

UNIVERSITATEA AGRARĂ DE STAT DIN MOLDOVA

Cu titlul de manuscris
C.Z.U.: 631.3+539.3

ȘEREMET DUMITRU

**PERFEȚIONAREA METODELOR DE CALCUL AL
AJUSTAJELOR CUPLELOR TRIBOLOGICE RENOVATE CU
MATERIALE ETEROGENE**

**255.02. TEHNOLOGII ȘI MIJLOACE TEHNICE PENTRU INDUSTRIA
PRODUSELOR AGRICOLE**

Rezumat al tezei de doctor în științe ingineresti

CHIȘINĂU, 2022

Teza a fost elaborată în cadrul catedrei „Mentenanța mașinilor și ingineria materialelor”, actualmente „Departamentul Inginerie în Agricultură și Transport Auto”, Universitatea Agrară de Stat din Moldova.

Conducător științific:

Marian Grigore, doctor habilitat, profesor universitar

Referenți oficiali:

Barsuc Alexandru - doctor habilitat, conferențiar universitar, USM

Nastas Andrei - doctor în tehnică, lector universitar, UTM

Componența Consiliului Științific Specializat:

Cerempei Valerian, doctor. habilitat, conferențiar universitar, UASM – președinte al CȘS;

Beșleagă Igor, doctor în inginerie, conferențiar universitar, UASM – secretar al CȘS;

Topală Pavel, doctor. habilitat, profesor universitar USARB - membru al CȘS;

Pațuc Vladimir, doctor în științe fizico-matematice, conferențiar universitar, USM – membru al CȘS;

Gorobeț Vladimir, doctor în tehnică, conferențiar universitar, UASM – membru al CȘS;

Malai Leonid, doctor în tehnică, conferențiar universitar, UASM – membru al CȘS

Susținerea va avea loc la 29 Septembrie 2022, ora 14:00.

în ședința Consiliului Științific Specializat D 255.02-21-35 din cadrul Universității Agrare de Stat din Moldova, pe adresa Chșinău, str. Mircești, 56, facultatea Inginerie Agrară și Transport Auto, sala I-318.

Teza de doctorat și rezumatul pot fi consultate la Biblioteca Republicană Științifică Agricolă UASM, pagina web a UASM: // <http://uasm.md/ro/sustinerea-tezelor> și pe pagina web ANACEC (www.cnaa.md).

Rezumatul a fost expediat la August 2022.

Secretar științific al Consiliului Științific Specializat,
Beșleaga Igor, dr. în șt. ing. _____

Conducător științific,
Marian Grigore, dr. hab., prof. univ. _____

Autor
Șeremet Dumitru _____

© Șeremet Dumitru, 2022

CUPRINS

Cuprins	3
Repere conceptuale ale cercetării	4
Conținutul tezei	8
Concluzii generale și recomandări.....	24
Sugestii privind cercetările de perspectivă.....	25
Bibliografie	26
Lista publicațiilor autorului la tema tezei	29
Adnotare	31
Annotation	32
Аннотация.....	33

Repere conceptuale ale cercetării

Actualitatea și importanța problemei abordate. Creșterea vertiginoasă a numărului de echipamente agricole în ultimii ani, în special celor de mână a doua, impune abordări noi a procesului de mentenanță, abordări bazate pe tehnologii moderne de menținere a siguranței în funcționare, a disponibilității și mentenabilității întregului complex de mijloace tehnice folosite în agricultură și ramurile conexe.

Elaborările cercetătorilor din străinătate [28] și din țară în domeniul recondiționării pieselor de mașini uzate permit obținerea unor suprafețe de lucru cu proprietăți fizice și mecanice care asigură o durabilitate a pieselor renovate egală sau mai mare ca a pieselor noi [1]. În plus, rezultatele cercetării fondului pieselor și a agregatelor automobilelor, tractoarelor și utilajelor agricole, arată că în mediu 25 ... 40% - sunt bune pentru folosire în continuitate, cca. 20 % - nu pot fi restabilite iar celelalte 40 ... 55% pot fi recondiționate. Reieșind din cele menționate, în special procentajul mare al fondului de piese care pot fi restabilite, cât și costul ridicat al pieselor noi în comparație cu cheltuielile mai mici necesare la recondiționarea pieselor uzate putem concluziona că procesul renovării pieselor utilajului agricol este binevenit, și chiar necesar în condițiile actuale ale pieței.

Fiabilitatea utilajelor agricole renovate crește dacă procesele tehnologice, folosite în mentenanță, sunt la nivelul producției de bază sau superioare conform următorilor parametri de bază: asigurarea durabilității prin majorarea rezistenței la uzare a suprafețelor de contact și majorarea durabilității prin folosirea normelor de precizie a ajustajului argumentate teoretico-experimental [27] cât și prin folosirea materialelor performante.

În mentenanța utilajului agricol, alegerea metodei de recondiționare trebuie să se efectueze în concordanță cu metodele de asigurare a interschimbabilității bazată pe principiile fiabilității. La rândul său asigurarea interschimbabilității pieselor recondiționate este, în mare măsură, determinată de alegerea corectă a toleranțelor pieselor recondiționate și a ajustajelor dintre aceste piese. În virtutea specificului condițiilor de exploatare a utilajului agricol și a multitudinii de metode de recondiționare și de materiale folosite în calitate de strat compensator de uzură, apare necesitatea calculării preciziei ajustajelor îmbinărilor specifice utilajului agricol.

Acest lucru mai este condiționat și de faptul că mentenanța utilajelor agricole este efectuată, de regulă, cu piese AM (abreviere din engleză *aftermarket*), adică fabricate de către producătorii de piese de schimb care sunt mai ieftine, dar au și o calitate scăzută sau cu piese recondiționate la dimensiuni de reparație, care posedă calitate destul de bună, datorită materialelor avansate folosite în calitate de compensator de uzură, însă necesită recalcularea ajustajului dintre piesele îmbinării renovate.

Analiza documentației tehnice referitoare la reparația utilajelor agricole arată că clasele de precizie a pieselor recondiționate și precizia ajustajelor pentru majoritatea îmbinărilor alcătuite din

aceste piese nu se calculează pentru parametri concreți de funcționare și pentru materiale concrete folosite în calitate de strat compensator de uzură, dar se stabilesc în baza experienței anterioare și prin metoda similitudinii. Metode universale de calcul al preciziei de proiectare pentru îmbinările nominalizate sau lipsesc, sau sunt imperfecte și nu au obținut o răspândire largă în proiectarea îmbinărilor alcătuite din piese renovate.

Reieșind din cele menționate anterior, este evidentă actualitatea perfecționării metodelor de stabilire a ajustajelor îmbinărilor din utilajele agricole prin calcul, iar tema de doctorat este motivată și prezintă interes major asupra îmbunătățirii calității asamblărilor din piese recondiționate folosite în mentenanța utilajului agricol.

Lucrarea „Perfecționarea metodelor de calcul al ajustajelor cuplelor tribologice renovate cu materiale eterogene” propune o metodă perfecționată de calcul al interstițiului cuplelor tribologice recondiționate prin diferite metode și cu diferite materiale. Metoda de calcul se bazează pe facilitățile funcțiilor Green și este, pentru prima dată, folosită la calcularea ajustajelor cu strângere și cu joc luând în considerare marea majoritate a factorilor posibili de influență asupra durabilității îmbinărilor renovate.

Tema de doctorat poartă un caracter trans-disciplinar, având tangență cu știința preciziilor pieselor recondiționate și a ansamblurilor din aceste piese, completată cu realizările din domeniul mecanicii corpului solid și tendințele specifice fiabilității și disponibilității utilajelor agricole supuse intervențiilor de mentenanță.

Tema se încadrează în preocupările științifice ale cercetărilor realizate în cadrul mai multor colective de cercetare din țară și străinătate. Astfel, în cadrul Universității Agrare de Stat din Moldova cercetările au fost axate, în special, pe asigurarea fiabilității pieselor recondiționate prin folosirea unor materiale noi cu proprietăți avansate și pe perfecționarea metodelor de compensare a uzurii [1,2, 14]. Acest lucru se urmărește și în cercetările realizate în străinătate [27, 28, 30].

Referitor la asigurarea preciziei de proiectare prin calculul valorilor ajustajelor dintre piesele recondiționate cu diferite materiale cercetările realizate sunt cu mult mai modeste. Metodele folosite în prezent pentru stabilirea claselor de precizie al ajustajelor cu strângere sunt bazate, în esență, pe problema Lamé pentru un tub cu pereții groși solicitat de presiuni exterioare și interioare care nu depind de unghiul polar [29]. În acest caz problema devine axial simetrică, ceea ce înseamnă că deformațiile și tensiunile interioare, de asemenea, sunt axial simetrice.

Metodele bazate pe problema Lamé nu țin cont de un șir de factori prezenți în timpul exploatării utilajelor agricole cum sunt: deplasările din interiorul elementelor tribo-sistemului, temperatura și fluxurile de căldură, sursele de căldură, date în interiorul pereților cilindrului, viteza de rotire a cilindrului care provoacă forțe centrifugale etc.

Primele cercetări cu privire la perfecționare metodelor de calcul al ajustajelor au fost inițiate de V. Șeremet și Gr. Marian [9] prin construirea și folosirea funcțiilor Green, care au propus rezolvarea problemelor de limită ale pieselor recondiționate cu straturi compensatoare de uzură pentru ajustaje alcătuite din piese cilindrice tubulare. Metoda se referă la asamblările când o piesă este metalică, iar a doua este recondiționată cu straturi compensatoare de uzură din materiale compozite pe bază de polimeri și nu se ține cont de o serie de factori cum ar fi: sursa interioară de căldură, temperatura, fluxul de temperatură, conductibilitatea termică, coeficientul de dilatare termică a materialului etc. Situația descrisă a condus la formularea scopului, obiectivelor și ipotezei de lucru a tezei de doctorat.

Scopul tezei: Perfecționarea metodelor de calcul al elementelor și ajustajelor formate din ele, renovate cu materiale eterogene prin construirea și aplicarea funcțiilor Green.

Pentru realizarea scopului propus au fost evidențiate obiectivele principale ale cercetării care se referă la calculul preciziei geometrice a pieselor din care rezultă necesitatea perfecționării metodelor propriu-zise de calcul al ajustajelor îmbinărilor alcătuite din piese recondiționate cu materiale eterogene.

Ipoteza de lucru. După studiul literaturii de specialitate și analiza practicilor înaintate din domeniul calcului ajustajelor îmbinărilor alcătuite din materiale eterogene a fost formulată și definită ipoteza de lucru, care presupune posibilitatea măririi preciziei de proiectare a îmbinărilor realizate prin strângere și a celor cu joc, în rezultatul construirii și aplicării funcțiilor Green la calculul valorilor ajustajelor de proiectare.

Confirmarea ipotezei înaintate a fost realizată prin identificarea obiectului studiului prin prisma sporirii gradului de precizie a metodelor de calcul studiate.

Obiectul studiului este metoda de calcul al ajustajelor îmbinărilor alcătuite din piese renovate prin compensarea uzurii cu aplicarea unui strat compensator de uzura care poate fi din diferite materiale și cu anumite proprietăți cerute de condițiile de proiectare, fabricare și exploatare.

Subiectul cercetărilor include studierea obiectului de studiu, rezolvarea problemelor de limită mono și multidimensionale, estimarea cantitativă și calitativă a obiectului cercetării prin prisma folosirii funcțiilor Green la calculul ajustajelor cu strângere și cu joc pentru îmbinările renovate, componente ale utilajelor agricole.

Sinteza metodologiei de cercetare se bazează pe achiziția de date, informații și cunoștințe pentru abordări sistematice a posibilităților de utilizare a funcțiilor Green în rezolvarea principalelor sarcini determinate de scopul lucrării.

La realizarea cercetărilor teoretice de bază au fost aplicate metode de analiză sistemică și metode matematice; elemente ale teoriei erorilor, fiabilității și interschimbabilității. Rezolvarea problemelor necesare pentru calculul ajustajelor s-a efectuat în corelare cu determinarea tensiunilor de contact, iar pentru estimarea efectului temperaturii în zona de contact și în interiorul pieselor componente ale

îmbinărilor au fost construite relații matematice necesare pentru determinarea câmpului de temperatură.

La stabilirea clasei de toleranță pentru piesele îmbinării a fost folosită metoda elaborată în teza de doctor a autorului cu privire la stabilirea caracterului ajustajului în dependență de solicitările mecanice, de cele cauzate de forțele centrifugale și de acțiunile termice. Verificarea corectitudinii alegerii clasei de toleranță a fost efectuată prin metoda clasică, folosită în proiectarea ajustajelor reieșind din teoria tensiunilor tangențiale maxime.

Noutatea științifică a studiului realizat constă în următoarele:

- abordarea trans-disciplinară a problematicii asigurării preciziei de proiectare a ajustajelor îmbinărilor cu strângere și cu joc alcătuite din piese recondiționate cu materiale eterogene, de asemenea, abordarea trans-disciplinară s-a completat cu realizările din domeniile interschimbabilității, mecanicii corpului solid și cu tendințele specifice ale fiabilității și disponibilității utilajelor agricole supuse intervențiilor de mentenanță;

- perfecționarea bazelor teoretice ale metodelor existente de calcul al preciziei geometrice a pieselor de mașini recondiționate și a ajustajelor din aceste piese prin elaborarea unor algoritmi de rezolvare a problemelor de limită uni și multidimensionale cu folosirea metodei reprezentărilor integrale armonice cu obținerea unor noi funcții principale Green pentru ecuația Poisson;

- elaborarea algoritmului pentru stabilirea câmpului de toleranță al ajustajelor cu strângere prin calculul strângerii minime, funcție de solicitările mecanice, cele cauzate de forțele centrifugale și acțiunile termice, bazat pe noile funcții Green construite;

- abordarea principial nouă a calcului ajustajelor cu strângere și a pieselor cu diferite forme geometrice bazată pe construirea unor funcții principale termoelastice Green pentru deformați și tensiuni, apărute în piesele îmbinării, exprimate prin funcția Green pentru ecuația Poisson, cu ajutorul căroră, au fost rezolvate un șir de probleme particulare noi pentru piese în formă de fâșie, semi fâșie, paralelipiped și cilindru exploatate în condiții termoelastice;

- rezolvarea problemelor de contact cu folosirea Funcțiilor Green pentru îmbinările cu joc diametral renovate cu materiale compozite pentru două cazuri: a) verificarea corectitudinii alegerii jocului standard de proiectare (clasa de precizie a arborelui și cea a ajustajului) prin determinarea capacității de încărcare P a straturii compensator de uzură aplicat; b) proiectarea jocului diametral prin determinarea unghiului portant α și a jocului diametral Δ_r .

Semnificația teoretică și valoarea aplicativă a cercetărilor se referă la perfecționarea metodelor de calcul al ajustajelor alcătuite din piese recondiționate prin abordare transdisciplinară completată cu realizările din domeniile interschimbabilității, mecanicii corpului solid și tendințele specifice fiabilității și disponibilității utilajelor agricole supuse intervențiilor de mentenanță.

Conținutul tezei

Capitolul 1. Analiza situației cu privire la metodele de recondiționare ale ajustajelor îmbinărilor renovate cu materiale eterogene

Capitolul cuprinde un studiu de sinteză bibliografică cu privire la asigurarea fiabilității pieselor de mașini recondiționate cu materiale eterogene. În baza analizei metodelor de recondiționare a suprafețelor uzate ale pieselor componente ale mașinilor agricole s-a demonstrat că perfecționarea metodelor de calcul ale ajustajelor îmbinărilor renovate cu materiale eterogene este o problemă actuală și necesită un studiu mai profund.

Acest lucru va contribui la mărirea preciziei de proiectare a ajustajelor pieselor de mașini recondiționate având în vedere multitudinea de factori de influență prezenți în timpul exploatării utilajelor agricole.

Pentru stabilirea particularităților metodelor de recondiționare folosite la renovarea utilajelor agricole, s-a efectuat o analiză retrospectivă a metodelor de recondiționare pretabile de a fi folosite în condițiile Republicii Moldova cu identificarea avantajelor și dezavantajelor acestora. În baza analizei metodelor de restabilire a ajustajelor degradate ale utilajelor agricole s-a constatat că, în multe cazuri, după renovare se modifică proprietățile suprafețelor de contact ale cuplei, având alte proprietăți fizice și mecanice, de obicei mai bune, lucru care argumentează concretizarea câmpului de toleranță atât a pieselor componente cât și a ajustajului în ansamblu.

Referitor la argumentarea preciziei de proiectarea a pieselor și îmbinărilor renovate, la ziua de astăzi, s-au stabilit recomandări și norme tehnice privind alegerea și calcularea ajustajelor bazate pe experiența anterioară și pe rezultatele cercetărilor științifice și calculelor de laborator.

Conform acestor recomandări și norme, clasele de toleranțe și ajustajele îmbinărilor se determină în concordanță cu caracteristicile de destinație, fiabilitate, tehnologicitate, standardizare și unificare. În același timp, clasele de toleranțe și ajustajele selectate trebuie să asigure posibilitatea de realizare a elementelor respective în condiții tehnico-economice accesibile în procesul de exploatare și mentenanță.

Un moment important în stabilirea claselor de toleranțe ale ajustajelor este legat de caracterul instabil al valorilor inițiale, adică este dependent de variația în timp a dimensiunilor efective, fapt care impune un șir de condiționări în faza de stabilire a claselor de toleranțe și care nu sunt complet luate în considerare.

În baza analizei stadiului actual al cercetărilor din domeniu s-a înaintat ipoteza care denotă posibilitatea majorării durabilității cuplelor tribologice renovate prin concretizarea ajustajului de proiectare reieșind din asigurarea durabilității de proiectare, celei tehnologice și de exploatare luând în considerare un număr cât mai mare de factori de influență prezenți pe parcursul întregului ciclu de viață a utilajului renovat. Reieșind din ipoteza înaintată a fost structurat scopul și obiectivele lucrării.

Pentru realizarea scopului propus au fost înaintate următoarele obiective care și-au găsit oglindire în teza de doctorat:

- dezvoltarea bazelor teoretice pentru perfecționarea metodelor de calcul al preciziei geometrice a pieselor de mașini recondiționate cu materiale eterogene;
- scoaterea în evidență a factorilor care influențează precizia calcului ajustajelor îmbinărilor cu strângere și cu joc, alcătuite din piese recondiționate, folosite la reparația utilajelor agricole; analiza metodologiilor rezolvării problemelor de interschimbabilitate a pieselor recondiționate în conformitate cu știința preciziilor;
- perfecționarea algoritmilor de rezolvare a problemelor de limită termoelastice prin Metoda Reprezentărilor Integrale Armonice (MRIA) și Metoda Elementelor de Influență (MEI) de una, două și trei dimensiuni (1D, 2D, 3D) folosite la calculul îmbinărilor;
- perfecționarea metodelor de calcul al strângerii proprii pentru îmbinările alcătuite din materiale eterogene;
- alcătuirea algoritmului de calcul al ajustajelor cu strângere prin aplicarea facilităților funcțiilor Green pretate pentru acest scop;
- cercetarea și perfecționarea metodelor de calcul al elementelor ajustajelor cu joc alcătuite din piese recondiționate cu materiale eterogene;
- confirmarea validității metodelor de calcul elaborate prin studii de caz pentru cazuri practice întâlnite în stabilirea ajustajelor prin calcul.

Capitolul 2. Bazele teoretice ale metodelor de calcul al preciziei geometrice a pieselor de mașini

Calitatea pieselor de mașini recondiționate și a îmbinărilor din aceste piese este indisolubil legată de precizia de proiectare și precizia tehnologică. Aceste aspecte sunt părți componente la elaborarea documentației tehnice de proiectare și trebuie luate în considerare atunci când se alege metoda de recondiționare, când se elaborează materiale noi pentru compensarea uzurii și când se stabilesc regimurile tehnologice de prelucrare.

Precizia de proiectare este precizia stabilită în faza de proiectare în dependență de rolul funcțional care îi revine elementului respectiv fiind definită de abaterile limită ale dimensiunilor, ale formei, poziției reciproce, ondulației, rugozității etc. Conform standardului ISO 286-1 sunt definite 20 de trepte de toleranță standardizate, adică 20 de grade de precizie.

Stabilirea preciziei de proiectare este una din etapele importante și laborioase în elaborarea și aplicarea metodelor de recondiționare a elementelor uzate ale utilajelor agricole deoarece este influențată de un număr de factori perturbatori prezenți atât în procesul de exploatare cât și în procesul de fabricație și de asamblare a elementelor constructive respective. Cu alte cuvinte, precizia de proiectare, pe de o parte, trebuie să asigure funcționarea eficientă a utilajului respectiv la parametrii

stabiliți de către cerințele de destinație și exploatare, iar pe de altă parte, trebuie să poată fi asigurată în procesul de fabricație cu cheltuieli rezonabile.

În capitolului 2 sunt prezentate algoritmele folosite pentru rezolvarea problemelor de limită de 1, 2 și 3 dimensiuni. Aceste algoritme au fost elaborate în baza metodelor de construire a funcțiilor Green (pentru cazul de o singură dimensiune) și au fost folosite la determinarea strângerilor în ajustajele pieselor cilindrice (tuburi cu pereții groși). În cazul menționat, se ține cont de mai mulți factori care sunt prezenți în partea dreaptă a ecuației diferențiale.

Pentru rezolvarea problemelor de termoelasticitate a fost folosită metoda reprezentărilor integrale armonice care constă în obținerea funcțiilor principale termoelastice în deplasări (FPTD) $U_i(x, \xi)$, exprimate prin funcțiile Green pentru ecuația Poisson (FGEP) $G_T(x, \xi)$, $G_i(x, \xi)$, în care sunt folosite următoarea reprezentare integrală în coordonate carteziane [19, 20, 24]:

$$U_i(x, \xi) = \frac{\gamma \xi_i}{2\mu} G_T(x, \xi) - \frac{\lambda + \mu}{2\mu} \xi_i \theta(x, \xi) - \frac{\gamma}{2(\lambda + 2\mu)} x_i G_i(x, \xi) - \int_{\Gamma} \left(\frac{\partial}{\partial n_{\Gamma}} G_i(y, \xi) - G_i(y, \xi) \frac{\partial}{\partial n_{\Gamma}} \right) \left[U_i(x, y) + \frac{\xi_i}{2\mu} ((\lambda + \mu) \theta(x, y) - \gamma G_T(x, y)) \right] d\Gamma(y), \quad (2.1)$$

unde $\theta(x, \xi)$ este dilatarea termoelastică de volum (DTV); λ, μ sunt constantele de elasticitate Lamé; $\gamma = \alpha(2\mu + 3\lambda)$ este constanta de termoelasticitate; α este coeficientul dilatării termice liniare; a este coeficientul conductivității termice; $i = 1, 2, 3$.

În ecuația (2.1) FPTD $U_i(x, \xi)$ reprezintă deplasările în punctul $\xi \equiv (\xi_1, \xi_2, \xi_3)$, cauzate de o sursă unitară de căldură concentrată, aplicată în punctul $x \equiv (x_1, x_2, x_3)$, $x, \xi \in V$; $y \in \Gamma$, care trebuie determinate. Formula integrală pentru deplasările termoelastice se va scrie conform [19, 20, 24] în forma:

$$U_i(\xi) = a^{-1} \int_V F(x) U_i(x, \xi) dV(x) - \int_{\Gamma_D} T(y) \frac{\partial U_i(y, \xi)}{\partial n_y} d\Gamma_D(y) + \int_{\Gamma_N} \frac{\partial T(y)}{\partial n_y} U_i(y, \xi) d\Gamma_N(y) + a^{-1} \int_{\Gamma_M} \left[\alpha T(y) + a \frac{\partial T(y)}{\partial n_y} \right] U_i(y, \xi) d\Gamma_M(y); \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.2)$$

Avantajul principal al metodei elaborate constă în îmbinarea a două etape de rezolvare a problemelor termoelastice de limită (PTL) într-o singură etapă. Deplasările termoelastice se exprimă direct prin acțiunile termice date pe suprafață și în interiorul corpului termoelastic.

Metodica aplicării MRIA la calculul problemelor termoelastice de limită de două și trei dimensiuni presupune parcurgerea anumitor etape.

Primul pas. Se scriu reprezentările integrale armonice (2.1) pentru cazul corpului solid cu parametri geometrici concreți;

Pasul doi. Se simplifică reprezentările integrale armonice (2.1) ținând cont de condițiile omogene generalizate de limită;

Pasul trei. Se obțin formulele structurale pentru FPTD, exprimate prin FGEP, folosind formula (2.1);

Pasul patru. Expresiile analitice pentru FGEP se substituie în formulele integrale scrise pentru problemele de limită concrete obținând soluția problemei inițiale de limită sub formă de integrală;

Pasul cinci. Se calculează integralele (2.2) în rezultatul căruia obținem expresiile analitice finale pentru deplasările termoelastice $u_i(\xi)$;

Pasul șase. Se reprezintă expresiile analitice finale sub formă de grafice și se analizează rezultatele obținute.

S-a demonstrat că MEI permite obținerea soluției problemei de limită a teoriei elasticității sub formă de integrale, exprimate prin acțiunile mecanice cunoscute de pe suprafața și din interiorul corpului elastic.

Reprezentările integrale în coordonate cilindrice se scriu sub forma [11, 16, 23]:

$$\theta^{(q)} = -\frac{1}{\lambda+2\mu} L^{(q)} G_\theta + \int_\Gamma \left(\frac{\partial \theta^{(q)}}{\partial n_\Gamma} G_\theta - \theta^{(q)} \frac{\partial}{\partial n_\Gamma} G_\theta \right) d\Gamma(M'); \quad q = \xi_1, \rho, \psi \quad (2.3)$$

- pentru funcțiile de influență a dilatării elastice de volum;

$$U_r^{(q)} = \tilde{U}_r^{(q)} + \int_\Gamma \left[\left(G_r^{(\rho)} \frac{\partial}{\partial n_\Gamma} - \frac{\partial}{\partial n_\Gamma} G_r^{(\rho)} + 2 \frac{n_{\phi'}}{r'} G_\phi^{(\rho)} \right) \left(U_r^{(q)} + \frac{\lambda + \mu}{2\mu} r' \theta^{(q)} \right) + \left(G_\phi^{(\rho)} \frac{\partial}{\partial n_\Gamma} - \frac{\partial}{\partial n_\Gamma} G_\phi^{(\rho)} + \frac{2n_{\phi'}}{r'} G_r^{(\rho)} \right) U_\phi^{(q)} - \left(G_\theta \frac{\partial}{\partial n_\Gamma} - \frac{\partial}{\partial n_\Gamma} G_\theta \right) \frac{\lambda + \mu}{2\mu} r \theta^{(q)} \right] d\Gamma(M') \quad (2.4)$$

- pentru funcțiile de influență ale deplasărilor radiale [11];

$$U_\phi^{(q)} = \tilde{U}_\phi^{(q)} + \int_\Gamma \left[\left(G_r^{(\psi)} \frac{\partial}{\partial n_\Gamma} - \frac{\partial}{\partial n_\Gamma} G_r^{(\psi)} + \frac{2n_{\phi'}}{r'} G_\phi^{(\psi)} \right) \left(U_r^{(q)} + \frac{\lambda + \mu}{2\mu} r' \theta^{(q)} \right) + \left(G_\phi^{(\psi)} \frac{\partial}{\partial n_\Gamma} - \frac{\partial}{\partial n_\Gamma} G_\phi^{(\psi)} - \frac{2n_{\phi'}}{r'} G_r^{(\psi)} \right) U_\phi^{(q)} \right] d\Gamma(M') \quad (2.5)$$

- pentru funcțiile de influență ale deplasărilor circulare [11] și

$$U_1^{(q)} = \tilde{U}_1^{(q)} + \int_\Gamma \left[\left(G_1 \frac{\partial}{\partial n_\Gamma} - \frac{\partial}{\partial n_\Gamma} G_1 \right) \left(U_1^{(q)} + \frac{\lambda + \mu}{2\mu} Y_1 \theta^{(q)} \right) - \left(G_\theta \frac{\partial}{\partial n_\Gamma} - \frac{\partial}{\partial n_\Gamma} G_\theta \right) \frac{\lambda + \mu}{2\mu} x_1 \theta^{(q)} \right] d\Gamma(M') \quad (2.6)$$

- pentru funcțiile de influență ale deplasărilor verticale [11], unde:

$$\tilde{U}_r^{(q)} = A \left[(B\delta_{q\rho} - \rho L^{(q)}) G_r^{(\rho)} + r L^{(q)} G_\theta + (B+1)\delta_{q\psi} G_r^{(\psi)} \right]; \quad \tilde{U}_\phi^{(q)} = A \left[(B\delta_{q\rho} - \rho L^{(q)}) G_\phi^{(\rho)} + (B+1)\delta_{q\psi} G_\phi^{(\psi)} \right]; \quad \tilde{U}_1^{(q)} = A \left[(B\delta_{q1} - \xi_1 L^{(q)}) G_1 + x_1 L^{(q)} G_\theta \right] \quad (2.7)$$

$L^{(q)}$ este operator diferențial care se determină cu relația

$$L^{(q)} = \delta_{q1} \frac{\partial}{\partial \xi_1} + \delta_{q\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} + \frac{\delta_{q\psi}}{\rho} \frac{\partial}{\partial \psi}, \quad (2.8)$$

iar $\delta_{q\rho}$, $\delta_{q\psi}$ și δ_{q1} reprezintă simbolul lui Kronecker.

În ecuațiile (2.4) și (2.5) $n_{\phi'}$ prezintă cosinusul unghiului între normala exterioară pe suprafață și planul $\varphi = \text{const}$.

Deplasările elastice se determină cu următoarea formulă integrală [11]

$$\begin{aligned}
u_s(M) = & \int_V K_j(N) U_j^{(s)}(M, N) dV(N) - \int_{\Gamma_u} [u_j(N) P_j^{(s)}(N, M) d\Gamma_u(y) \\
& + \int_{\Gamma_p} p_j(N') U_j^{(s)}(N', M) d\Gamma_p(N') + \int_{\Gamma_m} [\beta u_i(N') + \eta p_i(N')] U_j^{(s)}(N', M) d\Gamma_m(M); \\
j = & 1, r, \phi; s = 1, \rho, \psi
\end{aligned} \tag{2.9}$$

în care $K_j(N)$ și $u_j(N'), p_j(N'), [\beta u_i(N') + \eta p_i(N')]$ reprezintă forțele de volum, deplasările, sarcinile și relațiile dintre deplasări și sarcini date în punctele interioare N și în punctele de suprafață N' . De asemenea, $U_j^{(s)}(M, N), P_j^{(s)}(N', M), U_j^{(s)}(N', M)$ reprezintă respectiv: funcțiile de influență pentru deplasări (în interiorul corpului) și funcțiile de influență pentru sarcini, pentru funcții de influență pentru deplasări date pe suprafețele Γ_u, Γ_p și Γ_m .

Metodica aplicării MEI la calculul problemelor elastice de limită cu două și trei dimensiuni.

Primul pas. Se scriu reprezentările integrale (2.3) - (2.7) pentru cazul corpului solid elastic cu geometrie concretă;

Pasul doi. Se simplifică reprezentările integrale (2.2) - (2.7), ținând cont de condițiile omogene generalizate de limită;

Pasul trei. Din reprezentările integrale simplificate se obțin formulele structurale pentru matricele de deplasări Green $U_i^{(k)}$; $i, k = 1, 2, 3$; $U_s^{(q)}$; $s = x_1, r, \phi$; $q = \xi_1, \rho, \psi$, exprimate prin FGEP sau prin funcțiile $G_r^{(\rho)}, G_\phi^{(\psi)}, G_\phi^{(\rho)}, G_r^{(\psi)}$;

Pasul patru. Se substituie expresiile analitice pentru FGEP sau pentru funcțiile $G_r^{(\rho)}, G_\phi^{(\psi)}, G_\phi^{(\rho)}, G_r^{(\psi)}$ în formulele structurale pentru $U_i^{(k)}(x, \xi)$ sau $U_s^{(q)}$ obținând expresiile analitice respective pentru $U_i^{(k)}$ sau $U_s^{(q)}$;

Pasul cinci. Se substituie expresiile analitice pentru $U_s^{(q)}$ în formula integrală (2.8) scrisă pentru problema de limită concretă obținând soluția problemei inițiale de limită sub formă de integrale;

Pasul șase. Se calculează integralele indicate în pasul cinci obținând expresiile analitice finale pentru deplasările u_s .

Pasul șapte. Se construiesc graficele rezultatelor analitice obținute cu analiza acestora.

Capitolul 3. Cercetări cu privire la calculul preciziei de proiectare a ajustajelor îmbinărilor cu strângere alcătuite din piese recondiționate cu materiale eterogene din componența mașinilor agricole

În momentul de față, calculul și alegerea ajustajelor îmbinărilor cu strângere se efectuează prin metode clasice, folosind o mulțime de date din diverse îndrumare de specialitate [31]. Metodele existente presupun determinarea valorii strângerii în dependență de solicitările la care este supusă îmbinarea. Condiția principală este ca presiunea specifică p dintre suprafețele de contact să fie mai mare decât forțele exterioare la care este expusă îmbinarea (forța axială P_{ax} , momentul de torsiune M_t sau acțiunea simultană a acestora).

În afară de solicitările mecanice menționate, precizia calcului ajustajelor cu strângere proprie este influențată de temperatura din zona de contact și de forțele centrifugale. La rândul său, câmpurile de temperatură depind de coeficienții dilatării termice liniare α_1 , de coeficientul de conductibilitate termică a_1 , sursa de căldură s_1 , coeficientul conductibilității căldurii λ_1 și temperatura de pe suprafața interioară a arborelui T_1 și cea de pe suprafața exterioară a alezajului T_2 , respectiv de $a_2, \alpha_2, s_2, \lambda_2$. În același rând deplasările în stratul compensator și bușă depind de următoarele caracteristici ale materialului elastic E_1, ν_1 - pentru stratul compensator de uzură și E_2, ν_2 - pentru bușă.

Având în vedere că unul dintre elementele asamblării sau ambele se rotesc, deplasările care apar în asamblare, depind de forțele centrifugale care se caracterizează prin viteza unghiulară a îmbinării (ω), greutatea specifică ale materialului stratului compensator de uzură (γ_1) și a bușei (γ_2), de forța longitudinală (p_{ax}) și de momentul de torsiune (M_t), care se transmit de la arbore la bușă (vezi figura 3.1)

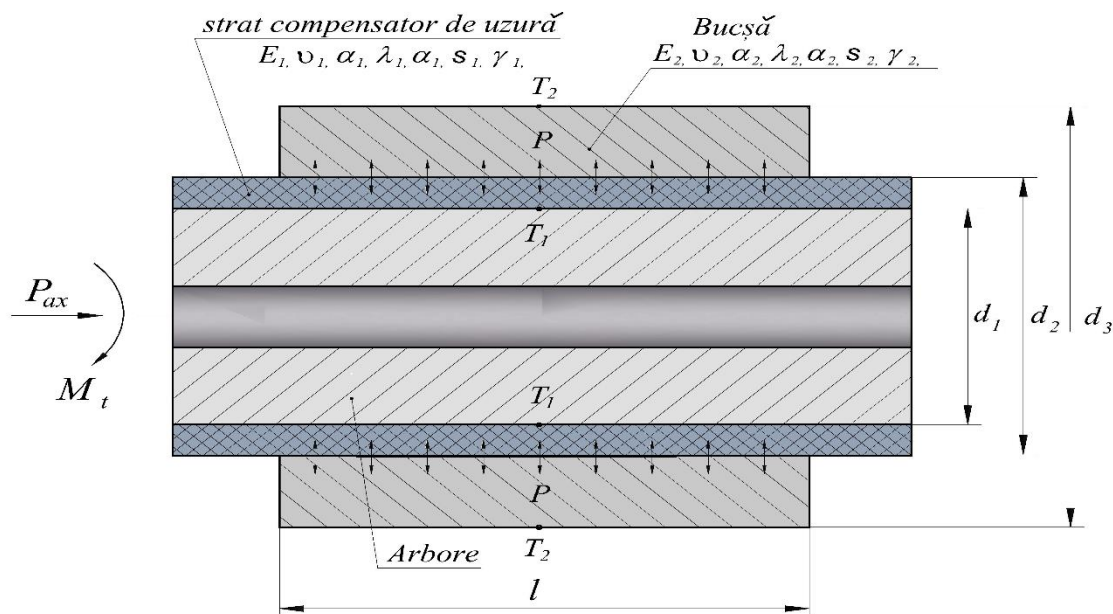


Figura 3.1. . Schema îmbinării prin strângere alcătuită din piese reconșionate cu materiale eterogene

Câmpurile de temperatură care apar în arbore și bușă se determină cu ecuațiile [15]:

$$\frac{d^2 T_1(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_1(r)}{dr} = -\frac{s_1(r)}{a_1} \text{ - pentru stratul compensator de uzură,} \quad (3.1)$$

$$\frac{d^2 T_2(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_2(r)}{dr} = -\frac{s_2(r)}{a_2} \text{ - pentru bușă} \quad (3.2)$$

cu condițiile de limită

$$T_1(r_1) = T_1 \text{ și } T_2(r_3) = T_2 \quad (3.3)$$

și de conjugare

$$T_1(r_2) = T_2(r_2), \lambda_1 \frac{dT_1(r_2)}{dr} = \lambda_2 \frac{dT_2(r_2)}{dr} \quad (3.4)$$

Soluția acestei probleme permite determinarea câmpului de temperatură din stratul compensator de uzură și din bucsă, folosind următoarea formulă [3 - 6, 10]:

$$T_1(r) = \frac{s_1}{4a_1}(r_1^2 - r^2) + T_1 + c_2 \ln \frac{r}{r_1}; T_2(r) = \frac{s_2}{4a_2}(r_2^2 - r^2) + T_2 + f_2 \ln \frac{r}{r_3} \quad (3.5)$$

$$c_1 = \frac{s_1}{4a_1}r_1^2 + T_1 - c_2 \ln r_1; f_1 = \frac{s_2}{4a_2}r_3^2 + T_2 - f_2 \ln r_3$$

$$c_2 = \frac{N_1 \lambda_2 + N_2 \ln \frac{r_3}{r_2}}{\ln \left[\left(\frac{r_3}{r_2} \right)^{\lambda_1} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{\lambda_2} \right]}; f_2 = \frac{N_1 \lambda_1 - N_2 \ln \frac{r_2}{r_1}}{\ln \left[\left(\frac{r_3}{r_2} \right)^{\lambda_1} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{\lambda_2} \right]} \quad (3.5a)$$

$$N_1 = \frac{s_1}{4a_1}(r_2^2 - r_1^2) + \frac{s_2}{4a_2}(r_3^2 - r_2^2) + T_2 - T_1; N_2 = \frac{r_2^2}{2} \left(\frac{\lambda_1 s_1}{a_1} - \frac{\lambda_2 s_2}{a_2} \right)$$

Strângerea în îmbinările supuse diferitor tipuri de solicitări este determinată de forțele care apar în zona de contact ale pieselor conjugate și de factorii însoțitori pe parcursul exploatării (sursele interioare de căldură s_1, s_2 și temperaturile T_1, T_2 prezente pe suprafețele interioară și exterioară ale îmbinării; forțele centrifugale cvasistatice din piesele singulare și din îmbinări. Astfel, problema de limită pentru îmbinările din piesele recondiționate cu materiale de natură diferită se reduce la rezolvarea a două ecuații diferențiale - una pentru stratul compensator de uzură și a doua pentru alezaj.

În cele ce urmează se prezintă formularea ecuației pentru stratul compensator de uzură:

$$\frac{d^2 U_{r1}(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU_{r1}(r)}{dr} - \frac{U_{r1}(r)}{r^2} = f_1(r) \quad (3.6)$$

în care U_{r1} sunt deplasările radiale din arbore, $f_1(r)$ este funcția de derivata temperaturii pe raza arborelui circular ($r_1 \leq r \leq r_2$; $0 \leq \phi \leq 2\pi$):

$$\frac{dT_1(r)}{dr} = -\frac{s_1}{2a_1}r + \frac{c_2}{r}, \quad (3.7)$$

Constanta dependentă de coeficientul Poisson ν_1 și coeficientul dilatării termice liniare α_1 se determină relația:

$$q_1 = (1 + \nu_1)\alpha_1 \quad (3.8)$$

Constantă care ține cont de viteza unghiulară se determină cu relația:

$$b_1 = [(1 - \nu_1^2)/E_1] \cdot \gamma_1 \omega^2 g^{-1}, \quad (3.9)$$

în care E_1 și γ_1 sunt modulul de elasticitate și greutatea specifică a materialului stratului compensator, ω – viteza unghiulară de rotire, g – accelerația căderii libere. Astfel, expresia generală pentru funcția $f(r)$ este:

$$f_1(r) = q_1 \frac{dT_1(r)}{dr} - b_1 r, \quad (3.10)$$

iar cea finală din ecuația (3.6) are următoarea formă:

$$f_1(r) = -\left(\frac{q_1 s_1}{2a_1} + b_1\right)r + \frac{q_1 c_2}{r} \quad (3.11)$$

Ecuția diferențială pentru alezajul ($r_2 \leq r \leq r_3$; $0 \leq \phi \leq 2\pi$) se formulează, în mod analogic, cum a fost formulată pentru stratul compensator de uzură. Sensul fizic al acestei ecuații reprezintă echilibrul îmbinării exprimat prin deplasări și are următoarea formă:

$$\frac{d^2 U_{r2}(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU_{r2}(r)}{dr} - \frac{U_{r2}(r)}{r^2} = -\left(\frac{q_2 s_2}{2a_2} + b_2\right)r + \frac{q_2 f_2}{r} \quad (3.12)$$

Soluțiile generale a ecuațiilor (3.6) – (3.11) și (3.12) pot fi scrise în următoarea formă [3]:

$$U_{r1}(r) = m_1 r + \frac{m_2}{r} + \bar{U}_{T1}(r) + \bar{U}_{\omega1}(r); \bar{U}_{T1}(r) = q_1 \left(c_2 r \ln r - \frac{s_1}{16a_1} r^3\right);$$

$$\bar{U}_{\omega1}(r) = -\frac{b_1}{8} r^3 \quad (3.13)$$

iar $U_{r2}(r) = k_1 r + \frac{k_2}{r} + \bar{U}_{21}(r) + \bar{U}_{\omega2}(r); \bar{U}_{T2}(r) = q_2 \left(f_2 r \ln r - \frac{s_2}{16a_2} r^3\right);$

$$\bar{U}_{\omega2}(r) = -\frac{b_2}{8} r^3 \quad (3.14)$$

Constantele de integrare m_1, m_2, k_1 și k_2 se determină din următoarele condiții de conjugare:

$$u_{r1}(r_1) = 0; \quad \sigma_{r1}(r_2) = p_{\min} \quad (3.15)$$

pentru stratul compensator de uzură ($r_1 \leq r \leq r_2$; $0 \leq \phi \leq 2\pi$) și

$$\sigma_{r2}(r_2) = p_{\min}; \quad u_{r2}(r_3) = 0 \quad (3.16)$$

pentru alezaj ($r_2 \leq r \leq r_3$; $0 \leq \phi \leq 2\pi$), unde

$$\sigma_{r1}(r) = \frac{E_1 m_1}{1-\nu_1} - \frac{E_1 m_2}{(1+\nu_1)r^2} + p_1(r); p_1(r) = p_{1\omega}(r) + p_{1T}(r); p_{1\omega}(r) = -\frac{b_1}{8} (3 + \nu_1)r^2; p_{1T}(r) = \frac{E_1}{1-\nu_1^2} q_1 \left[c_2 (1 + (1 + \nu_1) \ln r) - \frac{s_1}{16a_1} (3 + \nu_1)r^2 \right] - E_1 \alpha_1 T_1(r) \quad (3.17)$$

$$\sigma_{r2}(r) = \frac{E_2 k_1}{1-\nu_1} - \frac{E_2 k_2}{(1+\nu_1)r^2} + p_2(r); p_2(r) = p_{2\omega}(r) + p_{2T}(r); p_{2\omega}(r) = -\frac{b_2}{8} (3 + \nu_2)r^2; p_{2T}(r) = \frac{E_2}{1-\nu_2^2} q_2 \left[f_2 (1 + (1 + \nu_1) \ln r) - \frac{s_2}{16a_2} (3 + \nu_2)r^2 \right] - E_2 \alpha_2 T_2(r) \quad (3.18)$$

în care $p_1(r)$ și $p_2(r)$ reprezintă presiunile radiale din stratul compensator de uzură și din alezaj care sunt compuse din presiunea cauzată de temperatură ($p_{1T}(r), p_{2T}(r)$) și forțele centrifugale ($p_{1\omega}(r), p_{2\omega}(r)$).

Pentru determinarea strângerilor minime, cauzate de forța axială P_{ax} , momentul de torsiune M_t și de acțiunea concomitentă a forței P_{ax} și a momentului M_t obținem următoarele formule finale [3 - 6]:

$$N_{P_{\min}} = \begin{cases} N_{P_{ax}} = \frac{P_{ax}}{\pi d_2 l f} d_2 \left[\frac{(1-\nu_1^2)(1-e_1^2)}{E_1 [e_1^2(1-\nu_1)+(1+\nu_1)]} + \frac{(1-\nu_2^2)(e_2^2-l)}{E_2 [(1-\nu_2)+e_2^2(1+\nu_2)]} \right] \\ N_{M_t} = \frac{2M_t}{\pi d_2^2 l f} d_2 \left[\frac{(1-\nu_1^2)(1-e_1^2)}{E_1 [e_1^2(1-\nu_1)+(1+\nu_1)]} + \frac{(1-\nu_2^2)(e_2^2-l)}{E_2 [(1-\nu_2)+e_2^2(1+\nu_2)]} \right] \\ N_{P_{ax}, M_t} = \sqrt{\frac{P_{ax}^2 + (2M_t/d_2)^2}{\pi d_2^2 l f}} d_2 \left[\frac{(1-\nu_1^2)(1-e_1^2)}{E_1 [e_1^2(1-\nu_1)+(1+\nu_1)]} + \frac{(1-\nu_2^2)(e_2^2-l)}{E_2 [(1-\nu_2)+e_2^2(1+\nu_2)]} \right] \end{cases} \quad (3.19)$$

în care d_2 este diametrul nominal al îmbinării.

Pentru determinarea componentelor $N_{\omega_{\min}}$ și $N_{T_{\min}}$ obținem următoarele relații de calcul [3 - 6]:

$$\begin{aligned}
\left\{ \frac{N_{min\omega}}{N_{minT}} \right\} = d_2 \left[- \left\{ \frac{p_{1\omega}(r_2)}{p_{1T}(r_2)} \right\} \frac{(1-v_1^2)(1-e_1^2)}{E_1[e_1^2(1-v_1)+(1+v_1)]} - \left\{ \frac{p_{2\omega}(r_2)}{p_{2T}(r_2)} \right\} \frac{(1-v_2^2)(e_2^2-1)}{E_2[(1-v_2)+e_2^2(1+v_2)]} \right] - \\
2 \left\{ \frac{\bar{u}_{1\omega}(r_1)r_1}{\bar{u}_{1T}(r_1)r_1} \right\} \left(r_2^{-1} + \frac{E_1(1-v_1)(1-e_1^2)}{E_1[e_1^2(1-v_1)+(1+v_1)]r_2} \right) - \left\{ \frac{\bar{u}_{2\omega}(r_3)r_3}{\bar{u}_{2T}(r_3)r_3} \right\} \left(r_2^{-1} + \frac{(1-v_2^2)(e_2^2-1)}{[(1-v_2)+e_2^2(1+v_2)]r_2} \right) + \\
2 \left\{ \frac{\bar{u}_{1\omega}(r_2)}{\bar{u}_{1T}(r_2)} \right\} + 2 \left\{ \frac{\bar{u}_{2\omega}(r_2)}{\bar{u}_{2T}(r_2)} \right\}
\end{aligned} \quad (3.20)$$

în care

$$\begin{aligned}
\bar{u}_{1T}(r_2) &= 2q_1 \left(c_2 r_2 \ln r_2 - \frac{s_1}{16a_1} r_2^3 \right); \quad \bar{u}_{1\omega}(r_2) = -\frac{b_1}{4} r_2^3 \\
\bar{u}_{2T}(r_2) &= 2q_2 \left(f_2 r_2 \ln r_2 - \frac{s_2}{16a_2} r_2^3 \right); \quad \bar{u}_{2\omega}(r_2) = -\frac{b_2}{4} r_2^3 \\
b_1 &= [(1-v_1^2)/E_1] \gamma_1 \omega^2 g^{-1}; \quad b_2 = [(1-v_2^2)/E_2] \cdot \gamma_2 \omega^2 g^{-1}; \\
q_1 &= (1+v_1)\alpha_1; \quad q_2 = (1+v_2)\alpha_2; \quad n_1 = 1-e_1^2; \quad n_2 = 1-e_2^2,
\end{aligned} \quad (3.21)$$

iar mărimile $p_{1\omega}(r_2)$, $\bar{u}_{1\omega}(r_1)$, $p_{2\omega}(r_2)$, $\bar{u}_{2\omega}(r_3)$ și $p_{1T}(r_2)$, $\bar{u}_{1T}(r_1)$, $p_{2T}(r_2)$, $\bar{u}_{2T}(r_3)$ se calculează după formulele:

$$\begin{aligned}
\bar{u}_{1T}(r_1) &= q_1 \left(c_2 r_1 \ln r_1 - \frac{s_1}{16a_1} r_1^3 \right) \\
\bar{u}_{2T}(r_3) &= q_2 \left(f_2 r_3 \ln r_3 - \frac{s_2}{16a_2} r_3^3 \right)
\end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned}
p_{1\omega}(r_2) &= -\frac{E_1 b_1}{8(1-v_1^2)} (3+v_1) r_2^2; \quad \bar{u}_{1\omega}(r_1) = -\frac{b_1}{8} r_1^3 \\
p_{2\omega}(r_2) &= -\frac{E_2 b_2}{8(1-v_2^2)} (3+v_2) r_2^2; \quad \bar{u}_{2\omega}(r_3) = -\frac{b_2}{8} r_3^3
\end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned}
p_{1T}(r_2) &= \frac{E_1}{1-v_1^2} q_1 \left[c_2 (1 + (1+v_1) \ln r_2) - \frac{s_1}{16a_1} (3+v_1) r_2^2 \right] - E_1 \alpha_1 T_1(r_2); \\
T_1(r_2) &= T_1 + \frac{s_1}{4a_1} (r_1^2 - r_2^2) + c_2 \ln \frac{r_2}{r_1};
\end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned}
p_{2T}(r_2) &= \frac{E_2}{1-v_2^2} q_2 \left[f_2 (1 + (1+v_2) \ln r_2) - \frac{s_2}{16a_2} (3+v_2) r_2^2 \right] - \\
&- E_2 \alpha_2 T_2(r_2); \quad T_2(r_2) = T_2 + f_2 \ln \frac{r_2}{r_3}
\end{aligned} \quad (3.25)$$

Pentru analiza soluțiilor obținute cu metoda propusă a fost elaborat un program de calcul [3] cu aplicarea Maplesoft 15.

Menționăm, că în lucrarea [10, 29] au fost date câmpurile de temperatură, deplasările și tensiunile pentru diverse probleme de limită elastice și termoelastice axial simetrice care pot fi folosite pentru calculul strângerilor înbinărilor cu strângere alcătuite din materiale eterogene.

Capitolul 4. Cercetări cu privire la perfecționarea metodelor de calcul al elementelor ajustajelor cu joc din înbinările alcătuite din piese recondiționate cu materiale eterogene

Lagărele de alunecare sunt înbinări întâlnite foarte des în construcția utilajelor agricole care, la proiectare, sunt prevăzute cu un anumit joc între suprafețele de contact. Aceste organe de mașini asigură rezistență la diferite solicitări de rotație (completă și oscilantă), de translație sau pivotantă.

Ca formă, lagărele de alunecare, cel mai des, se întâlnesc cu suprafețe cilindrice, pene, conice, sferice (cu aliniere automată pentru sarcini radiale și elicoidale). Suprafețele plane se întâlnesc în formă de dreptunghi cu două laturi scurte și două laturi lungi, care mai sunt numite și fâșii (de exemplu, arbori canelați lungi, ghidaje la diferite mașini unelte și mașini agricole etc.), cu două laturi scurte și două laturi mijlocii, care mai sunt numite și semi-fâșii (de exemplu, pene, came glisante, arbori și flanșe canelate) și cu diferite lungimi ale laturilor care nu diferă mult (în această lucrare noi le-am numit simplu – dreptunghiuri). După regimul de frecare lagărele de alunecare se împart în lagăre cu frecare uscată și cele cu frecare fluidă, ponderea cea mai mare revenind lagărelor cu frecare uscată. Lagărele cu frecare fluidă se întâlnesc, de regulă în motoarele cu ardere internă.

Există o mulțime de factori externi și interni care influențează forțele de frecare din îmbinările cu frecare nedorită și care trebuie, în mod obligatoriu luați în considerare atunci când se stabilește caracterul îmbinării (la proiectare), când se alege materialul suprafețelor de contact și când se stabilește metoda de recondiționare [31].

Pentru micșorarea forțelor de frecare se folosesc diferite procedee constructive și tehnologice cum sunt: micșorarea suprafeței reale de contact prin optimizarea rugozității suprafețelor conjugate, alegerea materialelor cuplei tribologice care sunt compatibile din punct de vedere tribologic, folosirea lubrifianților, formarea unor elemente constructive capabile să înmagazineze și să păstreze o durată cât mai îndelungată a unsorilor în zona de contact, optimizarea jocului dintre piesele cuplei tribologice etc.

Stabilirea toleranțelor optime pentru utilajele agricole reparate, capabile să asigure fiabilitatea prescrisă pentru utilajele noi, prezintă o provocare pentru asigurarea interschimbabilității pieselor renovate, asigurarea preciziei montajului final și a disponibilității utilajelor agricole după operațiile de mentenanță corectivă. Acest lucru obține valențe noi în cazul îmbinărilor cu joc renovate care, în procesul de mentenanță, necesită ajustări, practic, pe parcursul tuturor intervențiilor.

Ajustajul cu joc presupune întotdeauna un interstițiu între alezaj și arbore atunci când sunt asamblate, adică dimensiunea minimă proiectată a alezajului întotdeauna este mai mare sau, în cazul extrem, egală cu dimensiunea maximă a arborelui. Mărimea limită a interstițiului dintre arbore și alezaj este determinată de jocul minim și de intervalul de toleranță al ajustajului, care este diferența dintre jocul maxim și jocul minim.

Jocul minim și intervalul de toleranță al ajustajului depind de un număr mare de factori, care trebuie luați în considerare la proiectarea ajustajelor. Printre principalii factori de influență se regăsesc caracterul frecării, încărcarea specifică și direcția sarcinii, caracterul solicitărilor, viteza de alunecare a unei piese în raport cu cealaltă, natura materialului din care sunt fabricate piesele componente, echilibrul termic, grosimea pereților bucșei sau cuzinetului, caracteristicile mediului în care funcționează asamblarea etc. [9].

În același timp, calculul corect al ajustajului și respectarea toleranțelor sunt cruciale pentru calitatea tehnică al unui produs finit. Toleranțele foarte precise implică, inevitabil, costuri ridicate la fabricare, iar cele scăzute conduc la micșorarea fiabilității produselor fabricate sau renovate [14]. Prin urmare, la proiectarea intervalelor de toleranță a pieselor recondiționate, în special a celor recondiționate cu materiale compozite, adică piese care au proprietăți diferite față de cele inițiale, de regulă îmbunătățite, este necesar să se optimizeze intervalele de toleranță ale pieselor componente și ale ajustajului în întregime. În practica analizei toleranțelor îmbinărilor cu joc acest proces se realizează prin minimizarea valorii jocului [12].

În practica mentenanței corective și recondiționării pieselor de mașini, metoda de recondiționare prin minimizarea jocului în îmbinările cu joc, practic nu se folosește. Însă, rezultatele practice demonstrează oportunitatea aplicării acestei metode, deoarece, ca urmare, crește precizia dimensională a pieselor renovate prin micșorarea presiunii specifice pe suprafețele de contact și poate fi optimizată rugozitatea suprafețelor elementelor tribocuplei respective.

În același rând se cunoaște că pentru minimizarea jocului este necesar să se ia în calcul maximum posibil de factori potențiali de a influența durabilitatea îmbinării [33]. Pentru cazul îmbinărilor cu joc cu ungere fluidă există un șir de recomandări, bine definite în mai multe surse bibliografice [9, 28] și pornește de la premisa că între piesele conjugate, în timpul funcționării, trebuie să apară un joc suficient pentru existența unei pelicule de ulei.

Pentru îmbinările metalo-polimerice prezintă interes metoda propusă în [1, 30, 32]. Această metodă este folosită la calculul jocului în tribo-sistemele alcătuite dintr-un arbore metalic și un lagăr din polimer presat în carcasă. Ea are la bază principiile din teoria elasticității și constă în crearea a patru funcții statice unghiulare. Însă, și această metodă este folosită cu aproximări, lucru care conduce la micșorarea preciziei de proiectare. Trebuie de menționat și faptul că calculele sunt destul de voluminoase, iar parametrii inițiali greu de măsurat. Iată de ce această metodă se folosește destul de rar în calculul jocului din îmbinările metalo-polimerice, iar rezultatele sunt deseori contradictorii [2].

Din cercetările mai recente, referitoare la analiza și stabilirea ajustajelor, prezintă interes folosirea modelului Monte-Carlo pentru analiza toleranțelor din asamblările mecanice. Dintre avantajele acestei metode se poate puncta posibilitatea folosirii pentru sisteme tehnice complexe, precum și posibilitatea obținerii unor soluții de toleranțe simultane. Dezavantajul metodei este că, pentru a obține precizii rezonabile sunt necesare eșantioane de date numeroase [13].

Pentru prima dată, a fost demonstrată posibilitatea folosirii funcțiilor Green la stabilirea caracterului îmbinărilor cu joc renovate cu materiale compozite polimerice prin utilizarea problemelor mixte de limită, propuse de către Grigore Marian în teza sa de doctor habilitat [2]. Autorul a elaborat principiile de asigurare a interschimbabilității funcționale a îmbinărilor cilindrice metalopolimerice cu joc prin aplicarea tensorilor de deplasări Green pentru prima problemă

fundamentală a elasticității. Metodele propuse se referă la anumite tipuri de piese și nu iau în considerare toți factorii prezenți în ajustajele cu loc posibili în timpul exploatării acestora, în special, în condițiile specifice sectorului agrar.

Restaurarea îmbinărilor cu joc prin compensarea uzurii cu materiale compozite poate fi efectuată prin aplicarea materialului compensator de uzură pe piesa cuprinsă sau pe piesa cuprinzătoare. Pentru calcularea ajustajului îmbinărilor cu joc renovate prin aplicarea materialelor compozite pe piesa cuprinsă folosim matricele funcțiilor Green cu utilizarea MEI.

În figura 4.1 se prezintă schematic un lagăr de alunecare care funcționează în regim de frecare uscată, alcătuită dintr-un arbore recondiționat cu un strat de material compozit, iar bușca metalică este prelucrată mecanic la dimensiunea d . Calculul se efectuează prin rezolvarea unei probleme de contact studiată și prezentată de către Marian [2] cu diferența că în cazul nostru stratul compensator de uzură din polimer este aplicat pe suprafața exterioară a arborelui [15] (vezi fig. 4.1).

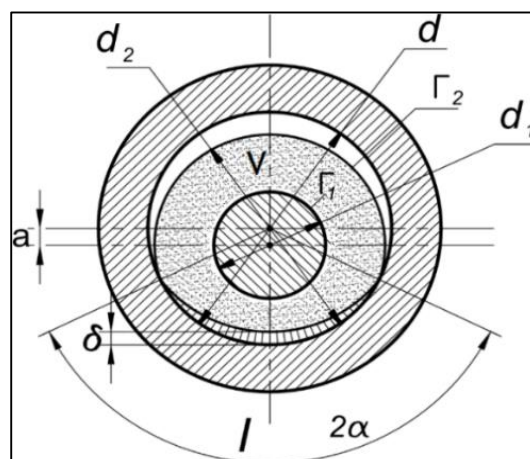


Figura 4.1. Schema unei îmbinări pentru care arborele este recondiționat prin compensarea uzurii cu materiale compozite polimerice: I – zona de comprimare a stratului de polimer (suprafața portantă a îmbinării); d – diametrul interior al piesei metalice; d_1 – diametrul arborelui care coincide cu diametrul interior al stratului de polimer; d_2 – diametrul exterior al stratului de polimer; a – deplasarea centrului arborelui; δ – deformarea maximă a stratului de polimer; 2α – unghiul suprafeței portante a îmbinării.

Contactul dintre stratul compensator de uzură din material compozit pe bază de polimer $V(r_1 \leq r \leq r_2, 0 \leq \phi \leq 2\pi)$ și piesa metalică nedeformabilă are loc pe conturul $\Gamma_2(r = r_2, 0 \leq \phi \leq 2\pi)$. Conturul circular $\Gamma_2(r = r_2, 0 \leq \phi \leq 2\pi)$ al stratului din material compozit polimeric $V \equiv (r_1 \leq r \leq r_2, 0 \leq \phi \leq 2\pi)$ este considerat nedeformabil, deoarece este lipit pe suprafața metalică a arborelui. Contactul dintre stratul din material compozit polimeric $V \equiv (r_1 \leq r \leq r_2, 0 \leq \phi \leq 2\pi)$ și piesa metalică nedeformabilă are loc pe conturul $\Gamma_2(r = r_2, 0 \leq \phi' \leq 2\pi)$.

Astfel, pentru a determina deformările și tensiunile din zona de contact trebuie să precizăm stratul din polimer și mărimile: a - deplasarea centrului arborelui, cauzată de sarcini statice, α – semi-unghiul zonei portante; Δ_r - jocul radial și să rezolvăm problema de contact, care presupune integrarea următoarelor ecuații Lamé în coordonate polare r, ϕ :

În punctele exterioare ale stratului din polimer $V \equiv (r_1 \leq r \leq r_2, 0 \leq \phi \leq 2\pi)$ cu următoarele condiții limită [15]:

$$U_r(r = r_1, 0 \leq \phi' \leq 2\pi) = U_\phi(r = r_1, 0 \leq \phi' \leq 2\pi) = 0 \quad (4.1)$$

pe conturul circular $\Gamma_1(r = r_1, 0 \leq \phi' \leq 2\pi)$ și

$$\sigma_{rr}(r = r_2, -\alpha \leq \phi' \leq \alpha) \neq 0; \sigma_{r\phi}(r = r_2, -\alpha \leq \phi' \leq \alpha) \neq 0 \quad (4.2)$$

$$\sigma_{r\phi}(r = r_2, -\alpha \leq \phi' \leq \alpha) = f \sigma_{rr}(r = r_2, \phi') \quad (4.3)$$

$$\sigma_{rr}(r = r_2, -\alpha \leq \phi' \leq \alpha) = 0; \sigma_{r\phi}(r = r_2, -\alpha \leq \phi' \leq \alpha) = f \sigma_{rr}(r = r_2, \phi') \quad (4.4)$$

pe conturul circular $\Gamma_2(r = r_2, 0 \leq \phi' \leq 2\pi)$.

În relațiile (4.3) și (4.5) f este coeficientul de frecare dintre piesa metalică și stratul de polimer.

În reparații de mașini, adesea, apare problema când este necesar să se stabilească dacă stratul compensator de uzură este capabil să facă față sarcinilor la care este supusă piesa renovată, în special în cazul folosirii materialelor pe bază de polimeri, când este stabilit jocul diametral prin metode standarde și proprietățile materialului aplicat (de obicei rezistența la compresiune).

În cele ce urmează vom examina un caz particular când se cunoaște jocul diametral Δ_R și rezistența la compresiune a stratului de material pe bază de polimer $[\sigma_{rr}]$. Este necesar să se determine unghiul α și capacitatea de încărcare P a stratului polimer [15].

$$\sigma_{rr(max)} = [\sigma_{rr}] \text{ deci } A + B = [\sigma_{rr}] \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2r_2 F_0^{(1)}} \left[F_1^{(1)} \left(1 + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) - f F_1^{(2)} \sin^2 \alpha \right] - \frac{\alpha}{r_2 \cos \alpha} + \\ & 2 \left(F_1^{(1)} \sin \alpha - f F_1^{(2)} (1 - \cos \alpha) \right) \frac{1}{2r_0 F_0^{(1)}} = \frac{K[\sigma_{rr}]}{\Delta_R} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Rezolvând ecuația (4.6) determinăm unghiul α .

Capacitatea de încărcare P se determină din relația:

$$P = -r_2 l \int_{-\alpha}^{\alpha} \sigma_{rr}(\phi, \alpha) \cos \phi d\phi \quad (4.7)$$

Calculăm această integrală obținem [15]:

$$\begin{aligned} P &= -r_2 l \left[2A \sin \alpha + B \left(\alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right) \right] \\ P &= -Er_2 l \Delta_R \left[2\bar{A} \sin \alpha + \bar{B} \left(\alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right) \right]; \bar{A} = \frac{A}{E}; \bar{B} = \frac{B}{E} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Adoptând notațiile

$$L = P/Er_2 l \Delta_R; L_1 = -2\bar{A} \sin \alpha + \bar{B} \left(\alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right), \quad (4.9)$$

putem determina capacitatea portantă P a stratului de polimer, reieșind din egalitatea $L = L_1$.

Apoi de la egalitate $L = L_1$, putem determina capacitatea portantă P a stratului polimeric.

În continuare urmează rezolvarea problemelor termoelastice de limită, cu aplicarea MRİA, pentru diverse domenii de 2 și 3 dimensiuni așa ca: fâșia [18], semi-fâșia [17, 25], dreptunghiul [8,

22] și diverse paralelipede [21, 26], prezentată în capitolul doi. Spre regret însă, în acest rezumat ne vom limita cu două exemple pentru o semi-fâșie [17, 25] și pentru un dreptunghi [8, 22].

Exemplul 1. De determinat tensiunile termice $\sigma_{11}(\xi)$, $\sigma_{12}(\xi)$ în una din componentele unei îmbinări în formă de semi-fâșie (două laturi scurte și două laturi mijlocii).

$V \equiv (0 \leq x_1 < \infty, 0 \leq x_2 \leq a_2)$, cauzate de următorul gradient de temperatură dat în interiorul dreptunghiului $[a \leq x_1 \leq b, c \leq x_2 \leq d] \in V$ [8, 17]:

$$\Delta T(x) = \begin{cases} T_0 = \text{const.}, & x \equiv (x_1, x_2) \in V \equiv [a \leq x_1 \leq b, c \leq x_2 \leq d] \in V, \\ a \geq 0, b \geq 0, c \geq 0, d \geq 0 \\ 0, & x \equiv (x_1, x_2) \in \Omega \equiv V - V' \end{cases} \quad (4.10)$$

cu următoarele condiții omogene de limită mecanice, prezentate în figura 4.2.

Calculul efectuat cu aplicarea MRİA ne-a permis să obținem următoarele expresii analitice finale pentru tensiunile termice [8, 17]:

$$\begin{aligned} \sigma_{11}(\xi) &= \frac{2\mu T_0}{2\pi(\lambda+2\mu)} F(\xi) + \begin{cases} -\gamma T_0; & \xi \in V \equiv [a \leq x_1 \leq b, c \leq x_2 \leq d] \in V \\ 0; & \xi \notin V \equiv [a \leq x_1 \leq b, c \leq x_2 \leq d] \in V \end{cases} \\ \sigma_{22}(\xi) &= -\frac{2\mu T_0}{2\pi(\lambda+2\mu)} F(\xi) + \begin{cases} -\gamma T_0; & \xi \in V' \equiv [a \leq x_1 \leq b, c \leq x_2 \leq d] \in V \\ 0; & \xi \notin V' \equiv [a \leq x_1 \leq b, c \leq x_2 \leq d] \in V, \end{cases} \end{aligned} \quad (4.11)$$

în care funcția $F(\xi)$ se exprimă prin arc tangentele de la funcții exponențiale și trigonometrice

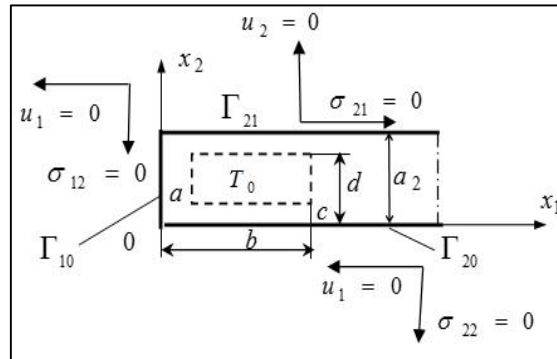


Figura 4.2. Schema semi-fâșiei cu segmentul marginal Γ_{10} , și semi-dreptele marginale Γ_{20} , Γ_{21} și gradientul constant de temperatură T_0 dat în interiorul unui dreptunghi.

Reprezentarea grafică a tensiunilor termice din zona de contact poate fi urmărită din figurile 4.3.

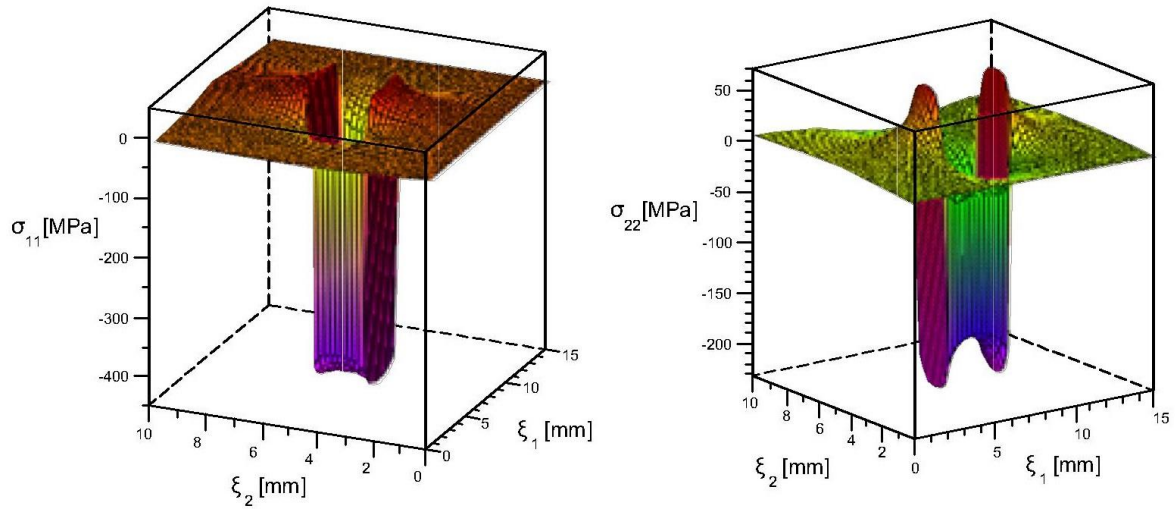


Figura 4.3. Tensiunile termoelastice normale (σ_{11}) și (σ_{22}) din semi-fâșia examinată.

Exemplul 2. De determinat tensiunile termice $\sigma_{11}(\xi)$ în dreptunghiul (cu două laturi scurte și două laturi lungi) V , cauzate de următoarele condiții termice de limită date pe segmentele marginale a liniilor drepte Γ_{10} , Γ_{11} și Γ_{20} , Γ_{21} , prezentate în figura 4.4 [7, 22]:

$$T(y) = \begin{cases} T_{10}(y) = 0; y \equiv (0, y_2) \in \Gamma_{10}; a \partial T / \partial n_{y_1} = 0, y \equiv (a_1, y_2) \in \Gamma_{11} \\ T_{20}(y) = T_0 = \text{const}, y \equiv (y_1, 0) \in [a_1 \leq y_1 \leq b_1] \in \Gamma_{20}; T_0 > 0 \\ T_{20}(y) = 0, y \equiv (y_1, 0) \in [0 \leq y_1 < a_1] \cup (b_1 < y_1 < \infty) \in \Gamma_{20} \\ \partial T(y_1, a_2) / \partial n_{y_2} = \partial T(y_1, a_2) / \partial y_2 = 0; y \equiv (y_1, a_2) \in \Gamma_{21} \end{cases} \quad (4.12)$$

Condițiile mecanice de limită pe conturul dreptunghiului sunt prezentate în figura 4.4.

În rezultatul calcului obținem expresii analitice finale pentru tensiunile termice [7, 22]:

$$\begin{aligned} \sigma_{11}(\xi) &= -\frac{\gamma \mu T_0}{(\lambda + 2\mu)} \left[\frac{2}{\pi} (\bar{f}_1 + \bar{f} + \tilde{f}_1 + \tilde{f}) - \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial \xi_2} \left(y_1 \ln \frac{\bar{E}_0 \bar{E}_{10}}{\bar{E}_0 \bar{E}_{10}} + \xi_1 \ln \frac{\bar{E}_0 \bar{E}_{10}}{\bar{E}_0 \bar{E}_{10}} \right) + S_{11}(\xi) \right]; \\ S_{11}(\xi) &= \frac{2}{a_2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{v_1 e^{v_1 a_1} \cosh v_1 a_1} \left(\left(1 - \xi_1 \frac{\partial}{\partial \xi_1} \right) \cosh v_1 y_1 \sinh v_1 \xi_1 + \right. \\ &\quad \left. \frac{\partial}{\partial \xi_1} \left(a_1 \frac{e^{v_1 a_1}}{\cosh v_1 a_1} \cosh v_1 y_1 - y_1 \sinh v_1 \xi_1 + \frac{\cosh v_1 y_1}{v_1} \right) \cosh v_1 \xi_1 \right) \sin v_1 \xi_2 \Bigg]_{y_1=a}^{y_1=b} \end{aligned} \quad (4.13)$$

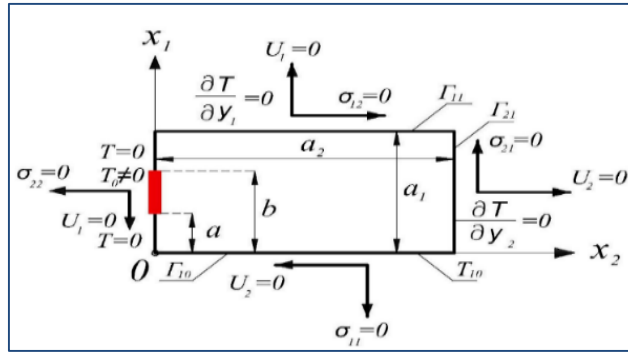


Figura 4.4. Schema dreptunghiului cu condițiile mecanice și termice de limită

În continuare se reprezintă tensiunile termice $\sigma_{11}(\xi)$ și seria lor $S_{11}(\xi)$, pentru dreptunghiul $0 \leq x_1 \leq a_1$, $0 \leq x_2 \leq a_2$, cu următoarele valori: $a_1 = 4 \text{ mm}$; $a_2 = 8 \text{ mm}$; $a = 3 \text{ mm}$ și $b = 6 \text{ mm}$ (vezi figura 4.5).

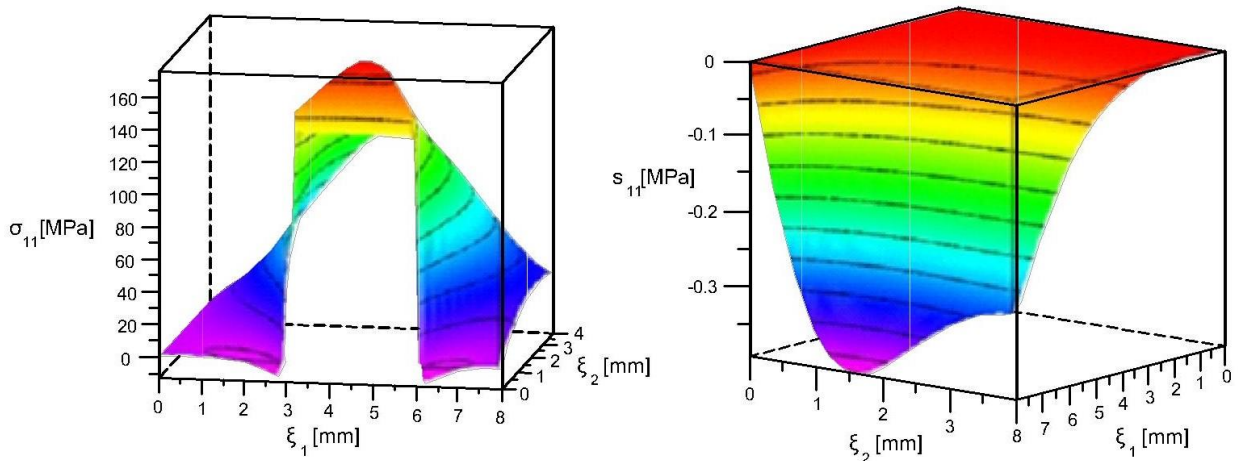


Figura.4.5. Graficele tensiunilor termice normale $\sigma_{11}(\xi)$ - a) și seria lor $S_{11}(\xi)$ -b)

Graficele au fost construite cu aplicarea softului Maple 15. Tensiunile termice $\sigma_{11}(\xi)$ sunt create de un gradient constant de temperatură $T_{20}(y) = T_0 = 50K$, $y \equiv (y_1, 0) \in [a \leq y_1 \leq b] \in \Gamma_{20}$ dat de ecuația (4.12). Graficele pentru $\sigma_{11}(\xi)$, și seria lor $S_{11}(\xi)$ au fost construite pentru următoarele valori ale constantelor de elasticitate și de termoelasticitate: coeficientul Poisson, $\nu = 0.3$; modulul de elasticitate $E = 2.1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$ și coeficientul dilatării termice liniare $\alpha = 1.2 \cdot 10^{-5} K^{-1}$.

Concluzii generale și recomandări

Documentarea și studiul de sinteză în domeniul calcului ajustajelor cuplelor tribologice renovate cu materiale eterogene au pus în evidență următoarele aspecte:

1. În urma studiului de sinteză a fost formulată ipoteza de lucru care presupune posibilitatea măririi durabilității cuplelor tribologice, renovate prin compensarea uzurii cu diferite materiale compozite, folosind funcțiile Green la calculul ajustajelor cu strângere și cu joc al acestor cuple [3, 15].

2. Pentru confirmarea ipotezei de lucru înaintată și pentru realizarea scopului propus au fost canalizate cercetările pe următoarele direcții principale [3, 15]:

- dezvoltarea bazelor teoretice pentru perfecționarea metodelor de calcul al preciziei geometrice a pieselor de mașini recondiționate cu materiale eterogene în vederea identificării posibilităților folosirii funcțiilor Green la calculul de proiectare și verificare a ajustajelor îmbinărilor renovate cu materiale eterogene;
- scoaterea în evidență a factorilor de influență a preciziei ajustajelor îmbinărilor renovate cu materiale eterogene cu analiza metodelor rezolvării problemelor de interschimbabilitate în conformitate cu știința preciziilor;
- perfecționarea algoritmilor pentru rezolvarea problemelor de limită de o dimensiune, a problemelor de limită de două și trei dimensiuni pentru diverse domenii termoelasticitate și elastice cu aplicare lor la îmbinările renovate cu materiale compozite;
- cercetare și perfecționarea metodelor de calcul al ajustajelor cu strângere proprie și celor cu joc, renovate cu materiale compozite, prin aplicarea facilităților funcțiilor Green;
- validarea rezultatelor modelelor matematice elaborate prin studii de caz cu privire la exemple concrete întâlnite în domeniul recondiționării pieselor de mașini agricole și celor din industria prelucrătoare.

3. Au fost abordată o nouă tălmăcire a elementelor teoretice esențiale necesare pentru continuarea studiului cu privire la asigurarea preciziei de proiectare a ajustajelor pieselor de mașini prin elaborarea algoritmilor pentru problemele de limită de o singură și mai multe dimensiuni cu folosirea MRIA care constă în obținerea funcțiilor principale termoelastice exprimate prin funcțiile Green pentru ecuația Poisson. Avantajul principal al metodei elaborate constă în îmbinarea a două etape de rezolvare a problemelor termoelastice de limită într-o singură etapă cu exprimarea directă a deplasărilor și tensiunilor termoelastice, atât pe suprafața cât și în interiorul corpului termoplastic.

4. În baza analizei metodelor de calcul al ajustajelor cu strângere corelate cu problemele tensiunilor de contact s-au obținut relații analitice, bazate pe funcțiile Green, pentru calculul strângerii minime funcție de toți parametrii de influență posibili să apară în timpul exploatării și asamblării.

5. S-a alcătuit algoritmul pentru calculul câmpului de toleranță pentru ajustajele cu strângere prin determinarea valorii strângerii minime funcție de solicitările mecanice, cele cauzate de forțele centrifugale și acțiunile termice cu considerarea deformațiilor cauzate de distrugerea microreliefului și de numărul de montări repetate.

6. A fost alcătuit un algoritm de calcul al ajustajului minim cu folosirea facilităților mediului programului de calcul Maplesoft 15 care poate fi folosit pentru toate cazurile de solicitări posibile de a fi prezente în îmbinările cu strângere proprie [3].

7. În rezultatul dezvoltării și aplicării metodei elementelor de influență a fost elaborată o metodă nouă de calcul al ajustajelor cu joc, bazată pe rezolvarea unei probleme noi de contact de două dimensiuni ce a permis să obținem un sistem de trei ecuații care ne dau posibilitate să rezolvăm patru probleme practice întâlnite în proiectarea și verificarea ajustajelor cu joc renovate cu materiale compozite prin calcularea separată sau în combinații a unghiului zonei portante α a îmbinării proiectate, a jocului diametral Δ_r dintre arbore și alezaj, a capacității de încărcare a stratului compensator de uzură aplicat P și a rezistenței la compresiune a stratului compensator de uzură aplicat $[\sigma_r]$ [15].

Sugestii privind cercetările de perspectivă

Cercetările teoretice și practice efectuate în această lucrare au permis trasare unor direcții de perspectivă în cercetarea în asigurarea preciziei de proiectare a ajustajelor îmbinărilor renovate componente ale utilajului agricol și celui din industriile conexe:

Efectuarea unui studiu cu privire la extinderea MEI și MRIA pentru construirea funcțiilor Green, obținerea formulelor integrale și rezolvarea problemelor de limită elastice și termoelastice pentru domenii canonice descrise în diferite sisteme de coordonate ortogonale, lucru ce va contribui substanțial la perfecționarea calculelor ajustajelor și îmbinărilor pieselor de diferite forme;

Extinderea folosirii funcțiilor Green în combinație cu principiile probabilităților pentru calculul preciziei ajustajelor intermediare;

Studiarea aspectelor tribologice ale îmbinărilor proiectate prin metodele elaborate.

Bibliografie

a) în limba română

1. MARIAN, G. and MALAI, L. Comportarea tribologică a îmbinărilor de tip lagăr renovate cu materiale compozite poliamidoepoxidice. 2012, Vol. 1, pp. 56-59. ISSN 1857-0003.
2. MARIAN, G. Contribuții teoretico-experimentale la studiul fiabilității pieselor și îmbinărilor utilajului agricol recondiționate cu compozite pe bază de polimeri: Teza de dr. hab. Chișinău: Ce. Ed. UASM, 2005. p. 252.
3. MARIAN, G., ȘEREMET, D. Perfecționarea metodelor de calcul al ajustajelor îmbinărilor cu strângere, alcătuite din piese recondiționate, din componența mașinilor agricole. Știința Agricolă. UASM, 2020, Vol. 2. ISSN 1857-0003.
4. ȘEREMET, D. and MARIAN G. Determinarea distribuției temperaturii în straturile compensatoare de uzură a pieselor recondiționate cu materiale compozite polimerice. Știința Agricolă. 2015a, Vol. 2, pg. 55-60, ISSN 1857-0003.
5. ȘEREMET, D. and MARIAN, G. Aplicarea funcțiilor Green la calculul ajustajelor cu strângere renovate cu materiale compozite polimerice. Lucrări științifice UASM. 2015b, pg. 321-326, ISSN 1857-0003.
6. ȘEREMET, D. and MARIAN, G. Aplicarea metodei funcției Green la determinarea temperaturii, deplasărilor, și tensiunilor termice în acoperirile cilindrice, aplicate în straturi groase pe substraturi metalice (probleme de simetrie axială cu condiții mixte de limită). Lucrări științifice UASM. 2016, pg. 221-225, ISBN 978-9975-64-276-7.
7. ȘEREMET, D. Determinarea tensiunilor termice a unei probleme particulare de limită pentru o placă termoelastică de formă dreptunghiulară. Lucrări științifice UASM. 2018, pg. 229-232, ISBN 978-9975-64-297-2.
8. ȘEREMET, V and CREȚU, I. Reprezentarea grafică a funcțiilor Green pentru tensiunile termice într-un dreptunghi cu aplicarea Softului Maple 18. Lucrări științifice UASM. UASM, 2016, Vol. 46, pg. 216-220. ISBN 978-9975-64-284-2.
9. ȘEREMET, V and MARIAN, G. Contribuții privind aplicarea funcțiilor Green la calculul stării de deformații și tensiuni a pieselor recondiționate cu straturi compensatoare de uzură. Lucrări științifice UASM. UASM, 2004, Vol. 12, pp. 65-71, ISBN 9975-9855-7-2.
10. ȘEREMET D., Unele rezultate pentru deplasări și tensiuni termice în acoperirile cilindrice aplicate în straturi groase pe substraturi metalice obținute prin metoda funcției Green. în: Lucrări științifice, Simpozionul internațional științific. UASM, 2016, Vol. 46 p. 220-230. ISBN 978-9975-64-284-2.
11. ȘEREMET, V. Metoda elementelor de influență. Chișinău : CE. UASM, 2003. p. 239. ISBN 9975946550.

b). în limba engleză

12. CHAHBOUNI, M., BOUTAHARI, S. and AMEGOUZ, D. Influence of form deviations on the tolerance analysis. International Journal of Engineering & Technology. Science Publishing Corporation, 2014, Vol. 3, 3, pp. 343-349, ISSN: 2227-524X
13. HELENA, V. G. NAVAS. Monte Carlo Model Applied to Tolerance Analysis of Mechanical Assembly Sets. American Journal of Mechanical Engineering and Automation. 2015, Vol. 2, 5, pp. 55-58, ISSN: 2381-6198.

14. LORENZONI, A., TIELEMANN, C. and SAUER, A. Reducing manufacturing costs: the dynamic tolerance system. *Cogent Engineering*. 2019, Vol. 6, pp. 1-17, ISSN: 2331-1916.
15. ŞEREMET, D. Computing Contributions to Restore Agricultural Machinery (A Contact Problem of Bearings With Diametrical Game Reconditioned by Composite Polymers). *Journal TJMM*. 2016b, Vol. 2, 8, pg. 175-181, ISSN: 2067-239X.
16. ŞEREMET, D. Determining thermoelastic strains and stresses created by the temperature field and constrictions exerted on the contours of the reconditioned cylindrical piece. *Journal TJMM*. 2016a, Vol. 1, 8, pg. 89-97, ISSN: 2067-239X.
17. ŞEREMET, V, CREȚU, I and ŞEREMET, D. Explicit thermal stresses within a thermoelastic half-strip and their graphical presentation using Maple – 15, ISBN 978-9975-68-244-2.
18. ŞEREMET, V, MARIAN, G and ŞEREMET, D. Thermoelastic influence functions and solution to a locally mixed BVP for a strip. *J. of thermal stresses*. **Impact Factor 3.14**, 2018, Vol. 6, 41, pp. 706–720, ISSN 0149-5739.
19. ŞEREMET, V. A method to derive thermoelastic Green's functions for bounded domains. *Acta Mechanica*. Springer, 2016, Vol. 12, 227, pg. 3603-3620, ISSN 0001-5970.
20. ŞEREMET, V. A New efficient unified method to derive new constructive formulas and explicit expressions for plane and spatial thermoelastic Green's functions. *J. Acta Mechanica*. Springer, 2014, Vol. 1, 226, pg. 2011-230, ISSN 0001-5970.
21. ŞEREMET, V. and ŞEREMET, D. Solution in integrals of a 3D BVP of thermoelasticity: Green's functions and integration formula for thermal stresses within a semi-bounded parallelepiped. *J. Acta Mechanica*. Springer, **Impact Factor 2.505**, 2017, pp. 4471-4490, ISSN 0001-5970.
22. ŞEREMET, V. and ŞEREMET, D. Steady-state Green's functions for thermal stresses within rectangular region under point heat source, *Journal of Thermal Stresses*. **Impact Factor 3.14**, 2016, Vol. 6, 39, pg. 906-927, ISSN 0149-5739.
23. ŞEREMET, V. Method to derive thermoelastic Green's functions for cylindrical domains. *J. of Thermal Stresses*. 2016, Vol. 3, 40, pg. 363-375, ISSN 0149-5739.
24. ŞEREMET, V. Thermoelastic Green's function. Chisinau : Print-Caro, 2014. p. 237. ISBN 978-9974-56-208-9.
25. ŞEREMET, V., and ŞEREMET, D. Structural formulas and Explicit Green's Functions for a Generalized BVP for Half-Strip under a Point-Heat Source. *Engineering Mechanics*. **Impact Factor 2.264**, September 2017, pp. 1943-7889, ISSN 0733-9399.
26. ŞEREMET V., and ŞEREMET D., The Derivation of volume dilatation caused by a unit point heat source. în: *Proceedings of 12 International Congress on Thermal Stresses (ICTS2019)*, pag. 74, 1-5 June, Zhejiang University, Hangzhou, China

c) în limba rusă

27. ЛЕОНОВ, О.А. Обеспечение качества ремонта унифицированных соединений сельскохозяйственной техники методами расчета точностных параметров. Дис. дтн. Москва : (ФГОУ ВПО МГАУ, 2004. p. 266.
28. ЛЯЛЯКИН, В.П. Восстановление и упрочнение деталей в агропромышленном. Тяжёлое машиностроение. 2004, Vol. 2, pg. 28-32.
29. МАРЬЯН Г., ШЕРЕМЕТ Д., Новый метод расчета посадок с натягом восстановленных деталей метало полимерными композициями, În: *Евразийский Конгресс «Фундаментальные*

основы и практический опыт при проведении сервиса и рециклинга техники», Труды ГОСНИТИ 2016с с. 271-278, том 125., с.а. 0,5, г. ISSN 2587-6864.

30. МЯГКОВ, В.Д., et al. Допуски и посадки. Справочник. В 2-х ч. - 6-е изд., перераб. И дополн. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. р. 543. Vol. 1. ББК 3.41ц я2.

31. ПУЧИН, Е. А., et al. Технология ремонта машин. Москва : КолосС, 2007. р. 488. ISBN 978-5-9532-0456-9.

32. РЕМИЗОВ, Д. Д., БОЧКОВ, В.С. and БРАГИНСКИЙ, В.А. Допуски и посадки полимерных опор. Москва : Машиностроение, 1985. р. 208. ИБ № 3895.

33. ЧЕПУРИ, А.В. Влияние начального зазора на долговечность соединений. Ремонт, восстановление и модернизация. 2004, Vol. 6, pg. 29-32.

Lista publicațiilor autorului la tema tezei

Articole în reviste internaționale cotate ISI cu impact factor

1. ȘEREMET, V, MARIAN, G and ȘEREMET, D. Thermoelastic influence functions and solution to a locally mixed BVP for a strip. J. of thermal stresses. **Impact Factor 3.14**, 2018, Vol. 6, 41, pp. 706–720, ISSN 0149-5739.
2. ȘEREMET, V. and ȘEREMET, D. Solution in integrals of a 3D BVP of thermoelasticity: Green's functions and integration formula for thermal stresses within a semi-bounded parallelepiped. J. Acta Mechanica. Springer, **Impact Factor 2.505**, 2017, pp. 4471-4490, ISSN 0001-5970.
3. ȘEREMET, V. and ȘEREMET, D. Steady-state Green's functions for thermal stresses within rectangular region under point heat source, Journal of Thermal Stresses. **Impact Factor 3.14**, 2016, Vol. 39, nr. 8, pg. 906-927, ISSN 0149-5739.
4. ȘEREMET, V., and ȘEREMET, D. Structural formulas and Explicit Green's Functions for a Generalized BVP for Half-Strip under a Point-Heat Source. Engineering Mechanics. **Impact Factor 2.264**, September 2017, pp. 1943-7889, ISSN 0733-9399.

Articole în reviste din străinătate recunoscute

5. ȘEREMET D., Determining thermoelastic strains and stresses created by the temperature field and constrictions exerted on the contours of the reconditioned cylindrical piece, In: Journal TJMM, Romania. 2016, vol.8, No. 1, p. 89-97. ISSN: 2067-239X
6. ȘEREMET D., Computing Contributions to Restore Agricultural Machinery (A Contact Problem of Bearings with Diametrical Game Reconditioned by Composite Polymers) în: Journal TJMM, Romania. vol.8, No. 2, 2016, p. 175-181, ISSN: 2067-239X.

Articole în reviste din Registrul Național al revistelor de profil, categoria B

7. ȘEREMET D., and MARIAN G., Determinarea distribuției temperaturii în straturile compensatoare de uzură a pieselor recondiționate cu materiale compozite polimerice, în: Știința Agricolă, UASM, Chișinău, 2015, nr.2, p. 55-60, ISSN 1857-0003.
8. MARIAN G., și ȘEREMET D., Perfecționarea metodelor de calcul al ajustajelor îmbinărilor cu strângere alcătuite din piese recondiționate din componența mașinilor agricole, în: Știința Agricolă, UASM, Chișinău, 2020, nr.1, p. 115-126, 0,75 c. ISSN 1857-0603

Articole în culegeri internaționale

9. ȘEREMET D., Determinarea tensiunilor termice a unei probleme particulare de limită pentru o placă termoelastică de formă dreptunghiulară. In: Lucrări științifice. Simpozion internațional științific. UASM, 2018, voi. 48. p. 229-232. ISBN 978-9975-64- 297-2.
10. ȘEREMET D., and MARIAN G., Aplicarea metodei funcției Green la determinarea temperaturii, deplasărilor, și tensiunilor termice în acoperirile cilindrice, aplicate în straturi groase pe substraturi metalice (probleme de simetrie axială cu condiții mixte de limită), în: Lucrări științifice Simpozionul internațional științific. UASM, 2016, Voi. 46. p. 221-225, ISBN 978-9975-64-284-2.
11. ȘEREMET D., and MARIAN G., Aplicarea funcțiilor Green la calculul ajustajelor cu strângere renovate cu materiale compozite polimerice. în: Lucrări științifice. Simpozion internațional științific. UASM, 2015, Voi. 45 p. 321-326. ISBN 978-9975-64- 276-7.

12. **ȘEREMET D.**, Unele rezultate pentru deplasări și tensiuni termice în acoperirile cilindrice aplicate în straturi groase pe substraturi metalice obținute prin metoda funcției Green. în: *Lucrări științifice, Simpozionul internațional științific. UASM, 2016, Vol. 46 p. 220-230. ISBN 978-9975-64-284-2.*

13. **ȘEREMET V.**, **CREȚU I.**, **ȘEREMET D.**, Explicit thermal stresses within a thermoelastic half-strip and their graphical presentation using Maple - 15 Soft. In: *Proceedings of the Third International Conference of Mathematical Society of Moldova, Chișinău, Republic of Moldova, 2014, p. 410-413, ISBN 978-9975-68-244-2.*

Materiale la conferințe internaționale (peste hotare)

14. **ȘEREMET V.**, and **ȘEREMET D.**, The Derivation of volume dilatation caused by a unit point heat source. în: *Proceedings of 12 International Congress on Thermal Stresses (ICTS2019), pag. 74, 1-5 June, Zhejiang University, Hangzhou, China*

15. **МАРЬЯН Г.**, **ШЕРЕМЕТ Д.**, Новый метод расчета посадок с натягом восстановленных деталей металла полимерными композициями, În: *Евразийский Конгресс «Фундаментальные основы и практический опыт при проведении сервиса и рециклинга техники»*, Труды ГОСНИТИ 2016с с. 271-278, том 125., с.а. 0,5, г. ISSN 2587-6864.

Adnotare

Autor – Șeremet Dumitru. Titlul „Perfecționarea metodelor de calcul al ajustajelor cuplelor tribologice renovate cu materiale eterogene”.

Teză de doctor în științe ingineresti, Chișinău, 2022, este compusă din introducere, 4 capitole, concluzii generale și recomandări, bibliografie din 127 de titluri, 2 anexe, 124 pagini (până la bibliografie), 28 de figuri, 3 tabele. Rezultatele obținute sunt publicate în 15 lucrări științifice, inclusiv 4 cotate ISI

Cuvinte-cheie: Ajustaj, Clasa de toleranță, Precizie dimensională, Funcții Green, Îmbinări cu strângere, Îmbinări cu joc.

Domeniul de studiu: Științe ingineresti și tehnologii. Calculul ajustajelor cuplelor tribologice renovate. **Scopul lucrării:** Perfecționarea metodelor de calcul al ajustajelor cuplelor tribologice renovate cu materiale eterogene prin aplicarea funcțiilor Green. **Obiectivele cercetării:** Dezvoltarea, promovarea și aplicarea bazelor teoretice referitoare la calculul preciziei geometrice a pieselor de mașini recondiționate prin compensarea uzurii cu aplicarea unor straturi de materiale cu proprietăți speciale și la perfecționarea metodelor propriu-zise de calcul al ajustajelor îmbinărilor alcătuite din piese recondiționate cu materiale eterogene, elaborarea unui algoritm de calcul al ajustajelor prin metoda perfecționată.

Noutatea și originalitatea științifică constă în: a

- abordarea trans-disciplinară a problematicilor referitoare la asigurarea preciziei de proiectare a ajustajelor îmbinărilor alcătuite din piese recondiționate cu diferite materiale prin completarea cu realizările din domeniile interschimbabilității, mecanicii corpului solid și cu tendințele specifice fiabilității și disponibilității utilajelor agricole supuse intervențiilor de mentenanță;

- analiza critică detaliată a stadiului actual cu privire la metodele de calcul al ajustajelor îmbinărilor renovate cu materiale eterogene și căile de perfecționare a acestora;

- perfecționarea bazelor teoretice ale metodelor existente de calcul al preciziei geometrice a pieselor de mașini recondiționate și a ajustajelor din aceste piese prin elaborarea unor algoritmi de rezolvare a problemelor de limită mono și multidimensionale cu folosirea ulterioară a acestora la determinarea valorii ajustajelor îmbinărilor cu joc și cu strângere.

Rezultate obținute care contribuie la soluționarea problemelor științifice importante sunt: exprimate prin obținerea de cunoștințe noi, valorificate prin elaborarea unei metode originale de calcul al ajustajelor îmbinărilor alcătuite din piese recondiționate care se deosebește de cele existente prin soluționarea problemelor de limită din zona de contact cu aplicarea funcțiilor Green, fapt care a condus la mărirea preciziei de proiectare, celei tehnologice și celei funcționale.

Semnificația teoretică se referă la îmbunătățirea calității utilajelor agricole reparate prin perfecționarea metodei de calcul a ajustajelor diferitor îmbinări renovate cu materiale eterogene.

Valoarea aplicativă a lucrării constă în posibilitatea folosirii metodei de calcul propuse pentru mărirea preciziei de calcul al ajustajelor îmbinărilor pieselor de mașini renovate și la perfecționarea procesului de instruire a studenților, masteranzilor și doctoranzilor de la specialitățile din domeniul științei și activităților ingineresti.

Implementarea rezultatelor științifice. Rezultatele obținute vor fi implementate în lucrările de elaborare și proiectare a tehnologiilor de reparație a utilajului agricol.

Annotation

Author – Seremet Dumitru. Title- „Improving the methods used to calculate engineering fits of tribological couples renovated with heterogeneous materials". Doctoral Thesis in Engineering Sciences, Chisinau, 2022.

The thesis consists of the introduction, four chapters, conclusions and recommendations, bibliography of 127 sources, 2 Annexes, 124 pages (up to bibliography), 28 figures, 3 tables. The obtained results are published in 15 scientific papers, including 4 ISI resources.

Key-words: Engineering fit, Tolerance class, Dimensional accuracy, Green's functions, Interference fits, Clearance fits.

Field of study: Engineering sciences and technologies. Calculation of engineering fits of renovated tribological couples.

Aim of the paper: Improving the quality of repaired agricultural equipment by applying an improved method of calculating adjustments of renovated tribological couples with heterogeneous materials by applying Green functions .

Research objectives: To develop, promote and apply theoretical bases related to the calculation of geometric accuracy for machine parts reconditioned by compensating their wear with the application of material layers, characterized by special properties and improvement of the methods used to calculate joint fits that consist of reconditioned heterogeneous materials, to develop an algorithm used to calculate fits employing the improved method.

Scientific novelty includes:

- a transdisciplinary approach for the issues related to the accuracy when designing joint fits made of parts reconditioned utilizing different materials through achievements in the fields of interchangeability, solid body mechanics and with the trends specific to reliability and availability of agricultural machinery subject to maintenance interventions;
- detailed critical analysis of the actual state regarding the methods of calculating joint fits renovated with heterogeneous materials and the ways to improve them;
- improvement of theoretical bases of existing methods used to calculate the geometric accuracy of reconditioned machine parts and fits in these parts by developing algorithms to solve mono- and multi-dimensional boundary problems with their subsequent use when determining the value of fits of clearance and interference joints.

The obtained results that contribute to solving important scientific problems are expressed by acquiring new knowledge, capitalized by developing an original method of calculating joint fits made of reconditioned parts that differ from existing ones by solving boundary problems in the contact area with the application of Green's functions, which led to the improved design, technological and functional accuracy.

Theoretical significance refers to the quality improvement of the agricultural equipment repaired by improving the method of calculating the fits of different joints renovated with heterogeneous materials.

Applicative value of the paper consists in the possibility to use the proposed calculation method to increase the calculation accuracy of joint fits of renovated machine parts and to improve the training process of Bachelor's, Master's and Doctoral students in science and engineering.

Аннотация

Автор - Шермет Думитру. Название - «Совершенствование методов расчета посадок трибологических пар восстановленных разнородными материалами».

Диссертация кандидата инженерных наук, Кишинев, 2022.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и рекомендаций, библиографии из 127 источников, 2 приложений, 124 страниц (до библиографии), 28 фигур, 3 таблиц. Полученные результаты опубликованы в 15 научных трудах, в том числе 4 котируемые ISI.

Ключевые слова: Посадка, класс точности, размерная точность, функции Грина, соединения с натягом, соединения с зазорами.

Область исследования: Технические науки и технологии. Расчет посадок восстановленных трибологических пар.

Цель работы: Повышение качества ремонтируемой сельскохозяйственной техники за счет применения усовершенствованного метода расчета поправок отремонтированных трибологических моментов с разнородными материалами с применением функций Грина.

Задачи исследования: Разработка, внедрение и применение теоретических основ расчета геометрической точности восстановленных деталей машин путем компенсации износа покрытиями со специальными свойствами и совершенствованию существующих методов расчета посадок соединений из восстановленных деталей, разработка программы для расчета посадок по усовершенствованному методу.

Научная новизна и оригинальность заключается в:

- междисциплинарной трактовки вопросов обеспечения точности проектирования посадок деталей, восстановленных различными материалами путем дополнения знаний в области взаимозаменяемости, механики твердого тела, надежности и готовности отремонтированной сельскохозяйственной техники;
- детальный критический анализ состояния методов расчета посадок деталей, восстановленных неоднородными материалами и выявление путей их улучшения;
- совершенствование теоретических основ расчета геометрической точности восстановленных деталей машин и из посадок путем разработки алгоритмов для решения одно- и многомерных краевых задач с их последующим использованием при расчете посадок с зазором и с натягом.

Полученные результаты, вносящие вклад в решение важных научных проблем, заключаются в приобретении новых знаний, материализованные путем разработки оригинального метода расчета посадок восстановленных деталей отличающиеся от существующих решением краевых задач в зоне контакта соединения с применением функций Грина, что способствовало повышению проектной, технологической и функциональной точности.

Теоретическая значимость заключается в улучшении качества отремонтированной с.-х. техники путем совершенствования метода расчета посадок деталей, восстановленных разнородными материалами.

Прикладная ценность работы заключается в возможности использования предложенного метода расчета для повышения точности расчета посадок восстановленных деталей машин и улучшения процесса обучения студентов технических специальностей.

Внедрение научных результатов: Полученные результаты могут быть внедрены в работы по разработке и проектированию технологий ремонта сельскохозяйственной техники.

**PERFEȚIONAREA METODELOR DE CALCUL AL
AJUSTAJELOR CUPLELOR TRIBOLOGICE RENOVATE CU
MATERIALE ETEROGENE**

**255.02. TEHNOLOGII ȘI MIJLOACE TEHNICE PENTRU INDUSTRIA
PRODUSELOR AGRICOLE**

Rezumat al tezei de doctor în științe inginerești

Aprobat spre tipar: data Hârtie offset. Tipar offset. Coli de tipar.:	Formatul hârtiei 60x84 1/16 Tiraj ... ex Comanda nr.
---	---

Ch.:Centrul Ed. al UASM