



**MINISTRY OF EDUCATION**  
**University POLITEHNICA of Bucharest**  
**Doctoral School of**  
**Industrial Engineering and Robotics**

**UPB-CSUD Decision no. 975/ 08.12.2022**

**Flavia-Petruța-Georgiana G.**  
**ARTIMON (STOCHIOIU)**

**PHD THESIS/ TEZĂ DE DOCTORAT**  
**\* Summary/ Rezumat \***

**Contributions to structure and attributes  
development of laser interferometry systems/  
Contribuții la dezvoltarea structurii și atributelor  
sistemelor de interferometrie laser**

**COMISIA DE DOCTORAT**

<b>President</b>	<b>Prof.univ.dr.ing. Liviu-Daniel GHICULESCU</b>	<b>University POLITEHNICA of Bucharest</b>
<b>PhD Supervisor</b>	<b>Prof.univ.dr.ing. Marian GHEORGHE</b>	
<b>Referee</b>	<b>Prof.univ.dr.ing. Nicolae IONESCU</b>	
<b>Referee</b>	<b>Prof.univ.dr.ing. Viorel PĂUNOIU</b>	<b>University “Dunărea de Jos” of Galați</b>
<b>Referee</b>	<b>C S 1 Dr.ing. Mihai MĂRGĂRITESCU</b>	<b>National Institute of Research and Development in Mechatronics and Measurement Technique</b>

## Cuprins

	Rezumat/ Summary: S; Teză/ Theis: T	S	T
<i>Cuvânt înainte</i> .....		3	3
Introducere .....		4	4
Lista abrevierilor .....		5	5
<b><i>Partea I. Stadiul actual privind procese și sisteme de măsurare</i></b>			
<i>Capitolul 1. Procese de măsurare și sisteme de producție</i> .....		7	7
1.1. Metrologie, controlul calității și standarde .....		7	7
1.1.1. Procesul și caracteristicile măsurării .....		7	10
1.1.2. Erori de măsurare .....		8	11
1.2. Inspecția proceselor de producție și de măsurare .....		8	13
1.3. Calibrarea sistemelor de producție și de măsurare .....		9	14
1.4. Factori ce afectează procesele de măsurare și de producție .....		9	16
1.5. Influența temperaturii ca factor de mediu.....		9	17
<i>Capitolul 2. Echipamente și dispozitive de măsurare</i> .....		11	21
2.1. Introducere .....		11	21
2.2. Clasificare .....		11	21
2.2.1. Clasificare în funcție de datele de ieșire .....		11	21
2.2.2. Clasificare în funcție de datele de intrare.....		11	22
2.2.3. Clasificare în funcție de precizie .....		11	23
2.3. Interferometrie și interferometre .....		11	24
2.3.1. Principiul de bază.....		11	24
2.3.2. Tipuri de interferometre în funcție de metoda de divizare.....		11	27
2.3.3. Tipuri uzuale de interferometre .....		13	39
2.3.4. Surse de incertitudine în măsurările cu laser.....		14	31
2.3.5. Interferometre laser pentru controlul și calibrarea mașinilor-unelte.....		14	33
2.3.6. Sisteme de prindere și kituri de montare disponibile pe piață pentru interferometre .....		15	39
2.3.7. Fabricare aditivă a sistemelor de prindere și a elementelor de montaj .....		15	40
<i>Capitolul 3. Concluzii privind stadiul actual al proceselor și sistemelor de măsurare</i> .....		18	43

*Partea a II-a. Contribuții la definirea și dezvoltarea constructivă a structurii sistemelor de interferometrie laser*

<i>Capitolul 4. Direcțiile, obiectivul principal și metodologia de cercetare - dezvoltare privind structura sistemelor de interferometrie laser</i> .....	22	47
4.1. Direcțiile de cercetare - dezvoltare .....	22	47
4.2. Obiectivul principal al activității de cercetare – dezvoltare .....	22	47
4.3. Metodologia de cercetare - dezvoltare .....	22	47
<i>Capitolul 5. Dezvoltarea structurii și caracteristicilor generale ale sistemelor de interferometrie laser</i> .....	25	51
<i>Capitolul 6. Dezvoltarea unui sistem inovativ de interferometrie laser pentru poziție liniară</i> .....	27	59
6.1. Structura inovativă a unui sistem de interferometrie laser pentru poziție liniară .....	27	59
6.2. Conceptualizare și proiectare detaliată a unui dispozitiv inovativ de poziționare a divizorului de fascicul .....	27	61
6.2.1. Date inițiale și conceptualizarea dispozitivului de poziționare a divizorului de fascicul .....	27	61
6.2.2. Proiectare detaliată a dispozitivului de poziționare a divizorului de fascicul .....	27	62
6.3. Fabricarea dispozitivului de poziționare a divizorului de fascicul .....	27	72
6.3.1. Pre - procesare pentru fabricarea aditivă .....	27	72
6.3.2. Fabricarea aditivă a dispozitivului de poziționare a divizorului de fascicul .....	27	74
6.3.3. Post - procesare după fabricarea aditivă .....	27	76
<i>Capitolul 7. Validarea dispozitivului inovativ de poziționare a divizorului de fascicul în cadrul unor sisteme de interferometrie laser pentru poziție liniară</i> .....	31	79
7.1. Protocol experimental și condiții de mediu .....	31	79
7.1.1. Protocol experimental .....	31	81
7.1.2. Studiu privind condițiile de mediu .....	31	84
7.2. Teste consecutive în condiții de laborator .....	32	85
7.3. Teste în paralel în condiții de laborator .....	33	88
7.4. Teste în paralel în condiții industriale .....	34	91
<i>Capitolul 8. Concluzii finale și contribuții principale privind dezvoltarea structurii și atributelor sistemelor de interferometrie laser</i> .....	37	97
Bibliografie .....	41	101

## ***Cuvânt înainte***

Cercetarea și dezvoltarea sistemelor de interferometrie laser reprezintă *motivația și direcția* studiilor doctorale, finalizate prin prezenta teză de doctorat.

Activitatea doctorală a constat în pregătirea, prezentarea și susținerea examenelor și a rapoartelor de cercetare, cercetarea aprofundată a literaturii de specialitate, în dezvoltarea și definirea unor descriptori analitici privind structura și caracteristicile generale ale sistemelor cu interferometrie laser, propunerea, proiectarea, fabricarea și validarea unui sistem de poziționare a divizorului de fascicul laser, ca parte a unui sistem de interferometrie laser pentru poziție liniară, elaborarea și publicarea unor lucrări științifice de specialitate, precum și elaborarea prezentei teze de doctorat, referitoare la contribuții asupra dezvoltării structurii și a atributelor sistemelor de interferometrie laser.

În primul rând aș dori să îi mulțumesc lui Dumnezeu pentru a fi făcut posibilă această teză și le mulțumesc tuturor care m-au purtat în rugăciunile lor.

Adresez profundele mele mulțumiri domnului Prof.univ.dr.ing Marian GHEORGHE, pentru ghidarea sa și coordonarea științifică pe parcursul întregii activități doctorale, pentru suportul său și încrederea acordată.

Adresez sincere mulțumiri domnilor Conf.univ.dr.ing.mat Ovidiu BLĂJINĂ, Șef lucr.univ.dr.ing Daniel MANOLACHE și CSP1 dr.ing Gheorghe POPAN pentru aprecieri și comentarii, ca parte a Comisiei de îndrumare a studiilor doctorale și a Comisiei pentru pre-susținerea tezei de doctorat.

Îmi exprim aprecierea și le mulțumesc respectuos domnilor Prof.univ.dr.ing Liviu-Daniel GHICULESCU, de la Universitatea POLITEHNICA din București, Prof.univ.dr.ing. Nicolae IONESCU de la Universitatea POLITEHNICA din București, Prof.univ.dr.ing Viorel PAUNOIU, de la Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați și CS I dr.ing Mihai MĂRGĂRITESCU de la Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Mecatronică și Tehnica Măsurării (INCDMTM) pentru aprecieri și recomandări, în calitate de președinte, respectiv, membri ai Comisiei de Doctorat pentru evaluare și examinare în timpul susținerii publice a tezei de doctorat.

Mulțumiri deosebite domnilor Ing. Nasim GANNAM și Ing. Cătălin-Ștefan NEGREA pentru suportul lor în pregătirea și operarea centrelor cu comandă numerică pe parcursul dezvoltării sistemului de interferometrie laser din timpul studiilor doctorale.

Îi voi fi mereu recunoscătoare fratelui meu iubitor, ale cărui cuvinte înțelepte nu încetează niciodată să mă surprindă cu acuratețea lor.

Această teză este dedicată tatălui și mamei mele, care m-au crescut frumos, întotdeauna îmi poartă de grijă și mă iubesc necondiționat. De asemenea, este dedicată soțului meu, care m-a încurajat și m-a susținut în această perioadă dificilă.

*Flavia-Petruța-Georgiana G. ARTIMON  
(STOCHIOIU)*

## Introducere

Procesele de producție și de măsurare sunt interdependente. Evoluția lor se remarcă la scară globală, prin îmbunătățirea continuă a calității, capacității și eficienței de fabricare.

Procesele de măsurare și sistemele de producție necesită precizie ridicată pentru a respecta specificațiile produselor, cu consecințe asupra exigențelor privind echipamentele de control al calității. Acestea trebuie să fie capabile a măsura la precizie de ordinul micro -/ nano - metrilor.

Metoda interferometrică a cunoscut o dezvoltare continuă și o gamă largă de aplicații. Dispozitivele bazate pe această metodă sunt unele dintre cele mai precise instrumente de măsurare, în toate ramurile tehnologiei. Pentru evaluarea proceselor și sistemelor de producție, interferometria este o tehnologie cu eficiență dovedită, datorită capacității de precizie la scară nanometrică. Un factor restrictiv este necesitatea ca unele din elementele optice să fie montate în spațiul de lucru al echipamentului de evaluat, limitând intervalul de măsurare. Prezenta teză vizează analiza și propunerea unei soluții la această problemă, prin dezvoltarea structurii unui sistem de interferometrie laser.

\* \* \*

Prima parte a tezei prezintă stadiul actual al dezvoltării proceselor și sistemelor de măsurare. Sunt analizate metrologia, sistemele de control și conceptele standard cu scopul de a conștientiza diferenții factori ce pot interveni în calitatea rezultatelor sistemelor de producție și de măsurare. În continuare, este efectuată clasificarea dispozitivelor de măsurare actuale, cu detalierea unora din ele. Conceptul interferometriei, procedura și componentele dispozitivelor interferometrice sunt detaliate pentru studii ulterioare asupra capacităților lor.

În concordanță cu datele și concluziile privind stadiul actual, interferometria laser a atras atenția, astfel încât, s-a determinat ca obiectiv principal al activității de cercetare: dezvoltarea structurii și atributelor sistemelor de interferometrie laser.

Dezvoltarea descriptorilor analitici definatorii pentru structura și caracteristicile generale ale sistemelor de interferometrie laser este propusă, cu un nivel ridicat de generalitate, deschisă particularizărilor.

În conformitate cu limitările interferometriei, anterior studiate, un nou dispozitiv de poziționare a divizorului fasciculului laser pentru sisteme de interferometrie laser este conceput, în raport cu o serie de caracteristici funcțional - constructive cerute. Astfel, o serie de iterații sunt luate în considerare, cu scopul realizării unui concept optimizat. Iterația finală prezintă structură celulară de tip "lattice", pentru utilizare cu diverse interferometre laser. Prototipul obținut pentru dispozitivul de poziționare este optimizat pentru sinterizare cu laser, din pulbere de superaliaj de CoCrSP2.

Pentru încercările experimentale sunt utilizate două sisteme de interferometrie laser, consecutiv sau în paralel, pe trei sisteme de prelucrare cu comandă numerică, unul în condiții de funcționare de laborator și două în condiții industriale, cu scopul validării dispozitivului inovativ realizat.

Drept perspective potențiale, pot urma cercetări complexe privind interacțiunea proceselor, modelarea analitică și caracteristicile operaționale asociate sistemelor de interferometrie laser, cu scopul dezvoltării aplicațiilor în mediul industrial.

## Lista abrevierilor

No.	Abrev.	Semnificație
01	ADC	Convertor din Analog către Digital
02	ASRO	Asociația de Standardizare din România
03	CAD	Design cu Ajutorul Computerului
04	CEN	Comitetul European pentru Standardizare
05	CENELEC	Comitetul European pentru Standardizare in domeniul Electrotehnic
06	CMM	Mașină de Măsurat in Coordonate
07	CNC	Control Numeric Computerizat
08	DAC	Convertor din Digital către Analog
09	DMLS	Sinterizare Directa a Metalului folosind Laser
10	ECG	Electrocardiograma
11	EDM	Prelucrare prin Electroeroziune
12	ETSI	Institutul European de Standardizare a Telecomunicațiilor
13	FEA	Analiza cu Element Finit
14	FEM	Metoda cu Element Finit
15	HRC	Duritate Rockwell
16	IEC	Comisia Electrotehnica Internațională
17	ISO	Organizația Internațională pentru Standardizare
18	LCD	Display cu Cristale Lichide
19	LED	Dioda cu Emisie de Lumina
20	LIS	Sistem cu Interferometrie Laser

21	PA (2200)	Poliamida (2200)
22	PSC	Procese, Programe și Computere
23	QC	Controlul Calității
24	SLS	Sinterizare Selectiva cu Laser
25	SPD	Dispozitiv pentru poziționarea divizorului de fascicul
26	TQM	Metoda Calității Totale
27	VMC	Originea Axei Verticale
28	WCN	Index de Compensare a Lungimii de Unda
30	3D	Tridimensional

## ***Partea I.***

# **Stadiul actual privind procesele și sistemele de măsurare**



## Capitolul 1. Procese de măsurare și sisteme de producție

### 1.1. Metrologie, controlul calității și standarde

Procesele de producție și de măsurare pentru fiecare produs în parte necesită pregătire detaliată pentru a atinge criteriile tehnice și economice solicitate.

Calitatea oferită de procesele de producție poate fi determinată conceptual printr-o diagramă de tipul cauză-efect (Fig. 1.1) [I01].

Procesul care asigură că sistemele de producție și de măsurare funcționează în parametrii prevăzuți este controlul calității.

Controlul calității nu poate fi realizat fără măsurări. Acest concept cuprinde, de asemenea, stabilirea și prevenirea cauzei pentru care un produs ar putea fi identificat ca neconform. Inspecția și calibrarea sunt părți ale controlului calității care cuprind sfera menținerii procesului până la caracteristicile specifice de calitate determinate inițial, prin măsurări [W01].

Inspeția este un aspect important al controlului calității. În plus, asigurarea calității include toate aspectele controlului și inspecției calității, deoarece conține planificarea calității, inspecția calității și supravegherea calității. Pe scurt, asigurarea calității este suma măsurilor luate pentru a asigura calitatea [M01].

În funcție de scopul lor, există diferite tipuri de standarde orientate spre referire, calibrare, inspecție sau lucru. O scurtă clasificare ierarhică a standardelor este descrisă în Fig. 1.3.

#### 1.1.1. Procesul și caracteristicile măsurării

Alegerea principiului de măsurare depinde de mulți factori, dintre care cei mai importanți pot fi considerați caracteristicile măsurandului, precizia necesară, rezoluția, stabilitatea, mediul, timpul, costurile etc. Ținând cont de toate acestea, de-a lungul timpului, numeroase tipuri de proceduri de măsurare au avut fost dezvoltate.

Alegerea dispozitivului de măsurare perfect nu este posibilă din cauza faptului că nu există instrumente ideale pentru acest tip de activitate și, de obicei, dispozitivul care ar putea oferi cel mai bun rezultat este extrem de scump [R01]. Acesta este unul dintre motivele pentru care atunci când se realizează alegerea dispozitivului de măsurare trebuie să se țină cont de domeniul de aplicare al rezultatelor măsurării. Fie că este vorba de studiu pe un șantier, într-un laborator sau într-o fabrică, chiar dacă măsurandul ar putea fi același, dispozitivul potrivit poate diferi.

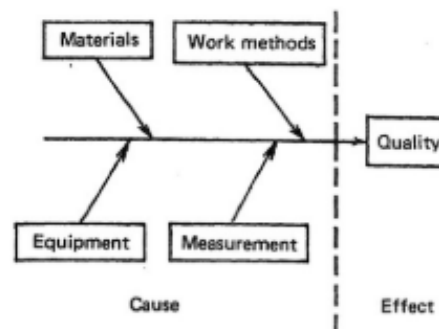


Fig. 1.1. Diagrama cauză-efect a procesului de producție [I01]



Fig. 1.3. Clasificare ierarhică a standardelor [R02]

### 1.1.2. Erori de măsurare

O eroare de măsurare poate fi definită ca diferența dintre mărimea măsurată și valoarea absolută a acelei cantități. Deoarece valoarea absolută nu poate fi cunoscută cu adevărat, eroarea reală de măsurare este suma erorilor de măsurare ale dispozitivului, erorilor metodologice, erorilor umane și statisticilor [G02].

În timp ce clasificarea poate fi realizată în funcție de procedura de măsurare, erorile pot fi distinse și pe baza factorilor care le cauzează: sistematice și aleatorii. Erorile sistematice cuprind erorile dispozitivului, erorile de mediu și de observație și influențează acuratețea măsurării, în timp ce erorile aleatorii sunt cauzate frecvent de o variație neașteptată a mediului de lucru și influențează precizia rezultatelor măsurării. [R01]

Din punct de vedere matematic, relația dintre acuratețe/neacuratețe, repetabilitate și erori sistematice poate fi descrisă ca [G02]:

$$\text{Acuratețe} = \sqrt{(\text{repetabilitate})^2 + (\text{neacuratețe})^2 + (\text{erori sistematice})^2} \quad (1.1)$$

O descriere gaussiană a erorilor aleatorii și sistematice este prezentată în Fig. 1.7. După cum se poate observa, rezultatul real al unei măsurări poate fi scris după cum urmează [G03]:

$$\text{Resultat} = \text{valoare reală} + \text{eroare sistematică} + \text{eroare aleatorii} \quad (1.2)$$

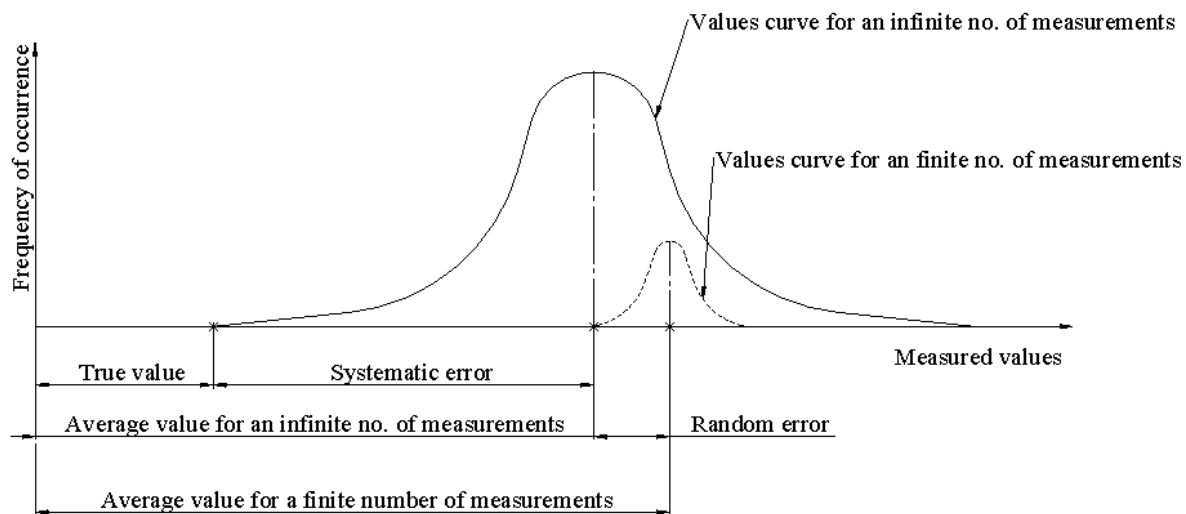


Fig. 1.7. Random and systematic errors description [adapted from I06]

Spre deosebire de erorile aleatorii, erorile sistematice sunt ușor de observat și evaluat, nu pot fi eliminate prin creșterea numărului de măsurări, dar pot fi reduse prin calibrarea dispozitivului. În plus, erorile aleatorii sunt caracterizate prin varianță, abatere standard și medie și pot fi atât pozitive, cât și negative [R02].

### 1.2. Inspecția procesului de producție și măsurare

Suma încercărilor și verificărilor efectuate asupra echipamentelor de măsurare și producție reprezintă o procedură de inspecție [B01]. Atunci când se efectuează o inspecție a unui echipament, ghidurile pot fi furnizate de către producător, însă, în mod uzual, această procedură este detaliată de ghidurile standardizate [P01]. Companiile tind să dezvolte norme tehnice specifice pentru controlul procesului de producție și măsurare pentru a satisface nevoile clientului, capacitățile echipamentelor, calificarea personalului și specificațiile produsului.

Alegerea metodei adecvate de inspecție depinde de precizia dorită. Cele două sunt legate prin aspectul economic deoarece, o creștere a preciziei este de obicei însoțită de o creștere a costurilor, care poate avea o evoluție exponențială.

Pentru a efectua o procedură de control a producției, instrumentul ales pentru a fi utilizat trebuie să fie calibrat cu un dispozitiv ce are o precizie de zece ori mai mare [R02, C03].

### 1.3. Calibrarea sistemelor de producție și măsurare

Procesul de calibrare combină o suită de operații în condiții speciale de mediu pentru a stabili relația dintre un sistem de măsurare și măsurand și pentru a elimina erorile sistematice [B02].

Calibrarea se efectuează cu precădere dispozitivelor, instrumentelor și echipamentelor din proces de producție și metrologie. Calibrarea se realizează în condiții specifice determinate de standarde și se referă la compararea directă a valorilor obținute prin măsurare, cu dimensiunilor sau performanțelor cunoscute anterior ale măsurandului.

O persoană autorizată poate efectua acest proces și determină eliberarea certificatului. Dacă valorile obținute depășesc valorile de toleranță, trebuie efectuată o procedură de recalibrare.

Unul dintre cele mai importante atribute ale instrumentelor de măsurare este trasabilitatea. Pentru a realiza trasabilitatea, calibrarea dispozitivelor și echipamentelor de măsurare conform standardelor internaționale este crucială [F01].

Pentru a facilita această trasabilitate, standardele internaționale, considerate primare, sunt adaptate în standarde naționale (de către ASRO, de exemplu), cunoscute pe scară largă ca secundare, și la standarde de lucru (Fig. 1.11).

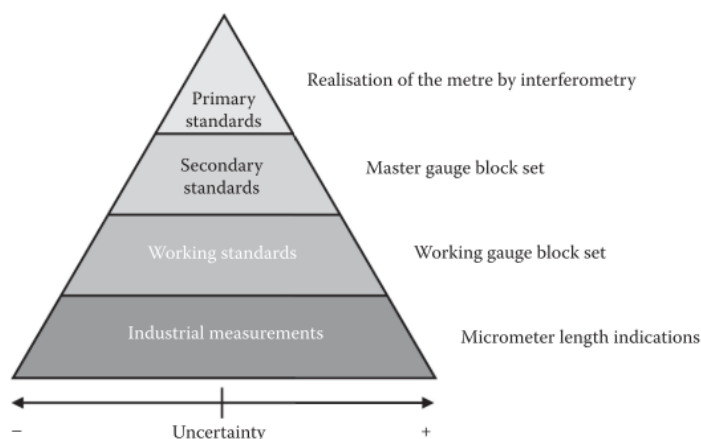


Fig. 1.11. Piramida trasabilității pentru măsurări micrometrice [L01]

### 1.5. Influența temperaturii ca factor de mediu

Instabilitățile de temperatură pot produce diferențe extreme atunci când este necesară acuratețea micrometrică, prin urmare au fost dezvoltate anumite soluții [R04] pentru a depăși aceste probleme. În general, abordările se concentrează pe identificarea surselor ce determină fluctuația temperaturii.

În cazul unei mașini-unelte există cinci origini ale acestei probleme: mediul încăperii, lichidele de răcire, oamenii, mașina-unealtă și procesul de tăiere [B03]. Fiecare sursă transferă căldură printr-una dintre cele trei moduri posibile: conducție, convecție sau radiație. Acest transfer de căldură poate fi uniform, cum ar fi în cazul încăperii sau a surselor de lichid de răcire, sau neuniform din alte cauze.

Variațiile de temperatură pot afecta dimensiunile dispozitivului de operare (corpul de control și cadrul mașinii) și ale piesei/măsurandului. Această perturbare poate produce fie contractii, fie expansiuni la materialul care este formulat ca o multiplicare a lungimii inițiale, a coeficientului de dilatare și a temperaturii [V02].

Coeficientul de dilatare indică tipul de deformare prin utilizarea unui semn pozitiv sau negativ înaintea numărului valorii. Con tracția este reprezentată într-o formă negativă, în timp ce expansiunea este pozitivă. Pentru a ilustra influența temperaturii asupra coeficientului liniar, mai multe rezultate din literatură [T01] sunt reprezentate în Fig. 1.14. Se observă că majoritatea metalelor enumerate se comportă într-un mod similar, printr-o creștere a coeficientului de dilatare, cu excepția Invarului, cunoscut și sub numele de FeNi36, care are o evoluție deosebită a temperaturii.

Acest aliaj de fier are o dilatare termică foarte scăzută, la temperaturi de până la 100° C. Acest lucru se datorează contribuțiilor magnetice și electronice, care domină comportamentul la temperaturi scăzute. Prin urmare, acest material este utilizat frecvent în construcția de echipamente de măsurare și altele care necesită stabilitate dimensională.

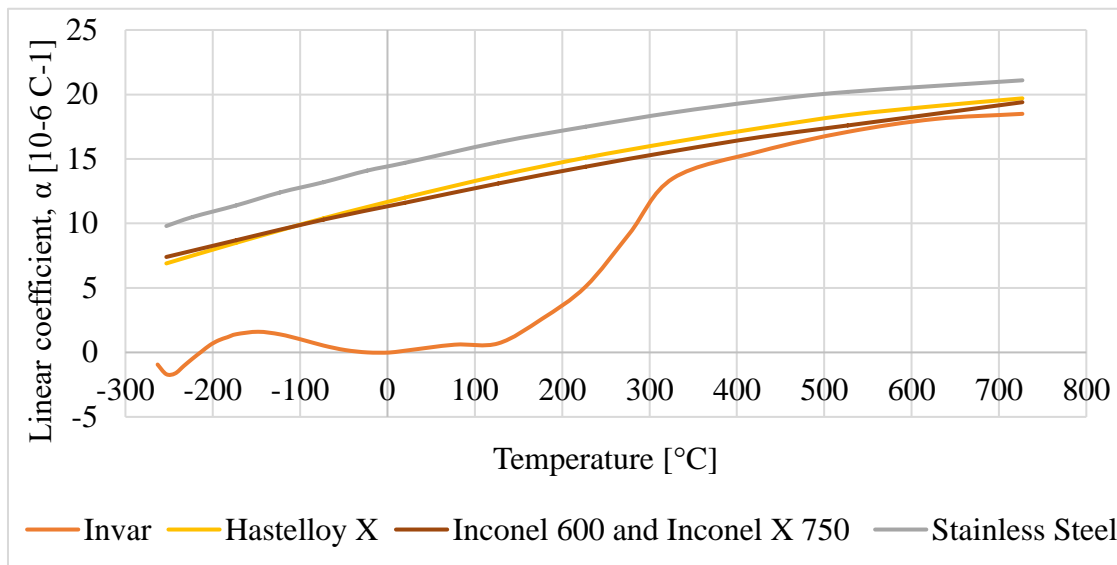


Fig. 1.14. Coeficientul liniar termic pentru diferite aliaje metalice

Producătorii de echipamente de producție și măsurare își îmbunătățesc continuu produsele, iar scăderea influenței temperaturii este una dintre preocupările continui.

Pentru a evita fluctuațiile termice în timpul unei proceduri de măsurare, standarde precum [I10] recomandă saturarea atât a măsurandului, cât și a instrumentului de măsurare într-un mediu stabil la 20° C, deoarece construcția fiecărui dispozitiv conține diferite tipuri de materiale, prin urmare diferite dilatații sau contracții pot afecta procesul.

## Capitolul 2. Echipamente și dispozitive de măsurare

### 2.1. Introducere

Un instrument de măsurare este un ansamblu de mijloace tehnice având scopul de a stabili o cantitate sau o variabilă, în conformitate cu standardele naționale și/sau internaționale. În general, acest tip de instrumente este echipat cu senzori și/sau traductoare, diviziune de condiționare a semnalului și o etapă de procesare a semnalului, așa cum este prezentat în Fig. 2.1 [W03].

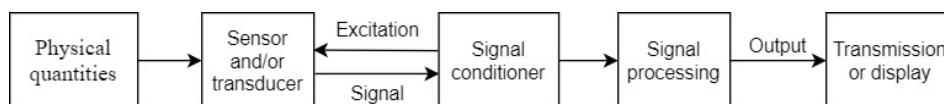


Fig. 2.1. Structura generală a unui instrument de măsură [W03]

Fiecare dispozitiv impune calibrarea periodică pentru a menține calitatea. Când ne referim la calibrarea mașinilor de producție sau chiar la calibrarea echipamentelor de măsurare, ar putea fi necesare unele dintre cele mai precise dispozitive, cum ar fi interferometre, autocolimatoare, nivele electronice, encodere de referință etc.

### 2.3. Interferometrie și interferometre

De-a lungul timpului, au fost dezvoltate o multitudine de tehnici și instrumente de măsurare, iar acuratețea acestora s-a îmbunătățit constant.

În prezent, unul dintre cele mai precise dispozitive de măsurare este interferometrul [B06]. Albert Michelson a fost primul care a implementat interferometria în măsurare la sfârșitul secolului al XIX-lea, iar principiul de funcționare al tuturor interferometrelor dezvoltate până astăzi l-a avut la bază pe acesta. Această tehnică de măsurare este versatilă, fiind folosită în mod obișnuit în măsurări de înaltă calitate.

Interferometria își are rădăcinile în teoria undelor lumii prin care, în urmă cu mai bine de 300 de ani, a fost determinat că lumina se comportă ca unde, similar sunetului [R05]. Pornind de la indispensabilele teorii ale lumii și unde, se derivă bazele metodei interferometriei. Undele luminoase sunt compuse din forme de undă electrice și magnetice perpendiculare (Fig. 2.8).

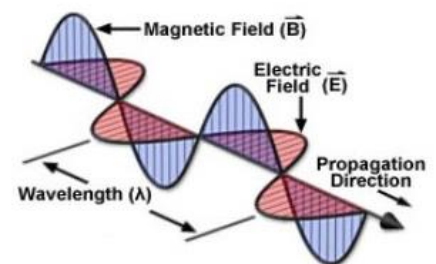


Fig. 2.8. Electromagnetic wave [B07]

Fiecare undă (armonică) poate fi descrisă de cinci parametri: iradierea, unghiul de fază, direcția de propagare, lungimea de undă și direcția de polarizare [D02].

Acești parametri se modifică atunci când fasciculul întâlnește obiectul de măsurat. Interferometria surprinde acele modificări și le studiază pentru a obține informații despre măsurand.

#### (a) Iradierea

Iradierea, cunoscută și sub denumirea de densitatea fluxului unei unde, este energia totală care curge pe secundă într-o unitate de suprafață perpendiculară pe direcția de propagare. În interferometrie, iradierea este denumită și intensitatea fasciculului, fiind considerată capacitatea fasciculului de a concentra energia într-o anumită zonă într-un anumit timp. Acest parametru este foarte important mai ales în domeniile în care este utilizat pentru tăiere, sudare sau tratamente termice (chirurgie, fabrici de produse metalice etc.). Iradierea este măsurată în  $W/m^2$  și este proporțională cu pătratul amplitudinii unde [R06, P03].

(b) Unghiul de fază

Unghiul de fază este deplasarea unghiulară a unei unde sinusoidale de la o referință dată. Ea poate fi măsurată doar prin intermediul fenomenului de suprapunere. Prin urmare, dacă două unde se deplasează în aceeași direcție cu aceeași amplitudine, frecvență și viteză, dar una are o diferență de unghi de fază de  $\phi$ , ecuațiile lor [S04] sunt:

$$Y_1 = A \sin(kx - \omega t - \phi) \quad (2.1)$$

$$Y_2 = A \sin(kx - \omega t) \quad (2.2)$$

unde: A este amplitudinea;  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $\omega$  – frecvența unghiulară ( $\omega = 2\pi\theta$ ); x - direcția; t - timpul. Dacă aceste două unde sunt suprapuse, forma lor de undă este dată de:

$$Y = 2A \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \sin\left(kx - \omega t - \frac{\phi}{2}\right) \quad (2.3)$$

Așa cum a fost menționat mai sus, iradierea este proporțională cu pătratul amplitudinii unde:

$$I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (2.4)$$

unde:  $I_0$  este iradierea uneia dintre cele două unde.

Când două unde identice se suprapun în fază, intensitatea câmpului se dublează, în timp ce atunci când cele două unde oscilează în fază opusă (se suprapun), ele se egalează între ele (Fig. 2.9) datorită faptului că intensitatea câmpului lor este calculată prin însumarea vectorilor de fiecare intensitate a câmpului. În consecință, în primul caz, iradierea se înmulțește de patru ori, în timp ce în al doilea caz este nulă.

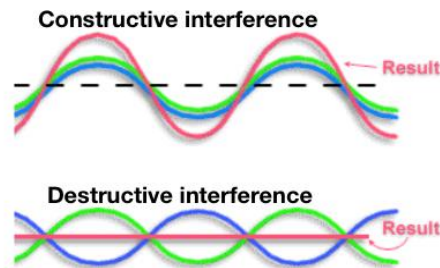


Fig. 2.9. Wave interference [I11]

(c) Direcția de propagare

O definiție evidentă este că direcția de propagare este axa de deplasare a unde.

Cu toate acestea, atunci când două unde diferă una de cealaltă doar prin direcțiile lor de propagare, ele se suprapun creând un model de interferență care permite diverse măsurări. Intervalul de timp dintre două vârfuri ale franjelor, D, poate fi determinat cunoscând unghiul,  $\theta$ , dintre cele două unde și lungimea lor de undă,  $\lambda$ , astfel:

$$D = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (2.5)$$

(d) Lungimea de undă

Lungimea de undă este distanța dintre un punct de început și un punct de sfârșit al unui ciclu complet de oscilație. Deoarece undele sinusoidale sunt simetrice, lungimea de undă ar putea fi definită și ca distanța dintre două puncte similare, consecutive, din undă (Fig. 2.8). Anterior, a fost stabilită importanța acurateții și repetabilității, în special în măsurări precise. Lungimea de undă necesită o stabilizare a frecvenței pentru a oferi aceste două caracteristici, prin urmare toate sursele laser interferometrice au un mecanism de stabilizare [S05]. Rezultatul unei măsurări interferometrice este format din franjuri. Când are loc o deplasare în sistem, franjurile sunt perturbate. Fiecare margine reprezintă o diviziune a unei lungimi de undă. Pentru a măsura aceste deplasări, pot fi abordate măsurările lungimii de undă, bazate pe principiul suprapunerii. Fiind considerate două unde,  $E_1$  și  $E_2$ , cu frecvențe diferite ca fiind suprapuse. Cele două lungimi de undă,  $\lambda$  și  $\lambda + \Delta\lambda$ , duc la o undă rezultată care are o iradiere modulată în timp. Intervalul de timp dintre două vârfuri de iradiere este intitulat perioade de bătaie,  $T_b$ , și:

$$T_b = \frac{\lambda^2}{\frac{\omega}{k} \Delta\lambda} \quad (2.6)$$

unde:  $\omega$  este frecvența unghiulară, și  $k$  - numărul de undă.

Această ecuație ajută la identificarea deplasării lungimii de undă, luând în considerare o lungime de undă absolută stabilită. Dacă perioada de măsurare este mai mică decât un interval de bătaie, atunci intervalul de bătaie nu poate fi determinat.

#### (e) Direcția de polarizare

Direcția de polarizare este dată de direcția transversală a câmpului electric. În general, deoarece direcția de propagare este considerată a fi de-a lungul axei Z, polarizarea luminii are loc în domeniul X-Y (Fig. 2.14, a).

În etapele de bază ale interferometriei, direcția de polarizare este liniară (Fig. 2.14. b) dar, de obicei, capătă o formă mai complexă, eliptică sau circulară. Aceste forme complexe au un decalaj de fază de  $90^\circ$  și direcția de polarizare le împarte în două categorii: polarizate la dreapta/în sens invers acelor de ceasornic sau polarizate la stânga/în sensul acelor de ceasornic (Fig. 2.14. c).

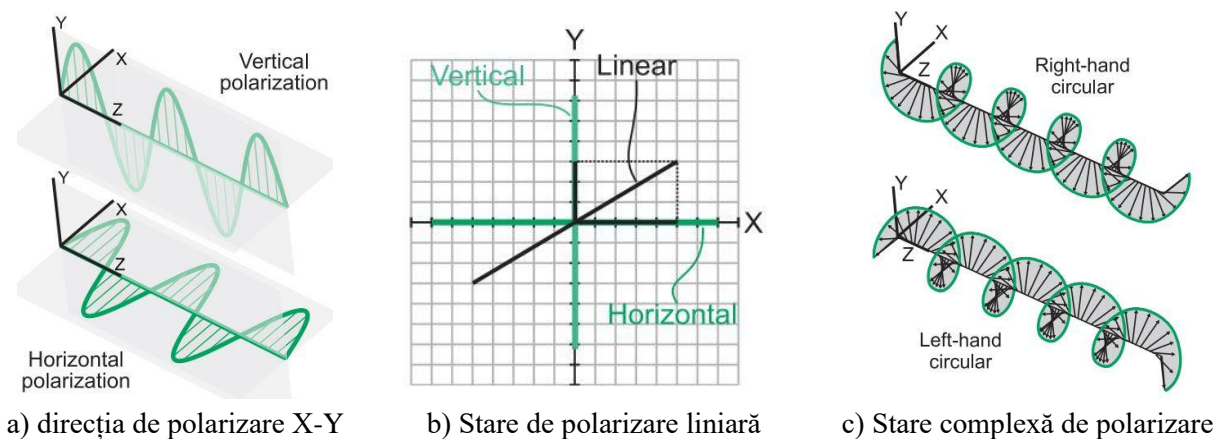


Fig. 2.14. Direcția de polarizare a udei [E02]

Lumina poate fi definită ca o undă electromagnetică care călătorește prin spațiu. Dacă o undă polarizată liniar, cum ar fi o undă luminoasă, se propagă de-a lungul unei direcții z, ecuația sa poate fi reprezentată după cum urmează:

$$E = \alpha \cos [2\pi (\vartheta t - z/\lambda)] \quad (2.7)$$

unde:  $\alpha$  este amplitudinea unde luminoase;  $\vartheta$  - frecvența;  $\lambda$  - lungimea de undă.

#### 2.3.3. Tipuri uzuale de interferometre

Interferometria a prezentat un interes deosebit, susținând diverse aplicații, cum ar fi: identificarea unei noi metode de definire a metruului [R07], diagnosticarea cu plasmă [V03], măsurarea industrială de precizie a lungimii și mișcării [J01, S06, S07], abateri liniare și măsurări de deformare [A04, T03, X01], antene gravitaționale [K05], analiza vibrațiilor [Z01, C09], monitorizarea exploatării ilegale și alunecărilor de teren [M05, S08], măsurarea vitezei sângelui [I12, X02], detectarea celulelor bolnave [N01] etc.

De când Michelson a demonstrat primul concept de interferometru prin intermediul oglinzilor, a unei surse de lumină albă, a unei lentile de compensare și a unui divizor de fascicul (oglină semi-argintie), au fost dezvoltate nenumărate principii, proceduri și configurații de interferometrie. Configurația liniară a unui interferometru Michelson este descrisă în Fig. 2.18. Raza laser este divizată și îndreptată către două oglinzi care readuc fasciculele către divizor și mai departe sunt reunite pe ecran.

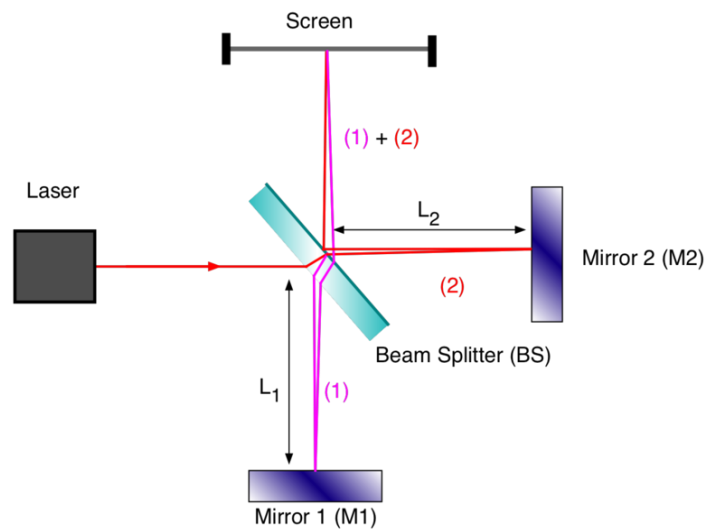


Fig. 2.18. Configurația interferometrului Michelson

Rezultatul acestei călătorii a luminii este redată sub forma unor franjuri de interferență, adică variația intensității sinusoidale a luminii. În interferometrul lui Michelson, dacă distanța dintre separatorul de fascicul și una dintre oglinzi își schimbă valoarea, pe ecran apar franjuri Haidinger (Fig. 2.19, (a)), în timp ce, dacă una dintre oglinzi își schimbă ușor unghiul față de separatorul de fascicul, rezultatul de interpretat va fi format din franjuri Fizeau (Fig. 2.19, (b)) [M06].

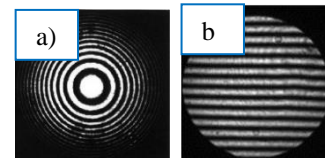


Fig. 2.19. Franjuri de interferență:  
a) franjuri Haidinger [S09];  
b) franjuri Fizeau [K06]

### 2.3.4. Surse de incertitudine la măsurările cu laser

Incertitudinea măsurărilor interferometriei cu laser este determinată în mare parte de erorile de mediu (lungimea de undă și erorile termice) și erorile geometrice (erori de cale moartă, cosinus și Abbe), așa cum se arată în ecuațiile ulterioare [L05]:

$$e = L x (1 + \alpha\theta) - L_{LI} + e_{cos} + e_{DeadPath} + e_{Abbe} \quad (2.8)$$

$$u_{tot}^2 = \sum_i (u_i x c_i)^2 \quad (2.9)$$

unde:  $u_i$  este incertitudinea standard;  $c_i$  – coeficient de sensibilitate;  $u_i x c_i$  – contribuția de incertitudine standard;  $L$  – deplasarea probei măsurate;  $e_{Abbe}$  – eroarea Abbe;  $\alpha$  – coeficientul de dilatare a temperaturii platformei;  $\theta$  – abaterea temperaturii de la 20°C;  $L_{LI}$  – distanța măsurată cu interferometru laser;  $e_{cos}$  – eroarea de cosinus;  $e_{CaleMoartă}$  – eroarea de cale moartă;  $u_{tot}$  – incertitudinea standard totală.

### 2.3.5. Interferometre laser pentru controlul și calibrarea mașinilor-unelte

O configurație tipică pentru calibrarea unei mașini-unelte (Fig. 2.29) constă dintr-o sursă de fascicul, divizor (divizoare) de fascicul, oglinzi, un receptor, un suport pentru sursa fasciculului (trepied), kituri de montare optică și software specific. În funcție de tipul de măsurare, ar putea fi necesare alte suporturi, elemente optice, senzori de mediu și o unitate compensatoare. Cu toate acestea, această configurație poate fi problematică deoarece unul dintre elementele optice este de obicei montată pe axul principal. Intersecția axelor de deplasare ale mașinii limitează capacitățile de măsurare prin scăderea suprafeței măsurabile.



Interferometrele sunt utilizate pe scară largă pentru calibrare datorită preciziei și fiabilității lor ridicate [L08], fiind capabile să efectueze măsurări de poziționare liniară și unghiulară, rectiliniaritate, planeitate, perpendicularitate și paralelism. Este important de menționat că, deși interferometria este bine apreciată în toate aceste aplicații, fiecare dintre ele trebuie să fie realizată cu componente optice specifice, întreaga procedură de configurare și realiniere a fasciculului laser fiind consumatoare de timp. Mai mult, așa cum s-a menționat anterior, configurarea elementelor optice ar putea determina ca domeniul de măsurare să nu acopere întreaga lungime a axei evaluate.

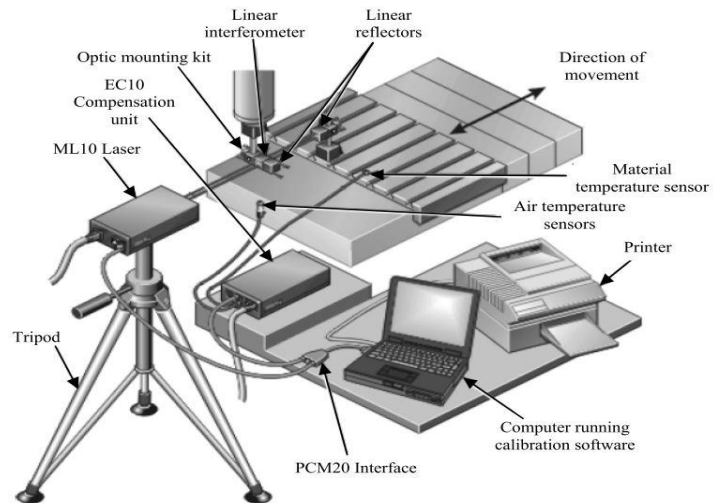


Fig. 2.29. Configurație uzuală a unui interferometru pentru o [B12]  
Fig. 1.1. Diagrama cauză-efect a procesului de producție [I01]

### 2.3.6. Sisteme de prindere și kituri de montare disponibile pe piață pentru interferometre

Interferometrele comercializate sunt de obicei însoțite de un kit de montare care asigură conexiunea între optică și mașinile-unelte. Setul își propune să permită o capacitate de interschimbare pentru părțile optice fără realinierea fasciculului.

De exemplu, interferometrul Renishaw este echipat cu coloane de montare, adaptoare, plăci de bază, blocuri de prindere și șuruburi, așa cum este prezentat în Fig. 2.38. Pilonii de montare sunt proiectați pentru a fi înșurubați pe o prismă magnetică, în timp ce blocurile de cleme asigură legătura dintre baza magnetică și elementele optice.

După cum au declarat producătorii, piesele metalice de bază (stâlpi/coloane și plăci/baze) sunt realizate din oțel inoxidabil magnetic sau nemagnetic [D03, R10].



Fig. 2.38. Kit de montare optică a interferometrului Renishaw

### 2.3.7. Fabricare aditivă a sistemelor de prindere și a pieselor de montaj

Dezvoltarea progresului tehnologiei de fabricație aditivă prezintă un interes din ce în ce mai mare pentru structurile celulare care sunt considerate a fi ușoare și oferă controlul flexibilității. Au început să fie utilizate în diferite domenii, cum ar fi biomedical, aerospațial și auto și continuă să fie studiate pentru diverse alte industrii. Unele dintre caracteristicile tehnice au fost determinate în deceniile anterioare prin studii efectuate pentru aceste materiale celulare, însă caracteristicile structurilor celulare de tip “lattice” sunt încă în curs de cercetare datorită versatilității lor.

În ultima vreme, structurile celulare de tip “lattice” sunt introduse în construcția sistemelor de prindere și montare, precum sistemele prezentate în Fig. 2.40.

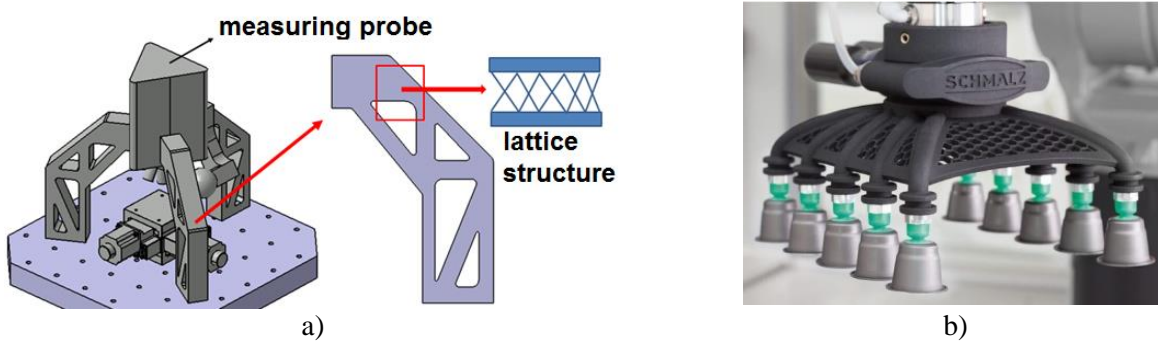


Fig. 2.40. Structuri celulare în: a) elemente de fixare [E03]; b) robot cu sistem de prindere [T09]

Principala caracteristică constrângătoare a structurilor cu zăbrele este că, în majoritatea cazurilor, singura metodă de fabricație posibilă este imprimarea 3D.

Pentru a fi imprimate 3D, piesele care conțin structuri celulare de tip “lattice” sunt generate digital prin intermediul unui software CAD diferit. Solidworks, Inventor și CATIA sunt câteva dintre instrumentele virtuale pentru construirea și proiectarea de la început a structurilor celulare. Apoi structura este de obicei multiplicată și supusă unei analize prin metoda elementului finit. Alte programe, cum ar fi Ansys, au început să implementeze module care oferă posibilitatea de a genera structuri celulare preexistente (Fig. 2.41) în zonele desemnate ale piesei/ansamblului.

Până în prezent, au fost determinate câteva caracteristici pentru unele structuri de zăbrele cunoscute pe scară largă, cum ar fi cubic, diamant și octet [M09, D04, L11].

Din 2019, programul Ansys oferă posibilitatea optimizării topologice a structurii, care permite distribuția anizotropă a construcției rețelei, putând astfel aborda modelele din natură, găsite în oase, aripi, frunze etc. (Fig. 2.42).

În natură, aceste structuri celulare sunt rezultatul evoluției, unde diferite părți s-au adaptat la sarcinile specifice pe care urmau să le suporte, respectând în același timp constrângerile de geometrie. Dimensiunea celulei unității, înălțimea și grosimea barei și distribuția densității sunt astfel construite în funcție de elementele de fixare, sarcini și caracteristicile materialului.

În ceea ce privește materialele utilizate pentru fabricarea pieselor metrologice, inclusiv suporturile specifice, Invar este cel mai recomandat material, datorită stabilității sale termice până la o temperatură de peste 100° C (vezi Tabelul 2.2), dar oțelul inoxidabil este frecvent utilizat pentru montarea și prinderea elementelor în metrologie [D03, R10, D05, A07]. Modulul de elasticitate, fiind considerabil mai mare, rezultând astfel structuri mai rigide, face ca oțelul inoxidabil să fie mai potrivit pentru aceste tipuri de aplicații.

Un material similar cu oțelul inoxidabil este Inconel, care are o rezistență mai bună la coroziune și stabilitate termică, dar, este mai scump.

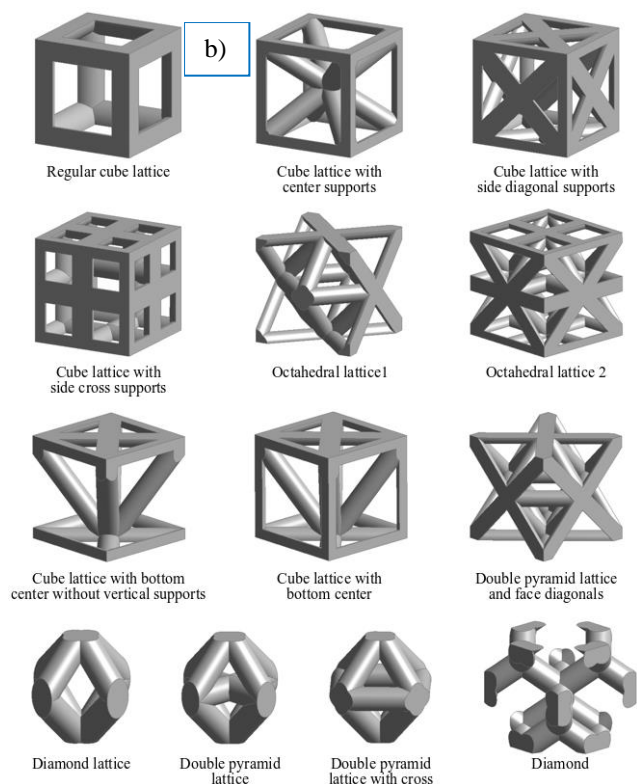


Fig. 2.41. Lattice structures:  
b) Available lattice cells in ANSYS 2021 R1 programme

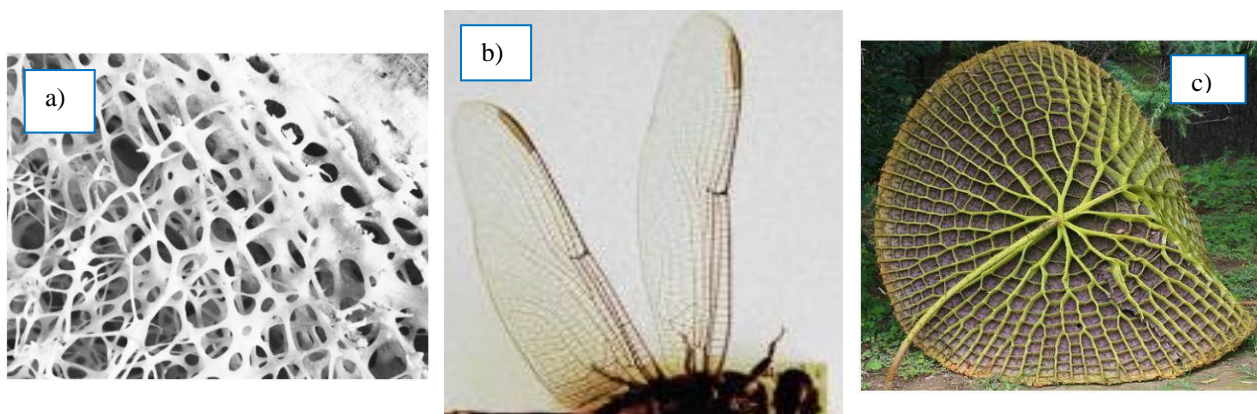


Fig. 2.42. Structuri celulare regăsite în natură:  
a) structura osoasă [N02]; b) aripi de insectă [W06]; c) structura frunzei [W06]

Un alt material plauzibil pentru fabricație este considerat a fi aliajul de aluminiu, datorită costurilor și greutateii reduse, și fabricației ușoare. Cu toate acestea, în metrologie, aliajele constând în principal din aluminiu sunt de obicei evitate datorită coeficientului de dilatare termică în general ridicat și rigidității scăzute, așa cum se vede în Table 2.2. Rigiditate sau rigiditate specifică,  $K_s$ , este [A08]:

$$K_s = E/\rho \quad (2.16)$$

unde: E este modulul de elasticitate (modulul Young), și  $\rho$  - densitatea.

Table 2.2. Caracteristicile mai multor materiale utilizate în fabricarea aditivă

Numele materialului	Coeficientul de expansiune termică [10 <sup>-6</sup> m/(m °C)]	Modulul de elasticitate [GPa]	Densitate [g/cm <sup>3</sup> ]	Sursă bibliografică
FeNi36	1.2	137	8.1	[A10]
316L Oțel inoxidabil	16.3	193	8	[A11]
AlSi10Mg	20	70	2.67	[E04]
Inconel 718	12.8	205	8.22	[H04]
TiAl6V4	9	110	4.43	[E05]
CoCrSP2 superaliaj	13.6	200	8.3	[E06]

Cu toate acestea, Al este utilizat în mod obișnuit în aliajele pe bază de Ti pentru implanturi osoase la om. Cu o rigiditate similară cu oțelul inoxidabil, dar o stabilitate termică mai bună și fiind biocompatibile, aliajele de Ti îndeplinesc cerințele pentru operațiile de înlocuire osoasă în aproape orice zonă a corpului. CoCrSP2 este, de asemenea, biocompatibil, dar servește frecvent implanturilor dentare.

Luând în considerare rigiditatea materialelor enumerate în Tabelul 2.2, se poate deduce că oțelul inoxidabil 316 L, Inconel 718, TiAl6V4 și superaliajul CoCrSP2 sunt similare. Cu toate acestea, caracteristicile coeficientului de dilatare termică arată un comportament mai bun pentru ultimele trei dintre ele.

## **Capitolul 3. Concluzii privind stadiul actual al proceselor și sistemelor de măsurare**

Din analiza stadiului actual al cercetării privind procesele și sistemele de măsurare, concluzii importante pot fi trase, după cum urmează.

- Metrologia este caracterizată de o gamă largă de definiții, dar poate fi rezumată ca fiind studiul măsurărilor. Este o ramură a științei cu următoarele componente principale: metrologie teoretică, cu interese precum acuratețea sistemelor de măsură, teoria măsurării, ce se ocupă de asigurarea uniformității măsurărilor și conceptelor fundamentale, metrologie particularizată, pentru mărimi cum ar fi lungimi, timp, cantități electrice, cantități mecanice, lumină, viteză, etc., metrologie aplicată, precum controlul și calibrarea instrumentelor, certificarea specimenelor standardizate, etc.

Diverși factori pot interfera cu un sistem de producție și măsurare. Drept urmare, pentru a furniza produse conforme, un întreg proces ce evaluează și corectează eventuale erori a fost dezvoltat, denumit controlul calității. Un segment important al controlului calității se referă la măsurări realizate pe bază de norme și standarde. Standardele pot fi limitate în aplicare la nivelul unității de producție sau valabile la nivel național/internațional și se concentrează pe arii specifice ale inspecției, calibrării, operațiilor de lucru etc. Standardele asigură trasabilitatea; drept urmare, organismele de resort ale țărilor aderă la o anumită organizație de standarde. Drept exemplu, ASRO, este membră a organizațiilor europene CEN, CENELEC, ETSI și a celor internaționale ISO și IEC.

- Caracteristicile măsurandului sunt printre cele mai importante aspecte de ținut cont la alegerea metodei de măsurare. Potrivit acestora, metodele de măsurare sunt împărțite în: directe, indirecte, diferențiale, raportate, reciproce, de înlocuire și de transfer. Suplimentar, un dispozitiv perfect de măsurare nu există și, astfel, aspecte precum rolul măsurării trebuie, de asemenea, luate în considerare pentru a reduce erorile și incertitudinile până la niveluri acceptabile.

- Erorile de măsurare, care sunt permanent prezente în cantitățile măsurate sunt împărțite în erori specifice dispozitivului, metodei, erori umane și statistice. Rezultatul măsurării este suma dintre valoarea reală a erorilor sistematice și a celor aleatorii. Erorile sistematice caracterizează acuratețea măsurării, iar erorile determină precizia rezultatelor măsurării. Incertitudinea de măsurare este o caracteristică a rezultatului ce reflectă repetabilitatea și reproductibilitatea măsurării.

- Inspecția echipamentelor de producție și de măsurare se referă la evaluarea, directă sau indirectă, prin măsurări a elementelor respectivului sistem. Procedura de inspecție este uzual efectuată pe baza unor instrucțiuni certificate, dar și unele asupra cărora producătorul echipamentului sau utilizatorul tind să intervină cu nevoi particularizate echipamentului sau nevoilor clientului final.

În urma inspecției, este eliberat un certificat de către operator sau inspector. Acesta oferă o imagine de ansamblu asupra produselor respinse, corectate și acceptate, facilitând îmbunătățiri ulterioare. Aparatul de măsură ales pentru inspecție trebuie calibrat cu un instrument de cel puțin 10 ori mai precis.

Cu toate că inspecțiile statistice sunt în continuare folosite pentru producția de masă, noi principii de inspecție au fost dezvoltate, cum ar fi sisteme flexibile de inspecție sau inspecția-automatizată pe echipament.

- Procesul de calibrare se referă la întreaga procedură de evaluare a unui dispozitiv, instrument sau echipament cu scopul îmbunătățirii acurateței sale. Certificatul de calibrare este eliberat de o persoană autorizată și depinde de factori externi precum utilizarea și condițiile de mediu.

Trasabilitatea dispozitivului de măsurare este de importanță crucială și este atinsă prin urmărirea instrucțiunilor din standarde internaționale de calibrare.

- Orice deviere a factorilor externi de la procedurile standard trebuie notată în raportul procedurii. Aceștia pot influența rezultatul final și, în consecință, trebuie monitorizați, controlați și înregistrați. Cu toate că mediul de producție sau măsurare nu poate fi controlat în întregime, acuratețea și repetabilitatea mașinilor depind de ele. Coeficienți de corecție sunt aplicați pentru compensarea erorilor.

- Fluctuațiile de temperatură reprezintă cel mai dăunător factor de mediu. Ele produc dilatarea sau contractarea termică a pieselor, atât ale echipamentului măsurat, cât și a celui de măsurat. Înregistrări punctuale cu termocuple, interferometre și termografie cu infraroșu sunt câteva din tehnicile de măsurare utilizate pentru a identifica surse de căldură.

Coeficientul de dilatare termică este cel ce determină stabilitatea termică. Diversele standarde pe subiect recomandă o temperatură de 20°C drept optimă pentru efectuarea măsurărilor. Unul dintre cele mai stabile materiale, până la temperaturi de 100°C, este Invar.

- Instrumentele de măsură stabilesc cantități sau variabile raportabile la valori stabilite în standarde naționale și/sau internaționale.

- Instrumentele de măsură au diverse clasificări multe din ele fiind în funcție de valorile de ieșire, cele de intrare sau de precizie.

- Datele de ieșire împart dispozitivele de măsurare în analoge, digitale, cu ecran, cu înregistrare, de însumare sau de integrare.

- Datele de intrare împart dispozitivele de măsurare în: mecanice, electrice, termice, magnetice, optice și acustice.

- Clasificarea bazată pe precizie grupează dispozitivele pe clase de precizie. Echipamentele din cele mai ridicate clase de precizie, precum interferometrele, autocolimatoarele, nivelele electronice etc. sunt uzual folosite pentru calibrarea echipamentelor de producție sau de măsurare.

- Interferometria a fost implementată în procedurile de măsurare pentru prima oară în urmă cu două secole de către Albert Michelson și, până la momentul actual, este considerată drept una dintre cele mai precise metode de măsurare, non-contact, cu acuratețe și conformitate semnificative, viteză de măsurare ridicată.

- Interferometria s-a dezvoltat pornind de la teoria undelor de lumină. Acestea sunt caracterizate de iradianță, unghi de fază, direcție de propagare, lungime de undă și direcție de polarizare. Iradianța reprezintă intensitatea fasciculului sau capacitatea sa de a concentra energie pe o anumită suprafață pentru o durată de timp. Unghiul determinat de deplasarea unei unde sinusoidale raportat la o poziție de referință reprezintă unghiul de fază. Cu toate că definiția direcției de propagare este intuitivă, efectele acesteia sunt importante atunci când se suprapun două unde ce o au drept singură diferență. Prin această suprapunere se creează un tipar de interferență, sub formă de franjuri.

Lungimea de undă este distanța dintre începutul și sfârșitul unui ciclu de oscilație. Acuratețea și repetabilitatea măsurărilor interferometrice sunt, printre altele, influențate de stabilitatea lungimii de undă a sursei laser. În timpul unei măsurări interferometrice, franjurile cauzate de suprapunere sunt captate drept date de ieșire iar perturbările lungimii de undă reprezintă o deplasare.

Având în vedere că interferometria se bazează pe o sursă ce emite unde pentru a măsura, efectul Doppler poate fi folosit în anumite situații, precum determinarea vitezei unui corp în mișcare.

Direcția de polarizare este definită de direcția transversală a câmpului electric al unde. Astfel, cazurile sunt de polarizare în sens orar sau trigonometric.

- Procedurile de interferometrie necesită două unde laser inițial identice. Ele se obțin frecvent prin divizarea fascicului unei surse laser prin divizarea frontului de undă sau a amplitudinii.

Divizarea frontului de undă este realizată cu ajutorul unor elemente optice care divid și redirecționează lumina unei surse monocromatice către un volum comun. Acolo, undele creează franjuri de interferență prin suprapunere. Printre cele mai cunoscute aplicații de divizare a frontului de undă se numără Experimentul cu fantă dublă al lui Young, Bi-prismele lui Fresnel, oglinda lui Fresnel, lentila divizată a lui Billet și oglinda lui Lloyd.

Divizarea amplitudinii este realizată atunci când două sau mai multe unde de lumină sunt obținute din același front de undă. Prin recombinație se obține fenomenul interferometriei. Cele mai comune dispozitive interferometrice conțin un element de divizare a amplitudinii, cum ar fi divizoare de fascicule, prisme de polarizare sau rețele de difracție.

- Diferite interferometre au fost dezvoltate de-a lungul timpului, pornind de la configurația lui Michelson, bazate pe fascicule de lumină albă direcționate printr-un divizor de fascicule către două oglinzi ce reflectă fasciculele către un ecran, cu aplicații în diferite domenii. Sunt prezentate câteva dintre acestea.

Interferometrul Fizeau folosește o sursă laser, un divizor de fascicul, o cameră și o suprafață de referință pentru a caracteriza o suprafață optică, ce trebuie doar să poată produce un tipar de interferență clar. În anumite situații, măsurarea poate fi doar pe bază vizuală.

În telecomunicațiile optice și aplicațiile mecanicii cuantice, se folosește în principal interferometrul Mach-Zehnder. Acesta folosește o sursă de lumină, un detector, două oglinzi și două divizoare de fascicul. Frecvent, cele patru elemente optice sunt poziționate la unghiuri de  $45^\circ$  în raport cu direcția de propagare a fascicului.

Interferometrul Sagnac constă în interferența a două fascicule de direcții opuse, ghidate de un divizor de fascicul și de două oglinzi. Configurația îl face deosebit de stabil și permite detectarea rotirii. Drept urmare, este folosit în mod particular în sisteme de navigare și supraveghere.

Pornind de la interferometrul lui Michelson, Rayleigh a dezvoltat un model bazat pe divizarea frontului de undă, producând două căi de undă prin două lentile, celule cu gaz și compensatoare. Este folosit în diferite aplicații, de la determinarea indicilor de refracție a gazelor, la măsurări ale masei molare.

Interferometrul Laser Tracker a fost conceput în 1985 și a fost dezvoltat în timp pentru a fi folosit la calibrarea volumetrică a mașinilor cu comandă numerică și a celor de măsurare în coordonate. Erorile geometrice sunt identificate pentru cel puțin patru poziții ale măsurării cu o sursă laser, unde reflectorul este urmărit de fascicul pe o rută specificată.

- Incertitudinea de măsurare a interferometriei este influențată de mediu, de erori geometrice etc. Erorile de mediu depind de sensibilitatea lungimii de undă și de coeficienții de dilatare termică a materialelor pieselor implicate. Compensarea lungimii de undă este frecvent aplicată pentru evitarea erorii lungimii de undă în timp ce, pentru minimizarea erorii cauzată de dilatare, sunt necesare stabilitate termică și o pregătire anterioară măsurării. Câteva din erorile ce pot fi prevenite prin pregătire riguroasă sunt abordate.

Eroarea căii moarte este o eroare geometrică legată de condițiile de mediu. Este definită ca distanța dintre divizorul de fascicul și punctul de început al cursei măsurate. Pentru evitarea sa, stabilitatea condițiilor de mediu și minimizarea distanței anterior menționate sunt necesare.

Când fasciculul laser nu este perfect aliniat cu axa mașinii măsurate, se formează un unghi între cele două care generează eroarea de cosinus. O aliniere mai bună duce la reducerea acestei erori.

Un alt unghi ce constituie o sursă de eroare poate fi generat de înclinarea reflectorului, din cauza deplasării imperfecte. Această eroare este aproape imposibil de estimat și de evitat.

- Interferometria are o multitudine de aplicații și a revoluționat metrologia. Configurația de bază implică o sursă laser, divizoare de fascicul, oglinzi, dispozitive de montare a elementelor optice și alte suporturi, în funcție de tipul măsurării.

Cu toate că măsurările interferometrice pot fi laborioase, ca urmare a procedurilor de asamblare a sistemului și a procedurilor de aliniere, sunt frecvent folosite pentru calibrări, ca urmare a acurateții și fiabilității.

Prin instrumentarea instalațiilor interferometrice, diferite proprietăți și erori ale echipamentelor pot fi determinate, privitoare la poziționare, rectilinitate, planeitate, rectangularitate sau paralelism.

Măsurarea poziționării liniare are un standard dedicat, care descrie procedura de urmat. Această măsurare implică utilizarea unui divizor de fascicul, a două reflectoare și, la nevoie, a unor oglinzi de ghidare. Unul din reflectoare este fixat pe componenta a cărei mișcare liniară este evaluată, iar celălalt este fix, folosit pentru a furniza fasciculul de referință.

Instrumentarea precizată implică poziționarea unuia din elementele optice pe arborele principal. Acest aspect limitează considerabil cursa măsurabilă.

Măsurarea poziției unghiulare evaluează precizia poziției unghiulare a componentelor. Pentru astfel de măsurări, de-a lungul unei axe liniare, sunt folosite un divizor unghiular și un reflector unghiular. Reflectorul unghiular este poziționat pe o componentă ce se deplasează de-a lungul axei evaluate. Diferențele dintre cele două fascicule laser ce revin dinspre reflectorul unghiular permit calculul erorii unghiulare.

Ghidajele mașinii unealtă sunt evaluate prin măsurări de rectilinitate. Acestea implică o oglindă unghiulară și, de obicei, o prismă Wollaston.

Deviațiile specifice asociate cu mesele și suprafețele plate sunt identificate cu măsurări de planitate, ce implică măsurări de-a lungul a două axe. Elementele optice trebuie să urmărească o traiectorie predefinită, bazată pe metoda Moody, metoda "Grid map" sau metoda "Half Grid map".

Măsurările de rectangularitate și de paralelism implică utilizarea unora din elementele anterior precizate împreună cu elemente optice specifice și dispozitive de prindere/fixare. Măsurările de rectangularitate evaluează perpendicularitatea dintre două axe liniare, iar cele de paralelism dintre două axe concepute pentru a fi coaxiale sau dintre axele a două capete rotative.

- Producătorii de interferometre furnizează, de obicei, elemente de fixare adaptate aplicațiilor destinate, acestea fiind frecvent concepute pentru a fi interschimbabile. Elementele metalice sunt fabricate din oțel inoxidabil, nemagnetizat sau magnetizat.

Cu toate că sunt încă la nivel de cercetare, structurile celulare de tip "lattice" sunt din ce în ce mai folosite în diverse domenii, inclusiv în cel al dispozitivelor de prindere și fixare. Fabricarea aditivă și programele de concepție asistată permit proiectarea și realizarea a astfel de structuri. Unul dintre cele mai indicate materiale pentru sisteme de fixare este Invar, datorită stabilității sale termice ridicate dar Inconel718, TiAl6V4 și superaliajul CoCrSP2 sunt, de asemenea, opțiuni satisfăcătoare datorită caracteristicilor lor.

*Partea a II-a.*

**Contribuții la definirea și dezvoltarea  
constructivă a structurii sistemelor de  
interferometrie laser**



## **Capitolul 4. Direcțiile, obiectivul principal și metodologia de cercetare - dezvoltare privind structura sistemelor de interferometrie laser**

### **4.1. Direcțiile de cercetare - dezvoltare**

Pe baza datelor și concluziilor desprinse din analiza stadiului actual, se apreciază a fi de perspectivă, pentru sistemele de interferometrie laser, direcțiile de cercetare-dezvoltare privind:

- structura generală și caracteristici;
- procese de interacțiune și modelare analitică;
- caracteristici operaționale, cu scopul dezvoltării de aplicații în medii industriale;
- analiza integrării structurilor celulare de tip "lattice" la elemente constructive din sistemele de măsurare;
- baze de date specifice.

### **4.2. Obiectivul principal al activității de cercetare - dezvoltare**

Având în vedere datele și concluziile desprinse din analiza stadiului actual, precum și direcțiile de cercetare-dezvoltare, se asumă drept obiectiv principal al activității doctorale avansate: dezvoltarea structurii și atributelor sistemelor de interferometrie laser.

### **4.3. Metodologia de cercetare - dezvoltare**

Metodologia de cercetare și dezvoltare este elaborată ca bază de referință pentru atingerea obiectivului principal al prezentei teze de doctorat, respectiv, al următoarelor capitole ale tezei de doctorat, precum și pentru cercetări ulterioare.

Structura sistemelor de interferometrie laser se configurează în corelare cu caracteristicile obiectivului măsurării.

Structura curentă a sistemelor de interferometrie laser conține un sistem de fixare pentru ansamblul divizorului de fascicul laser care limitează capacitatea de măsurare a liniarității, uneori cu mai mult de 30% la centrele de prelucrare.

Astfel, o structură inovativă a unui sistem de interferometrie laser pentru poziție liniară vizează extinderea capacității de măsurare pe întreaga cursă de lucru, la precizie de măsurare similară.

O structură inovatoare a unui sistem de interferometrie laser pentru evaluarea liniară a poziției urmează a fi conceput și detaliat. Cercetarea, concepția detaliată, fabricarea, testarea și validarea unui dispozitiv inovator de poziționare a divizorului de fascicul laser urmează a fi dezvoltate.

Sistemul inovator ar trebui să poată fi utilizat pentru diferite sisteme de interferometrie laser și măsurări. Astfel, testarea și validarea acestuia simultan, în diferite configurații, ar trebui efectuată.

Principalele etape ale cercetării - dezvoltării vor fi după cum urmează.

#### (A) Conceptualizarea unui nou dispozitiv de poziționare a divizorului de fascicul laser

- Analiza datelor inițiale
- Determinare cerințelor minime
- Condițiile optimizării structurale.

Se analizează datele de intrare privind cerințele și nevoile. O analiză complexă a structurii și atributelor sistemelor de interferometrie laser trebuie efectuată pentru a asigura integrarea tuturor constrângerilor de proiectare.

Conceptualizarea are în vedere, pe lângă extinderea ariei măsurabile, alegerea de materiale și, în egală măsură, procedurile de măsurare cu noul dispozitiv de poziționare a divizorului de fascicul laser. După cum este deja cunoscut, pentru fiecare procedură de măsurare sunt necesare diferite elemente optice și, prin urmare, fiecare din procedurile pentru măsurări liniare, unghiulare, de rotație etc. ar trebui analizată în detaliu pentru a identifica potențialele limitări (v. § 2.3.5).

Diferitele tipuri de măsuranți considerați trebuie determinați și analizați.

Printre cele mai importante elemente de stabilit sunt:

- dimensiunea minimă a spațiului funcțional pentru noul element de poziționare
- evaluarea sarcinilor externe
- determinarea zonei de prindere optimă
- configurarea funcțiilor obiectiv
- determinarea constrângerilor răspunsului.

#### (B) Proiectarea dispozitivului de poziționare a divizorului de fascicul laser

Proiectarea dispozitivului de poziționare a divizorului de fascicul laser se va desfășura în următoarele etape:

- proiectare asistată de calculator
- analiză prin metoda elementelor finite
- optimizarea structurală.

Pornind de la datele de ieșire ale proiectării, o iterație inițială poate fi concepută și analizată prin metoda elementelor finite. Diferite sisteme CAD pot fi folosite pentru studiul acestei componente, cum ar fi SolidWorks, AutoCAD, Catia sau Ansys.

Pentru optimizarea cu structuri celulare de tipul ”lattice”, modulul Ansys ”Topological Lattice Optimization” poate fi utilizat. Geometria urmează a fi construită sub formă de ansamblu, din care este izolată aria cu structură ”lattice”.

Ansamblul trebuie supus unei analize statice anterior optimizării structurale. Versiunea optimizată a componentei este generată pe baza funcției obiectiv și a constrângerilor stabilite. Validarea numerică, care face legătura dintre datele inițiale din analiza statică și structura optimizată, conduce, în egală măsură, și la o analiză similară a structurii ”lattice”.

Se va derula optimizarea topologică, ca o optimizare structurală care adoptă datele despre material, geometria și modelul din analiza structurală statică și solicită obiectivele acestei proceduri, precum și tipul, densitatea și dimensiunea elementului celulei ”lattice”.

### (C) Fabricarea dispozitivului de poziționare a divizorului de fascicul laser

Pentru evaluarea inițială a conceptului, componentele specifice ale dispozitivului pot fi fabricate din poliamidă, datorită costurilor de producție reduse. Procedura va consta în:

- pre-procesare: pregătirea pulberii de material, modelul CAD, orientarea modelului în spațiul virtual de fabricare și generarea straturilor piesei;
- fabricare: sinterizare selectivă cu laser a fiecărui strat generat;
- post-procesare: răcire și eliminarea pulberii în exces.

În funcție de conceptul final, SPD poate fi fabricat prin proceduri convenționale sau prin fabricare aditivă, din pulbere metalică, aleasă în funcție de caracteristicile și disponibilitatea sa. Procesul de fabricare aditivă poate solicita o pregătire intensă, dar este mai potrivit pentru prototipuri sau piese unicate cu geometrii complexe.

Conceptul piesei trebuie modificat pentru a îndeplini anumite cerințe aferente fabricării aditive. Această fabricare va consta în:

- pre - procesare: pregătirea pulberii metalice și a bazei de fabricare, adaptarea modelului CAD conform cerințelor procesului de fabricare, orientarea modelului în spațiul de fabricare virtual, generarea suporturilor și a straturilor piesei;
- fabricare prin sinterizare a fiecărui strat generat;
- post - procesare: răcire, eliminarea pulberii în exces, tratament termic pentru reducerea tensiunilor remanente, îndepărtarea piesei de pe baza de fabricare, îndepărtarea suporturilor, etc.

### (D) Validarea dispozitivului de poziționare a divizorului de fascicul laser

Noua structură a sistemului de interferometrie laser, ce conține dispozitivul de poziționare a divizorului de fascicul, urmează a fi testată și validată, în scopul evaluării conceptului.

Alegerea metodei corespunzătoare de evaluare și a condițiilor are impact major asupra fiabilității produsului.

Testele preliminare pot determina dacă rezultatele înregistrate cu noua structură sunt fiabile. În consecință, măsurări comparative dintre ansamblurile disponibile pe piață și configurația cea nouă trebuie luate în considerare. Procedura comparativă oferă libertate completă de efectuare a măsurărilor pentru fiecare ansamblu (inclusiv capacitatea sporită de măsură), în scopul evaluării capabilităților, în timp ce măsurările recomandate de fabricantul sistemului de interferometrie laser oferă baza de referință pentru rezultate.

Evaluarea celor două configurații de sistem de interferometrie laser este realizată pe baza unor măsurări efectuate prin testare consecutivă sau în paralel cu cele două sisteme de interferometrie laser.

Condițiile de mediu au o influență semnificativă asupra rezultatelor măsurărilor interferometrice, încât evaluarea se efectuează în diverse medii de lucru.

Procedura ISO 230-2, în calitate de procedură acceptată internațional, va fi utilizată pentru validarea rezultatelor.

În sinteză, această metodologie implică proceduri de tehnologie înaltă, unele din ele încă în fază de dezvoltare – optimizarea cu structuri "lattice", fabricarea aditivă -, care necesită testare continuă a diverselor faze de dezvoltare a produselor. În egală măsură, procedura de dezvoltare prezintă posibilități de simplificare în paralel cu acumularea și analiza de date, precum fabricarea prealabilă dintr-un material polimeric sau validarea experimentală intensă.

## Capitolul 5. Dezvoltarea structurii și caracteristicilor generale ale sistemelor de interferometrie laser

Dezvoltarea structurii și caracteristicilor generale ale sistemelor de interferometrie laser, incluzând elemente publicate de autor [G04], este după cum urmează.

Prezenta structură propusă și caracteristicile sistemelor de interferometrie laser sunt dezvoltate la un nivel înalt de generalitate, deschise particularizărilor, în context, precum și altor niveluri de descriere.

Se consideră elementul de măsurat ca fiind un set,  $G$ , de entități geometrice  $G_i, i = \overline{1, n}$ ,

$$G = \{G_i | i = \overline{1, n}\} \Leftrightarrow G = G_1 \cup G_2 \cup \dots \cup G_i \cup \dots \cup G_n \quad (5.1)$$

Se evidențiază faptul că fiecare entitate geometrică,  $G_i$ , este bine-definită de caracteristici specifice precum – caracteristici nominale, domeniul de toleranțe, elemente de referință/ sisteme de coordonate.

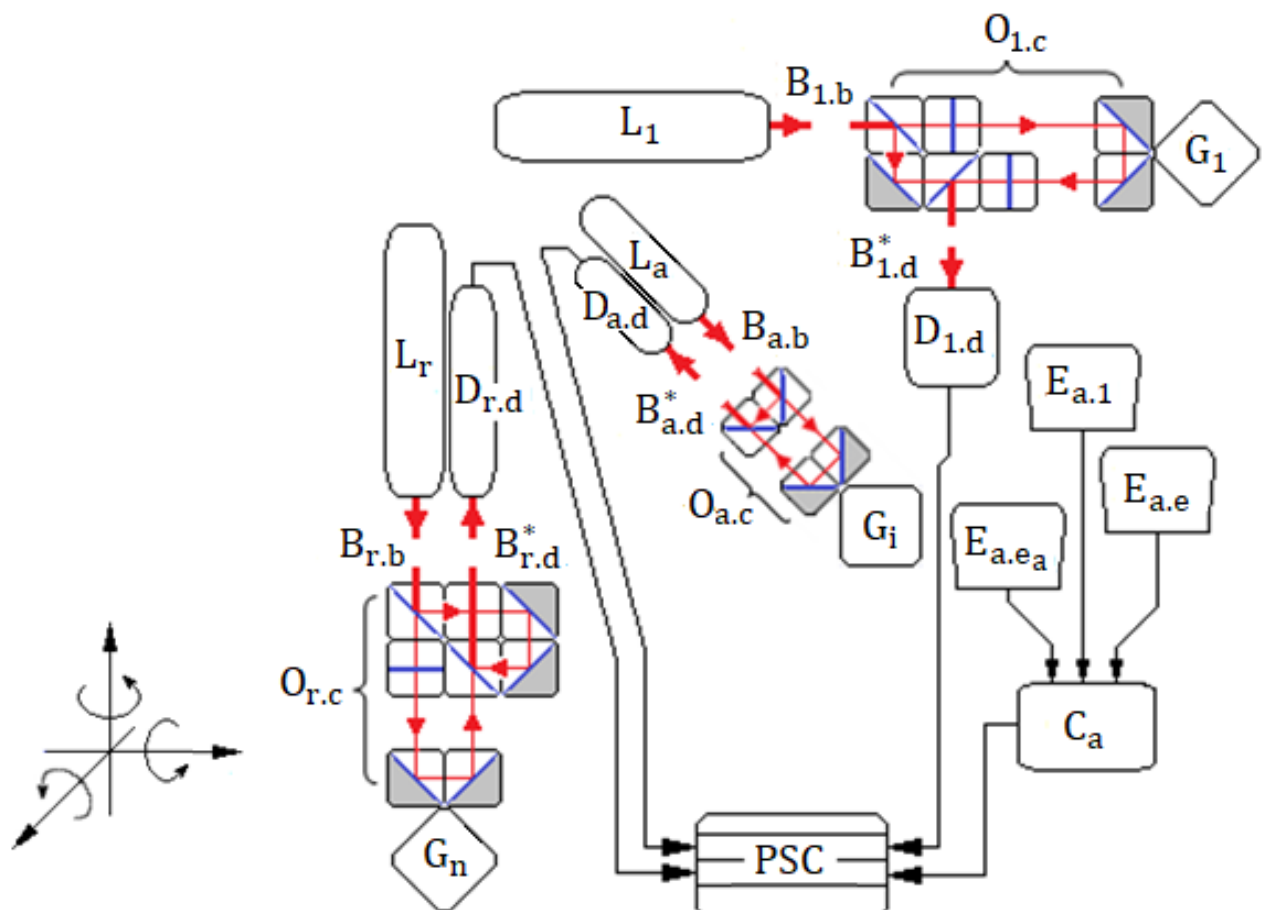


Fig. 5.1. O structură generală a unui sistem de interferometrie laser

Sistemul de interferometrie laser, LIS, destinat măsurărilor efectuate asupra grupului geometric  $G$  ( $G = \{G_i | i = \overline{1, n}\}$ ), este structurat astfel încât să includă elemente precum: sisteme de coordonate ( $CS_j, j = \overline{1, m}$ ), surse laser ( $L_a, a = \overline{1, r}$ ), fascicule laser ( $B_a, a = \overline{1, r}$ ), module optice ( $O_a, a = \overline{1, r}$ ), fascicule de ieșire ( $B_a^*, a = \overline{1, r}$ ), detectoare ( $D_a, a = \overline{1, r}$ ), senzori de mediu ( $E_a, a = \overline{1, r}$ ) și module de compensare ( $C_a, a = \overline{1, r}$ ), module electronice, software de proces și computere (PSC), elemente de asamblare și alte elemente, după cum sunt prezentate în Fig. 5.1.

Structura și caracteristicile constructive reale ale LIS depind de caracteristicile elementului de măsurat și de alte condiții tehnico-economice.

Astfel, un element *sursă laser* și un element *detector (receptor)* sunt componente distincte de sistem sau - încorporate împreună într-o componentă de *unitate laser*, elementele optice tip *divizor de fascicul* și *interferometru* sunt distincte sau - încorporate împreună într-un *divizor de fascicul*, unii *senzori de mediu* sunt incluși într-un *modul de compensare* etc.

## Capitolul 6. Dezvoltarea unui sistem inovativ de interferometrie laser pentru poziție liniară

Dezvoltarea unui sistem inovativ pentru măsurări interferometrice, incluzând elementele publicate ale autorului [M09, M13, O01, S14], s-a realizat după cum urmează.

Elementele optice ale sistemelor de interferometrie laser sunt, în mod uzual, fixate cu ajutorul unor prisme magnetice de componentele principale ale mașinilor-unelte, după cum se poate observa în Fig. 6.1. Capul laserului, care este în același timp sursa fascicului laser, dar și receptorul semnalului, este poziționat la o distanță  $D_1$  față de ansamblul divizorului de fascicul ce este fixat cu ajutorul unei prisme magnetice de axul principal. Distanța  $D_2$  dintre divizorul de fascicul și retroreflector reprezintă o distanță de siguranță între cele două componente, pentru a evita coliziunea. Retroreflectorul este conectat printr-o altă prismă magnetică de masa de lucru. De la acel punct începe zona de măsurare  $D_3$ , zonă care se termină la limita de deplasare a mesei de lucru pe ghidajul liniar al axei Y. În studiul de caz privind centrul vertical de prelucrare CNC Makino D200Z, masa de lucru are un interval de deplasare pe axa Y de  $[-170, +130]$  mm. Arborele principal, care are două ghidaje liniare, se deplasează pe axele X și Z, intersectând masa de lucru în jurul zonei 0 a axei Y.

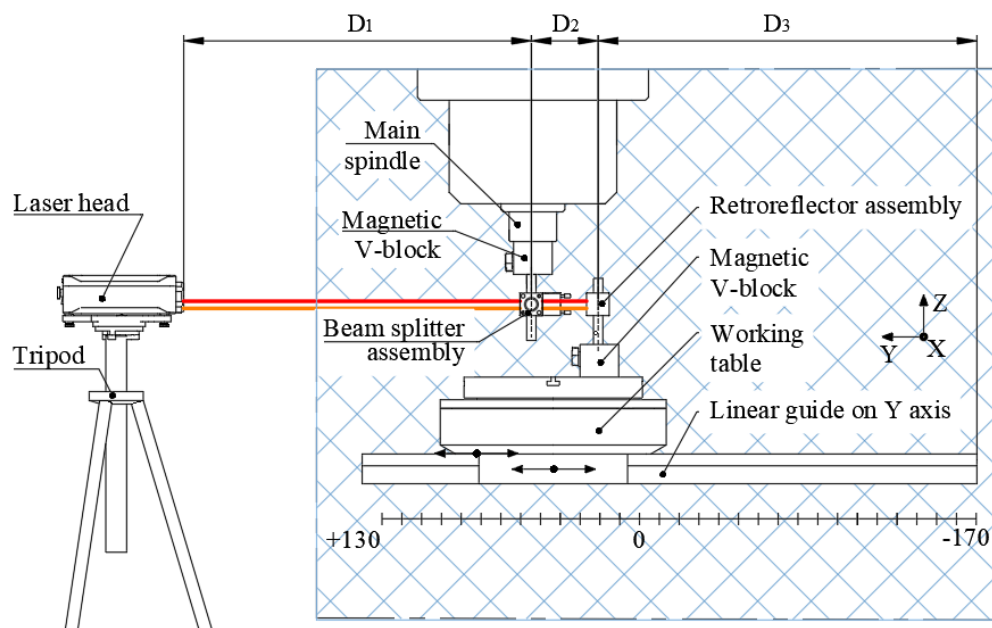


Fig. 6.1. Structura uzuală pentru realizarea unei măsurări interferometrice liniare pe un centru CNC vertical de prelucrare

Într-o structură a sistemului precum cea prezentată în Fig. 6.1,  $D_3$  este limitat la aproximativ 60% din capacitatea de deplasare liniară a mesei de lucru.

Principalul scop al acestei dezvoltări este de a permite măsurări interferometrice ale întregii zone de lucru.

Pentru a obține acces la întreaga zonă de lucru a deplasării axei, noua structură a sistemelor interferometrice cu laser este dezvoltată astfel încât divizorul de fascicul laser și retroreflectorul să nu fie montate pe elemente ale căror axe se intersectează

Cele două configurații au o diferență principală ce constă în poziționarea ansamblului divizorului de fascicul laser.

Noua structură oferă operatorului posibilitatea de a evalua întreaga zonă de lucru pe axa Y, fapt ce poate fi esențial în cazul centrelor de prelucrare, pentru a determina precizia.

Caracteristicile generale ale unui dispozitiv special care permite măsurări interferometrice ale întregii zone de lucru sunt:

- masă minimă;
- rigiditate mare, în corelație cu acțiunea greutatei sale și a greutatei părților susținute (elemente optice și suplimentare);
- montare simplă și sigură în cadrul sistemelor de interferometrie laser.

În urma evaluării a două sisteme interferometrice cu laser comerciale [R09, R10, D03], (§ 2.3.6), caracteristicile dimensionale necesare pentru dispozitivul considerat au fost determinate.

Componentele susținute au o masă totală de 560 g. Pentru a asigura o rigiditate înaltă a SPD, o forță (presiune) calculată de 15 N a fost determinată, care să fie avută în vedere în calculele ulterioare.

Rigiditatea este influențată de caracteristicile de material, astfel încât, au fost realizate studii pentru a determina tipul de material și structura "lattice" care poate fi utilizată [M09, M13, S14, O01] (de asemenea, v. § 2.3.7).

Dispozitivul considerat este dezvoltat în două variante principale constructiv diferite.

Analiza cu element finit a corpului din oțel al dispozitivului arată o rigiditate bună, având o deplasare micrometrică, însă masa de aproximativ 2.1 kg și provocările de fabricare deschid calea către noi îmbunătățiri.

Structura efectivă a fost generată și multiplicată cu ajutorul programului SolidWorks [D06].

Pentru o analiză inițială, produsul CAD a fost analizat prin FEM și, mai apoi, fabricat aditiv prin sinterizare selectivă cu laser din pulberi de PA2200 cu ajutorul unui echipament de fabricare aditivă EOS FORMIGA P110. Acest material a fost ales pentru această etapă a dezvoltării de produs deoarece permite o fabricare mai rapidă și ieftină decât cea cu pulberi metalice.

O inspecție vizuală a produsului fabricat indică un mic defect ce a fost produs cel mai probabil de manipulare incorectă astfel încât, trebuie luat în considerare că zonele exterioare curente sunt sensibile și ușor deformabile.

Varianta îmbunătățită a corpului dispozitivului are muchiile racordate pentru a preveni deformațiile. Întreaga zonă inferioară este concepută la același nivel pentru a putea fi poziționată pe placa de fabricare fără suporturi adiționali și pentru a ușura îndepărtarea de pe placă.

Componentele specifice ale dispozitivului au fost, de asemenea, fabricate din poliamidă (PA2200) și au fost supuse unor teste pentru a verifica aplicabilitatea. Un test experimental asupra prototipului arată că domeniul de măsurare este semnificativ mai mare (300 mm) în cazul măsurării cu sistem de interferometrie laser care include dispozitivul considerat, comparativ cu măsurările cu sistem simplu de interferometrie laser. Acest rezultat demonstrează utilitatea dispozitivului pentru a mări domeniul de măsurare la întreaga zonă de lucru a centrului de prelucrare. Dar, în același timp, erorile generate de materialul structurii sunt ridicate, inacceptabile, astfel încât noile dezvoltări trebuie să ia în considerare aceste elemente.

O variantă a dispozitivului este concepută cu zona centrală compusă din structuri “lattice”, cu muchii racordate, însă dimensiunile acesteia au fost diminuate pe cât posibil, utilizând avantajele oferite de sinterizarea directă cu laser a metalelor.

Procesul DMLS necesită acordarea unei atenții deosebite detaliilor precum găuri, muchii, traverse și baze, astfel încât piesa este ajustată având, spre exemplu, găuri în formă de lacrimă, unghiuri optimizate, zona inferioară poziționată în același plan, fără traverse și luând în calcul minimizarea consumului de material.

Zona sistemului de reglare a poziției suferă modificări corespunzătoare.

Pentru a evita posibilele nealineri cauzate de deformarea structurii, un sistem de deplasare, cu două șuruburi, este conceput pentru a ajusta deplasări mici unghiulare.

Generarea structurii “lattice” este realizată cu ajutorul programului Ansys [A12], ce are modulul de optimizare topologică cu structuri “lattice”, luându-se în considerare rezultatele FEA, funcția obiectiv și constrângerile de rezultat, dar și faptul că piesa fabricată trebuie să permită eliminarea pulberii libere (fără volume de pulbere încastrată).

Cedarea piesei poate fi ignorată așa cum rezultă din analiza tensiunii von-Mises. Diferențele de tensiuni dintre cele două piese (corp plin și corp cu structuri ”lattice”) au fost aproape neschimbate, iar nivelul de tensiune este suficient de scăzut încât nu trebuie să fie luat în considerare

Pentru acest studiu, dimensiunea celulei a fost de 5 mm. Obiectivul de optimizare a fost minimizarea masei și conformitatea.

Intervalul de densitate a fost ales pentru a evita volumele de pulbere încastate și pentru a nu atinge dimensiunea minimă de fabricare

Geometria corpului de optimizat a generat o densitate mare a rețelei mai aproape de zona de prindere de trepid și o densitate scăzută la cealaltă extremitate.

Ansys produce o hartă de densitate echivalentă prin această optimizare, prin urmare, pasul final al optimizării structurale reia analiza structurală statică anterioară, dar formând noua geometrie. Diferențele de deplasare dintre cele două sunt micrometrice.

O altă variantă a dispozitivului este compusă din elemente care să permită alinierea razei laser la divizorul de fascicul, fără sistem de reglare a poziției.

În legătură cu printarea metalică a componentelor specifice și procesul de fabricație DMLS, la alezajele de orientare și la întreaga zonă inferioară a piesei au fost adăugați suporti de printare de aproximativ 4 mm, pentru a facilita îndepărtarea piesei de pe placa de printare în timpul post - procesării DMLS, prin electroeroziune cu fir.

Pentru această geometrie finală și materialul superaliaj CoCrSP2, programul Ansys a determinat o masă estimată de aproximativ 500 de grame, cu aproape 25 % mai puțin decât dacă corpul ar fi fost plin, însă cu 76% mai mică față de iterația inițială. Procentul (25%) se poate modifica în funcție de intervalul de densitate, dimensiunile celulare ale structurii, sarcinile externe și dimensiunile inițiale.

Pentru pre – procesare, anterioară fabricării componentelor specifice ale dispozitivului, ansamblul conceput în CAD este exportat în format .stl pentru programul Magics [M14], unde are loc editarea suplimentară a pieselor, adăugare de suporti, detectarea zonelor problematice și definirea echipamentului de printare. Piesele sunt apoi exportate cu extensie cli. pentru programul EPHatch [E07] care urmează să delimiteze straturile ce vor fi printate aditiv. În acest caz, piesele au fost



secvențiate cu un increment de 0,03 mm, definindu-se astfel fiecare dintre cele 1566 de straturi de printat. Când piesele finale sunt pregătite, acestea sunt transferate la echipamentul de printare cu extensie .epi

Echipamentul de printare utilizat este un model 3D Shining 3D EP M250. Înainte de începerea fabricării, pulberea este cernută, uscată și depozitată în cuva de alimentare.

Fabricarea aditivă a componentelor specifice ale dispozitivului ar dura în condiții normale aproximativ 34 de ore. În acest caz particular, procedura de printare s-a încheiat după 240 de ore, din cauze necunoscute.

În cadrul post – procesării, după fabricarea aditivă, este nevoie de un timp de răcire înainte de extragerea plăcii de fabricare și a pieselor fabricate. Ulterior, pulberea este îndepărtată cu grijă de pe toată placa de fabricare și piese.

Placa de fabricare, ce are piesele sinterizate pe ea, este introdusă, apoi, într-un echipament de șlefuire pentru îndepărtarea pulberii rămase și pentru finisarea suprafețelor ce nu au rol funcțional direct.

Următorul pas implică procesul de detensionare. Piese se încălzesc inițial până la 450°C timp de o oră, temperatura se menține constantă timp de o oră, apoi se ridică până la 800°C timp de o oră și se menține acolo încă o oră. După aceea, căldura este oprită și procesul de răcire vine în mod natural.

După procesul de detensionare, duritatea materialului poate fi determinată. În acest caz, capacitatea pieselor de a rezista la deformare este de 44,5 HRC. Acest rezultat se încadrează în marja estimată a producătorului de pulbere, cu procedura recomandată de eliberare a tensiunilor.

Următorii pași constau în extragerea pieselor de pe placa de fabricare și prelucrarea necesară pentru realizarea produsului finit. Extragerea pieselor se execută prin electroeroziune cu fir.

Piese rezultate sunt apoi post - procesate pentru a îndepărta muchiile ascuțite și suportii rămași. Mai multe suprafețe ale suportului divizorului de fascicul sunt șlefuite conform cerințelor. De asemenea, cu ajutorul electroeroziunii cu electrod masiv, alezajul filetat a fost prelucrat cu electrozi specifici.

## **Capitolul 7. Validarea dispozitivului inovativ de poziționare a divizorului de fascicul în cadrul unor sisteme de interferometrie laser pentru poziție liniară**

Validarea dispozitivului inovativ de poziționare a divizorului de fascicul în cadrul unor sisteme de interferometrie laser pentru poziție liniară, incluzând publicațiile autorului [A04, S15], este după cum urmează.

### **7.1. Protocolul experimental și condițiile de mediu**

După cum a fost prezentat în capitolele precedente, efectuarea măsurărilor liniare cu sisteme de interferometrie laser oferă fiabilitate și precizie ridicată, dar are și anumite constrângeri. O astfel de constrângere este determinată de amplasarea elementelor optice, care necesită o zonă metalică rigidă pentru prisme magnetice. Această restricție determină o limitare a domeniului de măsurare pentru toate centrele de prelucrare evaluate.

#### **7.1.1. Protocolul experimental**

SPD va fi testat pe trei centre CNC: centrul vertical de prelucrare CNC Makino D200Z, centrul de prelucrare CNC Spinner VC1020 și centrul de prelucrare CNC Spinner MC1020.

Pentru fiecare test, două sisteme de interferometrie laser, LIS, sunt configurate și utilizate, în mod consecutiv sau în paralel (simultan), astfel:

- un sistem de interferometrie laser simplu "LIS simplu";
- un sistem de interferometrie laser care include SPD "LIS care include SPD".

Aceste LIS sunt structurate cu elemente din cadrul sistemelor de interferometrie Renishaw XL-80.

Procedura de măsurare utilizată este bazată pe etapele descrise în ISO 230-2.

Condițiile de mediu necesită adaptare la specificațiile fabricantului respectivului echipament. Standardul sugerează o temperatură optimă de 20° C.

Procedura de testare va fi utilizată pentru măsurări consecutive și în paralel.

Terminologia utilizată pentru diferitele măsurări comparative este prezentată în Fig.7.7.

Rezultatele sunt reprezentate grafic, unde coordonatele punctelor de măsurare (distanțele de poziție) de-a lungul axei Y sunt prezentate pe abscisă, iar erorile de poziționare corespunzătoare – pe ordonată.

#### **7.1.2. Studiu privind condițiile de mediu**

Efectele compensării condițiilor de mediu sunt puse în perspectivă prin intermediul a două tipuri de teste: unul ce conține unitatea de compensare a mediului și unul ce nu o conține. Studii preliminare au fost realizate pentru a determina influența termică asupra măsurărilor interferometrice [A04].

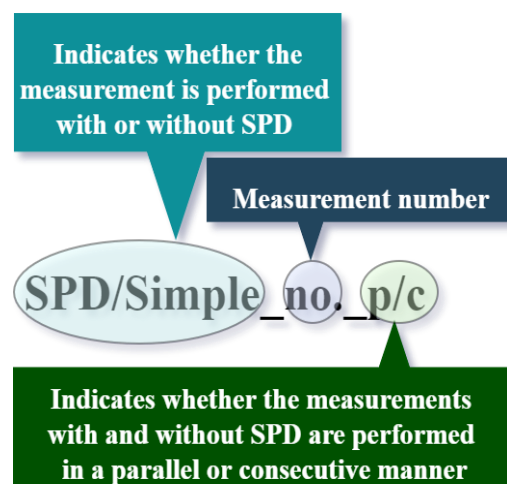


Fig. 7.7. Terminologia măsurărilor

Cu toate acestea, conform fabricantului [R10], unitatea de compensare XC-80 are capacitatea de a compensa influența condițiilor de mediu.

Două măsurări standard au fost realizate pe centrul vertical de prelucrare CNC Makino D200Z, iar rezultatele sunt prezentate în Fig. 7.9. De-a lungul abscisei, valorile intervalului specific axei Y sunt păstrate în intervalul valoric [-170, +10] mm.

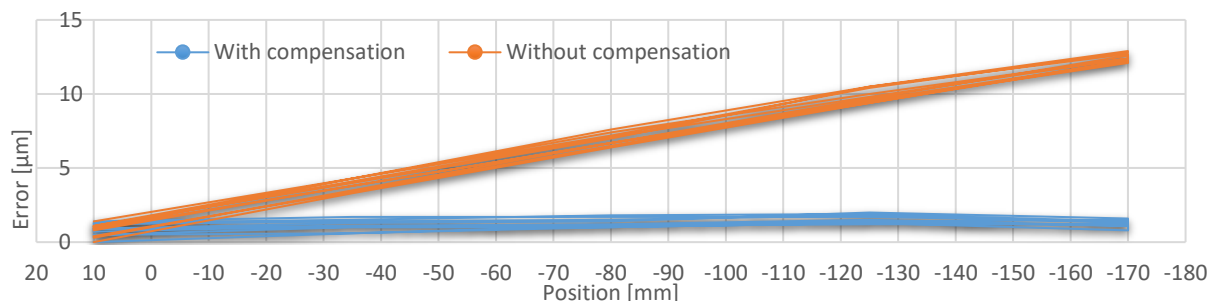


Fig. 7.9. Eroarea de poziționare liniară pe axa Y, la măsurări cu și fără compensare

Este o diferență evidentă între valorile date de măsurarea cu compensare, unde centrul CNC considerat nu evidențiază o eroare de poziționare semnificativă, și valorile date de măsurarea fără compensare, unde eroarea urcă până la peste 12 μm.

Indicatorii statistici de analiză specifică arată următoarele:

- eroarea de poziționare, eroarea sistematică de poziționare și intervalul erorii medii de poziționare bidirecțională sunt puternic influențate de condițiile de mediu;
- repetabilitatea poziționării este de o valoare acceptabilă (1.5 – 2.1 μm), la fiecare măsurare.

Pentru cazurile de măsurare luate în considerare, condițiile de mediu au variat cu mai puțin de 0,5°C pentru temperatură, în timp ce celelalte condiții au fost stabile.

## 7.2. Teste consecutive în condiții de laborator

Testele consecutive se referă la utilizarea LIS care include SPD și, succesiv, LIS simplu.

Centrul de prelucrare CNC pentru aceste teste a fost centrul vertical de prelucrare CNC Makino D200Z.

Condițiile de laborator au fost considerate a fi într-un mediu închis, cu trafic limitat. Toate condițiile de mediu au fost notate și compensatorul XC-80 a fost activat.

Au fost efectuate mai multe grupuri de măsurări ale preciziei și repetabilității de poziționare a axei Y. Dintre acestea, trei grupuri (cu număr de ordine 02, 03 și 06) de rezultate sunt prezentate în Fig. 7.10. Graficele arată erorile de poziționare de-a lungul axei Y. De-a lungul abscisei, coordonatele punctelor axei Y sunt limitate la un interval de [-170, +10] mm atunci când este utilizat LIS simplu (v. § 7.1), în timp ce coordonatele punctelor axei Y sunt în intervalul extins de [-170, +130] mm la utilizarea LIS care include SPD.

Ciclurile de măsurare încep și se termină la o eroare de aproximativ 0 μm, în timp ce de-a lungul axei Y evaluate, aceasta tinde să crească. Rezultatele măsurărilor SPD\_02\_c și Simple\_02\_c au o diferență crescândă între puncte similare cu o diferență maximă de aproximativ 4 μm la punctul comparativ de coordonate de poziție 10 mm. Celelalte două grupuri de măsurări, deși au valori diferite față de cele precedente, păstrează aceeași diferență de aproximativ 4 μm la punctul comparativ al coordonatei de poziție 10 mm.

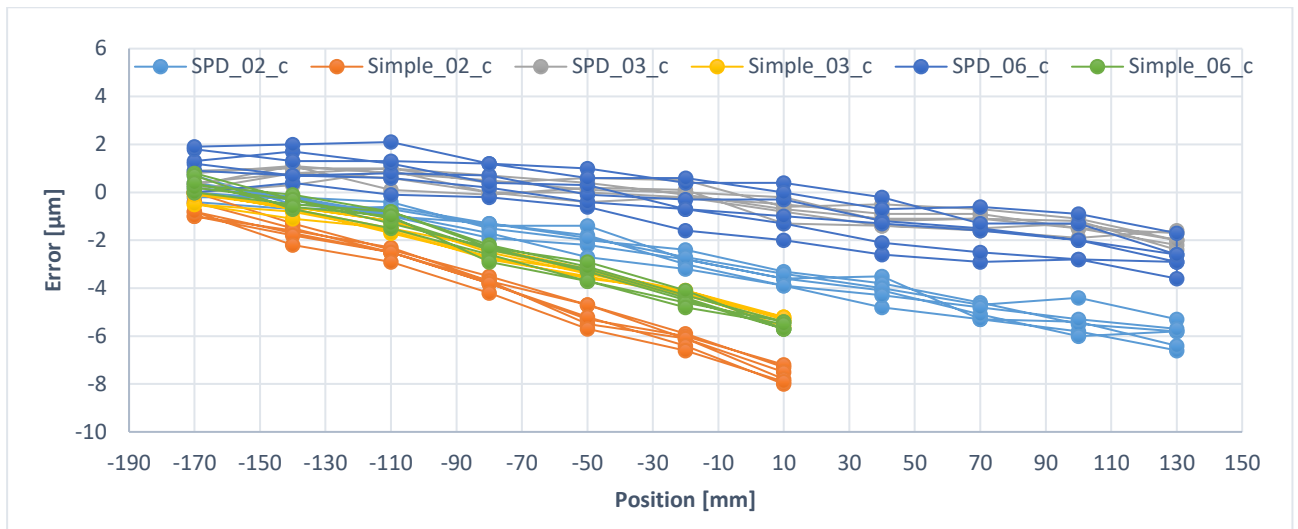


Fig. 7.10. Erorile de poziționare liniară pe axa Y, la teste consecutive

Indicatorii statistici de analiză specifică arată următoarele:

- în general, valorile fiecărui indicator statistic de analiză la măsurările cu LIS care include SPD și cu LIS simplu sunt de același ordin de mărime;
- eroarea de poziționare, eroarea de poziționare sistematică și intervalul erorii medii de poziționare bidirecțională la măsurările cu LIS care include SPD sunt mai mici sau foarte apropiate de cele din măsurările cu LIS simplu; valoarea repetabilității poziționării este de 1,8 – 4,9  $\mu\text{m}$  la măsurări cu LIS care include SPD și de 1,1 - 2,1  $\mu\text{m}$  la măsurări cu LIS simplu.

Compensarea mediului a corectat erorile de măsurare care s-ar fi putut produce din cauza influenței variației condițiilor de mediu asupra materialelor implicate în procedură sau a fascicul laser. Chiar dacă procedurile s-au efectuat într-o cameră închisă, cu trafic redus (sau fără) și a fost prezent un singur operator. Temperaturile aerului și ale materialului au fost destul de diferite chiar dacă grupurile consecutive de măsurări au fost efectuate cu intervale minime de timp. Variațiile generale între începutul și sfârșitul unui set ajung chiar și până la 2° C, ceea ce ar fi putut modifica lungimea de undă și ar fi putut influența considerabil rezultatele măsurărilor. Diferența dintre temperatura aerului și cea a materialului este de aproape 1° C pentru toate grupurile, cu excepția primului, unde este surprinsă și cea mai mare variație de temperatură. În total, temperaturile ajung până la 26° C, cu o variație de până la 6° C până la valoarea ideală a temperaturii de 20° C, recomandată de standarde.

Aceste măsurări dovedesc aplicabilitatea SPD. Este evident că un dispozitiv inovator de susținere a divizorului de fascicul, mărește domeniul de măsurare făcând posibilă evaluarea întregii deplasări a axei. După cum s-a determinat, o zonă întregă de aproximativ 40% din deplasarea axei a fost adăugată la domeniul de măsurare, în condițiile utilizării LIS care include SPD.

### 7.3. Teste în paralel în condiții de laborator

Testele în paralel se referă la utilizarea simultană a unui LIS simplu și a unui LIS care include SPD.

Caracteristica principală a testelor paralele este că ambele LIS diferite funcționează în aceleași condiții tehnice asociate elementelor de lucru ale mașinii și în aceleași condiții de mediu.

Condițiile de lucru sunt identice sau asemănătoare cu cele prezentate în subcapitolul anterior: centrul vertical de prelucrare CNC Makino D200Z, structura generală a fiecărui sistem de interferometrie laser, senzori de mediu, compensator XC-80 etc.

LIS simplu și LIS care include SPD, au fost configurate cu elemente specifice din două LIS-uri de ediții diferite tip Renishaw XL-80.

Configurarea a fost deosebit de meticuloasă pentru a fi pusă în aplicare, deoarece cele două surse laser trebuie să fie aproape una lângă alta, astfel încât fiecare fascicul laser să ajungă la reflectorul corespondent. Fasciculele laser pot fi aliniat în același timp sau separat.

Se subliniază că, din cauza structurii simple LIS, în timpul testelor paralele luate în considerare, coordonatele punctelor axei Y sunt limitate la intervalul [-170, +10] mm.

Au fost efectuate mai multe grupuri de măsurări ale preciziei și repetabilității de poziționare ale axei Y. Dintre acestea, trei grupe (cu nr. de ordine 05, 11 și 13) de rezultate sunt prezentate în Fig. 7.14.

Valorile păstrează modelul de la testele consecutive anterioare (v. § 7.2) și au aproximativ aceleași diferențe între ele de 4-5 μm la distanța maximă.

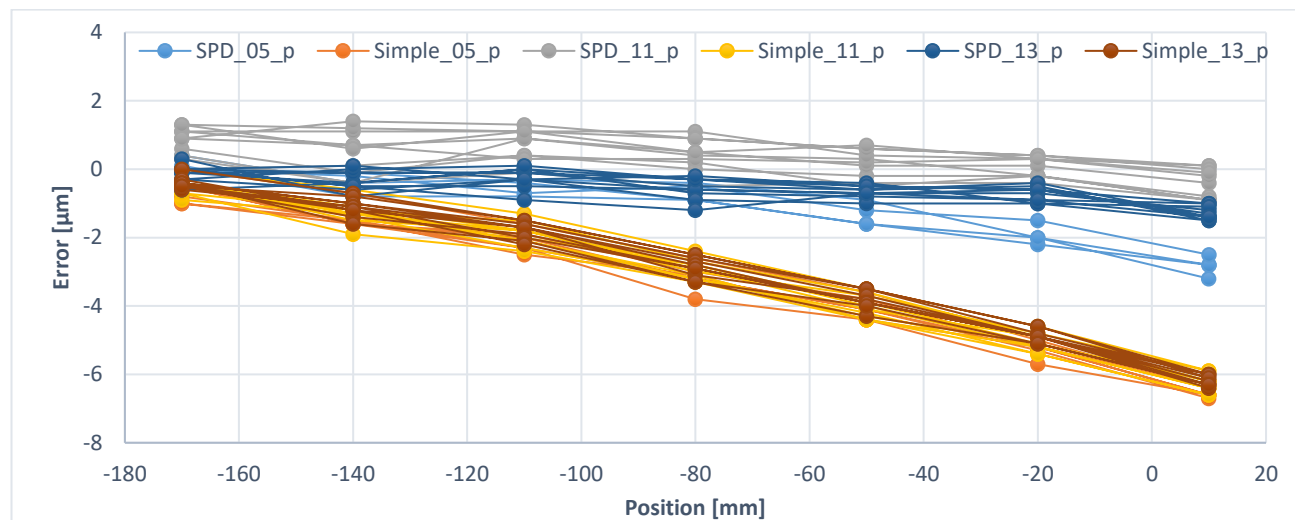


Fig. 7.14. Eroarea de poziționare liniară pe axa Y, la teste în paralel

Indicatorii statistici de analiză specifică arată următoarele:

- în general, valorile fiecărui indicator statistic de analiză la măsurările cu LIS care include SPD și cu LIS simplu sunt de același ordin de mărime;
- eroarea de poziționare, eroarea de poziționare sistematică și intervalul erorii medii de poziționare bidirecțională sunt mai mici la măsurări cu LIS care include SPD, chiar de 4 ori mai mici în unele cazuri; valoarea repetabilității poziționării este de 1,1 – 3,4 μm la măsurări cu LIS care include SPD și de 1 - 2,1 μm la măsurări cu LIS simplu.

Parametrii specifici de mediu au fost captați simultan de senzorii celor două unități de compensare XC-80. Variațiile parametrilor nu sunt mai mari de 1° C la temperaturi, 5.4 mbar la presiune și 7% la umiditate, dar dacă unitățile XC-80 nu ar implementa compensarea, lungimea de undă ar suferi modificări.

#### 7.4. Teste în paralel în condiții industriale

Testele paralele în condiții industriale au fost efectuate pe două centre de prelucrare CNC diferite, și anume, centrul de prelucrare CNC Spinner VC 1020 - cu deplasarea mesei pe axele X, Y și cursa arborelui principal pe axa Z, precum și centrul de prelucrare CNC Spinner MC 1020 – cu deplasarea axului pe toate axele X, Y, Z.

Celelalte condiții de lucru sunt similare cu cele din testele paralele în condiții de laborator (v. § 7.3), adică: LIS simplu și LIS care include SPD au fost configurate cu elemente specifice din două sisteme laser de ediții diferite tip Renishaw XL-80, ambele reflectoare sunt amplasate pe aceeași coloană de montare etc.

### (A) Teste în paralel pe centrul de prelucrare CNC Spinner VC 1020

La centrul de prelucrare CNC Spinner VC 1020, intervalul de deplasare a mesei pe axa Y este de 610 mm, în timp ce intervalul maxim evaluat a fost de aproximativ 480 mm din cauza limitei introduse de structura simplă LIS.

Rezultatele (Fig. 7.16) arată un model similar, cu o ușoară diferență pentru rezultatele asociate LIS care include SPD, de până la aproximativ maxim 15  $\mu\text{m}$ . Erorile sunt sub 10  $\mu\text{m}$  cu mici oscilații până la punctul de coordonată de 240 mm; din acel moment, eroarea scade până la - 40  $\mu\text{m}$  pentru LIS simplu și până la - 20  $\mu\text{m}$  pentru LIS care include SPD. La întoarcere, valorile sunt ușor similare, cu o diferență continuă de mai puțin de 10  $\mu\text{m}$  între erorile asociate LIS-urilor considerate.

Intervalul erorilor medii de poziționare bidirecțională este de aproximativ 30  $\mu\text{m}$  pentru LIS care include SPD și de aproximativ 40  $\mu\text{m}$  pentru LIS simplu. Repetabilitatea poziționării este ușor similară între cele două LIS cu o mică variație pentru LIS care include SPD. În ansamblu, erorile de poziționare întâlnite în evaluarea axei Y s-au dovedit a fi mai mari în a doua parte a axei de deplasare, care probabil sunt datorate nivelului de uzură a ghidajelor liniare în zona de lucru.

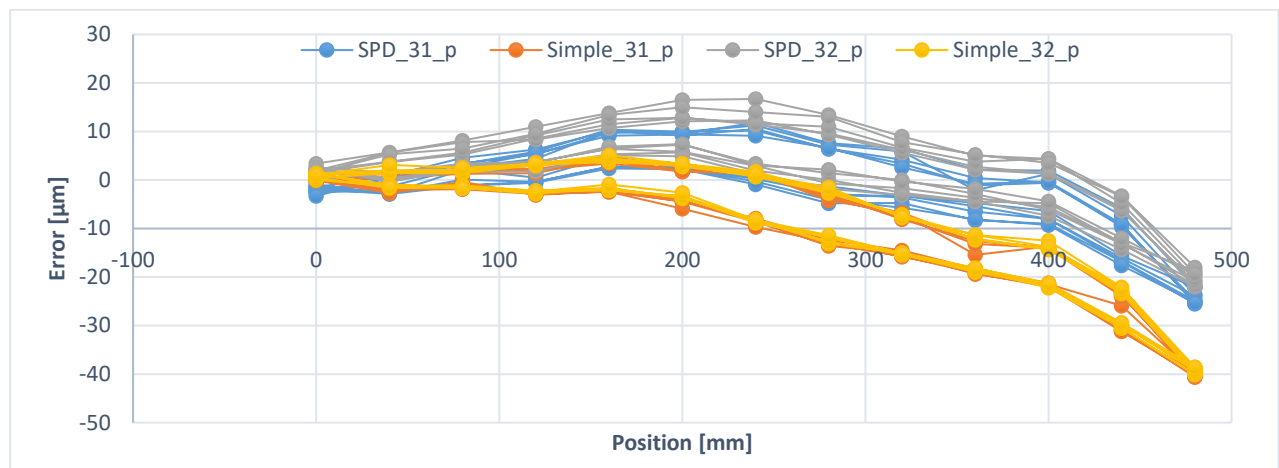


Fig. 7.16. Eroarea de poziționare liniară pe axa Y, la teste în paralel, pe centrul de prelucrare CNC Spinner VC 1020

Condițiile de mediu au fost stabile. Diferența dintre temperatura aerului și cea a materialului este de aproximativ 2° C, asemănătoare cu condițiile de laborator (v. subcapitolul anterior), dar temperatura totală este mai mare decât temperatura recomandată de 20°C, ceea ce indică necesitatea compensatorului de mediu.

### (B) Teste în paralel pe centrul de prelucrare CNC Spinner MC 1020

La centrul de prelucrare CNC Spinner MC 1020, intervalul de deplasare a arborelui principal pe axa Y este de 580 mm, în timp ce intervalul maxim evaluat a fost de aproximativ 380 mm din cauza limitei introduse de structura simplă LIS.

Configurarea pentru LIS simplu și LIS care include SPD necesită timp și spațiu semnificativ.

Rezultatele urmează un model similar de erori asociate LIS care include SPD și, respectiv, LIS simplu, așa cum este prezentat în Fig. 7.19.

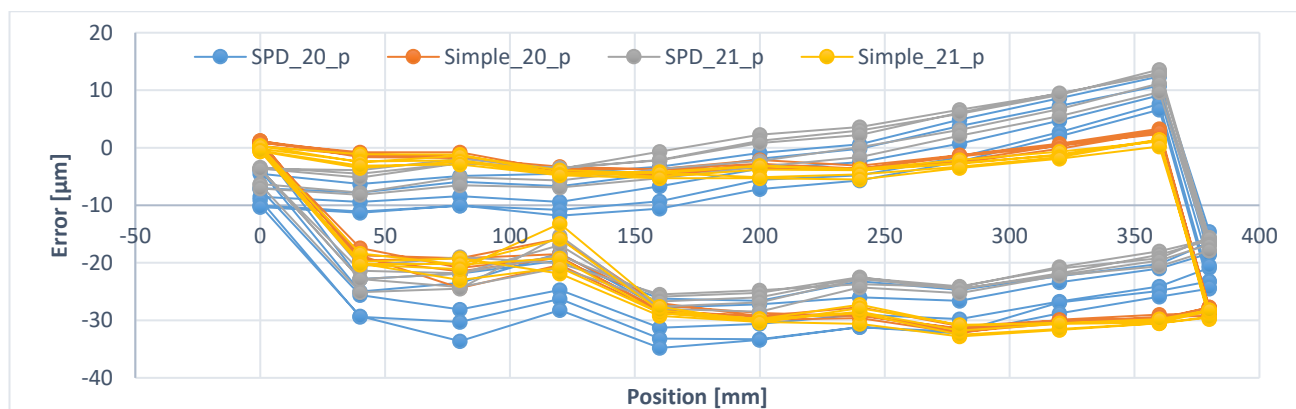


Fig. 7.19. Eroarea de poziționare liniară pe axa Y, la teste în paralel, pe centrul de prelucrare CNC Spinner MC 1020

Măsurările încep din punctul de coordonată 0 a axei Y; la poziția de 40 mm de-a lungul axei, eroarea de poziționare este - 20 μm. Această eroare continuă cu mici oscilații de-a lungul axei până la poziția de 120 mm, unde eroarea devine -30 μm. Eroarea, cu o scădere foarte mică, continuă cu aproximativ aceeași valoare până la poziția de 380 mm. La întoarcere, se observă o corecție bruscă a erorii de la aproximativ -30 μm la 0 μm, care se datorează, probabil, unui joc din ghidajele liniare. Din acel moment, punctele de revenire sunt în limita erorii de ±10 μm.

Erorile de poziționare bidirecționale sunt de aproximativ 40 μm, în timp ce repetabilitatea poziționării este puțin mai bună pentru LIS simplu. O variație maximă a valorii de aproximativ 15 μm poate fi observată între cele două LIS-uri diferite.

Ca și în testele industriale paralele anterioare, condițiile de mediu au fost stabile.

Măsurările comparative, prezentate în acest capitol, arată că SPD, inclus într-un LIS, îndeplinește cerințele specifice. Rezultatele experimentale arată asemănări importante între măsurările efectuate cu LIS care include SPD și LIS simplu, ceea ce duce la o îmbunătățire a capacității LIS de a evalua întreaga deplasare posibilă pe anumite axe ale centrelor CNC de prelucrare.

## **Chapter 8. Concluzii finale și contribuții principale privind dezvoltarea structurii și atributelor sistemelor de interferometrie laser**

(1) Din analiza stadiului actual privind procesele și sistemele de măsurare, s-au desprins concluzii importante, după cum au fost prezentate în capitolul 3.

(2) Pe baza datelor și concluziilor desprinse din analiza a stadiului actual, au fost evaluate și considerate de perspectivă direcțiile de cercetare - dezvoltare prezentate în § 4.1.

(3) În raport cu stadiul actual și direcțiile de cercetare - dezvoltare, a fost asumat drept obiectiv principal al activității doctorale de cercetare avansată (v. § 4.2): dezvoltarea structurii și atributelor sistemelor de interferometrie laser.

(4) Concluziile relevante privind activitatea de cercetare - dezvoltare doctorală pentru realizarea obiectivului său principal, în raport și cu elementele metodologice de referință (v. § 4.3), sunt după cum urmează.

- Dezvoltarea structurii și caracteristicilor generale sistemelor de interferometrie laser include descriptori analitici și unele caracteristici referitoare la elementul de măsurat, sisteme de coordonate, lasere și fascicule laser, elemente optice, fascicule de ieșire, detectoare, senzori de mediu și module de compensare, module electronice, software de proces și calculatoare, elemente de asamblare, calibrare și alte elemente (v. § 5).

- Ca urmare a configurației actuale a elementelor optice, sistemele de interferometrie laser pentru măsurări liniare sunt frecvent factor limitator al cursei măsurate, din cauza amplasării lor în zona de lucru a echipamentelor. Drept exemplu, pentru un centru de prelucrare CNC Makino D200Z cu 5 axe, evaluarea erorii de poziționare a axe Y poate fi efectuată pe 60% din cursa totală a mesei de lucru. Pentru a depăși această problemă și a permite o măsurare pe cursa completă, s-a propus dezvoltarea unui nou dispozitiv de poziționare a divizorului de fascicul, SPD, care să fie inclus în sisteme de interferometrie laser (v. § 6. 1).

- Caracteristicile generale ale SPD se determină a fi: masă minimă, rigiditate ridicată (compliance redusă) în raport cu acțiunea propriei greutate și a celei a ansamblului divizorului de fascicul, simplu, fiabil și adaptat configurațiilor sistemelor de interferometrie laser (v. § 6. 2.1).

- Pentru faza de concepție, sarcina aplicată pe suport a fost evaluată la 15N, ca forță produsă de greutatea proprie și de elementele ce sunt montate pe dispozitiv. Este necesar ca SPD să nu se deformeze semnificativ sub acțiunea acestei sarcini (v. § 6.2.1).

- Dispozitivul de poziționare a divizorului de fascicul poate fi fabricat sub diferite forme și din diferite materiale, doar luând în considerare masa rezultată și omogenitatea materialului (v. § 6.2.2).

Partea centrală a corpului SPD-ului este analizată sub formă solidă, tubulară sau ca structură "lattice", fabricată din poliamidă sau aliaj metalic.



Un sistem de reglare cu două șuruburi a fost conceput pentru a elimina eventuale abateri unghiulare.

○ Un SPD care integrează structuri celulare de tip "lattice" respectă toate criteriile, întrucât poate fi personalizată, iar geometria poate fi optimizată conform necesității. Structurile celulare de tip "lattice" pot fi realizate, în prezent, numai prin fabricare aditivă. Drept urmare, geometria structurii trebuie ajustată în concordanță cu tipul fabricării, respectiv, cu limitări ale metodei în a urmări fidel anumite geometrii CAD (v. § 6.2.2).

○ În stadiul conceptualizării, pentru evaluarea inițială a conceptului, o metodă de fabricare mai economică, și anume metoda sinterizării laser poate fi asociată cu material al componentei de tip polimeric. Prototipul din material polimeric a fost inclus în măsurări interferometrice preliminare, dar s-a dovedit neviabil din cauza comportamentului viscoelastic (deformație continuă sub sarcină). Prin analiza calității fabricării, se determină o serie de îmbunătățiri necesare înainte de fabricare din pulberi metalice.

○ Structura celulară de tip "lattice" poate fi integrată în SPD, prin utilizare de celule identice sau generate printr-o procedură de optimizare, care necesită tipul celulei și obiectivele optimizării. Programele de analiză prin metoda elementelor finite au debutat în a furniza și module/ algoritmi de optimizare topologică. Ansys, programul utilizat pentru prezentul studiu, poate efectua acest tip de optimizare pe structură "lattice", cu generare de geometrii în concordanță cu un set de parametri de optimizare și constrângeri de concepție (v. § 6.2.2).

○ Fabricarea prin metoda DMLS necesită ajustări particulare ale geometriei, precum forma de picătură a găurilor, suporturi pentru traverse, modificarea unghiurilor anumitor suporturi etc. pentru a asigura absența defectelor de fabricație. Din cauza deformării produse de dilatarea termică, precizia prescrisă pentru suprafețele flanșei și ale bosajului SPD-ului este asigurată prin rectificare după fabricarea aditivă (v. § 6.2.2).

○ Analiza materialelor a revelat că cea mai potrivită alegere este superaliajul CoCrSP2, sub formă de pulbere metalică. În faza de pre-procesare a fabricării, geometria generată și pulberea aleasă au condus la generarea unor straturi de 0,030 mm grosime, respectiv, a unui număr de 1566 de straturi pentru fabricarea piesei (v. § 6.3.1).

○ În timpul fabricării aditive, pot acționa surse de erori, cum ar fi interferarea raclorului cu zone deja sinterizate, care determină distribuția neuniformă a pulberii. La fabricarea SPD nu au fost constatate astfel de abateri (v. § 6.3.2).

○ Faza de post-procesare a fabricării SPD-ului din pulberi metalice implică extragerea plăcii de sinterizare împreună cu produsele realizate din incinta de fabricare, o procedură de eliminare a tensiunilor reziduale (prin supunerea la un ciclu termic), precum și eliminarea plăcii de sinterizare, de obicei prin electroeroziune cu fir. Din cauza durității materialului, alezajul filetat din bosaj este recomandat a fi prelucrat prin electroeroziune (v. 6.3.3).

○ SPD poate fi integrat cu ușurință în configurația de măsurare, dar poate suferi și îmbunătățiri ale zonei de prindere odată cu utilizarea pe scară largă (v. § 7.1).

○ A fost avut în vedere standardul ISO 230-2 ce descrie procedura de măsurare pentru evaluarea axelor CNC (v. § 7.1.1).

○ Validarea noului dispozitiv de poziționare a divizorului de fascicul realizat a fost efectuată prin utilizarea unui sistem de interferometrie laser simplu și a unui sistem de interferometrie laser care include noul dispozitiv considerat pentru poziție liniară, în cadrul unor teste consecutive și teste paralele, în condiții de laborator și industriale, cu o evaluare continuă a parametrilor de mediu (v. § 7.2, 7.3 și 7.4).

Măsurările comparative efectuate arată că SPD satisface cerințele de dezvoltare specifice.

(5) La realizarea obiectivului principal al activității doctorale de cercetare - dezvoltare, prezenta teză de doctorat aduce a serie de contribuții, dintre care cele mai importante sunt după cum urmează.

- Analiza detaliată a stadiului actual privind procesele și sistemele de măsurare, inclusiv interferometria și interferometre, fabricarea aditivă a unor mecanisme de prindere și elemente de asamblare, structurile celulare de tip "lattice", precum și definirea obiectivului principal al activității doctorale de cercetare – dezvoltare, respectiv, dezvoltarea structurii și atributelor sistemelor de interferometrie laser.
- Dezvoltarea de descriptori analitici definatorii pentru structura și caracteristicile generale ale sistemelor de interferometrie laser, cu referire la: elementul de măsurat, sistemul de coordonate, laseri, fascicule laser, optică, fascicule de ieșire, detectoare, senzori de mediu și module de compensare, electronică, software de proces și computer(e), asamblare, calibrare și alte elemente.
- Conceptualizarea, proiectarea și simularea cu elemente finite a unui nou dispozitiv de poziționare a divizorului de fascicul, bazat pe crearea și analiza mai multor variante constructive diferite, cu optimizare prin integrarea structurilor celulare de tip "lattice" pentru reducerea greutateii acestuia.
- Fabricarea componentelor specifice ale dispozitivului de poziționare a divizorului de fascicul, prin sinterizare selectivă cu laser a unor variante constructive din poliamidă și prin sinterizare metalică directă cu laser a unei variante constructive din superaliaj, precum și evaluarea preliminară a acestora.
- Validarea noului dispozitiv de poziționare a divizorului de fascicul realizat, prin includerea acestuia într-o structură de sistem de interferometrie laser pentru poziție liniară, cu efectuarea de măsurări în cadrul unor teste consecutive și teste paralele, în condiții de laborator și industriale, care au condus la rezultate favorabile dezvoltării, dar și în ceea ce privește calibrarea generică cu sisteme de interferometrie laser.

\* \* \*

Prezenta teză de doctorat, prin problematică, abordare și rezultate, dezvoltă o serie de studii, analize, concepte, proiecte, componente constructive și rezultate experimentale privind dezvoltarea unui dispozitiv inovator de poziționare a divizorului de fascicul care să fie inclus în sistemele de interferometrie laser.

*Importanța științifică* a prezentei teze de doctorat este susținută de contribuțiile aduse la: dezvoltarea de descriptori analitici definatorii pentru structura și caracteristicile generale ale sistemelor de interferometrie laser; conceptualizarea, proiectarea și simularea cu elemente finite a unui nou dispozitiv de poziționare a divizorului de fascicul, cu optimizare prin integrarea structurilor celulare de tip "lattice"; fabricarea componentelor specifice ale dispozitivului de poziționare a divizorului de

fascicul prin sinterizare metalică directă cu laser din pulbere de superaliaj; validarea noului dispozitiv de poziționare a divizorului de fascicul realizat, prin efectuarea de măsurări în condiții de laborator și industriale, care au condus la rezultate favorabile dezvoltării.

*Importanța practică* a prezentei teze constă în faptul că descriptorii realizați pentru structura și caracteristicile generale ale sistemelor de interferometrie laser, conceptualizarea, proiectarea, fabricarea și validarea unui nou dispozitiv de poziționare a divizorului de fascicul sunt elemente utile, după caz, studenților, cadrelor didactice, specialiștilor din industrie, diverselor organizații educaționale și economice, pentru a dezvolta cunoașterea și aplicații ale sistemelor de interferometrie laser.

Problematika sistemelor de interferometrie laser, ca perspectivă potențială privind procesele de interacțiune, modelarea analitică și caracteristicile operaționale asociate sistemelor de interferometrie laser, în vederea dezvoltării aplicațiilor acestora în medii industriale active, necesită o activitate de cercetare-dezvoltare complexă și continuă.

## Bibliografie

- [A01] \*\*\*, ASRO - Organismul Național de Standardizare, <https://www.asro.ro/despre-asro/> (accessed on 30.03.2021).
- [A02] \*\*\*, ASRO - Organismul Național de Standardizare, *Statutul Asociației de Standardizare din România - ASRO*, updated on 15.10.2015.
- [A03] **Artimon (Stochioiu) F. P. G.**, *Identification expérimentale du comportement viscoélastique d'un composite stratifié lin/époxy – dissertation thesis*, Institut Supérieur de l'Automobile et des Transports, Université de Bourgogne, 2016-2017.
- [A04] **Artimon (Stochioiu) F. P. G.**, Stochioiu C. and Popan G., *Thermal influence on positioning error and position repeatability of a machining center axes*, U.P.B. Scientific Bulletin, Series D, Vol. 83, Iss. 2, 2021, ISSN 1454-2358
- [A05] \*\*\*, Agilent Technologies Inc., *Agilent Laser and Optics – User's Manual*, Vol. 1, Ed. 5, 2007, [https://www.uzimex.cz/soubory/20080403\\_laser\\_optika\\_cast\\_1.pdf](https://www.uzimex.cz/soubory/20080403_laser_optika_cast_1.pdf) (accessed on 01.10.2021)
- [A06] Azman A., Vignat F. and Villeneuve F., *Evaluating current cad tools performances in the context of design for additive manufacturing*, Joint Conference on Mechanical, Design Engineering & Advanced Manufacturing, 2014, France
- [A07] \*\*\*, Althen Sensors & Controls., *PPV / PPV80 Mounting Plate - AISI 304 steel upper plate for foot mounting*, <https://www.althensensors.com/sensors/weighing-sensors-load-cells/weighing-modules-mounting-kits-for-load-cells/5645/ppv-ppv80-mounting-plate/> (accessed on 10.02.2022)
- [A08] Ashby M. F., *Material selection in mechanical design*, 3<sup>rd</sup> Edition, 2005, Elsevier Butterworth Heinemann, ISBN 0 7506 6168 2
- [A09] \*\*\*, Air Products and Chemicals Inc., *Additive Manufacturing and Gas Applications Technology*, <https://www.airproducts.com/-/media/airproducts/files/en/330/330-19-001-us-additive-manufacturing-and-gas-applications-technology.pdf> (accessed on 10.02.2022)
- [A10] \*\*\*, ArcelorMittal, *Invar – Controlled expansion alloys*, <https://www.spacematdb.com/spacemat/manudatasheets/Invar-AM.pdf> (accessed on 10.02.2022)
- [A11] \*\*\*, AZO Materials, *Stainless Steel - Grade 316L - Properties, Fabrication and Applications (UNS S31603)*, <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2382> (accessed on 10.02.2022)
- [A12] \*\*\*, Ansys® Academic Research Mechanical, Release 2021 R2
- [B01] Bucher J. L., *The Metrology Handbook*, Second edition, ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisconsin, 2012, ISBN 978-0-87389-838-6.
- [B02] Bedson P. and Sargent M., *The development and application of guidance on equipment qualification of analytical instruments*, Accreditation and Quality Assurance vol. 1, Iss. 6, 1996, pp. 265-274, ISSN 09491775, DOI 10.1007/s007690050083.
- [B03] Bryan J., Livermore L., *International Status of Thermal Error Research (1990)*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 39, Iss. 2, pp 645-656, ISSN: 1726-0604, DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63001-7.
- [B04] Barron T. H. K. and White G. K., *Heat Capacity and Thermal Expansion at Low Temperatures*, Springer Science+Business Media New York, 1999, ISBN 978-1-4613-7126-7, DOI 10.1007/978-1-4615-4695-5.
- [B05] Blakenbach K., *Introduction to Display Metrology*. In: Chen J., Cranton W., Fihn M. (eds) *Handbook of Visual Display Technology*. Springer, Berlin, Heidelberg, (2012), [https://doi.org/10.1007/978-3-540-79567-4\\_142](https://doi.org/10.1007/978-3-540-79567-4_142)
- [B06] Bunch B. and Hellemans A., *The History of Science and Technology*, Houghton Mifflin Company, 2004, ISBN 0-618-22123-9
- [B07] \*\*\*, Basic Electromagnetic Wave Properties, <https://www.olympus-lifescience.com/es/microscope-resource/primer/java/wavebasics/> (accessed on 25.08.2021)
- [B08] Bass M., *Handbook of Optics*, Vol.1: Geometrical and Physical Optics, Polarized Light, Components and Instruments, 3<sup>rd</sup> Edition, 2010, ISBN 978-0-07-162925-6
- [B09] Briers J. D., *Optical testing: a review and tutorial for optical engineers*, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 32, Iss. 2, Pp. 111-138, 1999, doi: 10.1016/S0143-8166(99)00062-7

- [B10] Bünnagel R., Oehring H. A. and Steiner K., *Fizeau Interferometer for Measuring the Flatness of Optical Surfaces*, Applied Optics, Vol. 7, No. 2, pp. 331-336, 1968, doi: 10.1364/ao.7.000331
- [B11] Bucher D., Richards E. G. and Brown W.D., *Modifications of the Rayleigh Interferometer in the ultracentrifuge for use with Heme and other light-absorbing proteins*, Analytical biochemistry, Vol. 36, pp. 368-380, 1970, doi: 10.1016/0003-2697(70)90372-6
- [B12] Begović E., Plančić I., Ekinović S. and Ekinović E., *Laser Interferometry – Measurement and Calibration Method for Machine Tools*, 3rd Conference “MAINTENANCE 2014“, 2014, PP. 19-28
- [B13] Brzhezinskii M. L. and Simakhina G. V., *Interferometer of improved sensitivity for measuring small linear displacements*, Translated from Izmeritel'naya Tekhnika, No. 5, pp. 44-45, 1972
- [C01] Chiarini A., *Japanese total quality control, TQM, deming's system of profound knowledge, BPR, lean and six sigma: Comparison and discussion*, International Journal of Lean Six Sigma, 2011, Vol. 2, Iss. 4, pp 332-355, DOI: 10.1108/20401461111189425.
- [C02] Clifford P. M., *The international vocabulary of basic and general terms in metrology*, Measurement, 1985, Vol. 3, Iss. s, pp 72-76, DOI: 10.1016/0263-2241(85)90006-5.
- [C03] Castrup H. T., Eicke W. G., Hayes J. L., Mark A. and Martin R. E., *Metrology: Calibration and measurement processes guidelines*, NASA Reference Publication 1342, June 1994, Pasadena, California.
- [C04] Castro H. F. F., *Uncertainty analysis of a laser calibration system for evaluating the positioning accuracy of a numerically controlled axis of coordinate measuring machines and machine tools*, Precision Engineering, vol. 32, pag. 106-113, 2008, doi:10.1016/j.precisioneng.2007.05.001.
- [C05] Cable M., *Calibration: A Technician's Guide*, The Instrumentation System and Automation Society. ISA, 2005.
- [C06] Clark A. F., *Low temperature thermal expansion of some metallic alloys*, Cryogenics, vol. 8, iss. 5, pag. 282-289, 1968.
- [C07] Clark A. F., Fujii G. and Ranney M. A., *The thermal expansion of several materials for superconducting magnets*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 17, iss. 5, pag. 2316-2319, 1981.
- [C08] Clark A. F., Ekin J. W. and all, *Materials at Low Temperatures*, American Society for Metals, 1983, ISBN: 0-87170-146-4.
- [C09] Chunlei J., Zihua Z. and Chengwei L., *Vibration measurement based on Multiple Self-Mixing Interferometry*, Optics Communications, Vol. 367, 2016, pp. 227-233, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2016.01.032>
- [C10] Culshaw B., *The optical fibre Sagnac interferometer: An overview of its principles and applications*, Measurement Science and Technology, Vol. 17, Iss. 1, 2006, DOI: 10.1088/0957-0233/17/1/R01
- [C11] Castro H. F. F. and Burdekin M., *Evaluation of the measurement uncertainty of a positional error calibrator based on a laser interferometer*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 45, 2005, Pp. 285-291, DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.08.012
- [C12] Canero-Nieto J. M., Spinola C. G., Moreno-Aranda G., Bonelo J. M. and Martin-Vasquez M., *Contactless real time measuring system for the length of sheets in stainless steel production lines*, International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Proceedings, Vol. 1, 2012, Pp. 2295-2299, DOI: 10.1109/I2MTC.2012.6229426
- [C13] Chen J. R., Ho B. L., Lee H. W., Pan S. P. and Hsieh T. H., *Research on Geometric Errors Measurement of Machine Tools Using Auto-Tracking Laser Interferometer*, World Journal of Engineering and Technology, Vol. 6, 2018, Pp. 631-636, DOI: 10.4236/wjet.2018.63039
- [D01] \*\*\*, Display devices, <https://electronics-club.com/display-devices/> (accessed on 26.05.2021)
- [D02] Donges A. and Noll R., *Laser Measurement Technology - Fundamentals and Applications*, Springer Series in Optical Science – Vol. 188, 2015, ISBN 978-3-662-43633-2, DOI: 10.1007/978-3-662-43634-9
- [D03] \*\*\*, Dual-Frequency Laser Interferometer ZLM 700 ZLM 800, <https://sciencedocbox.com/68820934-Space-and-Astronomy/Dual-frequency-laser-interferometer-zlm-700-zlm-800.html> (accessed on 10.02.2022)
- [D04] Deshpande V. S., Fleck N. A. and Ashby M. F., *Effective properties of the octet-truss lattice material*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, © 2001 Elsevier Science Ltd, Vol. 49, Iss. 8, pp. 1747 – 1769, 2001, DOI: 10.1016/S0022-5096(01)00010-2
- [D05] \*\*\*, Dimetix AG, Switzerland, Laser Distance Sensors – Starter kit accessories, <https://www.s-d-a.sk/dimetix/pdf/prislusenstvo.pdf> (accessed on 10.02.2022)
- [D06] \*\*\*, DSS SolidWorks. Dassault Systems. Concord, MA: SolidWorks Corp., 2015.
- [E01] \*\*\*, [https://www.engineeringtoolbox.com/linear-expansion-coefficients-d\\_95.html](https://www.engineeringtoolbox.com/linear-expansion-coefficients-d_95.html) (accessed on 12.02.2021).

- [E02] Ellis J. D., *Field Guide to Displacement Measuring Interferometry*, SPIE Press, 2014, ISBN 978-0-8194-9800-7, DOI: 10.1117/3.1002328
- [E03] Elmadih W., Leach R. and Syam W., University of Nottingham, Manufacturing Metrology Team, *Design of additively manufactured lattice structures for precision mechanical force loops*, <https://www.nottingham.ac.uk/research/groups/advanced-manufacturing-technology-research-group/research/manufacturing-metrology-team/our-research/design-of-additively-manufactured-lattice-structures-for-precision-mechanical-force-loops.aspx>, (accessed on 10.02.2022).
- [E04] \*\*\*, EOS GmbH, *EOS Aluminium AlSi10Mg - Material Data Sheet*, [https://www.eos.info/03\\_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/aluminium/material\\_datasheet\\_eos\\_aluminium-alsi10mg\\_en\\_web.pdf](https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/aluminium/material_datasheet_eos_aluminium-alsi10mg_en_web.pdf) and [https://fathommf.com/wp-content/uploads/2020/11/EOS\\_Aluminium\\_AlSi10Mg\\_en.pdf](https://fathommf.com/wp-content/uploads/2020/11/EOS_Aluminium_AlSi10Mg_en.pdf) (accessed on 10.02.2022).
- [E05] \*\*\*, EOS GmbH, *EOS Titanium Ti64 - Material Data Sheet*, [http://www.harbec.com/wp-content/uploads/2018/11/ti-ti64\\_m270\\_material\\_data\\_sheet\\_12-08\\_en.pdf](http://www.harbec.com/wp-content/uploads/2018/11/ti-ti64_m270_material_data_sheet_12-08_en.pdf) and [https://www.eos.info/03\\_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/titan/ti64/material\\_datasheet\\_eos\\_titanium\\_ti64\\_grade23\\_premium\\_en\\_web.pdf](https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/titan/ti64/material_datasheet_eos_titanium_ti64_grade23_premium_en_web.pdf) (accessed on 10.02.2022).
- [E06] \*\*\*, EOS GmbH, *EOS CobaltChrome MP1- Material Data Sheet*, [http://www.e-manufacturing.it/downloads/EOS\\_CobaltChrome\\_MP1.pdf](http://www.e-manufacturing.it/downloads/EOS_CobaltChrome_MP1.pdf) (accessed on 10.02.2022).
- [E07] \*\*\*, Eplus3D Tech GmbH, EP-Hatch 2020
- [F01] Fridman A. E., *The quality of measurements – A metrological reference*, translated by Sabak A. and Makinen P., Springer, 2012, ISBN 978-1-4614-1477-3, DOI 10.1007/978-1-4614-1478-0.
- [F02] Figliola R. S. and Beasley D. E., *Theory and Design for Mechanical Measurements*, Fifth Edition, 2011 John Wiley & Sons.
- [F03] \*\*\*, Feanor R&D Metrology, Special Tools, Q-Software, *Principles of Operation*, [http://www.feanor.com/laser\\_principles.pdf](http://www.feanor.com/laser_principles.pdf) (accessed on 14.10.2021).
- [F04] Fan J., Tao H., Wu C., Pan R., Tang Y. and Li Z., *Kinematic errors prediction for multi-axis machine tools' guideways based on tolerance*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, Vol. 98, Iss. 5-8, Pp. 1131-1144, DOI 10.1007/s00170-018-2335-9
- [G01] Grabe M., *Measurement Uncertainties in Science and Technology*, 2<sup>nd</sup> Edition Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005, 2014, ISBN 978-3-319-04887-1, DOI 10.1007/978-3-319-04888-8.
- [G02] Gupta S. V., *Measurement uncertainties – Physical parameters and calibration of instruments*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, ISBN 978-3-642-20988-8, DOI 10.1007/978-3-642-20989-5.
- [G03] Grous A., *Applied Metrology for Manufacturing Engineering*, ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc., 2011, ISBN 978-1-84821-188-9.
- [G04] Gheorghe M., **Stochioiu F. P. G.**, Manolache D., Dijmărescu M. R. and Iliescu D., *Analysis and development on general structure and characteristics of laser interferometry systems*, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1268 012009, 2022, DOI 10.1088/1757-899X/1268/1/012009.
- [H01] Hariharan P., *Basics of Interferometry*, Academic Press, Sydney, Australia, 2013, 2<sup>nd</sup> Edition, 2007, ISBN 978-0-12-373589-8.
- [H02] Hecht E., *Optics*, Global Edition, 5<sup>th</sup> Edition, Adelphi University, Pearson Education Limited, 2017, ISBN: 978-1-292-09693-3.
- [H03] Huang Y., Yang Y., Liang J., Miao Z., Zhao M. and Zheng Y., *An optical glass plane angle measuring system with photoelectric autocollimator*, Nanotechnology and Precision Engineering, Vol. 2, Iss. 2, Pp. 71-76, DOI: 10.1016/j.npe.2019.06.001
- [H04] \*\*\*, High Temp Metals, *INCONEL 718 TECHNICAL DATA*, [https://www.hightempmetals.com/techdata/hitempInconel718\\_data.php](https://www.hightempmetals.com/techdata/hitempInconel718_data.php) (accessed on 10.02.2022).
- [I01] Ishikawa K., *Guide to Quality Control*, Industrial Engineering and Technology, Asian Productivity Organization, Hong Kong, 1976, ISBN: 92 833 1035 7.
- [I02] Iliescu D., Dijmărescu M. R. and Gheorghe M., *Configuration management by dolce upper-level ontology*, Conference Paper in Academic Journal of Manufacturing Engineering, 2015, Vol. 13, Iss. 2, ISSN: 15837904.
- [I03] \*\*\*, ISO 9000 - *WHAT IS THE ISO 9000 STANDARDS SERIES?*, <https://asq.org/quality-resources/iso-9000> (accessed on 27.05.2020).

- [I04] \*\*\*, ISO 9000 Family Quality Management, <https://www.iso.org/iso-9001-quality-management.html> (accessed on 27.08.2020).
- [I05] \*\*\*, International Organization for Standardization, *International Classification for Standards*, ICS ed. 7, 2015.
- [I06] Iliescu C., Ionescu-Golovanov C., Szabo W., Szekely I. and Bărbulescu D., *Măsurări electrice și electronice*, EDP, Bucharest, 1983.
- [I07] \*\*\*, Institutul de Lingvistică „Iorgu Iordan” al Academiei Române - *Dicționarul explicativ al limbii române*, Editura Univers Enciclopedic, 1998.
- [I08] \*\*\*, ISO/IEC 17025:2017, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*, 3<sup>rd</sup> Ed.
- [I09] \*\*\*, ISO 14644-1:2015, *Cleanrooms and associated controlled environments — Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration*, 2<sup>nd</sup> Edition.
- [I10] \*\*\*, ISO 230-2:2014, *Test code for machine tools — Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled axes*, 4<sup>th</sup> Edition.
- [I11] \*\*\*, Interference of waves, <https://www.fizzics.org/interference-of-waves/> (accessed on 21.09.2021)
- [I12] Iftimia N. V., Hammer D. X., Bigelow C. E., Rosen D. I., Ustun T. et al., *Toward noninvasive measurement of blood hematocrit using spectral domain low coherence interferometry and retinal tracking*, Optics Express, Vol. 14, Iss. 8, 2006, pp. 3377-3388, DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.14.003377>
- [I13] \*\*\*, ISO 230-1:2012, *Test code for machine tools — Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions*, 3<sup>rd</sup> Edition.
- [J01] Jang Y. S., Wang G., Hyun S. et al., *Comb-referenced laser distance interferometer for industrial nanotechnology*, Scientific Reports, Vol. 6, 2016, DOI: <https://doi.org/10.1038/srep31770>.
- [J02] Jozwik J., Jacniacka E. and Ostrowski D., *Estimation of uncertainty of laser interferometer measurement in industrial robot accuracy tests*, ITM Web of Conferences, Vol. 15, 2017, DOI: 10.1051/itmconf/20171504005.
- [J03] Jia M., Zhang J., Gao R., Zhao D. and Peng T., *Precision measurement of squareness of large rectangular square*, Ninth International Symposium on Precision Engineering Measurement and Instrumentation, Vol. 9946, 2015, DOI: 10.1117/12.2180699.
- [K01] Kutz M., *Handbook of measurement in science and engineering – Volume 1*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2013, ISBN 978-0-470-40477-5.
- [K02] Knapp W., *Measurement Uncertainty and Machine Tool Testing*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 51, Iss. 1, pp. 459 – 462, 2002, ISSN 0007-8506.
- [K03] Kirby R. K., Hahn T. A. and Rothrock B. D., *Thermal Expansion*, The American Institute of Physics Handbook, 3<sup>rd</sup> edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1972, Chapter 4f, ISBN 07-001485-X.
- [K04] Kartashev A. I. and Orshanskii D. L., *Classification of measuring devices by their accuracy*, Measurement Techniques, Iss. 5, pp. 447–451, 1962, <https://doi.org/10.1007/BF00986694>.
- [K05] Kawamura S., Ando M., Nakamura T., Tsubono K., Tanaka T., Funaki I et al., *The Japanese space gravitational wave antenna - DECIGO*, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 122, 2008
- [K06] Kumar Y. and Chatterjee., *Simultaneous measurement of refractive index and wedge angle of optical windows using Fizeau interferometry and a cyclic path optical configuration*, Applied Optics, Vol. 48, 4756-4761, 2009, doi: 10.1364/AO.48.004756
- [L01] Leach R. K. and Smith S. T., *Basics of precision engineering*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018, ISBN 9781498760874.
- [L02] Lo C. H., Yuan J. and Ni J., *An Application Of Real-Time Error Compensation On A Turning Center*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 35, no. 12, pp. 1669-1682, UK, 1995.
- [L03] Lahiri A., *Basic Optics*, Elsevier Inc., 2016, doi: 10.1016/c2015-0-04613-5.
- [L04] Lau K., Hocken R. and Haynes L., *Robot performance measurements using automatic laser tracking techniques*, Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, USA, Vol. 2, No. 3/4, pp. 227-236, 1985
- [L05] Lipus L. C., Budzyn G. and Acko B., *Analysis of Laser Interferometer Measurement Uncertainty by Simulating Error Sources*, International Journal of Simulation Modelling, Vol. 20, Iss. 2, Pp. 339-350, 2021, doi: 10.2507/IJSIMM20-2-563.
- [L06] Loughridge R. and Abramovich D. Y., *A tutorial on laser interferometry for precision measurements*, Proceedings of the American Control Conference, Pp. 3686-3703, 2013, doi: 10.1109/acc.2013.6580402.

- [L07] Leach R., *CIRP Encyclopaedia of Production Engineering*, Chapter: Abbe error/offset, pp. 1 – 4, 2015, DOI: 10.1007/978-3-642-35950-7\_16793-1
- [L08] Liu C. H., Jiwe W. Y., Hsu C. C. and Hsu T. H., *Development of a laser-based high-precision six-degrees-of-freedom motion errors measuring system for linear stage*, Review of Scientific Instruments, Vol. 76, Iss. 5, 2005, doi: 10.1063/1.1915520
- [L09] Langenbeck P., *Interferometry for precision measurement*, Tutorial Texts in Optical Engineering, Vol. TT94, SPIE PRESS, USA, 2014, ISBN 978-0-8194-9142-8
- [L10] Lacota S. and Gorog A., *Flatness measurement by multi-point methods and by scanning methods*, Journal of Interdisciplinary Research, 2011
- [L11] Li Y., Gu H., Pavier M. and Coules H., *Compressive behaviours of octet-truss lattices*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 234, Iss. 16, pp. 3257 – 3269, 2020, DOI: 10.1177/0954406220913586
- [M01] Mittag H. -J., Rinne H., *Statistical methods of quality assurance*, Chapman & Hall, London, UK, ISBN 0 412 55980 3.
- [M02] Morris A. S., Langari R., *Measurement and Instrumentation – Theory and Application*, Second edition, Academic Press, 2016, ISBN: 978-0-12-800884-3.
- [M03] \*\*\*, Measurement System Basics – Analog vs. Digital, <https://www.keyence.com/ss/products/measurement-selection/basic/analog-digital.jsp> (accessed on 26.05.2021)
- [M04] Mureșan A., *Aparate de măsură și control*, <https://biblioteca.regielive.ro/cursuri/agronomie/aparate-de-masura-si-control-221978.html> (accessed on 12.06.2021).
- [M05] Maowei J., Xiaojing L., Shunchuan W., Yongtao G. and Linlin G., *Use of SAR interferometry for monitoring illegal mining activities: A case study at Xishimen Iron Ore Mine*, Mining Science and Technology, China, Vol. 21, 2011, pp. 781–786, DOI: 10.1016/j.mstc.2011.05.039
- [M06] Micu C., Dodoc P., Diaconescu G. and Manolescu A., *Aparate si sisteme de masurare in constructia de masini*, Editura Tehnică, București, 1980.
- [M07] Malacara D. and Malacara Z., *Chapter 29: Optical Metrology*, Handbook of Optics: Devices, Measurements, and Properties, Vol. 2, 2<sup>nd</sup> Ed., 1992
- [M08] Modi B. S., George P. M. and Sheth S. M., *Study and Investigate Effect of Cutting Parameters on Flatness for Dual Plate Check Valve*, Conference: 7th international conference on Advanced computing & Communication Technologies, Vol. 4, 2013, DOI: 10.13140/2.1.3867.7286
- [M09] Milodin N. L., Popa N. M., Tutoveanu M. and **Artimon F. P. G.**, *Compression behaviour of PA2200 lattice structures*, International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics, Vol. 1, Iss. 9, pp 192-200, 2021, DOI: 10.17683/IJOMAM/ISSUE9.28
- [M10] \*\*\*, Makino GmbH, The Perfect Combination of Precision and Speed - The Makino D200Z, <https://www.youtube.com/watch?v=UaxA7y5saIk>, (accessed on 05.02.2020).
- [M11] \*\*\*, Makino GmbH, D200Z 5-Axis Vertical Machining Center - product catalogue, M482Ed 1804/1 (V-T-D)
- [M12] \*\*\*, Makino GmbH, ED AF2 sinker EDM, <https://www.makino.eu/en-us/machine-technology/machines/sinker-edm/edaf2>, (accessed on 01.04.2022).
- [M13] Milodin N. L., Popa N. M., Tutoveanu M. and **Artimon F. P. G.**, *Compression Testing of PA2200 Additive Manufactured Lattice Structures*, International Conference on Reliable Systems Engineering, pp 304-315, 2021, DOI: 10.1007/978-3-030-83368-8\_30
- [M14] \*\*\*, Materialise NV, Materialise Magics, Version 25.02
- [N01] Nissim N., Dudaie M., Barnea I. and Shaked N.T., *Real-Time Stain-Free Classification of Cancer Cells and Blood Cells Using Interferometric Phase Microscopy and Machine Learning*, Cytometry, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1002/cyto.a.24227>
- [N02] Naboni R. and Kunic A., *Design and Additive Manufacturing of Lattice-based Cellular Solids at Building Scale*, XXI Congreso de la Sociedad Ibero-americana de Gráfica Digital, 2017, Chile, Vol. 3, Iss. 12, DOI: 10.5151/sigradi2017-058
- [O01] Oros Daraban A. E., Negrea C. S., **Artimon F. P. G.** and al., *A Deep Look at Metal Additive Manufacturing Recycling and Use Tools for Sustainability Performance*, Sustainability, Vol. 11 (19): 5494, 2019, DOI: 10.3390/su11195494



- [P01] Placko D., *Metrology in Industry: The Key for Quality*, French College of Metrology, translated into english by Barbier J., ISTE Ltd, London, 2006, ISBN-13: 978-1-905209-51-4.
- [P02] Popovici C., Savii G. and Killman V., *Tehnologia construcției de mașini*, Editura Didactică și Pedagogică, Bucharest, 1967.
- [P03] Paschotta R., article on 'Irradiance' in the Encyclopedia of Laser Physics and Technology, 1. edition October 2008, Wiley-VCH, ISBN 978-3-527-40828-3 (<https://www.rp-photonics.com/irradiance.html> accessed on 02.10.2021).
- [P04] \*\*\*, Polytec Gmbh, *File:Michelson Interferometer scheme.png*, Werner Boeglin, Dept. of Physics, FIU, Miami, [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Michelson\\_Interferometer\\_scheme.png](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Michelson_Interferometer_scheme.png) (accessed on 12.10.2021).
- [P05] Pan F., Nie L., Bai Y., Wang X. and Wu X., *Geometric errors measurement for coordinate measuring machines*, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, Vol. 81, Iss. 1, DOI: 10.1088/1755-1315/81/1/012117
- [R01] Rabinovich S., *Measurement Errors and Uncertainties Third edition*, Journal of Chemical Information and Modeling, 2005, Vol. 53, Iss. 9, ISSN 9788578110796.
- [R02] Raghavendra N. and Krishnamurthy L., *Engineering metrology and measurements*, Oxford University Press, 2013, Vol. 1, Iss. 2, ISBN-13: 978-0-19-808549-2.
- [R03] Radhakrishnan P., Subramanyan S. and Raju V., *CAD/CAM/CIM – Third edition*, New age international (P) Ltd., Publishers, New Delhi, 2008, ISBN (13): 978-81-224-2711-0.
- [R04] Ramesh R., Mannan M. and Poo A.N., *Error compensation in machine tools- a review. Part II: Thermal errors*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, Vol. 40, Iss. 9, pp. 1257-1284.
- [R05] Repposi P., *Learning Optics from the History*, J. of Physics: Conference Series, 2019, Vol. 1221, doi: 10.1088/1742-6596/1221/1/012054.
- [R06] Roychoudhuri C., *Fundamentals of Photonics*, 2008, SPIE Press, ISBN: 9780819471284, doi: 10.1117/3.784938.
- [R07] Riehle F., Gill P., Arias F. and Robertsson L., *The CIPM list of recommended frequency standard values: Guidelines and procedures*, Metrologia, Vol. 55, Iss. 2, 2018, pp. 188-200, doi: 10.1088/1681-7575/aaa302.
- [R08] Rayleigh, *The interferometer*, Nature, No. 1536, Vol. 59, pp. 533, 1899, doi: <https://doi.org/10.1038/059533b0>.
- [R09] \*\*\*, Renishaw plc., *XC-80 compensator and sensors*, <https://www.renishaw.com/en/xc-80-compensator-and-sensors--8267>, (accessed on 14.10.2021).
- [R10] \*\*\*, Renishaw plc., *XL-80 system support disk*, Version 2.1.2, 2008, United Kingdom.
- [S01] Shah R. and Ward P., *Lean manufacturing: context, practice bundles, and performance*, Journal of Operations Management, Vol. 21 (2003), pp. 129-149.
- [S02] Smith G. P., *Machine Tool Metrology – An Industrial Handbook*, Springer International Publishing Switzerland, 2016, ISBN 978-3-319-25109-7, DOI 10.1007/978-3-319-25109-7.
- [S03] Schleicher M. and Blasinger F., *Control Engineering - A guide for beginners*, 3<sup>rd</sup> edition, JUMO GmbH & Co. KG, Germany, 2003, ISBN: 3-935742-01-0
- [S04] Slocum A. R., *Precision Machine Design*, Society of Manufacturing, 1992, Vol. 02, Iss.2, DOI: 10.1016/0141-6359(80)90078-1
- [S05] Steinmetz C. R., *Sub-micron position measurement and control on precision machine tools with laser interferometry*, Precision Engineering, 1990, Vol. 12, Iss. 1, pp. 12-24, DOI: 10.1016/0141-6359(90)90004-I
- [S06] Shirinzadeh B., Teoh P. L., Tian Y., Dalvand M. M., Zhong Y. and Liaw H. C., *Laser interferometry-based guidance methodology for high precision positioning of mechanisms and robots*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 26, Iss. 1, 2010, pp. 74-82, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2009.04.002>
- [S07] Sudatham W., Matsumoto H., Takahashi S. and Takamasu K., *Verification of the positioning accuracy of industrial coordinate measuring machine using optical-comb pulsed interferometer with a rough metal ball target*, Precision Engineering, Vol. 41, 2015, pp. 63-67, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.01.007>
- [S08] Sarychikhina O., Gomez Palacios D., Delgado Argote L. A. and Gonzales Ortega A., *Application of satellite SAR interferometry for the detection and monitoring of landslides along the Tijuana - Ensenada Scenic Highway, Baja California, Mexico*, Journal of South American Earth Sciences, 2020, Vol. 107, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103030>.
- [S09] Shukla R. P., Udupa D. V., Das N. C. and Mantravadi M. V., *Non-destructive thickness measurement of dichromated gelatin films deposited on glass plates*, Optics and Laser Technology, Vol. 38, 2006, pp. 552-557 DOI: 10.1016/j.optlastec.2004.11.020

- [S10] Steinberg I. Z. and Schachman H. K., *Ultracentrifugation Studies with Absorption Optics. V. Analysis of Interacting Systems Involving Macromolecules and Small Molecules*, Biochemistry, Vol. 5, 1966, pp. 3728-3747 DOI: 10.1021/bi00876a003
- [S11] Schwenke H., Franke M. and Hannaford J., *Error mapping of CMMs and machine tools by a single tracking interferometer*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 54, Iss. 1, Pp. 475-478, DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60148-6
- [S12] Schede R. W., *Interferometers for Use as integral parts of machine tools*, IEEE Transactions on Industry and General Applications, Vol. 3, No. 4, 1967, pp. 328-332
- [S13] Sommargren G. E., *Linear/angular displacement interferometer for wafer stage metrology*, SPIE 1989 Microlithography Conferences, Opticel/Laser Microlithography II, Vol. 1088, DOI: 10.1117/12.953154
- [S14] **Stochioiu F. P. G.**, Ulerich O. and Rolea A., *Femoral stems with lattice structures integration: from concept to part*, 4th International Conference on Materials: Advanced and Emerging Materials
- [S15] **Stochioiu F. P. G.**, Stochioiu C., Rolea A. and Gannam N., *Interferometric evaluation of positioning error and position repeatability on CNCs*, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1268 012009, 2022, DOI 10.1088/1757-899X/1268/1/012009
- [T01] Touloukian Y. S., Kirby R. K., Taylor R. K. and Desai P. D., *Thermal expansion; Metallic Elements and Alloys*, Thermophysical Properties of Matter, Vol. 12, Springer Science+Business Media, New York, 1975, ISBN 978-1-4757-1624-5.
- [T02] \*\*\*, The Doppler Effect: a measurement technique fit for Nobel prizes, <https://rockyworlds.wordpress.com/2017/07/05/the-doppler-effect-a-measurement-technique-fit-for-nobel-prizes/> (accessed on 07.10.2021).
- [T03] Tanaka M. and Nakayama K. *A New Optical Interferometer for Absolute Measurement of Linear Displacement in the Subnanometer Range*, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 22, No. 4A. DOI: 10.1143/JJAP.22.L233
- [T04] Tratnik J. and Batagalj B., *Fiber interferometric communications using Mach-Zehnder interferometer topology*, Eurocon, 2009, doi: 10.1109/EURCON.2009.5167877
- [T05] Tyler Estler W., *High-accuracy displacement interferometry in air*, Applied Optics, Vol. 24, No. 6, 1985, Pp. 808-815, doi: 10.1364/ao.24.000808
- [T06] \*\*\*, Types of errors – 6. Other errors, <https://lasertex.eu/support/interferometer-usage-documentation/types-of-errors/> (accessed on 08.10.2021).
- [T07] Tkaczyk T., Jozwicki R., *Heterodyne interferometer for measurement of linear displacements of a rough sample*, Tenth Polish-Czech-Slovak Optical Conference: Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics, Vol. 3320, Iss. 2, 1998, Pp. 147-152, doi: 10.1117/12.301329
- [T08] Tang H., Duan J. and Zhao Q., *A systematic approach on analyzing the relationship between straightness & angular errors and guideway surface in precise linear stage*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 120, 2017, Pp. 12-19, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2017.04.010
- [T09] \*\*\*, Trinkle 3D GmbH and Schmalz GmbH – 3D Print Mass Customized Grippers Thanks to trinckle, <https://3dprint.com/259529/3d-print-mass-customized-grippers-thanks-to-trinckle/> (accessed on 10.02.2022).
- [U01] Usamentiaga R., Venegas P., Guerediaga J., Vega L., Molleda J. and Bulnes F. G., *Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing*, Sensors, 2014, Vol. 14, Iss. 7, pp. 12305-12348, ISSN: 1424-8220.
- [V01] Vinod T. P., *Metrology and Quality Control - For semester V, Third Year Diploma Courses in Mechanical and Production Engineering/Production Technology*, Ed. 5, ISBN 978-93-83971-66-4.
- [V02] Vlăsceanu D., Stochioiu C. and Gheorghiu H. M., *Noțiuni de mecanică și rezistența materialelor*, Bren, 2017, ISBN: 978-606-610-207-0.
- [V03] Vala A, Mewada H., Patel A., Nagora U. and Pathak S., *Phase detection system based on digital signal processing in millimeter wave interferometer for fusion plasma diagnostics*, Fusion Engineering and Design, 2020, Vol. 157, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111637>
- [W01] Watts F. B., *Engineering Documentation Control Handbook, Configuration Management And Product Lifecycle Management*, Ed. 4, Elsevier, 2012, ISBN: 978-1-4557-7860-7.
- [W02] White G. K. and Minges M. L., *Thermophysical Properties of Some Key Solids: An Update*, International Journal of Thermophysics, Vol. 18, No. 5, 1997.

- [W03] Webster J. G. and Eren H., *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*, Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement, 2<sup>nd</sup> Edition, CRC Press, ISBN 978-1-4398-4889-0.
- [W04] \*\*\*, “What is a Fizeau Interferometer?”, <https://4dtechnology.com/products/fizeau-interferometer/> (accessed on 12.10.2021).
- [W05] Wirotattanaphaphisan K., Buajarern J. and Butdee S., *Uncertainty evaluation for absolute flatness measurement on horizontally aligned fizeau interferometer*, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1183, Iss. 1, 2019, DOI: 10.1088/1742-6596/1183/1/012009
- [W06] Wang D., Abdalla M. M., Wang Z. P. and Su Z., *Streamline stiffener path optimization (SSPO) for embedded stiffener layout design of non-uniform curved grid-stiffened composite (NCGC) structures*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering - © 2018 Elsevier B.V., Vol. 344, pp. 1021 – 1050, 2019, DOI: 10.1016/j.cma.2018.09.013.
- [X01] Xiang Yang. L. and Ettemeyer A., *Strain measurement by three-dimensional electronic speckle pattern interferometry: potentials, limitations and applications*, Optical Engineering, Vol. 42, Iss. 5, 2003, DOI: <https://doi.org/10.1117/1.1566781>
- [X02] Xu J., Jahromi A. K., Brake J., Robinson J. E., and Yang C., *Interferometric speckle visibility spectroscopy (ISVS) for human cerebral blood flow monitoring*, APL Photonics, Vol. 5, 2020, DOI:<https://doi.org/10.1063/5.0021988>
- [Y01] Yandayan T., Geckeler R., Just A., Siewert F., Grubert B., Prieto E., Perez M., Pisani M., Przybylska J. and Thalmann R., *Guidelines on the Calibration of Autocollimators*, Euramet Calibration Guide No 22, vers. 1.0, 07/2017.
- [Y02] Yadavalli N. S., *Advances in Experimental Methods to Probe Surface Relief Grating Formation Mechanism in Photosensitive Materials*, University of Potsdam, Potsdam, April 2014.
- [Y03] Yasin A. S. and Agus R., *Design of Fiber Optic Ring Resonator as a Gyroscope*, Physics Department, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Institute of Technology Sepuluh Nopember (ITS), 2013, [https://www.researchgate.net/publication/258697538\\_Design\\_of\\_Ring\\_Resonator\\_Fiber\\_Optics\\_as\\_a\\_Gyroscope](https://www.researchgate.net/publication/258697538_Design_of_Ring_Resonator_Fiber_Optics_as_a_Gyroscope) (accessed on 12.10.2021).
- [Z01] Zihua Z., Chengwei L. and Zhen H., *Vibration measurement based on multiple Hilbert transform for self-mixing interferometry*, Optics Communications, Vol. 436, 2019, pp. 192-196, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.12.032>
- [Z02] Zetie K. P., Adams S. F. and Tocknell R. M., *How does a Mach-Zehnder interferometer work?* Physics Education, Vol. 35, No. 1, 2000, DOI: <https://doi.org/10.1088/0031-9120/35/1/308>