaci tohoto pole v důsledku magnetických vlastností materiálu. Měření těchto změn v magnetickém poli umožňuje získat informace o vlastnostech materiálu, jako je jeho struktura, tloušťka, hustota nebo přítomnost defektů.

3 Metody měření pomocí bezdotykových měřících systémů

3.1 Optické a laserové metody

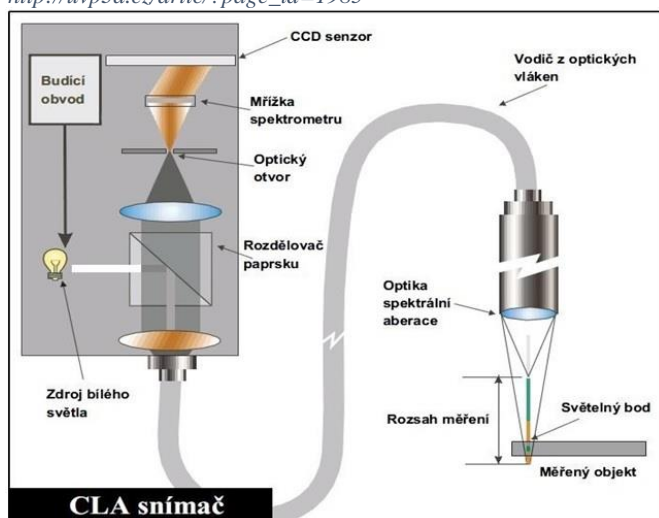
Optické metody představují širokou škálu analytických technik využívajících vlastnosti světla k analýze materiálů a objektů. Tyto metody umožňují neinvazivní a často velmi přesné měření různých vlastností, jako jsou tloušťka, index lomu, struktura, chemické složení a další.

3.1.1 Měření pomocí CLA snímače

Zejména v praxi vědecké a laboratorní se nejčastěji využívají přístroje na vyhodnocování povrchu za pomoci bezkontaktních snímačů. V nejvíce případech se tedy setkáme s CLA snímači (Chromatic Length Aberration) a laserovými snímači. Rozlišitelnost udáváme v μm a v případě laserových se rozlišitelnost uvádí z pravidla o řád níže tedy v nanometrech.

Schéma CLA snímače viz. obrázek 1. [4]

Obrázek 1: Schéma CLA snímače - dostupné z http://uwp3d.cz/drtic/?page_id=1985



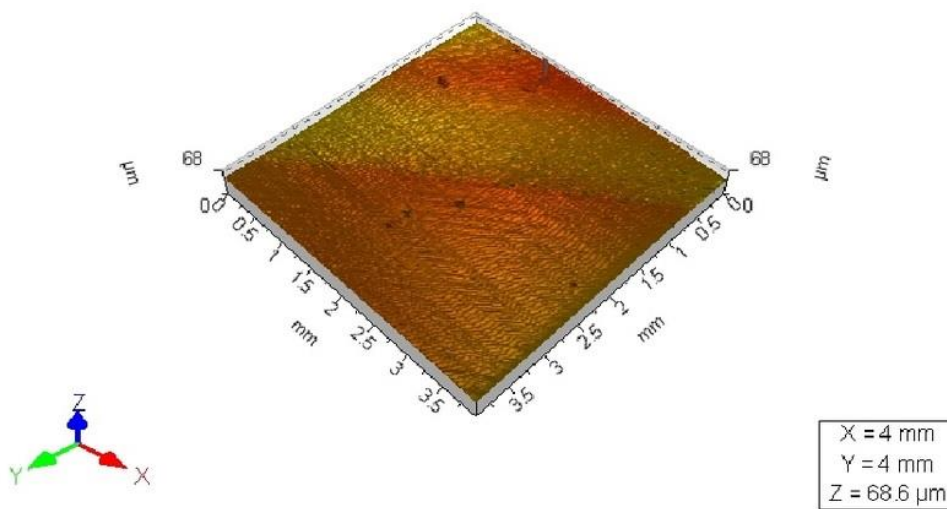
Princip CLA snímače :

Bílé světlo prochází procesem disperze a optickými prvky je směřováno na povrch, který je podroben kontrole. Optika rozkládá světlo podle jeho různých vlnových délek a ve v každém bodě povrchu je zaostřena pouze konkrétní vlnová délka. Světlo, které se odrazí od povrchu, je nasměrováno skrze úzký otvor, který propouští pouze světlo s odpovídající zaostřenou vlnovou délkou. [4]

Spektrometr následně odchyluje světlo směrem k maticovému senzoru, který zaznamenává prostorovou polohu každého bodu. Tato data jsou poté podrobena počítačovému zpracování a analýze.

Následně jsou naměřená data vyhodnocována za pomoci speciálních softwarů, které nám umožňují zobrazovat 3D vizualizaci naměřených dat. Viz. obrázek 2. [4]

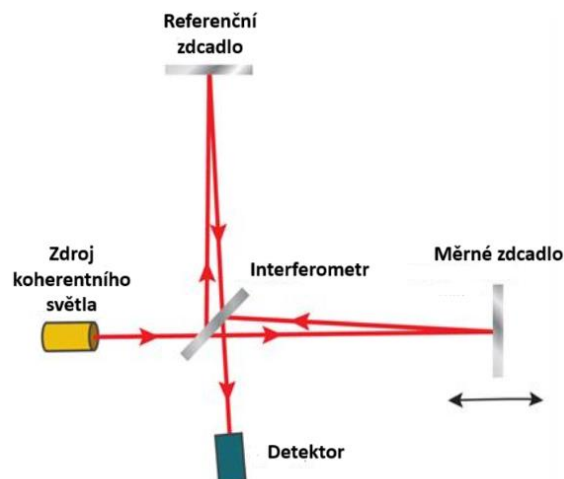
Obrázek 2 : Nasnímaný 3D povrch za pomoci CLA snímače - dostupné z http://wvp3d.cz/drtic/?page_id=1985



3.1.2 Interferometrie

Optická metoda, která využívá principy interference světla k měření vlastností materiálů a objektů. Tento způsob měření umožňuje získat detailní informace o struktuře, tloušťce, tvaru a dalších vlastnostech zkoumaných vzorků pomocí analýzy interferenčních vzorků.

Obrázek 3 : Schéma Michelsonova interferometru - Vlastní zpracování, dostupné z <https://www.renishaw.cz/cs/jak-funguje-interferometricky-system--38612>



Obecný postup měření se provádí v následujícím pořadí :

Nejprve je nutné připravit měřicí prostředí a kalibrovat interferometr. To může zahrnovat nastavení optického systému, vyvážení detektoru, nastavení osvětlovacího zdroje a další.

Interferometr vysílá koherentní světlo (například laserový paprsek) na zkoumaný vzorek. Světlo se odrazí od povrchu vzorku a vytvoří interferenční vzorec.

Detektor nebo kamera zachytí interferenční obraz vytvořený odraženým světlem. Tento obraz může být ve formě interferenčního vzorku, prstence nebo jiného vzoru závislého na konkrétní interferenční technice.

Získaný interferenční obraz je analyzován za účelem extrakce informací o topografii nebo jiných vlastnostech vzorku. To může zahrnovat měření tloušťky, deformace, plošného rozložení indexu lomu, povrchového profilu a dalších parametrů.

Získaná data jsou zpracována pomocí speciálních algoritmů a softwaru. Interpretace výsledků umožňuje získat informace o vlastnostech a struktuře vzorku, které jsou relevantní pro konkrétní aplikace. [5]

Výstupem měření interferometrií mohou být 2D nebo 3D mapy povrchu, profil povrchu, mapy deformací, tloušťky materiálu, index lomu a další kvantitativní informace o zkoumaném vzorku.

3.1.3 Laserová triangulace

Princip triangulace v moderních laserových snímačích spočívá v tom, že pokud je paprsek odražený od sledovaného objektu a dopadá na detektor pod konstantním úhlem, vzdálenost, kterou urazí odražený paprsek k povrchu senzoru, je přímo úměrná vzdálenosti sledovaného objektu od povrchu senzoru. [19]

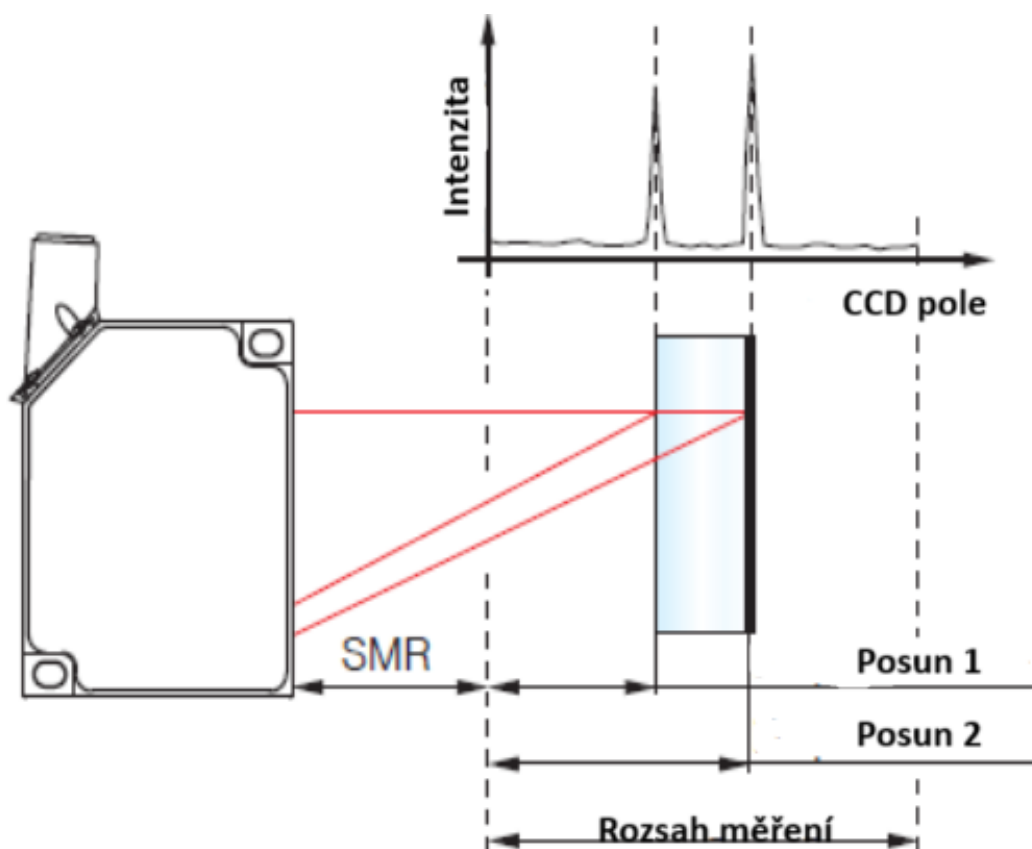
Tímto způsobem se nezjišťuje pouze intenzita dopadajícího paprsku nebo doba jeho letu, ale spíše bod, kam se odražený paprsek vrátil. Tento přístup zvyšuje spolehlivost detekce a odolnost proti rušení, neboť podmínka pro detekci závisí pouze na schopnosti optického senzoru zachytit odražený paprsek, bez ohledu na jeho intenzitu, pokud přesahuje minimální detekovatelnou úroveň.

V praxi se laserová triangulace využívá k měření vlastností vzájemných komponentů nebo součástí. Výstupem měření pak podle zvoleného typu měření může být vzdálenost, tvar, geometrie tělesa, deformace a v neposlední řadě povrchová textura. Laserové triangulace využívá například snímač Micro – Epsilon optoNCDT 1402 (obrázek 4) . Schéma měření konkrétním snímačem viz obr. 5.

Obrázek 4 : Micro - Epsilon optoNCDT 1402 - dostupné z <http://www.micro-epsilon.pl/download/man--optoncdt-1402--en.pdf>)



Obrázek 5: Schéma snímače Micro-Epsilon optoNCDT 1402 - Vlastní zpracování, dostupné z <http://automatizace.hw.cz/files/uploads/storyautomat/6701/optoncdt14027.png>



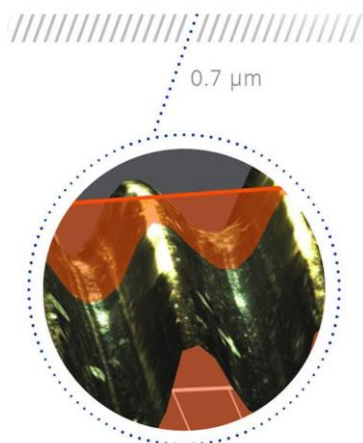
V konkrétním uspořádání (obrázek 5) je ze snímače vyslán světelný paprsek pomocí polovodičového laseru, který vytváří na cílovém objektu bodové světlo. Odražené světlo z tohoto bodu poté dopadá na vstupní čočku optického přijímače pod specifickým úhlem, který je závislý na vzdálenosti cílového předmětu (SMR) od čela snímače. Tento úhel dopadu na čočku je poté zpětně vyhodnocován za čočkou jako vzdálenost světelného bodu na citlivé ploše přijímače, která je tvořena známým CCD senzorem. Tato vzdálenost ve finále odpovídá vzdálenosti mezi snímaným objektem a snímačem. [6]

Jelikož plocha snímání CCD senzoru přijímače má omezené rozměry, je i rozsah měření vždy omezen v intervalu. Konkrétní rozsah je pak determinován optikou snímače a velikostí plochy CCD senzoru. Kromě toho tento princip umožňuje univerzálnější použití snímače, než pouze k měření vzdálenosti k objektu. Umožňuje totiž provozovat režimy s potlačením pozadí i s potlačením popředí a měřit tloušťku průhledných nebo průsvitných homogenních objektů a ploch. V takovém případě se na přijímači (na jeho CCD senzoru) vytvoří pouze dvě světelné stopy, část odraženého světla od vrchní vrstvy a část světla odražená od podkladu. Dvě detekční místa umožňují detekovat a rozlišit jak požadovaný objekt, tak například dopravní pás nebo podložku, na kterých jsou umístěny. [6]

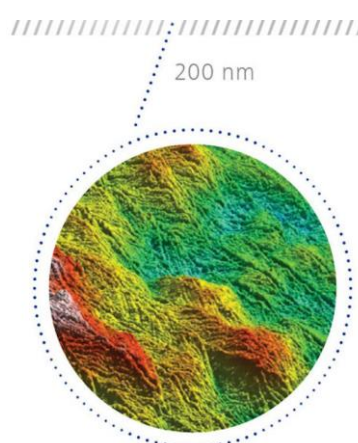
3.1.4 Konfokální mikroskopie

Jedná se o druh měření za využití konfokálního mikroskopu. Tento druh měření má velké využití nejen v průmyslu ke zkoumání povrchu materiálu a jeho jakosti, ale zejména ve zdravotnictví a to v oborech dermatologie při diagnóze kožních onemocnění, gynekologie k diagnostice či monitorování onemocnění děložního čípku a v neposlední řadě také v oblasti oftalmologie k vyšetření struktur oka, jako jsou rohovka, sítnice nebo oční povrch.

Obrázek 6: Mikroskopický obraz závitů – dostupné z <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/industrial->



Obrázek 7: Mikroskopický obraz povrchu materiálu – dostupné z <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/industrial->

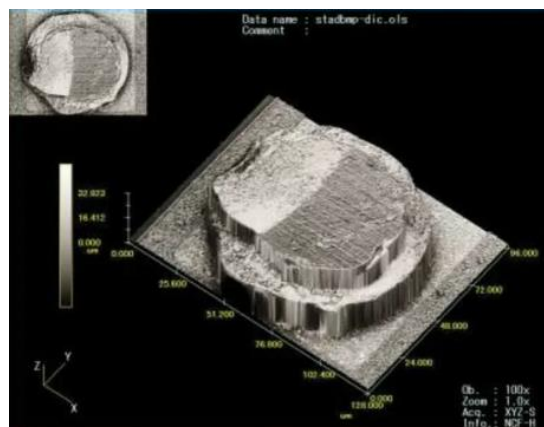
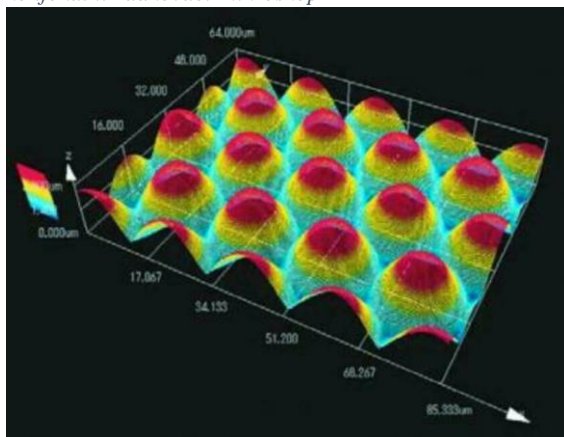


3.1.4.1 Laserový řádkovací konfokální mikroskop Lext

Základním principem konfokálního mikroskopu Lext je, že nevytváří obraz vzorku jako celek najednou, ale postupně bod po bodu prostřednictvím řádkování. Tímto způsobem jsou zachycovány optické řezy v rovině xy a díky přesnému posuvu objektivu v ose Z jsou získávány i jednotlivé optické řezy ve směru hloubky vzorku. Konfokální obrazy jsou vždy zaostřené a reprezentují jednotlivé optické řezy vzorkem. Pro vytvoření trojrozměrných obrazů je využívána možnost postupného snímání desítek až stovek optických řezů v ose Z.

Konfokální mikroskop Lext dále využívá inovativní softwarovou funkci nazývanou výpočet ohnisek (CFO), která selektivně volí nejlépe zobrazené části plochy vzorku pro vytvoření obrazu celého vzorku. Pro každou jednotlivou část plochy se navíc optimalizuje ohnisko. Funkce CFO nejenže výrazně urychluje proces zobrazování, ale také umožňuje získat velmi přesný a opakovatelný trojrozměrný obraz vady vzorku viz. obrázek 7. [7]

Obrázek 8: Funkce měření profilů mikroskopu Lext OLS 3100 dostupné z <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserovy-konfokalni-radkovaci-mikroskop>



Obrázek 9: 3D obraz vytvořený mikroskopem Lext OLS 3100– dostupné z <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserovy-konfokalni-radkovaci-mikroskop>

3.2 Ultrazvukové metody

Na základě ultrazvukových metod pro měření povrchu jsme schopni s velkou přesností analyzovat měřený povrch. Dle zvolených metod a přístrojů jsme schopni měřit tloušťku materiálů jako jsou sklo, kovy, plasty nebo dřevo.

Ultrazvukové vlny jsou citlivé zejména na změny povrchu materiálu. Tento fakt nám umožňuje bezpečně detekovat vady, trhliny i nehomogenity při kontrole odlitků nebo svarů. Jedno z dalších využití ultrazvukových metod spočívá v mapování povrchů. Umožňuje nám to vytvářet mapy na kterých jsou vyobrazené topografie a nerovnosti.

Zejména tato vlastnost je velmi důležitá při kontrole materiálů jako jsou kovy, polymery a v neposlední řadě keramika.

Velmi přívětivé využití těchto metod se nachází i v oblasti kontroly korozních vrstev. Senzory ultrazvukových vln jsou schopny na kovovém povrchu detekovat vrstvu koroze a tím pádem se dají sledovat stavy konstrukcí, potrubí či vodních nádrží.

V neposlední řadě najdou ultrazvukové metody uplatnění i v měření vodní hladiny v nádržích nebo nádobách.

3.2.1 Akustická mikroskopie

Skenovací akustická mikroskopie, často označovaná jako C-SAM (Coherent Scanning Acoustic Microscopy), Acoustic Micro Imaging (AMI) nebo akustická mikroskopie, vyniká svou schopností detekovat skryté nedostatky v sestavách a materiálech, které mohou vzniknout během procesů výroby nebo testování. Nedostatky jako delaminace, póry a praskliny lze identifikovat a analyzovat s větší efektivitou než pomocí jiných metod, které využívají akustickou mikroskopii. [8]

V kontrastu s ostatními nedestruktivními technikami, jako jsou rentgenové a infračervené zobrazování, vykazuje akustická mikroskopie vysokou citlivost na elastické vlastnosti materiálů, kterými prochází. Její schopnost identifikovat a charakterizovat tyto fyzikální defekty je tedy výrazně významnější. Mezi typické aplikace patří řízení výroby, analýza poruch a vývoj produktů. [8]

Výstupem měření akustické mikroskopie jsou obrazová data získaná pomocí ultrazvukových vln, které jsou použity k vizualizaci struktury a vlastností zkoumaného materiálu. Tento obraz může poskytnout informace o povrchové topografii, vrstvách materiálu, mikrostrukturách, defektech a dalších důležitých charakteristikách. [9]

3.2.2 Akustická emisní zkouška (AE)

Nedestruktivní metoda monitorování materiálů a struktur, která se zaměřuje na detekci akustických signálů generovaných v důsledku deformace, porušení nebo aktivace defektů. Principem této metody je zachytávání a analýza akustických vln emitovaných během provozu materiálu nebo struktury. Viz obrázek 9

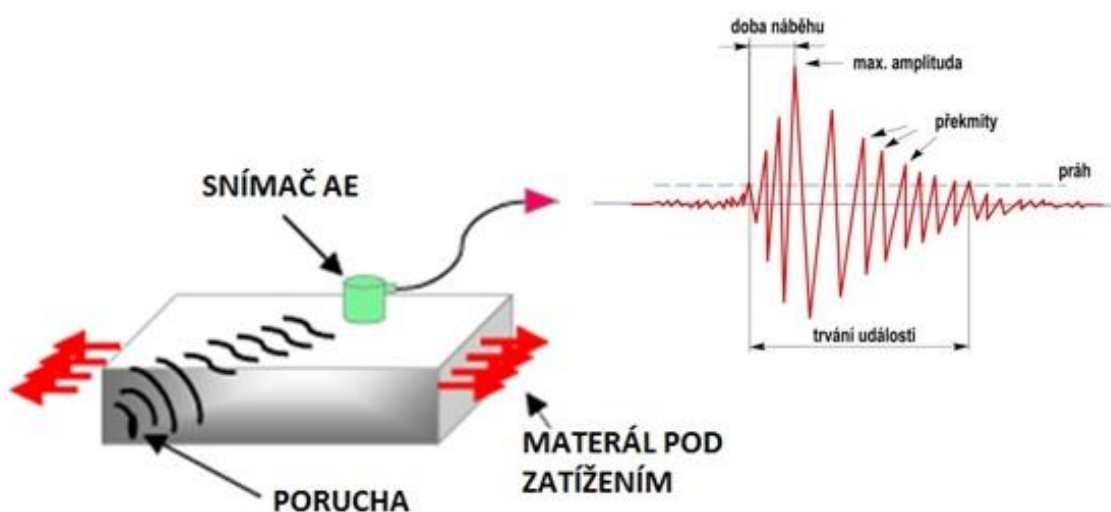
Během akustické emisní zkoušky jsou umístěny senzory, které zachytávají akustické signály, které vznikají v důsledku napětí nebo změn v materiálu. Tyto signály jsou

analyzovány pomocí sofistikovaných algoritmů a technik zpracování signálů, které umožňují identifikaci a lokalizaci defektů, jako jsou trhliny, póry, nebo jiné anomálie. [12]

Výhody akustické emisní zkoušky zahrnují možnost monitorování materiálů a struktur za provozních podmínek, což umožňuje identifikaci potenciálních problémů před jejich výraznějším rozvojem. Tato metoda je široce využívána v různých odvětvích, včetně průmyslu, energetiky, dopravy a stavebnictví. [12]

Obrázek 10: Princip metody AE dostupné z

https://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=6390&typ=html



3.2.3 Ultrazvuková interferometrie

Ultrazvuková interferometrie využívá principy interferometrie, což znamená, že získává informace z interferenčních vzorů vznikajících v důsledku vzájemného působení ultrazvukových vln. Tato interferenční data jsou analyzována a interpretována tak, aby poskytla informace o struktuře, tloušťce a dalších vlastnostech materiálu. [10]

Materiál nebo objekt je připraven pro měření a umístěn do vhodného prostředí, které umožní šíření ultrazvukových vln. Poté jsou ultrazvukové vlny vysílány do materiálu pomocí speciálního zdroje ultrazvuku, často piezoelektrického prvku. Dále ultrazvukové vlny interagují s materiálem a jsou částečně odraženy, lámány nebo absorbovány.

Odražené ultrazvukové signály jsou detekovány pomocí citlivého senzoru a jsou analyzovány pro získání informací o vlastnostech materiálu. Získaná data jsou zpracována pomocí speciálního softwaru pro rekonstrukci obrazu a kvantifikaci požadovaných vlastností materiálu. [11]

Výstupem tohoto konkrétního měření je :

- Povrchová topografie: Ultrazvuková interferometrie umožňuje získání detailních informací o povrchové topografii materiálu s vysokým rozlišením.
- Tloušťka materiálu: Metoda poskytuje přesné měření tloušťky materiálu s vysokou přesností.
- Identifikace defektů: Ultrazvuková interferometrie je schopna detekovat a charakterizovat defekty v materiálu, jako jsou trhliny, póry nebo nečistoty.

3.2.4 Akustická impedanční spektroskopie (AIS)

Tato konkrétní metoda je velmi pokročilá technika v oblasti nedestruktivního testování materiálů. Zaměřuje se na studium změn akustické impedance materiálu v závislosti na různých parametrech, jako je frekvence, teplota nebo tlak. Principem této metody je analýza reakce materiálu na akustické vlny při různých podmínkách, což poskytuje informace o mechanických vlastnostech, struktuře a dalších charakteristikách materiálu.

Během měření akustické impedanční spektroskopie je zaznamenána odezva materiálu na aplikované akustické signály pomocí citlivých senzorů a detekčních zařízení. Tyto signály jsou poté analyzovány a zpracovány pomocí sofistikovaných algoritmů a technik, které umožňují kvantifikaci změn v akustické impedanci materiálu a identifikaci strukturálních a mechanických vlastností. [13]

Metoda „AIS“ je široce využívána v různých průmyslových odvětvích, včetně materiálového inženýrství, výroby, elektroniky a biomedicínského výzkumu. Tato metoda poskytuje informace pro hodnocení kvality materiálů, kontrolu procesů výroby a vývoj materiálů s požadovanými vlastnostmi. [13]

Materiál, který má být zkoumán, je připraven pro měření. To může zahrnovat výrobu vzorků standardizovaných rozměrů nebo přípravu povrchu materiálu pro zajištění správné interakce s akustickými vlnami. [13]

Při zahájení měření jsou akustické vlny vygenerovány pomocí vhodného zdroje, jako je například ultrazvukový generátor nebo reproduktor. Tyto vlny jsou pak aplikovány na povrch nebo dovnitř zkoumaného materiálu. [13]

Odezva materiálu na aplikované akustické vlny je zachycena pomocí citlivých senzorů, mikrofónů nebo jiných detekčních zařízení. Tyto senzory registrují změny v akustické impedanci materiálu v závislosti na frekvenci a dalších parametrech. Získaná data jsou poté analyzována a dále zpracovávána. Touto metodou lze velmi přesně hodnotit kvalitu materiálu či kontrolovat proces výroby. [13]

3.2.5 Laserová ultrazvuková technika (LU)

Tato technika kombinuje vlastnosti laseru a ultrazvuku ke generování a detekci ultrazvukových vln v materiálu bez fyzického kontaktu. Principem LU je vyslání krátkých laserových impulzů na povrch zkoumaného materiálu, což vede k jeho lokálnímu zahřátí a expanzi. Tato expanze generuje ultrazvukové vlny, které jsou následně detekovány pomocí citlivých senzorů. Analyzováním časového průběhu a amplitudy detekovaných ultrazvukových signálů je možné získat informace o vlastnostech materiálu, včetně tloušťky, homogenity, a identifikace defektů. Vývoj nových metod a technologií v oblasti laserové ultrazvukové techniky přináší stále nové možnosti v nedestruktivním testování materiálů a zkoumání jejich vlastností na mikroskopické úrovni. [14]

3.3 Magnetické metody

3.3.1 Magnetoresistance

Magnetorezistence je obecně metoda používaná k měření změn elektrického odporu materiálu v reakci na externí magnetické pole. Principem metody je využití jevu magnetorezistence, který spočívá v tom, že elektrický odpor materiálu se mění v závislosti na velikosti a směru aplikovaného magnetického pole. Tato změna odporu je následně detekována a analyzována k získání informací o vlastnostech materiálu. Tímto měřením lze získat magnetickou susceptibilitu, což je schopnost materiálu reagovat na externí magnetická pole. Další z možných výstupů měření jsou poté magnetické vlastnosti měřeného materiálu.

V neposlední řadě lze touto metodou identifikovat i nežádoucí defekty a anomálie materiálu, které identifikujeme na základě změn v jeho magnetické rezistivitě.

Magnetořistence jako taková se dá měřit jak u feromagnetických kovových materiálů tak i polovodičů. Četné využití tohoto měření a celkově magnetických vlastností se nachází v počítačovém průmyslu k výrobě magnetické senzory či magnetických paměti jako je například pevný disk nebo operační paměť RAM.[15]

3.3.2 Magnetická pohybová detekce

Metoda využívá k měření povrchu materiálů na základě změn magnetického pole. Princip této metody spočívá ve využití senzorů, které reagují na změny magnetického pole generovaného povrchem materiálu. Sensory jsou umístěny v blízkosti povrchu a sledují změny magnetického pole, které jsou způsobeny pohybem senzorů nad materiálem. [17]

Během pohybu senzoru nad povrchem materiálu dochází ke změnám v magnetickém poli, které jsou zaznamenány a analyzovány. Tyto změny mohou být interpretovány jako informace o povrchu materiálu, jako je hrubost, nerovnosti nebo jiné charakteristiky. Tímto způsobem může být získána detailní informace o povrchu materiálu bez potřeby fyzického kontaktu. [16]

Data mohou být zobrazena ve formě grafu, který ukazuje změny magnetického pole v závislosti na poloze senzoru nad povrchem materiálu. To umožňuje vizuální analýzu a interpretaci vlastností povrchu.

Výstupem může také být soubor číselných hodnot, které popisují změny magnetického pole v jednotlivých bodech měření. Tato data mohou být dále zpracována a analyzována pro stanovení konkrétních vlastností povrchu, jako je hrubost nebo nerovnosti. V neposlední řadě výstup měření může odhalovat i přítomnost defektů na povrchu materiálů.

Celkově výstupem měření magnetické pohybové detekce je soubor dat, který umožňuje charakterizaci povrchu materiálu a poskytuje informace pro další analýzu a rozhodování v průmyslových nebo výzkumných aplikacích. [16]

4 Omezení bezdotykových měřících systémů pro měření povrchu

4.1 Omezení optických měřících systémů

Optické metody měření nabízejí vysokou přesnost a rozlišení, což je činí atraktivní volbou pro aplikace, kde je důležitá detailní charakterizace povrchu materiálu. Nicméně i tato volba má svá určitá omezení nebo nevýhody.

Jedním z omezení optických metod je citlivost na okolní osvětlení a odlesky. Přítomnost silného světla může způsobit zkreslení naměřených dat nebo dokonce neschopnost získat spolehlivá data. Tento fakt může omezit použitelnost optických metod v nekontrolovaných prostředích, kde není možné regulovat osvětlení. [18]

Dalším omezením může být obtížnost měření transparentních nebo průhledných materiálů, jelikož tyto materiály mohou odrazit nebo lomit světlo, což může vést k nepřesným výsledkům. Optické metody tak mohou být méně vhodné pro aplikace, kde je třeba pracovat s těmito typy materiálů. [18]

4.2 Omezení laserových měřících systémů

Laserové metody měření poskytují vysokou přesnost a rychlost, což je činí velmi atraktivní volbou pro širokou škálu aplikací v průmyslu, vědě a technologii. Nicméně, i přesto, že mají mnoho výhod, jsou těmto metodám přisouzena určitá omezení.

Jedním z hlavních omezení laserových metod je jejich citlivost na odrazy. Při práci s lesklými nebo odrazivými povrchy může docházet k odrazům laserového paprsku, což může vést k nepřesným měřením. Tato situace vyžaduje opatření, jako jsou antireflexní povlaky nebo změny úhlů měření, aby se minimalizovalo ovlivnění odrazy. [19]

Mezi další omezení patří obtížnost měření povrchů s velmi nízkým odrazivým indexem nebo tmavých materiálů, které absorbují laserové světlo. V těchto případech může být obtížné získat spolehlivá měření kvůli nedostatečnému rozptylu nebo absorpci laserového paprsku. Což může vést k neprůkazným či zavádějícím výsledkům měření.

4.3 Omezení ultrazvukových měřících systémů

Ultrazvukové metody měření mají své vlastní charakteristiky a výhody, ale stejně tak i omezení, která je třeba zohlednit při jejich použití.

Mezi omezení ultrazvukových metod patří jejich citlivost na změny teploty a tlaku prostředí, ve kterém se provádí měření. Změny těchto faktorů mohou ovlivnit rychlost šíření ultrazvukových vln a tím i přesnost měření tloušťky nebo struktury materiálu. Proto je důležité měření provádět v kontrolovaném prostředí a případné odchylky zohlednit při zpracovávání naměřených dat. [10]

Dalším omezením je někdy obtížnost měření tenkých nebo průhledných materiálů. Ultrazvukové vlny mohou být absorbovány nebo odraženy těmito materiály, což může vést k nedostatečné penetraci vln a následně k nepřesným výsledkům měření. V těchto případech je důležité zvolit vhodnou konfiguraci senzorů a provést kalibraci měřícího systému pro daný materiál, aby se zamezilo nežádoucím vlivům prostředí.

4.4 Omezení magnetických měřících systémů

Jedním z hlavních omezení je citlivost na magnetické vlastnosti materiálu. Materiály s různými magnetickými vlastnostmi mohou vykazovat odlišné reakce na magnetické pole, což může vést k nepřesnostem v měření. Proto je nutné provádět kalibraci měřícího zařízení pro konkrétní typy materiálů, aby se minimalizovaly potenciální chyby.

Omezením může být omezená hloubka průniku magnetického pole do materiálu. V závislosti na vlastnostech materiálu může být magnetické pole omezeno na povrchové vrstvy, což může ovlivnit přesnost měření, zejména u materiálů s rozsáhlými povrchovými úpravami nebo pokovením.

5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo detailněji prozkoumat fyzikální principy a metody bezdotykových měřících systémů, které nacházejí uplatnění v různých oblastech průmyslu a vědy. Během práce byly podrobně rozebrány jednotlivé metody, včetně optických, laserových, ultrazvukových a magnetických technik. Dále byly analyzovány jejich principy fungování a omezení.

Tato práce přispěla k lepšímu porozumění bezdotykových měřících systémů a fyzikálních principů na kterých jsou založeny. Práce v budoucnu poskytne užitečné směrnice pro výběr, rozšíření a nasazení v praxi. Důkladná komparativní analýza umožnila identifikovat klíčové faktory při výběru a nasazení těchto systémů, což představuje důležitý krok směrem k efektivnějšímu využití těchto technologií a zdokonalení výrobních procesů nebo jakostních kontrol parametrů povrchů.

Analýza ukázala, že každá z těchto metod má své vlastní charakteristiky a přednosti, ale také specifická omezení, která je třeba zohlednit při jejich výběru a nasazení v praxi. Každá aplikace může vyžadovat specifické parametry, jako je přesnost, rychlost a rozlišení, a proto je klíčové vybrat ten systém, který nejlépe odpovídá individuálním potřebám a cílům měření. Optické metody se vyznačují vysokou přesností a rozlišením, avšak jsou citlivé na okolní osvětlení a odlesky. Laserové metody nabízejí rychlost a přesnost, ale mohou být citlivé na odrazy a těžko měřitelné materiály. Ultrazvukové metody jsou užitečné pro průnik skrze materiál, ale mohou být citlivé na změny teploty a tlaku. Magnetické metody jsou bezdotykové a odolné vůči změnám prostředí, ale jsou citlivé na magnetické vlastnosti materiálu.

Na základě této analýzy lze odvodit několik doporučení pro výběr a nasazení jednotlivých systémů v různých praktických aplikacích. Je doporučeno důkladně zvážit specifické požadavky aplikace a provést testování různých metod a systémů před jejich implementací. Kombinace různých metod a systémů může vést k optimalizaci výsledků. Integrace různých technologií do jediného měřícího systému umožňuje flexibilitu a přizpůsobení širokému spektru aplikací, což v konečném důsledku zlepšuje celkovou efektivitu měření.

V neposlední řadě je klíčové věnovat pozornost kalibraci a údržbě měřících zařízení, aby se zajistila spolehlivost a přesnost měření v průběhu času. Investice do správné kalibrační strategie a plánované údržby může dlouhodobě ušetřit čas a zdroje. Zajišťuje konzistentní a spolehlivé výsledky měření.

6 Seznam použitých zdrojů

- [1] *Bezdotykové měření a vizuální kontrola kvality*. [online]. MMspektrum.com. 2001. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/bezdotykove-mereni-a-vizualni-kontrola-kvality>.
- [2] Neuhaus, J. *Principles of Contactless Measurement Systems*. Springer International Publishing, 2018, ISBN 978-3-319-64598-5.
- [3] OSTEN, W. a W. JÜPTNER. *Modern Optical Methods in Precision Engineering: With a Selection of the Best Contributions to the 7th International Conference on Optics in Precision Engineering and Nanotechnology*. Wiley-VCH Verlag, 1993, ISBN 978-3-527-26980-9.
- [4] Měření drsnosti povrchu. *Elektronická učebnice - ELUC* [online]. 2021. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1103>
- [5] HARIHARAN, P. *Basics of interferometry*. Boston : Academic Press, 1992. ISBN 0123252180. Dostupné z <https://archive.org/details/basicsofinterfer0000hari/page/n7/mode/2up>
- [6] VOJÁČEK, Antonín. Princip laserových snímačů vzdálenosti s triangulačním principem měření. *Automatizace.hw.cz* [online]. 2015. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/princip-funkce-laserovych-snimacu-vzdalenosti-s-triangulacnim-principem-mereni.html>
- [7] Laserový konfokální řádkovací mikroskop. *MMspektrum.com* [online]. 2007. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserovy-konfokalni-radkovaci-mikroskop>
- [8] Testovací akustická mikroskopická zkouška. *Eurolab* [online]. Dostupné z: <https://www.laboratuar.com/cs/testler/ndt-testleri/taramali-akustik-mikroskopi-testi/>
- [9] Křest'an Fröhlich, Josef Käs, and Hermann E. Gaub. Acoustic Microscopy. In: *Scanning Probe Microscopy*, 65-99. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006, ISBN-13: 978-3-642-27494-7.
- [10] B. T. Smith, *Principles of Ultrasonic Interferometry*, Springer, 2008. ISBN-13: 978-0387735819.
- [11] L. A. Zelaya, *Introduction to Ultrasonic Interferometry*, Wiley, 2015. ISBN-13: 978-1118937345.
- [12] Christian U. Grosse, Masayasu Ohtsu, Dimitrios G. Aggelis a Tomoki Shiotani, *Acoustic Emission Testing: Basics for Research - Applications in Civil and Structural Engineering*. Springer, 2016, ISBN-13: 978-3030679354.
- [13] F. Ansari, *Acoustic Impedance Spectroscopy: Applications to Polymers, Membranes, and Electrolytes*, Springer, 2016, ISBN-13: 978-3030679354.

[18] T. Maugan and B. Hoag, The Evolution of Laser Ultrasonics, v IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, svazek 55, číslo 3, strany 550-563, březen 2008, ISSN-1557-9670.

[15] Cullity, B.D., Graham, C.D. Introduction to Magnetic Materials. John Wiley & Sons, 2011, ISBN-13: 978-0471477419.

[16] Magnetic Sensing Principles and Applications by E. Daniel Kirby, 2011, ISBN: 978-0471477419.

[17] Nicu, L. (Ed.) (2006). Magnetic Sensors and Their Applications, v IEEE Sensors Journal, svazek 6, číslo 3, strany 631–649, 2006, ISBN: 978-0471477419.

[18] Leach, R. (Ed.) (2006). Optical Measurement Techniques and Applications, v IEEE Sensors Journal, svazek 6, číslo 3, strany 631–649, ISBN: 978-0471477419

[19] Lehmann, P. a Kling, R. (Eds.). (2006). Laser Measurement Technology: Applications and Challenges, v IEEE Sensors Journal, svazek 6, číslo 3, strany 631–649, ISBN: 978-0471477419.

7 Seznam obrázků

Obrázek 1 : Schéma CLA snímače	22
Obrázek 2 : Nasnímaný 3D povrch za pomoci CLA snímače	23
Obrázek 3 : Schéma Michelsonova Interferometru	23
Obrázek 4 : Micro - Epsilon optoNCDT 1420	25
Obrázek 5 : Schéma snímače Micro – Epsilon optoNCDT 1420	25
Obrázek 6 : Mikroskopický obraz závitu	26
Obrázek 7 : Mikroskopický obraz povrchu materiálu	26
Obrázek 8 : Funkce měření profilů mikroskopu Lext OLS 3100	27
Obrázek 9 : 3D obraz vytvořený mikroskopem Lext OLS 3100	27
Obrázek 10 : Princip metody AE	29