



LIETUVIŠKAS SPALVINIS KINESKOPAS

KONSTRUKCIJA, TECHNOLOGIJA, KOKYBĖ

9-tosios AB "Ekranas" mokslinės-techninės
konferencijos medžiaga

Šis pranešimų rinkinys išleidžiamas po 9-tosios mokslinės-techninės konferencijos, kuri vyko Panevėžio AB "Ekranas" 1999 metų gruodžio 16 dieną. Rinkinį sudaro 25 pranešimai, kuriuos pateikė 47 autoriai.

Svečių iš Minsko pranešimas spausdinamas rusų kalba, o svečio iš Italijos anglų kalba. Konferencijoje dalyvavo pranešėjai iš Vilniaus universiteto, Kauno technologijos universiteto, AB "Vilniaus Vingis" ir kitų organizacijų. Pranešimuose nagrinėjami kineskopų gamintojams ir konstruktoriams aktualūs klausimai.

Dauguma straipsnių redaguoti pačių autorių.

Atsiprašome skaitytojų už klaidas ir netikslumus.

Atsiliepimus ir pastabas prašome pateikti Angelei Rapševičienei tel. 423425, vietinis 6052, faksas 423415, mob. 285 27547. Adresas: laboratorijų kompleksas AB "Ekranas" Elektronikos 1, 5319 Panevėžys.

SPEKLŲ INTERFEROMETRIJA: MIKRODEFORMACIJŲ MATAVIMAS *IN SITU*

S. Tamulevičius, L. Augulis
Kauno technologijos universitetas

R. Augulis
Vilniaus universitetas

V. Zabarskas, A. Valeika, V. Bataitis
AB "Ekranas"

Ivadas

Speklų interferometrijoje naudojamos lazerio šviesos erdvinio koherentiškumo savybės. Joje analizuojamas objektas apšviečiamas lazerio šviesa. Objekto paviršiaus atskiri taškai, atspindėję šviesą, tampa koherentiniais antrinių bangų šaltiniais. Jų skleidžiamų bangų tarpusavio interferencijos ir difrakcijos optinėje sistemoje dėka formuojamas speklų vaizdas (plokštumoje - tai atsitiktinai išsidėsčiusių švytinčių dėmelių sistema, kartais vadinama grūdėtąja struktūra) [1]. Apšvietus tokį vaizdą papildomu atraminiu šviesos pluoštu dėl interferencijos tarp speklų vaizdo ir atraminės bangos stebimas naujas speklų vaizdas, kuris yra informatyvus objekto judėjimo ir jo geometrinių matmenų kitimo prasme [2].

Fiksuojant kokio nors fizikinio poveikio indukuotą geometrinių matmenų kitimą ar objekto poslinkį, fiksuojamas pradinis speklų vaizdas. Šis vaizdas fotografuojamas speklų fotografijos metode, arba įrašomas į kompiuterio atmintį elektroninėje speklų interferometrijoje. Suprantama, kad objektui judant, kinta ir jo formuojamas speklų vaizdas. Lyginant proceso metu įrašytus speklų vaizdus su pradiniu vaizdu, randamos koreliacinės sritys, kurios parodo objekto paviršiaus izoposlinkio taškus.

Elektroninė speklų interferometrija intensyviai buvo pradėta vystyti tik devintajame dešimtmetyje, kai atsirado spartūs kompiuteriai, leidžiantys registruoti speklų vaizdų kitimą bei nustatyti koreliacines sritis realiame laike [3]. Elektroninėje speklų interferometrijoje vaizdų sekų įrašymui, jų analizei, filtravimui, koreliacinių sričių išryškėjimui bei jų transformacijai į kiekybines objekto deformacijas naudojama speciali kompiuterinė ir programinė įranga.

Lyginant elektroninės speklų interferometrijos metodą su kitais interferenciniais ar holografiais metodais, išryškėja neabejotini metodo privalumai: galimybė matuoti difuziškai šviesą atspindinčių objektų deformacijas, galimybė atlikti matavimus fizikinio poveikio metu realiame laike (*in situ*), informacijos gavimo bei apdorojimo operatyvumas. Paskutiniu metu elektroninė speklų interferometrija yra naudojama įvairioms medžiagotyrinėms ar inžinerinėms problemoms spręsti. Kaip pavyzdžiai galėtų būti paminėti: techninių paviršių įtempimų bei deformacijų matavimai [4,5], deformuojamo kietojo kūno savybių degradavimo [6] bei paviršiaus mikrostruktūros pokyčių registracija [7], mikroįtrūkių ir kitokių makrodefektų vizualizacija [3,8], objekto linijinių matmenų ir formos kitimo matavimas [9], vibracijų analizė [3,10] ir t.t.

Šiame darbe aprašomos KTU Fizikos katedroje sukurtos speklų interferometrų, skirtų tiek normaliniams, tiek tangentiniams stebimų paviršių taškų poslinkiams matuoti, optinės schemas. Aptariami algoritmai ir procedūros, naudojamos koreliacinių sričių vizualizacijai,

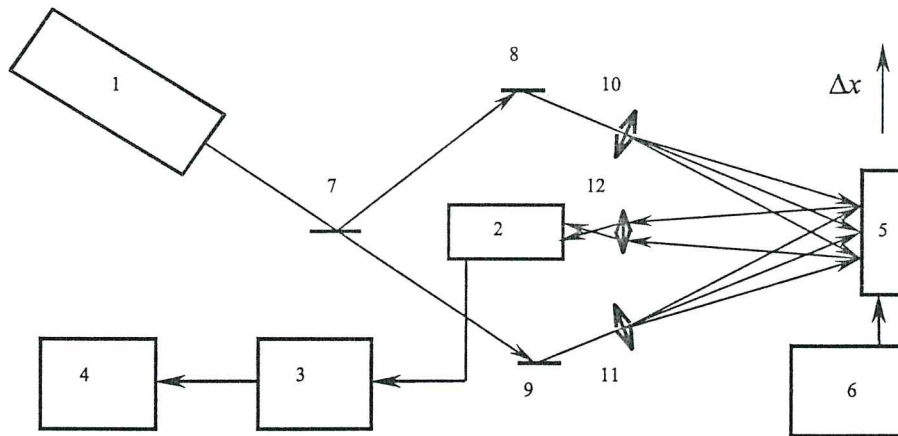
filtravimui, korekcijai bei objekto taškų judėjimo analizei. Metodo galimybės iliustruojamos aliuminio plokštelių šiluminių deformacijų matavimais. Elektroninės speklų interferometrijos metodas sėkmingai pritaikytas kineskopų elektroninės optikos sistemų atskirų elektrodų temperatūrinių deformacijų matavimams katodo įšilimo metu.

1. Eksperimentinė įranga

Kauno technologijos universiteto Fizikos katedroje daugiau kaip per dešimties metų darbo patirtį yra sukurti ir naudojami įvairių tipų lazeriniai interferometrai: dviejų spindulių diferencialinis [11] ir Maikelsono tipo [12,13] interferometrai, skirti joninių – plazminių procesų medžiagos paviršiniame sluoksnyje kontrolei *in situ*, prizminis panoraminis interferometras [14] veidrodinių paviršių mikrodeformacijų matavimui. Paskutiniaisiais metais pradėti darbai elektroninės speklų interferometrijos srityje [15].

Difuziškai šviesą sklaidančių objektų paviršių mikrodeformacijų dinamikos matavimams buvo sukonstruoti dviejų tipų elektroniniai speklų interferometrai. Pirmasis – dviejų spindulių interferometras skirtas tangentiniams, o antrasis – normaliniams objekto taškų poslinkiams matuoti. Abiejų tipų sistemos buvo pritaikytos kineskopų elektroninių optinių sistemų (EOS) elektrodų deformacijų matavimams kineskopo katodo įkaitimo metu (*in situ*).

Pirmojo tipo interferometro struktūrinė schema pateikta 1.1 pav.



1.1. pav. Dviejų spindulių interferometro struktūrinė schema:

- 1 – lazeris; 2 – video kamera; 3 – kadru griebiklis; 4 – kompiuteris;
- 5 – tiriamasis objektas; 6 – kaitinimo šaltinis; 7 – šviesos daliklis;
- 8, 9 – veidrodžiai; 10, 11 – lęšiai; 12 – objektyvas

Kaip koherentinės šviesos šaltinis interferometre naudojamas He-Ne lazeris 1. Tiriamasis objektas 5 apšviečiamas dviem koherentinės šviesos pluoštais, kurie formuojami šviesos dalikliu 7, veidrodžiais 8 ir 9, lęšiais 10 ir 11. Kaitinimo šaltinis 6 buvo naudojamas interferometro bei programinės įrangos testavimo metu, kada buvo matuojamos aliuminio plokštelių, kaip testinių elementų, temperatūrinės deformacijos. EOS tyrimo metu – tai katodo kaitinimo šaltinis. Objekto paviršiaus speklogramos objektyvo 12 pagalba projektuojamos į didelės skiriamosios gebos video kameros SONY (SPT-M308CE) šviesai jautrią matricą. Iš kameros video standarte gaunamos informacijos keitimui į skaitmeninį pavidalą ir perdavimui į kompiuterį 4 naudojamas Data Translation firmos kadru griebiklis DT-3155 3. Visa optinė

schema surinkta ant holografinio stalo, kurio 1,5 tonos plokštė pašalinių vibracijų sumažinimui matavimo metu pakeliama ant oro pagalvių. Mechaninis optinės sistemos stabilumas ir apsauga nuo vibracijų labai svarbi atliekant matavimus *in situ*.

Regos lauką ir speklų dydį apsprendžia objektyvo 12 židinio nuotolis ir apertūra. Darbo metu objektyvo diafragma nustatoma taip, kad speklų diametras keletą kartų viršytų kameros matricos elemento dydį. Pirmieji interferometro bandymai atlikti su HELIOS-44-2 objektyvu, parinkus kamerą ir objektyvą jungiančių žiedų plotį.

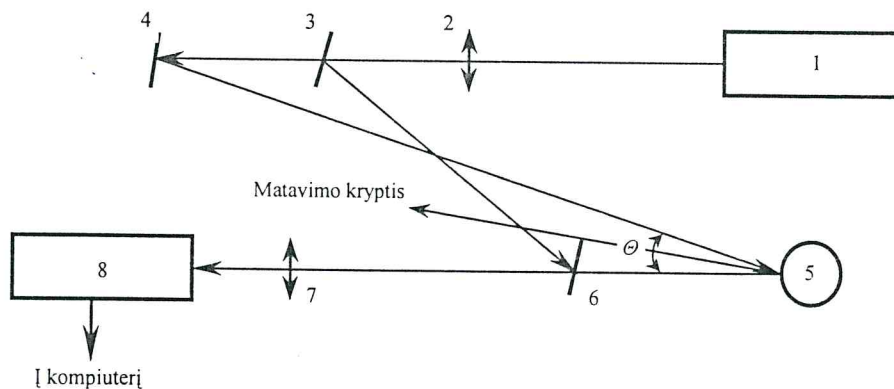
1.1 pav. pateiktos schemas interferometras yra skirtas poslinkiams objekto plokštumoje matuoti. Matavimo kryptis - statmena stebėjimo kryptiai (brėžinyje pažymėta Δx). Interferometro skiriamoji geba pagal poslinkį apsprendžiama kampu tarp apšviečiančių spindulių. Ją apibūdina poslinkis d_r , atitinkantis erdvinį (arba laikinį) intervalą tarp dviejų gretimų interferencinių juostų, apskaičiuojamas pagal formulę:

$$d_r = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)}; \quad (1.1)$$

čia: λ - šviesos bangos ilgis (mūsų atveju $\lambda = 0,63 \mu\text{m}$); θ - kampas tarp apšviečiančių spindulių.

Matavimo metu d_r buvo lygus $2,06 \mu\text{m}$. Pritaikius kompiuterinius interferogramų apdorojimo metodus buvo atliekami poslinkių skaičiavimai 1/8 interferencinės juostos tikslumu, tai sudarė $0,26 \mu\text{m}$.

Interferometro skirto normaliniams objekto taškų poslinkiams matuoti optinė schema pateikta 1.2 pav.



1.2. pav. Interferometro normaliniams poslinkiams matuoti optinė schema:

1 – lazeris; 2 – lęšis; 3 ir 6 – šviesos dalikliai; 4 – veidrodis;
5 – tiriamasis objektas; 7 – objektyvas; 8 – video kamera

Šioje schemoje lazeris 1 per lęšį 2 ir veidrodį 4 koherentine šviesa apšviečia tiriamąjį objektą 5 (mūsų atveju EOS). Speklų interferencijai gauti šviesos daliklių 3 ir 6 pagalba suformuojamas atraminis šviesos pluoštas. Objekto paviršiaus speklų vaizdas ir atraminis šviesos pluoštas per objektyvą 7 projektuojami į video kameros 8 matricą. Video kameros signalai apdorojami tokia pat kompiuterine sistema kaip ir anksčiau aprašytame interferometre. Matuojant kineskopų elektroninės optikos sistemų temperatūrines deformacijas, kaip šviesos daliklis 6, buvo panaudotos EOS stiklinio cilindro sienelės. Tai labai padidino interferometrines sistemos stabilumą ir atsparumą triukšmams bei vibracijoms.

Pasirinktos konfigūracijos interferometras jautrus objekto taškų poslinkiams rodykle parodyta kryptimi ("Matavimo kryptis"). Jautrumas, apsprendžiamas poslinkiu d_n , atitinkančiu intervalą tarp dviejų gretimų interferencinių juostų, apskaičiuojamas pagal formulę:

$$d_n = \frac{\lambda}{2 \cos(\theta/2)}; \quad (1.2)$$

čia θ - kampas tarp apšvietimo ir stebėjimo krypčių.

Mūsų atveju šis kampas sudarė tik keletą laipsnių ir $d_n = 0,32 \mu\text{m}$.

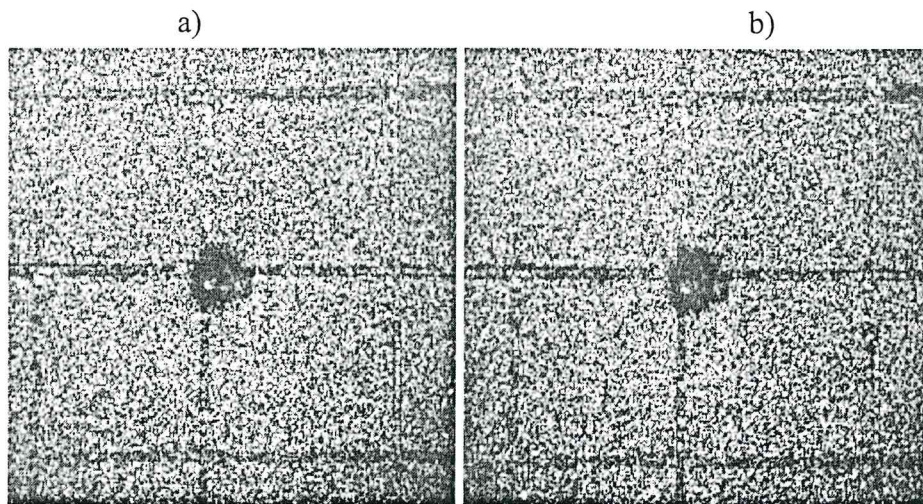
Interferometras normaliniams poslinkiams matuoti buvo panaudotas specialiai pagamintų bandinių matavimams. Šioms EOS buvo nuimti fokusavimo elektrodai ir padidintos kiaurymės greitinimo elektrode. Be to pati sistema buvo pasukta skersai stiklinio cilindro. Tai įgalino pro skirtingo diametro kiaurymės greitinimo elektrode ir moduliatoriuje stebėti katodo, moduliatoriaus ir greitinimo elektrodo judėjimą tuo pačiu metu ir matuoti jų poslinkius stiklinio cilindro sienelių bei vienas kito atžvilgiu *in situ*.

2. Kompiuterinis speklogramų apdorojimas

2.1. Interferencinių juostų gavimas

Interferometrinės sistemos bandymų metu, kaip testinis objektas, buvo panaudota aliuminio plokštelė $4 \times 4 \times 1$ cm su 4 mm diametro 10 W galios kaitinimo elementu centre [15]. Įjungus kaitinimą, aliuminio plokštelė pradeda deformuotis (plečiasi). Plokštelės išildymo metu, tam tikrais laiko intervalais (minimalus intervalas, kurį leidžia mūsų kompiuterinė įranga – 170 ms), į kompiuterio atmintį matricių pavidalu užrašomos plokštelės paviršiaus speklogramos. 2.1a ir 2.1b pav. parodytos dvi skirtingais laiko momentais užfiksuotos speklogramos.

Vizualiai šios speklogramos beveik niekuo nesiskiria, tačiau kiekvienoje iš jų yra informacija apie paviršiaus būseną skirtingais momentais. Palyginus šias speklogramas, panaudojant kompiuterinius apdorojimo metodus, gaunama informacija apie paviršiaus taškų judėjimą dėl temperatūrinių deformacijų.



2.1 pav. Tiriamo objekto paviršiaus speklogramos:

a) – pradiniu momentu; b) – po 150 sekundžių kaitinimo

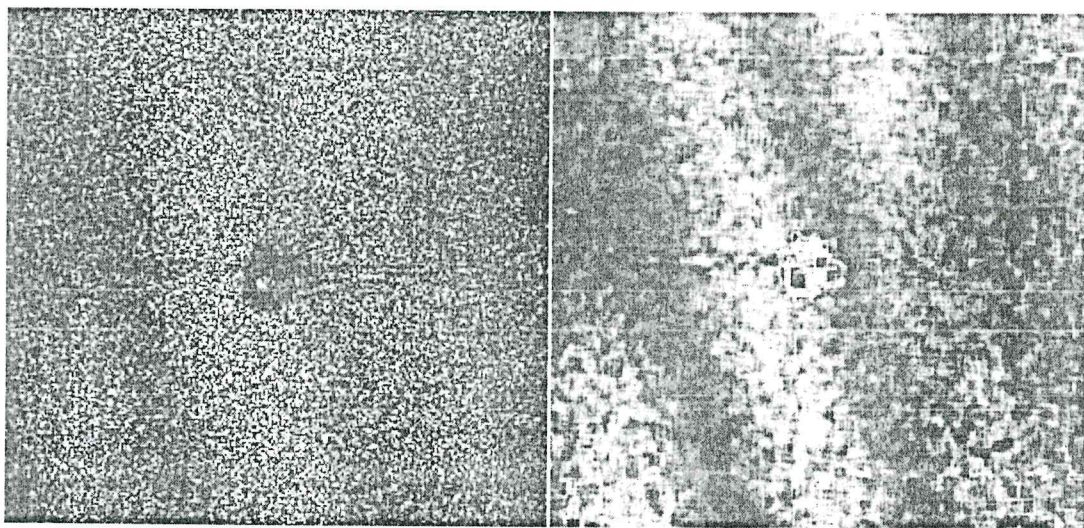
Iš dviejų skirtingu metu gautų, speklogramų interferencinių juostų (koreliacinių sričių) vizualizacijai išbandyti du metodai:

Matricų skirtumo metodas. Vienos, matricos pavidale užrašytos, speklogramos elementai atimami iš kitos speklogramos matricos atitinkamų elementų. Jei pirmąją speklogramą aprašo matrica A , o antrąją – B , tai jų skirtumas aprašomas matrica C , kurios taškai:

$$C_{ij} = |B_{ij} - A_{ij}|; \quad (2.1)$$

$$i \in [1, 768], j \in [1, 576].$$

Gautoje matricoje išryškėja interferencinės juostos pavaizduotos 2.2 pav.



2.2 pav. Interferencinės juostos, gautos matricų skirtumo metodu

2.3 pav. Interferencinės juostos gautos koreliaciniu metodu

Koreliacinis metodas. Speklogramos matricoje A išskiriamos sritys M , o matricoje B - sritys N , kurių taškai:

$$M_{k,l} = A_{i+k-n, j+l-n}; \quad (2.2)$$

$$N_{k,l} = B_{i+k-n, j+l-n}; \quad (2.3)$$

$$k \in [1, 2n], l \in [1, 2n],$$

o $n = 10 \div 30$ matricos taškų ir parenkamas atsižvelgiant į kameros skiriamąją gebą ir speklo tankį bei dydį, kurią apsprendžia objektyvo apertūra ir židinio nuotolis. Gaunama nauja matrica C , kurios taškai aprašomi:

$$C_{ij} = \left\{ (M_{k,l} - \langle M \rangle) \cdot (N_{k,l} - \langle N \rangle) \right\} \frac{1}{\sigma_M \sigma_N} \quad (2.4)$$

Trumpai aptarsime išraiškoje (2.4) panaudotą simboliką:

$\langle X \rangle$ - aritmetinis matricos X , kurios dydis ($t \times z$), narių vidurkis, kuris skaičiuojamas taip:

$$\langle X \rangle = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^z \frac{X_{i,j}}{t \cdot z}; \quad (2.5)$$

$\{X\}$ - aritmetinis matricos $X (t \times z)$ narių su svorio koeficientais vidurkis:

$$\{X\} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^z \frac{K_{i,j}}{C_0} X_{i,j}; \quad (2.6)$$

čia K – svorio koeficientų matrica, C_0 – normavimo konstanta:

$$C_0 = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^z K_{i,j}. \quad (2.7)$$

Nagrinėjama atveju $K_{a,b}$ apskaičiuojami pasinaudojant normalinio pasiskirstymo dėsnium:

$$K_{i,j} = \exp \left[- \frac{(i-m)^2 + (j-m)^2}{2\sigma_K^2} \right]; \quad (2.8)$$

čia m – vidurinis srities taškas, σ_K - dispersijos dimensiją turinti konstanta, kuri parenkama eksperimentiškai (mūsų atveju $\sigma_K = n/4$). Didinant σ_K , $\{X\}$ artėja prie $\langle X \rangle$, todėl mažėja filtravimo kokybė. Mažinant σ_K gaunamas geresnis triukšmo filtravimas, bet reikia imti didesnes sritis M ir N (didinti n), dėl to mažėja skaičiavimo sparta. Dydžių M ir N dispersiją apskaičiuojame taip:

$$\sigma_M = \langle (M_{k,l} - \langle M \rangle)^2 \rangle \quad (2.9)$$

$$\sigma_N = \langle (N_{k,l} - \langle N \rangle)^2 \rangle \quad (2.10)$$

Koreliaciniu metodu gautos matricos C vaizdas pateiktas 2.3 pav.

Pirmojo metodo privalumas – didelis tikslumas, greitis ir algoritmo paprastumas. Trūkumas – išskyla problemų, jei gaunant speklogramas objektas buvo netolygiai apšviestas, arba nevienodas paviršiaus atspindžio koeficientas. Tada tikslinga kompensuoti netolygų apšvietimą. Toliau būtina filtruoti išlikusį speklių triukšmą.

Antrasis metodas yra keletą kartų lėtesnis. Mažos sritys koreliacijos koeficientams rasti netinka – gaunamas labai didelis koeficientų išsibarstymas. Didinant sričių matmenis, rezultatai gerėja, bet skaičiavimo greitis ir galimų išskirti interferencinių juostų skaičius mažėja. Geresni rezultatai gaunami, jei prieš randant interferencines juostas koreguojamas speklogramų taškų intensyvumų pasiskirstymas. Šiuo būdu gautas rezultatas nebeturi speklių triukšmo – jo triukšmas kitokio pobūdžio, bet jam filtruoti naudojami tie patys metodai kaip ir speklių triukšmui. Didelis metodo privalumas – atsparumas netolygiam apšvietimui, todėl jo lėtumas pateisinamas – dažniausiai nebereikia kompensuoti apšvietimo netolygumo.

2.2. Netolygaus objekto apšvietimo kompensavimas, pradinių speklogramų taškų šviesio pasiskirstymo koregavimas

Pradinėse speklogramose matomas netolygus objekto apšvietimas. Jis pasireiškia ir gautame matricų skirtume, dėl ko mūsų bandyme aiškiai išsiskiria tik dvi vidurinės interferencinės juostos (2.2 pav.). Kompensavus šį defektą supaprastėja tolesnė rezultato analizė padidėja gauto rezultato patikimumas.

Pirmiausia skirtuminis vaizdas stipriai “suliejamas” – šiam tikslui pagal greitį ir kokybę labiausiai tinka vidurkinimas su taškų svorio koeficientais pagal Gauso skirstinį. Interferogramos matricoje C išskiriama matrica M , kurios taškai aprašomi kaip (2.6), tačiau

“suliejimo” atveju $n = 60\div 100$. Gaunamas apšvietimo intensyvumo pasiskirstymas tiriamajame paviršiuje aprašomas matricos F taškais

$$F_{i,j} = \{M\}. \quad (2.11)$$

Toliau kiekvieno skirtuminio vaizdo taško vertė $C_{i,j}$ dalinama iš to taško vidutinio apšvietimo vertės:

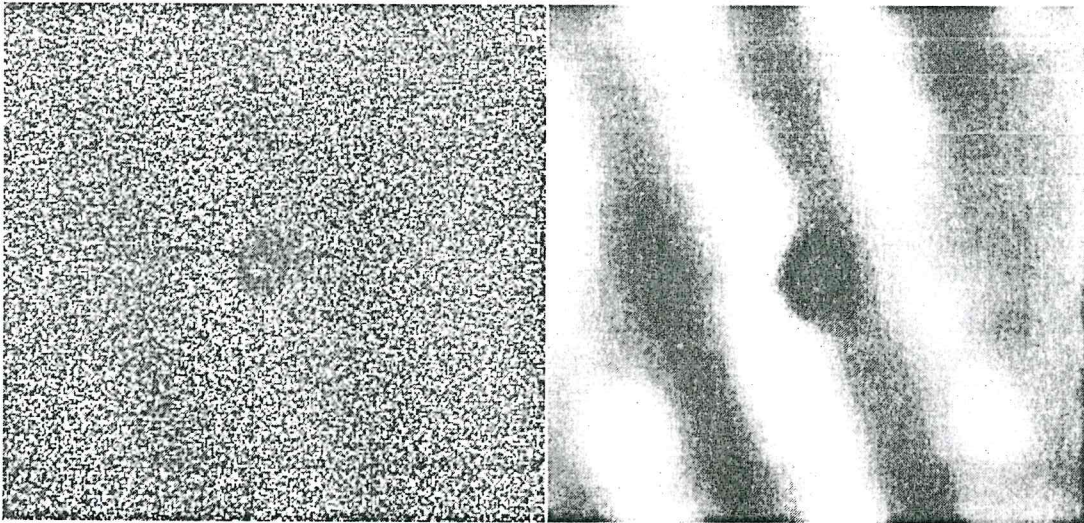
$$D_{i,j} = \frac{C_{i,j}}{F_{i,j}}. \quad (2.12)$$

Gaunamas vaizdas su kompensuotu apšvietimo netolygumu aprašomas matricos D taškais. Galima kompensuoti ir pradinių speklogramų apšvietimą, tačiau patirtis parodė, kad tai daryti nėra tikslo, nes gauti rezultatai praktiškai nesiskiria, o skaičiuojama ilgiau.

Kompensavimo kokybė priklauso nuo tinkamai parinkto “suliejimo” laipsnio (jį apsprendžia skaičius n). Pernelyg dideliu “suliejimo” laipsniu gautas apšvietimo pasiskirstymas tik iš dalies kompensuoja jo netolygumą speklogramų skirtume, mažas suliejimo laipsnis mažina kontrastą tarp interferencinių minimumų ir maksimumų, o speklų triukšmas išlieka.

Interferencinių juostų vaizdas, atlikus apšvietimo netolygumo kompensavimą parodytas 2.4 pav. Be dviejų interferencinių juostų, išskiriamų bandinio centre (2.2 pav.), išryškėja dar dvi – bandinio kraštuose, kur apšvietimas buvo silpnesnis.

Pažymėtina, kad autorių siūlomas, išbandytas ir literatūroje neaptiktas netolygaus apšvietimo kompensavimo būdas gana efektyvus kai interferometre naudojamas nedidelės galios lazeris, o norima apžvelgti didesnę tiriamo objekto paviršiaus plotą ir ypač, jei paviršius yra netolygiai arba stipriai sugeriantis šviesą.



2.4 pav. Interferencinės juostos kompensavus apšvietimo netolygumą (speklų triukšmas nefiltruotas)

2.5 pav. Filtruotos interferogramos vaizdas

Prieš “suliejimo”, o dažnai ir prieš tolimesnes procedūras (jei svarbi skaičiavimo sparta) skirtuminio vaizdo matricą galima sumažinti 2 – 4 kartus (suvidurkinant 2×2 – 4×4 dydžio sritis).

Pritaikius koreliacijos koeficientų metodą, interferencinės juostos geriau išskiriamos, jei prieš jas išskiriant koreguojamas speklogramų taškų šviesio pasiskirstymas.

Geresni rezultatai gaunami, jei pradinių speklogramų taškų šviesio skirstiniai yra tolygūs arba artimi tolygiesiems. Tai nesunkiai pasiekama perskaičiuojant taškų šviesius remiantis pradiniu jų pasiskirstymu. Veiksmas atliekamas greitai, o rezultatas žymiai pagerėja todėl jį verta atlikti prieš randant abipusę pradinių speklogramų koreliaciją.

Taškų šviesio korekcija sumažina rezultato iškraipymus (atpažįstant interferencines juostas didesniu nei $1/8$ periodo tikslumu). Šį veiksma verta atlikti, jei įrašant speklogramas buvo blogai parinkti įrašomo vaizdo šviesis ir kontrastas, bandinys buvo netolygiai apšviestas arba yra didelių bandinio paviršiaus atspindžio koeficiento netolygumų. Kadangi kompiuteriniais metodais sunku įvertinti speklogramų kokybę prieš jas įrašant į kompiuterio atmintį, o korekcija kokybiškoms speklogramoms nekenkia ir atliekama labai greitai (lyginant su tarpusavio koreliacijos koeficientų radimu), patartina šį veiksma atlikti visada.

2.3 Speklų ir kitokio triukšmo filtravimas

Iš speklogramų gautą interferencinį vaizdą būtina filtruoti. Tam tinkamiausi šie trys būdai:

Aproksimacija dviejų kintamųjų funkcija. Geriausi rezultatai ir patenkinamas skaičiavimo greitis gaunami aproksimuojant atskiras speklogramos sritis dviejų kintamųjų laipsninėmis eilutėmis. Gaunami kokybiškesni rezultatai, nei kitais būdais, bet dėl skaičiavimo lėtumo ir sudėtingumo šį būdą ne visada tinka praktiniams taikymams.

Aritmetinis vidurkinimas. Išskiriama $n \times n$ ($n = 10 \div 30$) matricos D sritis M ir randamas jos aritmetinis vidurkis. Taip į sritis dalinamas visas interferogramos su išlikusiu triukšmu plotas. Iš gautų vidurkių sudaroma matrica G , kurios taškai

$$G_{i,j} = \langle M \rangle. \quad (2.13)$$

Ši matrica ir yra filtruotas interferencinis vaizdas. Imant mažas matricos sritis M gaunama nelabai kokybiška interferograma. Geresni rezultatai gaunami didinant vidurkinamas sritis, bet didinant sritis mažėja galimų išskirti interferencinių juostų skaičius ir kontrastas. Vienintelis būdo privalumas – gana didelė sparta.

Aritmetinis vidurkinimas su svorio koeficientais. Būdas analogiškas antrajam, tik srities vidurkis skaičiuojamas, suteikiant atskiriems taškams svorio koeficientus, kurie priklauso nuo taškų atstumo iki srities centro. Panašiai kaip koreliaciniu metodu išskiriant interferencines juostas, gaunama matrica G , kurios taškai

$$G_{i,j} = \{M\}. \quad (2.14)$$

Tokiu būdu gautas rezultatas gerokai tolygesnis, bet filtravimo kokybė taip pat priklauso nuo sričių dydžio, kurias didinant “suliejami” ne tik speklai, bet ir interferencinės juostos. Lyginant su antru būdu, gali būti imamos mažesnės vidurkinamos sritys, o gaunamas geriau filtruotas vaizdas. Šis būdas gerokai lėtesnis už antrąjį, bet gaunami žymiai geresni rezultatai. Dėl greičio ir kokybės šis būdas yra labiausiai pritaikomas. Dar geresni rezultatai gaunami naudojant trimates sritis, kai analizuojama kadru seką (trečias matmuo – laikas), bet skaičiavimas dar keletą kartų sulėtėja. Taikant šį būdą sumažėja ir kitokio pobūdžio

speklogramų iškraipymų – dėl atsitiktinės vibracijos ar panašiai. Norint taikyti trimatį vidurkinimą, speklogramos turi būti įrašytos kuo didesniu dažniu (kadru per sekundę skaičiumi). Susiduriama su informacijos įrašymo į kompiuterio atmintį spartos problema.

2.5 pav. pateiktas interferogramos pavyzdys gautas, filtruojant speklogramų skirtumą su kompensuotu netolygiu apšvietimu. Filtruota taikant vidurkinimą su Gauso koeficientais (dvimatis variantas).

Atskirais atvejais gali būti taikomi ir visų aprašytų būdų vienmačiai arba trimačiai atvejai.

2.4. Interferogramos eilučių normavimas, bandinio taškų poslinkio radimas

Iš skirtingais laiko momentais užfiksuotų judančio paviršiaus speklogramų vienokiu ar kitokiu metodu (koreliaciniu, arba matricų skirtumo su netolygaus apšvietimo kompensacija ir filtravimu) gaunamos interferencinės juostos, pagal kurių tankį ir išsidėstymą galima spręsti apie paviršiaus atskirų taškų poslinkį.

Šiame darbe (tiriant šiluminių deformacijų laukus) gautos interferogramos buvo analizuojamos po vieną eilutę. Kai pasirinktos konstrukcijos interferometro optinė sistema (1.1 pav.) jautri bandinio deformacijoms tik viena kryptimi, pakanka analizuoti tik lygiagrečias šiai kryptiai eilutes (nagrinėjamoju atveju - horizontalias).

Atskirų bandinio taškų poslinkiai vienas kito atžvilgiu buvo skaičiuojami nustatant interferencinių juostų skaičių tarp jų ir įvertinant interferometro jautrumą, žiūrėkite (1.1). Jeigu stebimame paviršiuje matomos tik kelios interferencinės juostos, tai būtina nustatyti juostų skaičių ne mažiau kaip $1/4$, ar net $1/8$ tikslumu. Tam tikslui interferogramų taškų eilutės dar buvo papildomai apdorojamos.

Kompiuterinio ekstrapoliavimo metodais eilutė pratęsiama į abu galus. Veiksmą būtina atlikti, jei eilutė kerta mažai interferencinių juostų (mažiau nei 2). Po to surandami eilutės ir jos tęsinių minimumai, kurie sujungiami tolygia kreive. Analogiškas veiksmas atliekamas su eilutės maksimumais. Randamas aritmetinis vidurkis tarp minimumų ir maksimumų kreivių, kurio atžvilgiu centruojama pradinė eilutė. Centruotos eilutės taškų vertės dalinamos iš vidutinės kitimo amplitudės, kurią apibrėžia minimumus ir maksimumus gaubiančios kreivės. Normuotos eilutės taškų vertės kinta intervale $[-1;1]$.

Normuojant eilutes, galimos klaidos, atsirandančios dėl nekokybiško speklų triukšmo filtravimo, mažo interferencinių juostų kontrasto, netolygaus paviršiaus apšvietimo arba nevienodo atskirų paviršiaus sričių atspindžio bei sugerties koeficientų. Todėl šio proceso metu, pagal tam tikrus kriterijus, atmetamos arba koreguojamos klaidinančios eilutės. Koreguojamos arba atmetamos eilutės, kuriose žymiai mažesni, arba didesni atstumai tarp ekstremumų, lyginant su gretimomis eilutėmis. Tai blogai nufiltruoto speklų triukšmo, tiriamo paviršiaus defektu ar mažo interferencinių juostų kontrasto pasekmė. Priklausomai nuo pradinių speklogramų kokybės, interferencinio vaizdo filtravimo lygio ir atmetimo kriterijų, normuoti pavyksta 50 – 95 % interferogramos eilučių. To visiškai pakanka kiekybiškam bandinio deformacijų lauko įvertinimui, nes pilnas interferencinis vaizdas, gautas atlikus pirminį speklogramų apdorojimą, mūsų atveju sudarytas iš 576 eilučių, todėl, praradus net daugiau kaip pusę jų, dar turime virš 200 informatyvių eilučių. Pabrėžtina, kad su vidutiniškos kokybės interferogramos eilutėmis atlikus ką tik aprašytus veiksmus (ypač atranką) gaunamų rezultatų patikimumas artėja prie tokio, koks gaunamas dirbant su vienetinio kontrastingumo interferogramomis.

Normuota eilutė gali būti išreikšta taip:

$$I_i = \sin\left(\frac{2\pi}{d} \Delta x_i\right); \quad (2.15)$$

čia I_i – i -ojo eilutės taško vertė; Δx_i – i -ąjį eilutės tašką atitinkančio bandinio taško poslinkis pradinio ($i = 0$) taško atžvilgiu; d – interferometro jautrumą apibūdinantis dydis (žiūrėkite (1.1) arba (1.2)). Mūsų eksperimento atveju buvo ieškomi funkcijos $\left|I_i - \frac{\sqrt{2}}{2}\right|$

ekstremumų taškai, t.y. eilutės taškai, kuriuose I_i įgyja vertes 0, ± 1 ir $\pm \sqrt{2}/2$. Tai įgalino skaičiuoti interferencines juostas 1/8 tikslumu.

Kiekvienoje atranką praėjusioje eilutėje j surandami taškai $x_1 \dots x_{m_j}$, kurių poslinkis keičiasi kas $d/8$. Centrinio (mūsų atveju centre yra šilumos šaltinis) eilutės taško poslinkis prilyginamas 0 (šią operaciją vadiname eilutės centravimu) ir jo atžvilgiu skaičiuojami kitų taškų poslinkiai Δx_{m_j} . Visame interferogramos plote randami taškai $(x_1, y_1, \Delta x_1) \dots$

$(x_k, y_k, \Delta x_k)$; čia $k = \sum_{j=1}^{j_{\max}} m_j$, o j_{\max} – atranką praėjusių eilučių skaičius. Šie taškai

sujungiami į vientisą paviršių $\Delta x = f(x, y)$. Ši funkcija aprašo kiekvieno bandinio paviršiaus taško poslinkį.

2.5. Atskirų bandinio taškų judėjimo sekimas

Tiriant deformacijas šiuo metodu, nebūtina gauti koreliacines juostas. Bandinys gali būti sudėtingos formos, su tarpais tarp atskirų detalių ar veidrodiniais paviršiais. Galima sekti vienu bandinio detalių judėjimą kitų atžvilgiu. Būtent tokio tipo objektas yra kineskopo elektroninės optikos sistema.

Ijungus EOS katodų, kaitinimą sistemos elektrodai pradeda deformuotis. Šio proceso metu į kompiuterio atmintį maksimaliu greičiu (6 kadrai per sekundę), kuri apriboja turima kompiuterinė įranga, įrašoma speklogramų seka 768×576 matricų pavidalu. Iš speklogramų matricų sekos išskiriamos $n \times n$ paviršiaus sritys, taškų, kurių poslinkis mus domina, aplinkoje. Vieno taško judėjimui apibudinti gaunama $m \times n$ dydžio matricų A_m (m – speklogramų skaičius sekoje).

Visos A_m matricos lyginamos tarpusavyje – randami visų jų tarpusavio koreliacijos koeficientai

$$M_{i,j} = \frac{\langle (A_i - \langle A_i \rangle) \cdot (A_j - \langle A_j \rangle) \rangle}{\sigma_{A_i} \sigma_{A_j}}; \quad (2.16)$$

čia $i = 1..m$ ir $j = 1..m$.

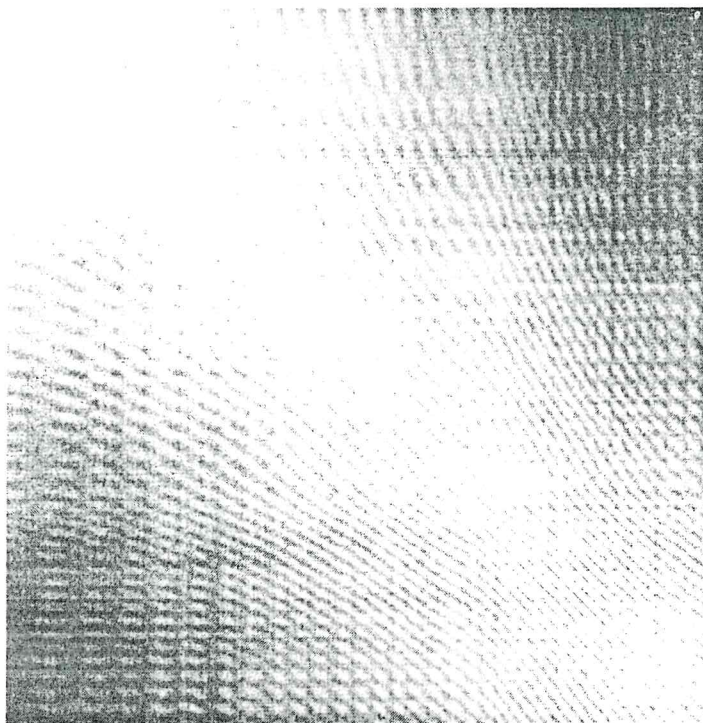
Gautoje koreliacijos koeficientų matricoje M yra pilna informacija apie taško judėjimą. Tipiškas tokios matricos vaizdas pateiktas 2.6 pav. Vizualiai apie taško, kurio aplinkai sudaryta ši matrica, judėjimo greitį galima spręsti pagal šviesių ir tamsių juostų tankį.

Kompiuteriu skaičiuojant taško poslinkius laike, iš matricos M išskiriamos eilučių (dėl simetrijos galima ir stulpelių, nes matricai būdinga savybė – $M_{i,j} = M_{j,i}$) dalys $N_j = M_{i-z,j} \dots M_{i+z,j}$. Kai z nedidelis ($z \approx 15$), tai $|F\{N_i\}| \approx |F\{N_j\}|$, čia $F\{N\}$ – greita Furjė transformacija. $F\{N_j\}$ turi ryškų maksimumą, kuris, esant fiksuotam i , išlieka toje pačioje

vietoje pagal dažnį nepriklausomai nuo j . Tarkime, kad tai yra b -tasis $F\{N_j\}$ koeficientas B_j . Randamas šių koeficientų argumentas

$$F_j = \arctg\left(\frac{\text{Im}(B_j)}{\text{Re}(B_j)}\right). \quad (2.17)$$

F_j priklausomybė nuo j primena "pjūklinę" funkciją, kurios vertės kinta intervale nuo $-\pi$ iki π . Atlikus F_j korekciją (pašalinus trūkius ir sujungus į tolygią kreivę), gaunamas rezultatas proporcingas taško poslinkiui.



2.6 pav. Koreliacijos koeficientų matricos vaizdas

Taško judėjimo krypties nustatymui buvo atliekami papildomi eksperimentai, dirbtinai stumiant bandinį pasirinkta kryptimi, arba judinant interferometro elementus. To pasėkoje žinomu dėsnio keitėsi apšviečiančių spindulių optiniai keliai, kas leido nustatyti tiriamo objekto taškų judėjimo kryptį.

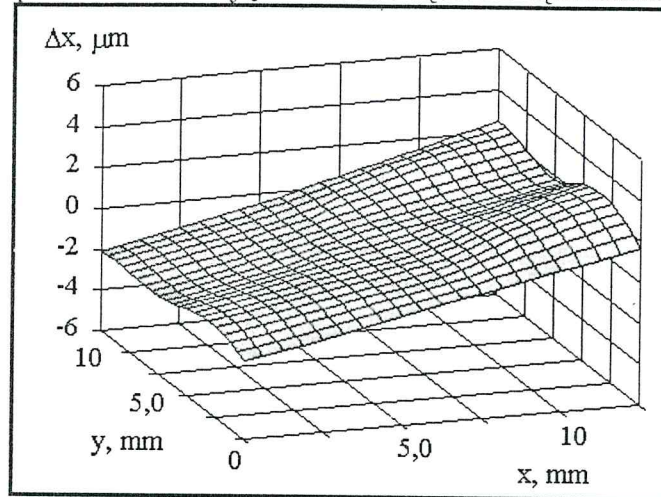
3. Eksperimentų rezultatai

3.1. Temperatūrinių deformacijų matavimas

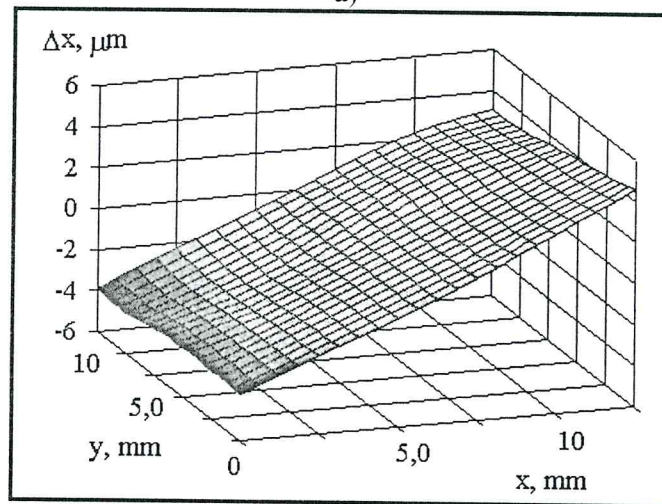
Aprašytas metodas ir algoritmai patikrinti, matuojant aliuminio plokštelės temperatūrines deformacijas [15]. Matavimams buvo panaudota $4 \times 4 \times 1$ cm aliuminio plokštelė su 4 mm diametro 10 W galios kaitinimo elementu centre. Įjungus kaitinimą, plokštelės išildymo metu kas 5 s į kompiuterio atmintį matricių pavidalu užrašomos plokštelės paviršiaus speklogramos.

Naudojant 2.1-2.4 skirsniuose aprašytą metodiką buvo apskaičiuotos plokštelės deformacijos interferometro matavimo kryptimi Δx (1.1 pav.). Deformacijų dinamika x ašies

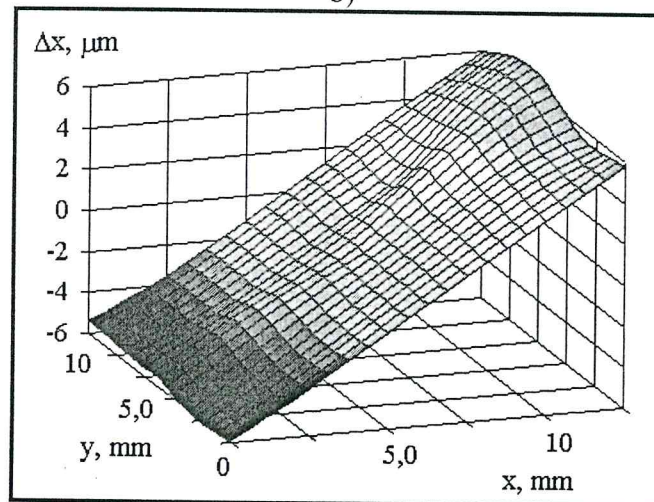
kryptimi demonstruojama 3.1 pav. 3.1a pav. pavaizduotas deformacijų laukas 75-tą kaitinimo sekundę. 3.1b ir 3.1c pav. – deformacijų laukas 150-tą ir 225-tą kaitinimo sekundę.



a)



b)



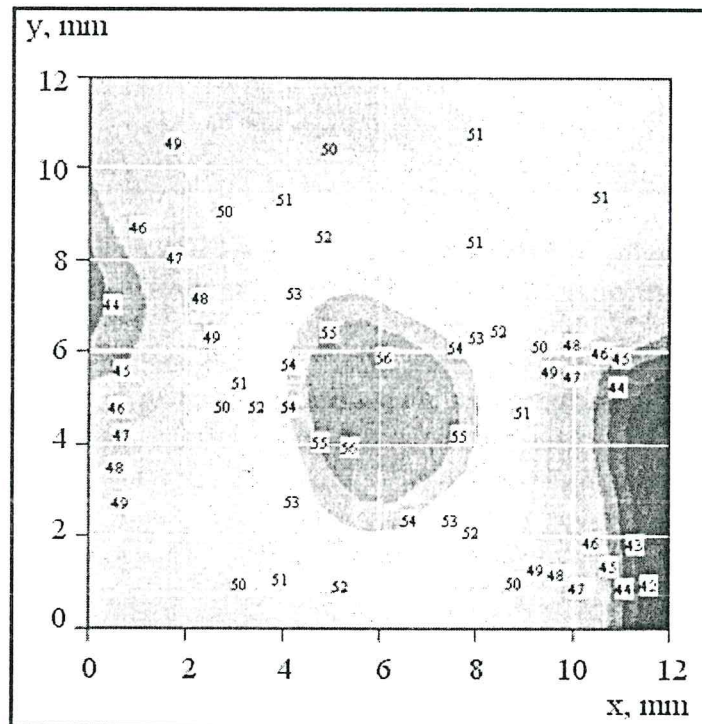
c)

3.1 pav. *Aluminio plokštelės temperatūrinės deformacijos x kryptimi:*

- a) – 75-tą kaitinimo sekundę; b) 150-tą kaitinimo sekundę;
 b) c) – 225-tą kaitinimo sekundę

3.2. Temperatūros pasiskirstymo tyrimas

Mūsų eksperimente bandinio deformacijos sukėlė temperatūros svyravimai. Išmatavus temperatūrinių plokštelės deformacijų lauką ir jį išdiferencijavus ($\frac{d}{dx}\Delta x$), randamas bandinio santykinis pailgėjimas bet kuriame taške (x,y) . Žinant santykinio pailgėjimo pasiskirstymą, medžiagos temperatūrinį plėtimosi koeficientą, Jungo modulį ir pradinę bandinio temperatūrą nesunkiai surandamas temperatūros pasiskirstymo bandinyje laukas. Paprasčiausiai tai atliekama nesudėtingos formos bandiniams. Pavyzdžiui didelėms plonomis plokštelėms, kurių matmenys $a \times b \times d$, o $a > d$ ir $b > d$. Temperatūros pasiskirstymo laukas mūsų testiniam objektui (aliuminio plokštelės su kaitinimo šaltiniu centre) centrinėje dalyje 150-tą kaitinimo sekundę pavaizduotas 3.2 pav.



3.2 pav. Temperatūros pasiskirstymo laukas

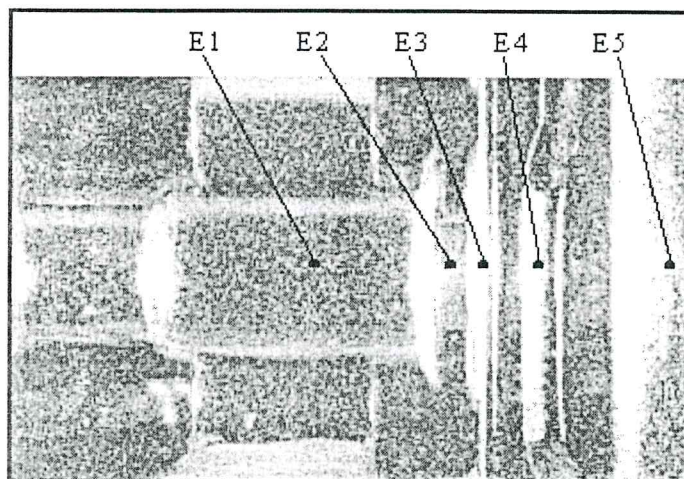
Pateiktas pavyzdys demonstruoja intriferometro galimybes, analizuojant deformacijų, įtempių bei temperatūrų pasiskirstymo laukus.

3.3. Kineskopų EOS temperatūrinės deformacijos

Atlikti AB "Ekranas" gaminamų kineskopų A33 ir A48 elektroninės optikos sistemų elektrodų poslinkių matavimai, įjungus katodų kaitinimą. Tyrimams buvo pagaminti dviejų tipų bandiniai. EOS elektrodų poslinkių skaičiavimui buvo naudojama atskirų bandinio taškų judėjimo sekimo metodika, aprašyta 2.5 skirsnyje.

Pirmasis tipas – tai bandiniai, kuriuose EOS įmontuota išilgai kineskopo kaklelio (taip kaip realiame kineskope). Šio tipo bandiniams atlikti katodo cilindro E1, modulatoriaus E3, greitinimo E4 ir fokusavimo E5 elektrodų poslinkių išilgai kineskopo ašies *interferometro atžvilgiu* ir E1, E3 ir E4 poslinkių *fokusavimo elektrodo atžvilgiu* matavimai. EOS

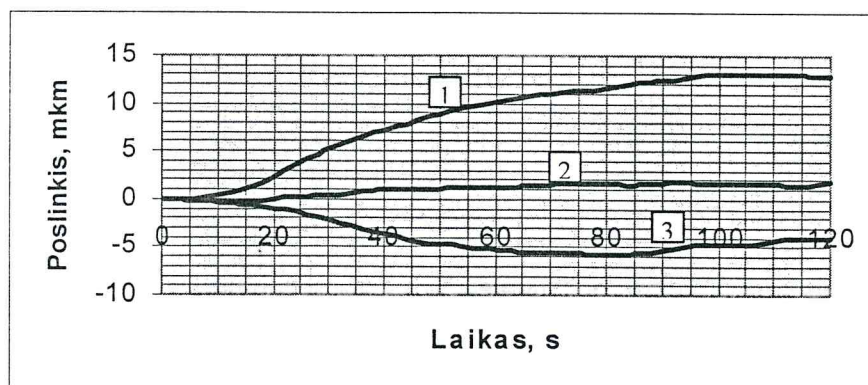
interferometro atžvilgiu buvo lėtai stumiama specialiai sukonstruotu įtaisu tam, kad būtų galima patikimai nustatyti elektrodų judėjimo kryptį. EOS vaizdas su mūsų darbe naudojama elektrodų numeracija pateiktas 3.3 pav. Paveikslėlyje E2 pažymėtas katodas. Šiuose bandiniuose jo beveik nesimato, todėl kokybiškų rezultatų apie paties katodo judėjimą gauti nepavyko.



3.3 pav. EOS vaizdas: E1 – katodo cilindras, E2 – katodas, E3 – modulatorius, E4 – greitinimo elektrodas, E5 – fokusavimo elektrodas

Visuose matavimuose priimta, kad *poslinkis link fokusavimo elektrodo – teigiamas*.

Pirmojo tipo bandinių matavimai buvo atliekami interferometru, kurio schema pateikta 1.1 pav. Buvo matuojama, įjungus nominalią katodo kaitinimo įtampą (6,3 V), 120 sekundžių nuo įjungimo momento. Per šį laikotarpį buvo užrašoma po 700 speklogramų, kurių kiekvienos apimtis 433 KB.

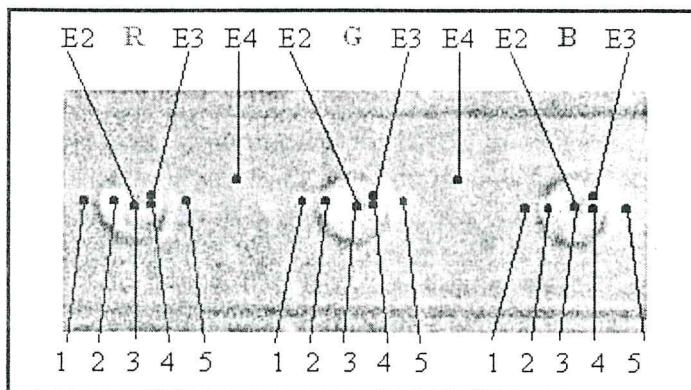


3.4 pav. EOS elektrodų (1 – katodo cilindro; 2 – modulatoriaus; 3 – greitinimo elektrodo) poslinkiai fokusavimo elektrodo atžvilgiu

Vienos iš tirtų EOS tipiškas katodo cilindro, modulatoriaus ir greitinimo elektrodo judėjimas fokusavimo elektrodo atžvilgiu grafiškai pavaizduotas 3.4 pav.

Antrojo tipo bandiniai buvo specialiai pagaminti taip, kad būtų galima stebėti visų trijų elektronų prožektorių pačių katodų (E2) judėjimą. Nuo standartinių EOS buvo nuimti fokusavimo elektrodai, padidintos kiaurymės greitinimo elektrode, o pačios sistemos įtvirtintos skersai stiklinio cilindro. Tokios sistemos vaizdas iš fokusavimo elektrodo pusės

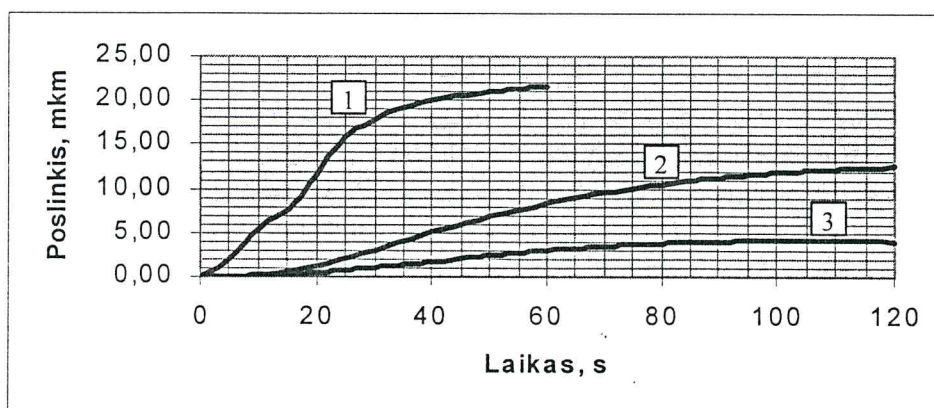
pateiktas 3.5 pav. E2, E3 ir E4 pažymėti katodas, modulatorius ir greitinimo elektrodas. 3.5 pav. pirmame plane matomas visas greitinimo elektrodas. Pro tris apvalias kiaurymes jame matomi trys modulatoriaus fragmentai, o per modulatoriaus kiaurymes stebimi katodų E2 paviršiai.



3.5 pav. "Raudono" (R), "žalio" (G) ir "mėlyno" (B) elektronų prožektorių elektrodų E2, E3 ir E4 vaizdas nuo fokusavimo elektrodo pusės (E2 – katodas, E3 – modulatorius, E4 – greitinimo elektrodas)

Šio tipo bandinių matavimams buvo naudojamas interferometras, kurio schema pateikta 1.2 pav. Kiekvienam elektronų prožektoriui poslinkiai buvo matuojami penkiuose taškuose. 3.5 pav. šie taškai pažymėti skaičiais nuo 1 iki 5. Po du modulatoriaus (2,4) ir greitinimo elektrodo taškus (1,5) ir viename katodo taške (3). Skaičiuojant modulatoriaus ir greitinimo elektrodų poslinkius, dviejų taškų rezultatai buvo vidurkinami. Matavimo metu paaiškėjo, kad įjungus nominalią kaitinimo įtampą (6,3V), katodas pirmąsias 10 sekundžių juda greičiau negu 0,5 $\mu\text{m/s}$. Didesniu už šį greitį judančių detalių poslinkio mūsų naudojama sistema nespėjo patikimai registruoti dėl riboto informacijos įrašymo į kompiuterio atmintį greičio. Todėl katodų judėjimas buvo stebimas, sumažinus kaitinimo įtampą iki 3,5 V. Esant nominaliai kaitinimo įtampai, patikimai buvo registruojami tik modulatoriaus ir greitinimo elektrodų poslinkiai stiklinio cilindro, kuriame skersai įtvirtinta sistema, sienelės atžvilgiu. Šių poslinkių skirtumas davė informaciją apie elektrodų judėjimą vienas kito atžvilgiu EOS ašies kryptimi.

3.6 pav. pateiktos kreivės demonstruoja vienos iš tirtų EOS katodo, modulatoriaus ir greitinimo elektrodų judėjimą stiklinio cilindro sienelės atžvilgiu.



3.6 pav. EOS elektrodų (1 – katodo; 2 – modulatoriaus; 3 – greitinimo elektrodo) poslinkiai stiklinio cilindro sienelės atžvilgiu

4. Rezultatų apibendrinimas

1. Sukonstruoti dviejų tipų elektroniniai speklų interferometrai skirti įvairių objektų paviršiaus taškų normalinių ir tangentinių poslinkių matavimui. Naudojamos optinės interferometrų schemas ir kompiuterinė įranga užtikrino poslinkių matavimą ne mažesniu kaip $0,3 \mu\text{m}$ tikslumu. Sistemos laikinė skiriamoji geba ne mažesnė kaip 200 ms.
2. Sukurti ir su testiniais objektais eksperimentiškai patikrinti algoritmai koreliacinių sričių vizualizavimui, speklų triukšmo filtravimui, netolygaus objekto apšvietimo kompensavimui, bandinio paviršiaus taškų poslinkių ir temperatūros pasiskirstymo laukų skaičiavimui.
3. Sudėtingos geometrinės formos objektų, tokių kaip kineskopo EOS, detalių deformacijų matavimams sukurta originali atskirų taškų judėjimo sekimo metodika.
4. Nustatyta, kad tirtų kineskopų elektroninės optikos sistemų temperatūrinės deformacijos pagrinde vyksta pirmąsias 100 sekundžių. Charakteringi EOS elektrodų poslinkiai fokusavimo elektrodo atžvilgiu sudaro: katodo – virš $20 \mu\text{m}$, katodo cilindro – $(10 \div 15) \mu\text{m}$, modulatoriaus – $(-6 \div -2) \mu\text{m}$ ir greitinančio elektrodo – $(-5 \div +2) \mu\text{m}$ (teigiamais poslinkiais laikomi poslinkiai link fokusavimo elektrodo).

Literatūra

1. М. Франсон, Оптика спеклов. – М.: Мир, 1980. – 171 с.
2. Robert Jones, Catherine Wykes, Holographic and Speckle Interferometry. – Cambridge University Press, 1983.
3. Dr. Ettemeyer Gmb&Co, Seeing invisible. – Neu-Ulm, Germany, 1997, (CD-ROM).
4. T. Pfeifer, H. Mischo, A. Ettemeyer, Z. Wang R. Wegner, Strain/stress measurements using electronic speckle pattern interferometry, in: Proc. SPIE, vol.3520, Three-dimensional Imaging, Optical Metrology and Inspection I, eds K. G. Harding, D. J. Svetkoff, K. Creath, J. S. Harris, 1998, p.262-271.
5. M. J Pechersky, R. F. Miller, C. S. Vikram, Residual stress measurements with laser speckle correlation interferometry, Optical Engineering, 1995, vol.34, No10, p.2964-2971.
6. T. Satoru, Suprapedi, Z. Qinchuan, Speckle interferometry to investigate degradation processes of stressed solid materials, in: Proc. SPIE vol.3407, International Conference on Applied Optical Metrology, eds P. K. Rastogi, F. Gyimesi, 1998, p.400-405.
7. G. Gulker, K. D. Hinsch, Detection of surface microstructure changes by electronic speckle pattern interferometry, Optics and Lasers in Engineering, 1997, vol.26, p.165-178.
8. W. Steinchen, Y. Lian Xiang, G. Kupfer, P. Maeckel, Nondestructive testing of microcracks using digital speckle pattern shearing interferometry, in Proc. SPIE vol.3098, Optical Inspection and Micromasurements II, ed. Ch. Gorecki, 1997, p.528-535.
9. A. Maas, Shape measurement using phase-shifting speckle interferometry, in Proc. SPIE vol.1553, Laser Interferometry IV: Computer-Aided Interferometry, ed. R. J. Pryputniewicz, 1992, p.558-568.
10. S. Sjauskas, Izotropinių kietų kūnų elektroakustiniai tyrimo metodai. – Kaunas, Technologija, 1994, 193 p.
11. L. Puodžiukynas, A. Matiukas, L. Pranevičius, S. Tamulevičius, L. Augulis, Lazerinės interferometrijos sistemų naudojimas jonų sąveikai su kietaisiais kūnais tirti, Lietuvos fizikos rinkinys, 1986, XXVI, Nr.4, p.484-490.

12. Л. Аугулис, Ф. Палюнас, И. Пожела, Б. Ясюленис, Диагностика механических напряжений в твердых телах при ионном облучении, В сб. Физическая электроника. – Вильнюс, 1988, с.69-85.
13. L. Augulis, B. Jasiulionis L. Pranevičius, Development of surface topology during ion sputtering of silicon, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1987, vol.B21, p.608-609.
14. S. Tamulevičius, L. Augulis, G. Laukaitis, L. Puodžiukynas, Techniques for measurements of strain in thin films, Materials Science, 1998, Nr.2(7), p.40-49.
15. S. Tamulevičius, L. Augulis, R. Augulis, V. Zabarskas, Thermal strain measurements using electronic speckle pattern interferometry, Materials Science, 1999, Nr.4(11), p.20-26.