

**UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” GALAȚI**

**FACULTATEA DE MECANICĂ**

**Inginer Valentin MEREUȚĂ**

**STUDII PRIVIND INFLUENȚA STĂRII DE  
INTEGRITATE A SUPRAFETEI ASUPRA  
DEGRADĂRII PRIN OBOSEALĂ**

**REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT**

**Conducător științific:**

**Prof. univ. dr. ing. Liviu Palaghian**

**GALAȚI**

**-2012-**



ROMÂNIA  
UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS”  
DIN GALAȚI



MINISTERUL  
EDUCAȚIEI  
CERCETĂRII  
TINERETULUI  
ȘI SPORTULUI

c. 11394/29.10.2012

Către

Universitatea “ Dunărea de Jos “ din Galați vă face cunoscut că în data de \_\_\_\_\_, ora \_\_\_\_\_  
în \_\_\_\_\_, va avea loc susținerea  
publică a tezei de doctorat intitulată: “STUDII PRIVIND INFLUENȚA STĂRII DE INTEGRITATE A  
SUPRAFETEI ASUPRA DEGRADĂRII PRIN OBOSEALĂ”, elaborată de domnul/doamna MEREUȚĂ  
VALENTIN-LUCIAN, în vederea conferirii titlului științific de doctor în Domeniul de doctorat - Inginerie  
mecanică.

Comisia de doctorat are următoarea componență :

- 1. Președinte:** Prof.univ.dr.ing. Cătălin FETECĂU  
Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați
- 2. Conducător  
de doctorat:** Prof.univ.dr.ing. Liviu PALAGHIAN  
Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați
- 3. Referent oficial:** Prof.univ.dr.ing. Anton HADĂR  
Universitatea POLITEHNICA din București
- 4. Referent oficial:** Prof.univ.dr.ing. Andrei TUDOR  
Universitatea POLITEHNICA din București
- 5. Referent oficial:** Prof.univ.dr.ing. Iulian-Gabriel BÎRSAN  
Rector-Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați

Cu această ocazie vă transmitem rezumatul tezei de doctorat și vă invităm să participați la susținerea  
publică. În cazul în care doriți să faceți eventuale aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării, vă rugăm  
să le transmiteți în scris pe adresa Universității, str. Domneasă nr. 47, 800008 - Galați, Fax - 0236 / 461353.



Prof.univ.dr.ing. Iulian-Gabriel BÎRSAN

**Cuvinte cheie:**

Degradare prin oboseală

Integritatea suprafeței

Parametrii de amplitudine a rugozității

Parametrii de structură fină

Microduritate

Factorii de concentrare a tensiunii

Modelele Arola-Ramulu și Neuber

## CUPRINS

<b>CAPITOLUL 1. INTRODUCERE</b>	3
1.1. Aspecte ale degradării prin oboseală	3
1.2. Obiectivul lucrării	3
1.3. Structura lucrării	3
<b>CAPITOLUL 2. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND INFLUENȚA STĂRII DE INTEGRITATE A SUPRAFETELOR ASUPRA DEGRADĂRII PRIN OBOSEALĂ</b>	4
2.1. Conceptul de integritate a suprafeței și parametrii caracteristici	4
<b>CAPITOLUL 3. MICROGEOMETRIA SUPRAFETEI ȘI DURABILITATEA LA OBOSEALĂ</b>	5
3.1. Parametrii geometrici care caracterizează starea de integritate a suprafețelor	5
3.2. Influența rugozității suprafețelor asupra tensiunilor remanente și asupra rezistenței la oboseală	6
3.3. Influența rugozității și a densității defectelor de suprafață asupra rezistenței la oboseală	6
3.4. Efectul microdurității asupra comportamentului la oboseală	6
3.5. Concluzii la stadiul actual al cercetărilor	7
<b>CAPITOLUL 4. TEHNICI ȘI METODE EXPERIMENTALE</b>	8
4.1. Aparatura utilizată în vederea studierii integrității suprafețelor	8
4.2. Concluzii privind tehnici și metode de investigare utilizate	9
<b>CAPITOLUL 5. REZULTATE EXPERIMENTALE</b>	9
5.1. Evaluarea durabilității la oboseală	9
5.2. Analiza evoluției parametrilor de amplitudine a rugozității stratului superficial în procesul de degradare prin oboseală	10
5.2.1. Concluzii privind analiza evoluției parametrilor de amplitudine a rugozității	12
5.3. Analiza evoluției parametrilor de structură fină	13
5.3.1. Evoluția dimensiunilor medii ale blocurilor de mozaic	14
5.3.2. Variația distanței interplanare	14
5.3.3. Evoluția densității de dislocații	15
5.3.4. Intensitatea integrală $I_{int}$	16
5.3.5. Analiza tensiunilor interne de ordinul I	17
5.3.6. Concluzii privind analiza evoluției parametrilor de structură fină	18
5.4. Utilizarea rețelelor neuronale în analiza gradului de influență a parametrilor de amplitudine a rugozității și a parametrilor de structură fină în	19

procese de oboseală	
5.4.1. Evaluarea influenței parametrilor de amplitudine a rugozității	19
5.4.2. Evaluarea influenței parametrilor de rugozitate asupra evoluției parametrilor de structură fină utilizând rețele neuronale	21
5.4.3. Concluzii privind utilizarea rețelelor neuronale în analiza gradului de influență a parametrilor de amplitudine a rugozității și a parametrilor de structură fină în procesele de oboseală	22
5.5. Evaluarea degradării stratului superficial în procesele de oboseală pe baza evoluției microdurității	22
5.5.1. Indicatori de evaluare a stării de degradare	22
5.5.2. Rezultate experimentale privind evoluția microdurității cu durata solicitării	23
5.5.3. Rezultate experimentale privind influența degradării asupra evoluției microdurității în procesele de oboseală	24
5.5.4. Rezultate experimentale privind legătura dintre efectul de indentare și procesul de oboseală	24
5.5.5. Caracterizarea influenței nivelului rugozității stratului superficial asupra comportării la solicitări variabile pe baza parametrului Deteriorare	26
5.5.6. Concluzii privind analiza evoluției microdurității stratului superficial	27
5.6. Influența rugozității ca defect de suprafață asupra comportării la solicitări variabile. Validarea modelelor existente pe baza datelor experimentale folosind parametri de rugozitate 3D	28
5.6.1. Rezultate experimentale	28
5.6.2. Influența rugozității ca factor de concentrare a tensiunilor asupra comportării la solicitări variabile	32
5.6.3. Concluzii privind modelele analizate	37
<b>CAPITOLUL 6. MODELE PROPUSE PENTRU STUDIUL DEGRADĂRII PRIN OBOSEALĂ PE BAZA STĂRII DE INTEGRITATE A SUPRAFETEI</b>	38
6.1. Modele propuse pentru studiul degradării prin oboseală	38
6.2. Concluzii privind evaluarea modelelor propuse pentru determinarea factorului teoretic de concentrare a tensiunilor, $K_t$ și a factorului efectiv de concentrare a tensiunilor, $K_f$	43
<b>CAPITOLUL 7. CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE</b>	45
7.1. Concluzii generale	45
7.2. Contribuții originale	46
7.3. Direcții viitoare de cercetare	47
<b>Bibliografie selectivă</b>	48

## **Capitolul 1. Introducere**

### ***1.1. Aspecte ale degradării prin oboseală***

*Oboseala este procesul modificărilor structurale localizate, cu caracter progresiv și permanent, într-una sau mai multe zone ale unui material supus unor solicitări ce produc fluctuația tensiunilor și deformațiilor și care pot culmina cu apariția fisurilor sau ruperea completă după un număr suficient de fluctuații [1].*

Oboseala este un proces care se caracterizează prin pierderea integrității stării inițiale a materialului, durata de viață fiind apreciată cu un anumit grad de imprecizie, chiar dacă în ultimii ani s-au făcut progrese importante în studiul acestui proces sau al propagării fisurilor și se cunosc cu acuratețe proprietățile materialelor.

Ruperea prin oboseală este cel mai frecvent tip de degradare a componentelor și structurilor mecanice. Inițierea degradării prin oboseală are loc, de obicei, la suprafața componentelor unde cel mai adesea apar, ca urmare a proceselor tehnologice, neomogenități și defecte care afectează integritatea stratului superficial și pot constitui amorsele fisurilor de oboseală.

### ***1.2. Obiectivul lucrării***

Obiectivul lucrării de față este acela de a efectua un studiu sistematic și amănunțit în vederea cuantificării și evaluării influenței stării de integritate a suprafețelor pieselor componente ale structurilor mecanice asupra degradării prin oboseală.

Dintre factorii care caracterizează starea de integritate a suprafeței s-au luat în studiu, ca element de bază, factorul geometric, rezultat în urma prelucrării mecanice, (rugozitatea suprafeței) și factorul metalurgic evaluat prin parametrii de structură fină și microduritate.

Analiza evoluției, în timpul solicitărilor variabile, a acestor factori a permis validarea experimentală și elaborarea unor modele care să descrie modul în care macro și microgeometria suprafeței evoluează în timpul procesului de oboseală și contribuie la mecanismul general al degradării prin oboseală.

### ***1.3. Structura lucrării***

Lucrarea este structurată în șase capitole.

În Capitolul 1 sunt prezentate aspecte ale degradării prin oboseală, obiectivul lucrării și structura acesteia.

Capitolul 2 cuprinde trei subcapitole și prezintă stadiul actual al cercetărilor privind influența stării de integritate a suprafețelor asupra degradării prin oboseală. În primul subcapitol este prezentat conceptul de integritate a suprafeței și sunt prezentați parametrii stratului superficial care definesc integritatea suprafeței. Cel de-al doilea subcapitol face o trecere în revistă a

tipurilor de procese tehnologice, influența procesului tehnologic asupra stării de integritate a suprafeței fiind prezentată în cel de-al treilea subcapitol.

În capitolul 3 sunt prezentate noțiuni despre microgeometria suprafeței și durabilitatea la oboseală. Acest capitol cuprinde opt subcapitole în care sunt prezentați parametrii geometrici care caracterizează starea de integritate a suprafețelor și influența acestora asupra: durabilității la oboseală, tensiunilor remanente și concentrării tensiunilor. Tot în acest capitol este prezentat și efectul microdurității asupra comportamentului la oboseală și metodele pentru studiul integrității suprafeței. Acest capitol se încheie cu concluziile asupra stadiului actual al cercetării.

Capitolul 4 este structurat în șapte subcapitole și prezintă pe rând materialul luat în studiu, caracteristicile mecanice și compoziția chimică a acestuia, epruvetele și standul pe care s-au făcut încercările, aparatul utilizată pentru investigarea integrității suprafeței și concluziile asupra tehnicilor și metodelor de investigare.

Rezultatele experimentale sunt prezentate în Capitolul 5, alcătuit din șase subcapitole, în care se prezintă evoluția parametrilor stratului superficial analizați și concluziile aferente. Tot în acest capitol este studiată influența rugozității ca defect de suprafață asupra comportării la solicitări variabile și se fac aprecieri privind aplicarea rezultatelor experimentale proprii în unele modele existente. Totodată se analizează influența variației rugozității asupra mecanismului de inițiere a fisurii pe baza evoluției valorii de prag a factorului de intensitate a tensiunilor,  $K_{th}$ .

Capitolul 6 prezintă modele propuse pentru studiul degradării prin oboseală pe baza stării de integritate a suprafeței și concluziile privind modelele propuse pentru determinarea factorului teoretic de concentrare a tensiunilor,  $K_t$  și a factorului efectiv de concentrare a tensiunilor,  $K_f$ .

În Capitolul 7 sunt prezentate concluziile generale ale lucrării, contribuțiile originale și direcțiile de cercetare. Finalul lucrării cuprinde referințele bibliografice și anexele.

## **Capitolul 2. Stadiul actual al cercetărilor privind influența stării de integritate a suprafețelor asupra degradării prin oboseală**

### ***2.1. Conceptul de integritate a suprafeței și parametrii caracteristici***

Un istoric al conceptului de integritate a suprafeței a fost publicat de M'Saoubi [2]. Field și al. [5] studiind influența proceselor de prelucrare asupra stratului superficial și modificările structurale care apar, atât la suprafața materialului cât și în stratul superficial, au introdus conceptul de *Integritate a suprafeței*, furnizând și o descriere detaliată a metodelor disponibile de evaluare și procedura experimentală de determinare a parametrilor de integritate.

Starea de integritate a unei suprafețe metalice poate fi definită cu ajutorul a trei parametri: un parametru geometric (rugozitatea suprafeței); un parametru mecanic (tensiuni reziduale de ordinul I, II și III) și un parametru metalurgic (microstructură). Acești trei parametri pot varia separat în funcție de condițiile și tehnologia de prelucrare [7].

Unii autori [8, 11] au propus o legătură între proprietățile stratului superficial, mecanismul de degradare și caracteristicile de rezistență. S-a constatat că o influență puternică în procesul de degradare prin oboseală o are geometria stratului superficial, tensiunile reziduale și microfisurile.

Prelucrarea de finisare întârzie apariția fisurilor și, în consecință, se îmbunătățește rezistența la oboseală [13]. Cu toate acestea, rezultatul final depinde foarte mult de tratamentul termic realizat în finalul procesului de prelucrare.

La nivel structural degradarea se poate caracteriza prin fenomene micro și macroscopice de natură diferită care în final conduc la formarea de microfisuri izolate, situate la marginile grăunților, în zonele de concentrare a benzilor de alunecare și în zonele cu defecte structurale (impurități) [19, 22].

S-a constatat că cele mai multe microfisuri sunt generate plecând de la suprafața materialului, din cauza tensiunilor din exploatare și din cauza agenților chimici și corozivi. Fisurile apărute ca urmare a procesului de oboseală pot apare și în situația în care tensiunile nominale sunt mult mai mici decât limita de elasticitate a materialului, prin efectul de concentrare a tensiunilor care are loc în jurul unor defecte. În aceste zone pot apare deformații plastice și se pot iniția fisurile de oboseală. După un anumit număr de cicluri de solicitare, degradarea se manifestă prin multiplicarea și unirea fisurilor, urmate de propagarea acestora.

### **Capitolul 3. Microgeometria suprafeței și durabilitatea la oboseală**

#### ***3.1. Parametrii geometrici care caracterizează starea de integritate a suprafețelor***

Procesele de fabricație conduc la modificarea stării de integritate a suprafețelor. Unul dintre parametrii care caracterizează această stare de integritate este rugozitatea suprafeței [32, 33].

S-a demonstrat că rezistența la oboseală a componentelor mecanice este influențată de rugozitatea suprafețelor și crește odată cu scăderea nivelului acesteia [36].

În unele lucrări s-a studiat doar influența parametrului de amplitudine,  $R_a$  care mai târziu a fost considerat insuficient pentru a caracteriza influența rugozității suprafeței asupra procesului de degradare prin oboseală.

Astfel, [38, 42, 45] au studiat influența rugozității suprafeței asupra solicitării la oboseală și au urmărit evoluția parametrilor de amplitudine a rugozității,  $S_q$  și  $R_v$ ,  $R_t$  și  $R_z$  în funcție de numărul ciclurilor de solicitare, care a



indicat faptul că rezistența la oboseală crește odată cu creșterea gradului de finisare a suprafeței.

### **3.2. Influența rugozității suprafețelor asupra tensiunilor remanente și asupra rezistenței la oboseală**

Prezența tensiunilor remanente poate influența durabilitatea la solicitarea de oboseală și comportarea la rupere a materialelor [64].

Koster [68] a sugerat că atunci când valoarea rugozității este mare ( $R_a = 2,5 \div 5 \mu\text{m}$ ) tensiunile remanente au o influență mai mică asupra rezistenței la oboseală a materialului decât gradul de prelucrare a suprafețelor. El-Helieby [69] studiind rezistența la oboseală a oțelului EN 31(AISI E52100) a concluzionat că efectul tensiunilor remanente asupra oboselii este mai mare decât influența rugozității pentru suprafețele foarte fin prelucrate, considerând drept cauză temperaturile înalte dezvoltate în timpul prelucrării, generatoare de tensiuni remanente. Rezultate similare a obținut și Leverant [70] studiind un aliaj Ti-6Al-4V, cu suprafețe prelucrate cu o rugozitate de  $R_a = 0,6 \mu\text{m}$ .

### **3.3. Influența rugozității și a densității defectelor de suprafață asupra rezistenței la oboseală**

Rugozitatea suprafeței poate fi considerată ca defect de la suprafața ideală, datorându-se interacțiunii dintre material și scula de prelucrat, depinzând de mișcarea și geometria acesteia, operația de prelucrare fiind însoțită de procese ca: deformarea elastică și plastică; frecarea dintre sculă și piesă; efecte termice; vibrații; etc.

Murakami și alții [80, 82, 83] au efectuat studii ample privind efectele defectelor, incluziunilor și neomogenităților asupra rezistenței la oboseală. Pe baza cercetărilor s-a obținut o ecuație pentru predicția rezistenței la oboseală pentru probele cu defecte mici și incluziuni, supuse oboselii de încovoiere rotativă.

### **3.4. Efectul microdurității asupra comportamentului la oboseală**

Referitor la influența durității materialelor asupra rezistenței la oboseală cercetări privind modificarea durității între 380 HB și 670 HB au arătat o creștere liniară a rezistenței la oboseală odată cu creșterea durității până la 600 HB și o scădere a acesteia după 600 HB.

Cel mai interesant fenomen în studiul microdurității cu ajutorul metodei Vickers este *efectul de indentare, ISE*, [108, 115], care apare atunci când se înregistrează o creștere a durității odată cu scăderea dimensiunii de indentare sau a sarcinii aplicate indenterului. Studiul efectului de indentare, a fost făcut experimental atât prin micro cât și prin nanoindentare [116, 120]. Acest fenomen a fost atribuit evoluției dislocațiilor de sub indenter care duce la modificarea gradului de deformare [122].

### 3.5. Concluzii la stadiul actual al cercetărilor

- Starea de integritate a suprafeței este un factor important care influențează comportamentul general al elementului structural la diverse solicitări. Acest lucru este consecința suprapunerii tuturor operațiilor de fabricație asupra proprietăților stratului superficial, ultima operație de prelucrare considerându-se ca fiind definitorie pentru evoluția deteriorării.
- Rezistența la oboseală a componentelor mecanice este influențată de starea de integritate a suprafețelor caracterizată global prin rugozitatea suprafețelor. Influența nivelului rugozității se manifestă în procesul de oboseală prin apariția și evoluția fisurii.
- Integritatea suprafeței și nivelul rugozității influențează distribuția tensiunilor remanente conducând la modificări în comportarea la oboseală.
- În cazul unor valori mari ale rugozității, tensiunile remanente conduc la apariția unor vârfuri de tensiuni de compresiune în stratul superficial, cu influență favorabilă asupra rezistenței la oboseală, fiind factorul predominant.
- Rugozitatea suprafeței poate fi considerată ca defect pentru suprafața ideală urmare a interacțiunii dintre scula de prelucrat și material.
- Rugozitatea influențează rezistența la oboseală prin efectul de concentrare a tensiunilor, cât și prin modificări în structura cristalină a materialului. Tensiunile maxime se înregistrează la baza rizurilor de prelucrare, fiind mai mari decât tensiunile medii care acționează în stratul superficial.
- Nivelul rugozității este unul din factorii extrinseci care influențează microduritatea materialelor. Prelucrări cu valori scăzute ale nivelului rugozității duc la creșterea microdurității stratului superficial și implicit la modificarea rezistenței la oboseală.
- Definierea rugozității suprafeței se poate realiza pe baza mai multor parametri. Parametrii de rugozitate spațiali cât și cei hibridi nu oferă rezultate satisfăcătoare în studiul influenței rugozității asupra oboselii, *cel mai bine acest fenomen fiind caracterizat de parametrii de amplitudine a rugozității.*
- Parametrul cel mai frecvent utilizat este  $R_a$ , înălțimea medie aritmetică, însă acesta nu este la fel de sensibil la variațiile rugozității suprafeței comparativ cu alți parametri.
- În vederea studiului influenței rugozității asupra rezistenței la oboseală trebuie aleși acei parametri care descriu cu acuratețe influența rugozității ca defect de suprafață. Parametrii de amplitudine cum ar fi: *Înălțimea în*

zece puncte ( $R_z$ ), Înălțimea maximă a profilului ( $R_p$ ) sau Adâncimea maximă a văilor ( $R_v$ ), pot caracteriza comportarea la oboseală deoarece indică cu un grad de acuratețe mai mare defectele de suprafață.

## Capitolul 4. Tehnici și metode experimentale

### 4.1. Aparatura utilizată în vederea studierii integrității suprafețelor

Înregistrarea evoluției **parametrilor de rugozitate** s-a realizat cu ajutorul unui aparat portabil pentru măsurarea rugozității Namicon TR 200<sup>TM</sup> prevăzut cu o interfață grafică RS232, acesta înregistrează 13 parametri de rugozitate, cu posibilitatea conectării la un calculator pentru achiziționarea datelor, și a profilometrului CETR PRO 500.

Au fost utilizate ambele aparate pentru caracterizarea mai bună a stării suprafețelor, cel portabil din cauza lungimii mari de scanare (17,5 mm), iar PRO 500 pe motivul posibilității de scanare 3D a probelor.

Scanarea 3D a probelor s-a realizat pe suprafața maximă de 500x500  $\mu\text{m}$ , în 100 de puncte pe fiecare linie. Prelucrarea datelor experimentale achiziționate cu profilometrul PRO 500 s-a realizat cu ajutorul unui soft dedicat de procesare a imaginii.

Au fost măsurate șaptezeci de probe, grupate pe trei niveluri de prelucrare a stratului superficial, cu trei măsurători efectuate pentru fiecare probă, în calcul luându- se media acestor valori.

Evoluția parametrilor de rugozitate s-a realizat prin înregistrarea după parcurgerea a  $4,5 \times 10^4$  cicluri de solicitare, până la rupere.

Evoluția **parametrilor de structură fină** s-a realizat cu ajutorul unui difractometru de radiații X tip DRON-3 datele înregistrate fiind prelucrate cu ajutorul a două programe dedicate EXPRESS și OUTSET.

În urma analizei liniilor de difracție obținute, (110) și (220), s-au obținut informații cu privire la: evoluția dimensiunii medii a blocurilor de mozaic; modificarea distanțelor interplanare; evoluția densității de dislocație; a intensității integrale și a tensiunilor interne de ordinul I.

Aceste date se obțin după analiza mărimilor caracteristice liniilor de difracție: poziție, alură, intensitate, lățime etc. De asemenea, pe baza datelor furnizate de spectrul de difracție, se poate face analiza de fază calitativă și cantitativă, precum și studierea indirectă a unor procese fizice, mecanice sau metalurgice la care a fost supus materialul cristalin studiat.

Evoluția **microdurității** pe parcursul solicitării de oboseală s-a realizat cu ajutorul unui echipament pentru măsurarea microdurității Vickers, prin măsurarea amprente lăsate de indenter.

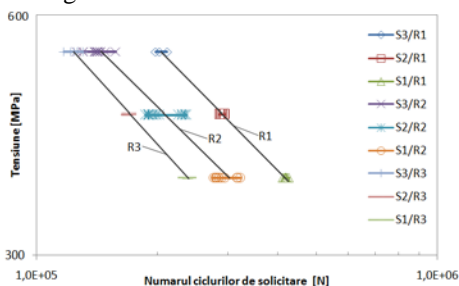
#### 4.2. Concluzii privind tehnici și metode de investigare utilizate

- Studiile în lucrarea de față s-au realizat pe epruvete plate, solificate la oboseală de încovoiere plană, pe un stand de încercări cu epruveta în consolă.
- Pentru caracterizarea integrității suprafeței, s-a utilizat marca de oțel *S355JR EN 10025:2004*, folosit în componența unor structuri mecanice, unde starea suprafeței influențează comportarea structurii la solicitarea variabilă.
- Starea de integritate a fost caracterizată în principal pe baza nivelului rugozității, a evoluției parametrilor de structură fină și a microdurității.
- Din punct de vedere al nivelului rugozității s-a determinat, pe parcursul încercărilor de oboseală, evoluția următorilor parametri de amplitudine a rugozității: *Abaterea medie aritmetică  $S_a$* , *Abaterea medie pătratică a profilului  $S_q$* , *Adâncimea medie în 10 puncte a rugozității  $S_{10z}$* , *Valoarea maximă a adâncimii văii  $S_v$* , *Valoarea maximă a vârfului profilului  $S_p$* , *Înălțimea maximă a profilului  $S_y$* .
- Din punct de vedere al parametrilor de structură fină s-a urmărit evoluția: dimensiunii medii a blocurilor de mozaic, distanței interplanare, densității de dislocație și a intensității integrale.
- În ceea ce privește caracterizarea comportamentului local la deformații, a materialului, s-a analizat evoluția microdurității și a efectului de indentare.

### Capitolul 5. Rezultate experimentale

#### 5.1. Evaluarea durabilității la oboseală

Rezultatele încercărilor de oboseală realizate pe epruvete plate, din oțel marca *S355JR EN 10025:2004*, solificate în ciclu alternant simetric de încovoiere plană sunt prezentate în figura 5.1.



**Figura 5.1.** Durabilitatea la oboseală a epruvetelor plate solificate la încovoiere alternant simetrică

În figura 5.1, este prezentată durabilitatea la oboseală a epruvetelor la trei niveluri de solicitare ( $S_1= 345$  MPa,  $S_2= 450$ MPa,  $S_3= 540$ MPa) și cele trei niveluri de rugozitate R1, R2, R3. Din analiza comportării la oboseală se remarcă faptul că durabilitatea crește, pentru aceeași sarcină, odată cu micșorarea valorii rugozității suprafețelor.

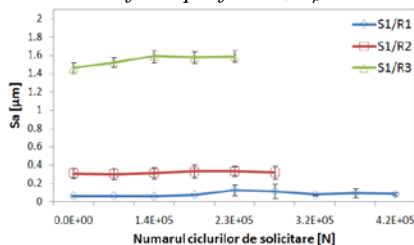
## 5.2. Analiza evoluției parametrilor de amplitudine a rugozității stratului superficial în procesul de degradare prin oboseală

În urma rezultatelor obținute pentru parametrii de amplitudine a rugozității, pe toată durata solicitării la oboseală, s-a urmărit evoluția globală a parametrilor: *Abateră medie aritmetică*,  $S_a$ ; *Abateră medie pătratică a profilului*,  $S_q$ ; *Adâncimea medie în 10 puncte a rugozității*,  $S_{10z}$ ; *Înălțimea maximă a profilului*,  $S_y$ ; *Valoarea maximă a adâncimii văii*,  $S_v$ ; *Valoarea maximă a vârfului profilului*,  $S_p$ , pentru cele trei niveluri de solicitare și cele trei grade de prelucrare a suprafeței.

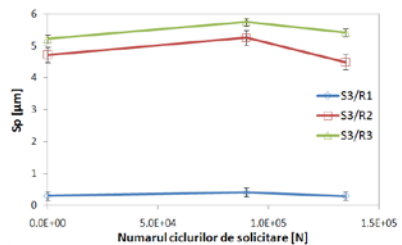
Din analiza figurii 5.2, în care este prezentată evoluția parametrilor de amplitudine pentru nivelul de rugozitate R1 la cele trei niveluri de solicitare se poate observa că aceștia evoluează crescător pe parcursul solicitării variabile, de la o valoare inițială, până la o valoare maximă, după care se produce o scădere bruscă.

Numărul ciclurilor de solicitare la care se înregistrează valoarea maximă depinde de nivelul de prelucrare al probelor. La nivele scăzute ale rugozității acest număr de cicluri este mai mare, iar la nivele ridicate numărul este mai mic.

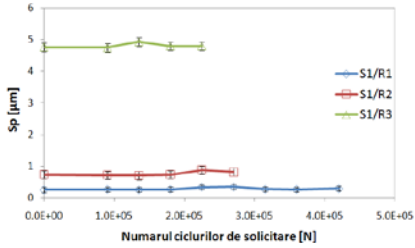
Se constată că evoluția cea mai semnificativă, o are parametrul *Valoarea maximă a adâncimii văii*  $S_v$ , pentru toate sarcinile de solicitare. Evoluții mai mici s-au înregistrat în cazul parametrilor *Abateră medie aritmetică*,  $S_a$  și *Valoarea maximă a vârfului profilului*,  $S_p$ .



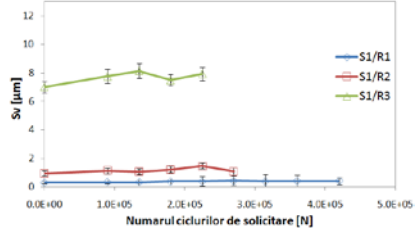
a)



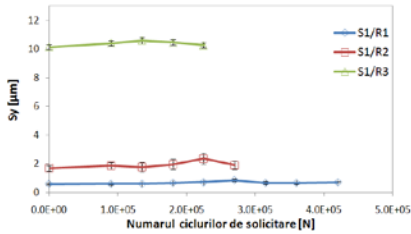
b)



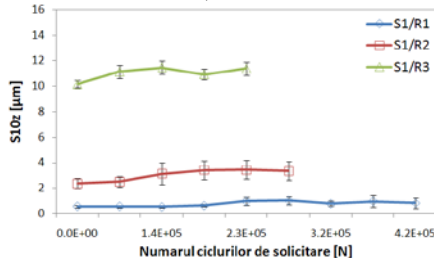
c)



d)



e)



f)

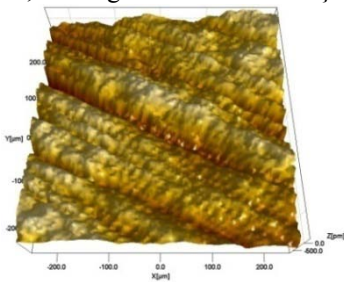
**Figura 5.2.** Evoluția parametrilor de rugozitate ( $S1=345\text{MPa}$ ):

- a) parametrul  $S_a$ , b) parametrul  $S_q$ , c) parametrul  $S_p$ , d) parametrul  $S_v$ , e) parametrul  $S_y$ , f) parametrul  $S_{10z}$

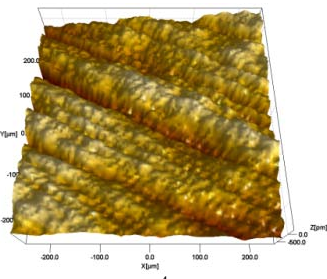
Din analiza evoluției parametrilor de amplitudine a rugozității cu sarcina de solicitare și nivelul rugozității rezultă următoarele:

- toți parametrii de amplitudine a rugozității analizați au același tip de evoluție (crescătoare-descrescătoare);
- numărul minim de cicluri de solicitare la care apare maximum în evoluția parametrilor de amplitudine a rugozității se înregistrează la nivelele maxime ale solicitării și rugozității;

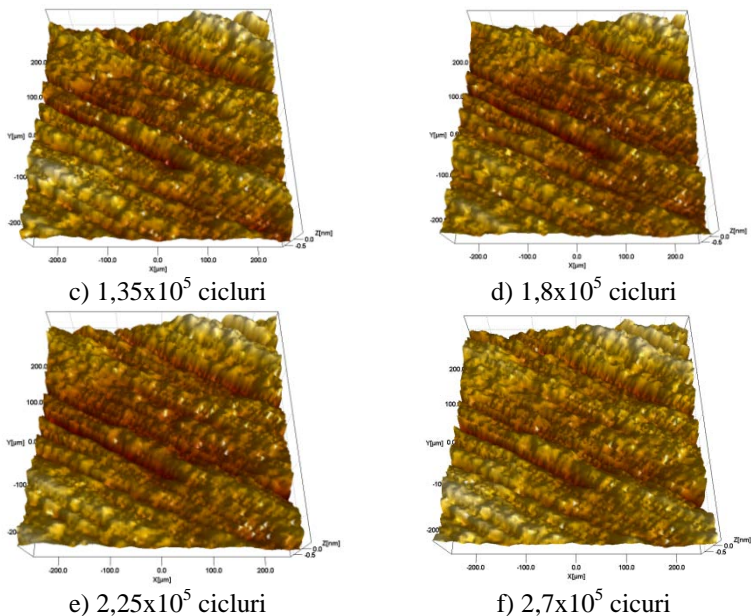
Parametrul, Adâncimea maximă a văii,  $S_v$ , ținând cont de nivelul solicitării, este legat în final de evoluția factorului de concentrare a tensiunilor.



a) probă nesolicitată



b)  $9 \times 10^4$  cicluri



**Figura 5.3.** Profilul 3D al suprafeței pentru nivelul de rugozitate R2 după diferite cicluri de solicitare

Modificarea microgeometriei suprafeței pe parcursul solicitării de oboseală poate fi observată și din analiza figurii 5.3, care prezintă profilul 3D al suprafeței în cazul unei probe solicitate la 345MPa și prelucrată la nivelul de rugozitate R2. Se constată o creștere a adâncimii văilor odată cu creșterea numărului ciclurilor de solicitare și se remarcă o creștere a numărului de zone cu valori maxime ale golurilor.

Din analiza imaginilor profilogramelor se remarcă faptul că după atingerea nivelului maxim al numărului de zone cu adâncime maximă a văilor urmează o scădere a numărului de zone cu adâncimi mari (fig. 5.3, f)

Considerăm că această evoluție, în două etape, poate fi explicată pe baza fenomenului de închidere a fisurilor. Nivelul maxim al adâncimii văilor poate fi considerat ca o fisură incipientă.

### 5.2.1. Concluzii privind analiza evoluției parametrilor de amplitudine a rugozității

- În timpul procesului de oboseală microgeometria suprafeței, caracterizată prin rugozitate și parametrii acesteia au un caracter evolutiv.

- Parametrii de amplitudine a rugozității pot constitui factori de evaluare a comportării la oboseală.
- În procesul de degradare prin oboseală parametrii de amplitudine a rugozității evoluează în timp și în funcție de nivelul tensiunii aplicate [146, 149, 150]. Evoluția parametrilor are loc în două etape: etapa de creștere valorică urmată de o scădere.
- Momentul în care neregularitatea suprafeței devine concentrator de tensiune și poate duce la inițierea fisurii, depinde de nivelul de prelucrare și de cel al solicitării, constituind punct de referință între cele două tipuri de evoluție a parametrilor de amplitudine a rugozității (crescătoare, descrescătoare).
- Faza descrescătoare poate fi explicată pe baza fenomenului de închidere a fisurii de oboseală.
- Experimentul arată că procesul de oboseală este caracterizat cel mai bine de parametrul de amplitudine a rugozității, *Valoarea maximă a adâncimii văii*  $S_v$ .
- Durata de viață a oțelului depinde de nivelul rugozității suprafeței scăzând odată cu creșterea acestui nivel.

### 5.3. Analiza evoluției parametrilor de structură fină

Procesele fizice care apar în timpul solicitării materialelor metalice la oboseală, sunt localizate în stratul superficial și fiind deosebit de complexe conduc la modificări structurale la nivelul rețelei cristaline. Modificările structurii, în timpul procesului de oboseală, au un caracter localizat.

În studiul modificărilor microstructurale pot fi supuse analizelor cu radiații X [136, 140] cristale, policristale, materiale care suportă schimbări de fază, în vederea determinării unor detalii micro-structurale cum ar fi: densitatea locală a dislocațiilor, caracterul dislocațiilor, dimensiunea blocurilor de mozaic etc.

În lucrarea de față analiza cu radiații X, este utilizată în vederea studierii influenței modificărilor parametrilor microgeometriei stratului superficial, ca urmare a solicitărilor variabile, asupra modificărilor microstructurale. Treptele de solicitare au avut nivelul tensiunilor  $S_1=345\text{MPa}$ ,  $S_2=450\text{MPa}$ ,  $S_3=540\text{MPa}$  iar gradul de prelucrare a fost respectiv R1 ( $R_a = 0,05\div 0,1\mu\text{m}$ ), R2 ( $R_a = 0,2\div 0,3\mu\text{m}$ ), R3 ( $R_a = 1,0\div 2,0\mu\text{m}$ ).

S-au analizat următorii parametri de structură fină:

- dimensiunea medie a blocurilor de mozaic după direcția [110];
- modificarea distanțelor interplanare după aceeași direcție [110];
- evoluția intensității integrale după direcția cristalografică [110];
- densitatea de dislocație din rețeaua cristalină.



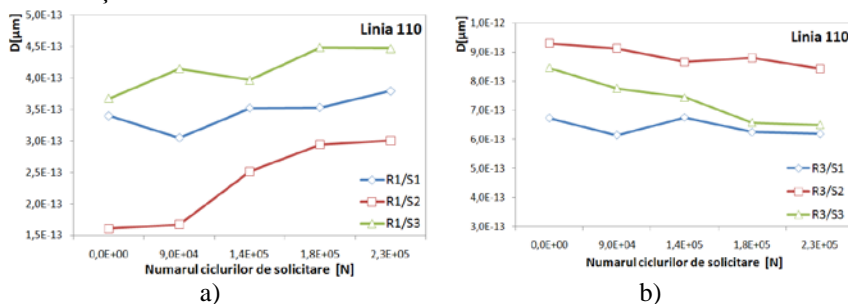
Evaluarea spectrului de difracție s-a realizat la diverse nivele ale duratei de solicitare, respectiv  $N1=9 \times 10^4$ ;  $N2=1,35 \times 10^5$ ;  $N3=1,8 \times 10^5$ ;  $N4=2,25 \times 10^5$  cicluri de solicitare.

### 5.3.1. Evoluția dimensiunilor medii ale blocurilor de mozaic

Se constată că dimensiunea medie a blocurilor de mozaic este influențată atât de valoarea rugozității cât și de nivelul tensiunii de solicitare. În cazul valorilor mici ale nivelului de rugozitate, (fig. 5.4, a), se remarcă o tendință de creștere a dimensiunilor medii ale blocurilor de mozaic în timp la toate cele trei nivele de solicitare, ca urmare a faptului că starea inițială a rețelei cristaline este perturbată de procesele repetate de prelucrare a suprafeței necesare atingerii calității prescrise a suprafeței. Solicitarea de oboseală pentru toate sarcinile de solicitare, conduce la o relaxare generală a rețelei cristaline.

În cazul rugozităților mari ale stratului superficial (fig. 5.4, b) se constată existența unei tendințe de scădere a dimensiunilor medii ale blocurilor de mozaic în timp pentru toate sarcinile de solicitare.

În această situație nivelul ridicat al înălțimii asperităților conduce la concentratori intenși de tensiune și corespunzător la modificări evidente ale stării structurale prin creșterea nivelului tensiunilor locale și corespunzător al gradului de fărâmițare a blocurilor de mozaic.



**Figura 5.4.** Variația dimensiunii medii a blocurilor de mozaic  $\langle D \rangle_{[110]}$

### 5.3.2. Variația distanței interplanare

Modificarea distanțelor interplanare ale blocurilor de mozaic conduce la mișcări ale dislocațiilor prin diverse mecanisme și ca urmare la deformații ale cristalelor.

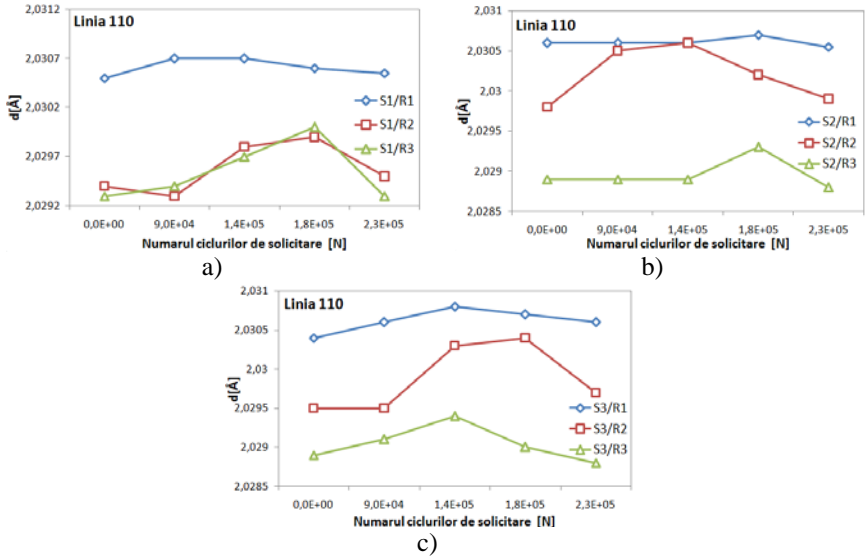
Referitor la variația distanței interplanare  $d_{[110]}$ , (fig. 5.5), în funcție de durata solicitării variabile pentru rugozități diferite, respectiv sarcini diferite, se constată existența unei tendințe de modificare a acesteia în timp, cu modificarea rugozității suprafeței și cu variația solicitării.

Din analiza figurii 5.5 se constată că distanța interplanară este influențată atât de valoarea rugozității cât și de nivelul sarcinii de solicitare.

Se remarcă o tendință de creștere inițială apoi o scădere a acestui parametru, în timpul solicitării. Tendința de creștere a distanței interplanare, se datorește perturbării rețelei cristaline în timpul procesului de prelucrare a suprafeței.

Valorile maxime ale distanței interplanare se obțin, pentru toate nivelele de solicitare, în cazul nivelelor scăzute ale rugozității suprafeței.

Comparativ, evoluția distanței interplanare este influențată într-o măsură mai mare de nivelul rugozității decât de nivelul sarcinii de solicitare.



**Figura 5.5.** Variația distanței interplanare  $d_{110}$

### 5.3.3. Evoluția densității de dislocații

Dislocațiile sunt evidențiate în fenomenul de alunecare care are loc în timpul deformării plastice, având o dimensiune mai mare comparativ cu distanța interatomică.

Dislocația nu se reduce numai la linia care reprezintă miezul dislocației, ci cuprinde întreaga regiune din jurul acestei linii în care rețeaua este deformată, ea putând fi obținută printr-o alunecare incompletă a unei părți din cristal în raport cu restul.

Dislocațiile interacționează între ele plastic prin respingere, cele de același semn și atracție cele de semn contrar, conducând la accentuarea defectului sau la anularea dislocațiilor de semn contrar.

Experimentele au arătat că la nivele scăzute ale solicitării exterioare se produc aglomerări de dislocații în zona obstacolelor ceea ce conduce la nivele de densități ridicate ale acestora.

Astăzi există numeroase dovezi experimentale care confirmă ipoteza după care fisurile se formează prin concentrarea dislocațiilor la obstacolele de pe planele de alunecare [144].

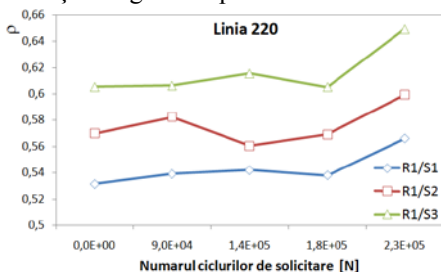
Potrivit acestei concepții o dislocație reprezintă la scară atomică o microfisură care poate evolua prin unirea cu alte dislocații de același semn în urma concentrării lor în fața obstacolelor preexistente pe planele de alunecare sau la obstacolele care se formează pe aceste plane în procesul alunecării.

Se constată o creștere a densității de dislocații, în cazul unor nivele scăzute ale rugozității, pentru toate sarcinile de solicitare (fig. 5.6), care duce în final la deformarea plastică a cristalelor metalice, deoarece, la deplasarea în lungul planelor de alunecare, multe din dislocații întrunesc condițiile transformării în surse de dislocații.

Procesul de deformare plastică bazat pe deplasarea dislocațiilor în lungul planelor de alunecare determină blocarea mișcării multor dislocații, datorită interacțiunii acestora cu obstacolele întâlnite (alte dislocații, vacanțe, impurități etc.).

Datorită creșterii densității de dislocații și blocarea mișcării unor dislocații, pe măsură ce procesul de deformare plastică a unui cristal avansează, crește intensitatea tensiunii tangențiale, care asigură continuarea procesului (apare fenomenul de ecruisare). Se remarcă faptul că sarcini de solicitare mari duc la creșterea densității de dislocații.

Din cele arătate rezultă că nivelul densității de dislocații constituie un factor principal de influență a degradării prin oboseală.



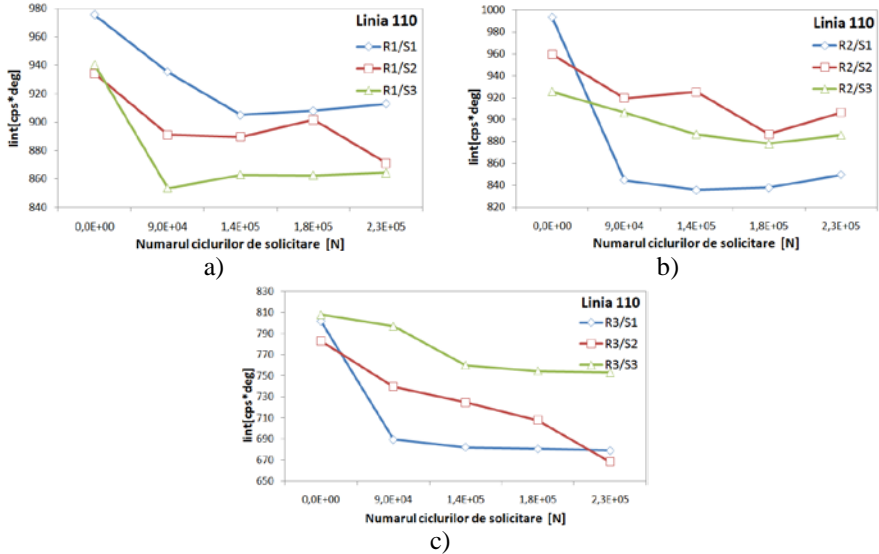
**Figura 5.6.** Variația nivelului densității de dislocații

#### 5.3.4. Evoluția Intensității integrale $I_{int}$

Solicitările exterioare precum și nivelul prelucrării mecanice a materialelor produc fragmentări ale grăunților cristalini precum și dezorientări ale blocurilor de mozaic conducând la creșterea unghiului de dezorientare, formându-

se importante tensiuni interne atât la nivelul celulelor elementare, la nivelul grăunților cristalini cât și la nivelul blocurilor de mozaic.

Analiza intensității integrale  $I_{int}$  după direcția cristalografică [110], arată că aceasta are o tendință descrescătoare în raport cu durata de solicitare atât pentru valori diferite ale rugozității suprafeței cât și în cazul solicitărilor la sarcini diferite (fig. 5.7).



**Figura 5.7.** Variația intensității integrale  $I_{int}$

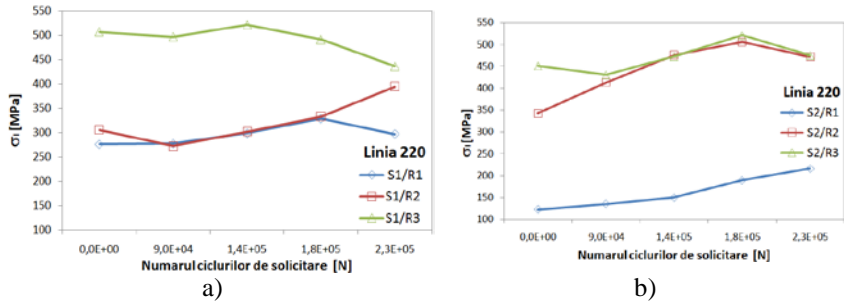
### 5.3.5. Analiza tensiunilor interne de ordinul I

În structura de mozaic a grăunților cristalini cu rol important în modificarea proprietăților fizico-mecanice ale materialelor, au loc procese de tensionare și detensionare strâns legate de nivelul solicitării exterioare cât și de numărul treptelor de prelucrare prin care a trecut suprafața analizată.

Se confirmă faptul, reliefat și de determinările anterioare în lucrare că efectul de concentrare a tensiunilor produs de nivele ridicate ale rugozităților conduc la nivele ridicate ale tensiunilor de ordinul I.

Corespunzător datelor experimentale (fig. 5.8), pentru toate sarcinile de solicitare, se constată o diferență semnificativă între valorile tensiunii de ordinul I, înregistrate pentru rugozitatea cea mai mare a epruvetelor, comparativ cu valorile înregistrate în cazul primului nivel de rugozitate.

Odată cu creșterea nivelului tensiunilor aplicate crește în valoare absolută diferența dintre valorile tensiunilor la diverse nivele de timp, dovedind o intensificare a proceselor de degradare prin tensionări și detensionări repetate.



**Figura 5.8.** Variația tensiunii interne de ordinul I,  $\sigma_I$

### 5.3.6. Concluzii privind analiza evoluției parametrilor de structură fină

- Studiile realizate arată că evoluția parametrilor de structură fină, (dimensiunea medie a blocurilor de mozaic; distanța interplanară; densitatea de dislocații; intensitatea integrală; tensiunile interne de ordinul I), este influențată în timpul procesului de oboseală, de nivelul rugozității și de nivelul sarcinii de solicitare
- Modificările structurale sunt influențate într-un grad mai mare, de nivelul rugozității decât de nivelul sarcinii de solicitare.
- Valori mici ale nivelului rugozității determină o tendință crescătoare a nivelului dimensiunii medie a blocurilor de mozaic, în timp, la toate nivele de solicitare.
- Valori mari ale nivelului rugozității fac ca dimensiunea medie a blocurilor de mozaic să aibă o tendință descrescătoare în timp.
- Nivelul ridicat al înălțimii asperităților conduce la concentrarea tensiunilor locale și corespunzător la creșterea gradului de fărâmițare a blocurilor de mozaic.
- Distanța interplanară suferă modificări ca urmare a nivelului de prelucrare a suprafeței cât și a solicitării variabile. Se obțin valori maxime la toate sarcinile de solicitare pentru probele realizate cu nivele scăzute de rugozitate. În cazul valorilor mici ale nivelului de rugozitate, densitatea de dislocații are o tendință crescătoare în timp la toate nivele de solicitare.
- Valori mari ale nivelului rugozității, fac ca densitatea de dislocații să prezinte tendință de scădere în timp la toate sarcinile de solicitare.
- Rugozitatea cea mai mică (grad ridicat de prelucrare) determină creșterea densității de dislocații cu influență asupra deformării plastice locale.
- Intensitatea integrală, care apreciază nivelul de fărâmițare și orientare a blocurilor de mozaic, are valori minime în cazul unui nivel mare al rugozității, indiferent de sarcina de solicitare. Odată cu creșterea

nivelului de prelucrare, (scăderea nivelului rugozității), acest parametru atinge valori apropiate indiferent de valoarea sarcinii de solicitare.

- Valorile tensiunii de ordinul I, la nivelul cel mai mare de rugozitate, sunt semnificativ mai mari față de nivel cel mai scăzut de rugozitate.
- Studiile arată că din punct de vedere a structurii fine procesul de degradare prin oboseală se produce în salturi prin tensionări și detensionări repetate.
- Nivelul solicitării mecanice acționează în același sens, ca și nivelul de rugozitate cei doi factori cumulându-se în sensul intensificării procesului de degradare prin oboseală.

#### 5.4. Utilizarea rețelelor neuronale în analiza gradului de influență a parametrilor de amplitudine a rugozității și a parametrilor de structură fină în procesele de oboseală

O serie de studii anterioare [151÷153, 155] au indicat faptul că rețelele neuronale pot fi utilizate în modelarea proceselor de oboseală și permit predicția rezistenței la oboseală sau a duratei de viață.

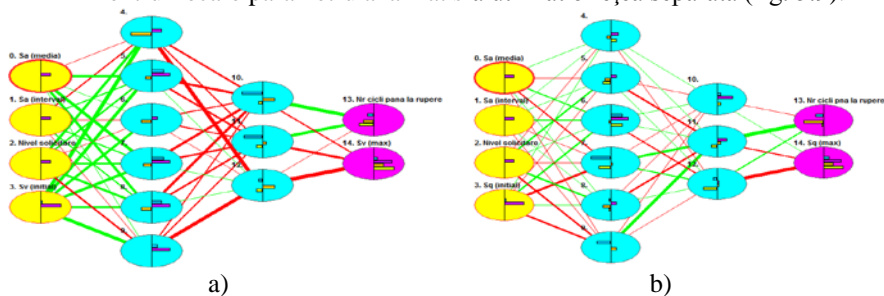
##### 5.4.1. Evaluarea influenței parametrilor de amplitudine a rugozității

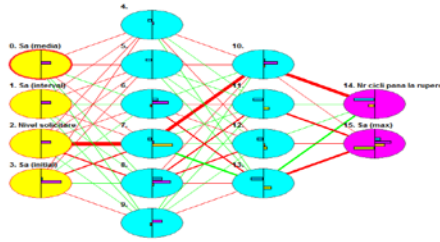
În vederea analizelor propuse mai sus, au fost identificați parametrii de intrare și ieșire necesari.

Ca parametri de intrare au fost considerați: nivelul de rugozitate, cuantificat prin valoarea medie inițială a parametrului de amplitudine a rugozității,  $S_a$ ; intervalul de rugozitate la care au fost prelucrate probele; nivelul solicitării variabile și parametrii de amplitudine a rugozității analizați,  $S_v$ ,  $S_q$  cu valorile lor inițiale.

Drept mărimi de ieșire s-au ales valorile maxime ale parametrilor de rugozitate și numărul de cicluri până la atingerea acestor valori.

Pentru fiecare parametru analizat s-a utilizat o rețea separată (fig. 5.9).





c)

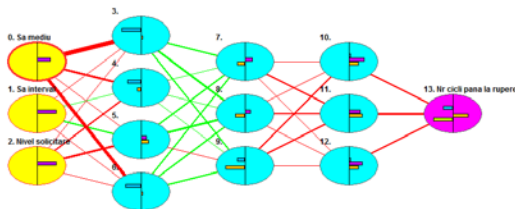
**Figura 5.9.** Structura rețelei neuronale:

a) parametrul  $S_v$  b) parametrul  $S_q$  c) parametrul  $S_a$

Pentru determinarea numărului de cicluri până la rupere a fost folosită o altă structură de rețea neuronală, cu parametrii de intrare și ieșire prezentați în tabelul 5.1. și figura 5.10.

*Tabelul 5.1.* Parametrii pentru modelarea rețelei neuronale

Parametri de intrare	Parametri de ieșire
$S_a$ (media)	Nr. cicluri de solicitare
$S_a$ (interval)	
Nivel de solicitare	



**Figura 5.10.** Structura rețelei neuronale pentru determinarea numărului de cicluri până la rupere

Utilizarea modelelor de mai sus a permis determinarea valorilor numerice ale parametrilor de ieșire pentru diferite combinații ale nivelului de rugozitate și sarcină.

S-a constatat faptul că parametrul cel mai important care influențează evoluția degradării prin oboseală este *Valoarea maximă a adâncimii văii*,  $S_v$ , locul doi ca factor de influență fiind ocupat de sarcina de solicitare.

Procesul de oboseală manifestă un grad ridicat de sensibilitate față de același parametru,  $S_v$ .

O influență minoră asupra rezistenței la oboseală o are parametrul de amplitudine a rugozității *Abaterea medie aritmetică*,  $S_a$ . Se confirmă astfel observațiile după care acest parametru nu oferă informații precise în studiul probelor supuse la solicitări variabile, acesta ne ținând cont de defectele locale.

#### 5.4.2. Evaluarea influenței parametrilor de rugozitate asupra evoluției parametrilor de structură fină utilizând rețelele neuronale

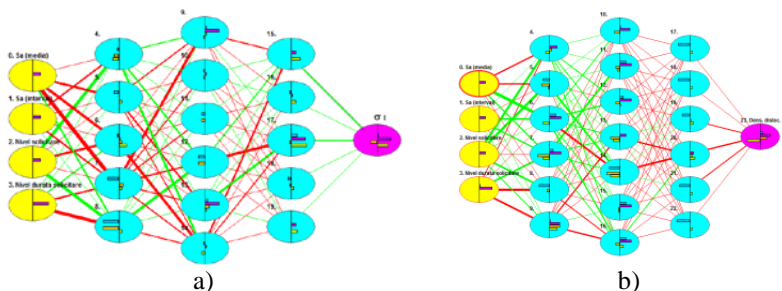
În vederea realizării unui studiu privind influența modificărilor microgeometriei asupra evoluției parametrilor de structură fină s-a realizat o arhitectură cu rețele neuronale. În această structură asemănător celei anterioare drept parametri de intrare, au fost utilizați: nivelul de rugozitate cuantificat prin valoarea medie inițială a parametrului de amplitudine a rugozității,  $S_a$ ; intervalul de rugozitate la care au fost prelucrate probele; nivelul solicitării variabile și nivelul duratei de solicitare.

Drept mărimi de ieșire s-au ales valorile tensiunii interne de ordinul I și densitatea de dislocații.

Pentru fiecare parametru analizat s-a folosit o rețea neuronală proprie, (fig. 5.11).

O analiză a acestor parametri oferă informații cu privire la influența mărimilor de intrare asupra mărimilor de ieșire. În acest fel se pot obține informații privind influența ponderii parametrilor de amplitudine a rugozității asupra evoluției parametrilor de structură fină.

În urma analizei efectuate cu ajutorul rețelelor neuronale, se remarcă faptul că media parametrului de amplitudine  $S_a$  are cea mai mare influență asupra tensiunilor interne de ordinul I,  $\sigma_I$ , fiind urmat de nivelul sarcinii de solicitare.



**Figura 5.11.** Structura rețelei neuronale:  
a) parametrul  $\sigma_I$  b) parametrul  $\rho$

Nivelul densității de dislocații este influențat aproximativ în aceeași măsură de durata solicitării (numărul ciclurilor de solicitare) și de nivelul sarcinii variabile aplicate.



### 5.4.3. Concluzii privind utilizarea rețelelor neuronale în analiza gradului de influență a parametrilor de amplitudine a rugozității și a parametrilor de structură fină în procesele de oboseală

- Utilizarea rețelelor neuronale poate constitui un instrument de analiză a ponderii influenței parametrilor de rugozitate și a sarcinii de solicitare asupra parametrilor de structură fină și implicit asupra dinamicii degradării prin oboseală.
- *Adâncimea maximă a rugozității*,  $S_v$ , are ponderea cea mai ridicată de influență asupra procesului de oboseală. Totodată procesul are sensibilitatea cea mai mare față de acest parametru.
- Parametrul de amplitudine a rugozității,  $S_a$  influențează hotărâtor evoluția tensiunilor interne de ordinul I.
- Mărimea și durata aplicării sarcinii au aproximativ aceeași pondere de influență asupra densității de dislocații  $\rho$ .

## **5.5. Evaluarea degradării stratului superficial în procesele de oboseală pe baza evoluției microdurității**

### 5.5.1. Indicatori de evaluare a stării de degradare

Analiza comportării la microindentare și deformare locală poate oferi informații asupra unor caracteristici mecanice cum ar fi rezistența la rupere și modulul de elasticitate, caracteristici legate și de comportarea la oboseală a materialului [167, 172, 176].

În lucrare se urmărește aprecierea evoluției gradului de integritate a suprafețelor metalice supuse proceselor de oboseală pe baza legăturilor dintre evoluția rugozității suprafeței, ca aspect geometric, și evoluția microdurității și a efectului de indentare ca aspect fizic. Analiza aspectelor legate de procesele de deformare a stratului superficial s-a realizat cu ajutorul microscopului optic și a metodei Vickers. Epruvetele au fost încercate la nivelul de solicitare  $S_2=450\text{MPa}$ , microduritatea înregistrându-se după  $N_1=9 \times 10^4$ ;  $N_2=1,35 \times 10^5$ ;  $N_3=1,8 \times 10^5$  cicluri de solicitare.

Caracterizarea modificărilor în adâncime, pe baza evoluției microdurității, s-a evaluat definind *factorul de degradare a suprafeței prin prelucrare mecanică*, (*DGR %*). *DGR* caracterizează intensitatea procesului de ecruisare a materialului în timpul prelucrării [179]. Pe de altă parte mărimea amprente, obținută în urma aplicării sarcinii de indentare la determinarea microdurității Vickers, permite evidențierea existenței unui efect numit *efect de indentare*, *ISE (Indentation Size Effect)*, [108, 181, 182]. Acest efect se manifestă prin creșterea durității odată cu scăderea amprente de indentare sau a sarcinii aplicate indentorului.

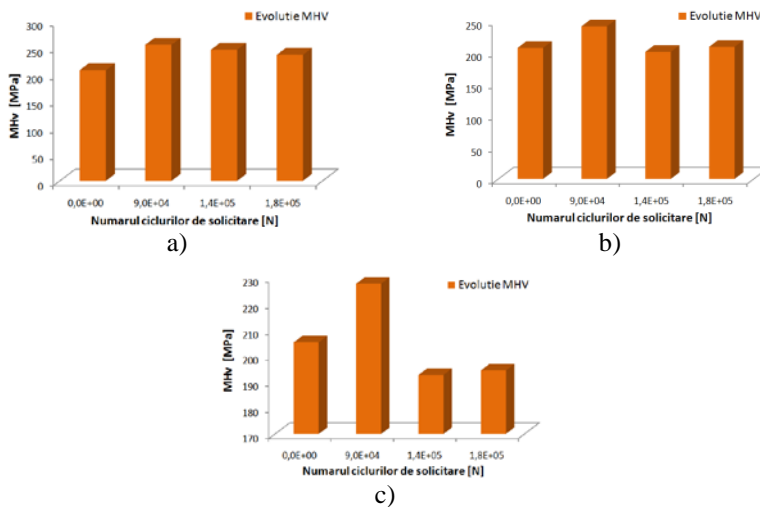
Efectul de indentare se manifestă la nivele ale sarcinilor de indentare mai mici de 100gf și poate fi analizat prin două metode. *Metoda Meyer* care stabilește legătura între sarcina aplicată ( $F$ ) și mărimea amprente de indentare ( $d$ ) și o metodă care stabilește relația dintre microduritatea  $MHV$  și adâncimea de indentare,  $h$ , denumită *Legea puterii*.

În cazul metodei Meyer, indicele cu același nume este utilizat ca o măsură a efectului de indentare. Astfel dacă  $n < 2$  se constată că microduritatea scade odată cu creșterea sarcinii aplicate și efectul de indentare se manifestă. În cazul când  $n = 2$  microduritatea este independentă de efectul de indentare, iar dacă  $n > 2$  efectul de indentare nu se manifestă. În cazul nemanifestării efectului de indentare caracterizarea influenței stării de integritate a stratului superficial asupra comportării la solicitări variabile se poate aprecia cu ajutorul parametrului *Deteriorare*,  $D_H$ .

### 5.5.2. Rezultate experimentale privind evoluția microdurității cu durata solicitării

Cercetările experimentale [189÷192] au arătat că în timpul procesului de oboseală suprafețele își modifică starea de integritate ca urmare a evoluției parametrilor care o definesc.

S-a constatat că microduritatea evoluează, la cele trei nivele ale rugozității, pe parcursul solicitării (fig. 5.12). S-au înregistrat valori ridicate odată cu creșterea gradului de finisare a suprafeței, ca urmare a procesului de ecrusare care are loc în timpul prelucrării mecanice.



**Figura 5.12.** Evoluția microdurității Vickers în funcție de numărul ciclurilor de solicitare: a) rugozitatea R1, b) rugozitatea R2, c) rugozitatea R3

### 5.5.3. Rezultate experimentale privind influența degradării asupra evoluției microdurității în procesele de oboseală

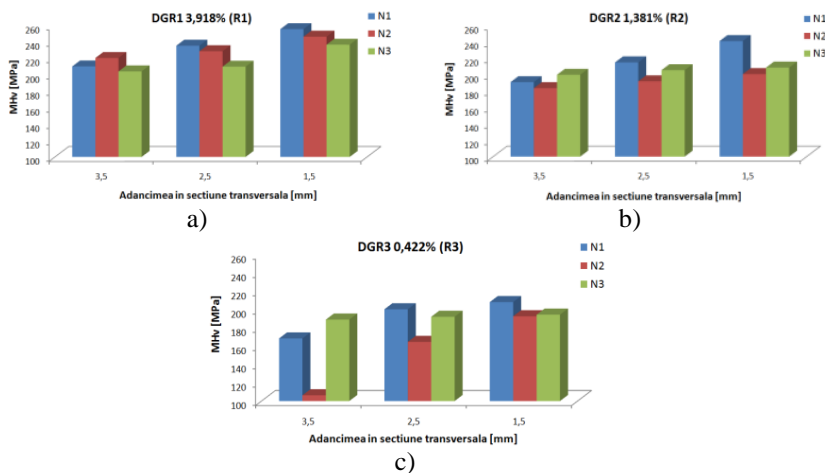
Pe baza celor trei nivele de rugozitate sau grade de prelucrare, și a valorilor microdurității, adoptând ca nivel inițial nivelul de prelucrare cel mai redus, s-au determinat, în condiții statice, ca nivel inițial, cele trei grade de degradare ale degradării, *DGR* (tab. 5.2).

Tabelul 5.2. Valorile inițiale ale *DGR* pentru cele trei nivele de prelucrare

	R1	R2	R3
<i>DGR</i> [%]	<i>DGR</i> 1 3,9191	<i>DGR</i> 2 1,3808	<i>DGR</i> 3 0,4234

Pentru cele trei grade de degradare (tab.5.2), inițiale *DGR*1, *DGR*2, *DGR*3 s-a analizat și variația în adâncime, (la 1,5mm; 2,5mm; 3,5mm), a microdurității (fig. 5.13).

Se constată astfel, scăderea microdurității odată cu creșterea adâncimii la același nivel al gradului de degradare. Se remarcă și faptul că la valori ridicate ale *DGR* (prelucrări mecanice mai intense) nivelul microdurității este mai ridicat.



**Figura 5.13.** Evoluția microdurității cu adâncimea de măsurare la cele trei nivele inițiale ale *DGR*:

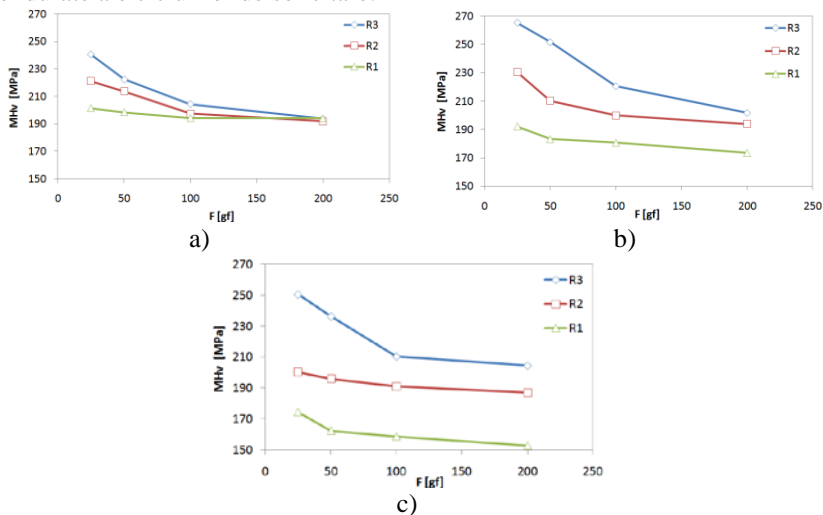
a) rugozitatea R1, b) rugozitatea R2, c) rugozitatea R3

### 5.5.4. Rezultate experimentale privind legătura dintre efectul de indentare și procesul de oboseală

Din punct de vedere *cantitativ* evaluarea efectului de indentare se poate face pe baza evoluției microdurității în funcție de sarcina de indentare pentru

diferite nivele de prelucrare a suprafeței și pentru diferite numere de cicluri de solicitare.

În lucrarea de față s-a identificat efectul de indentare în condițiile solicitărilor variabile unde s-a remarcat că rugozitatea variază în timp cu numărul ciclurilor de solicitare și nivelul sarcinii aplicate. Se constată că acest fenomen se produce în general la niveluri scăzute ale sarcinii de indentare. S-au realizat măsurători de microduritate la diverse sarcini aplicate indenterului, la diverse nivele de rugozitate și diverse numere de cicluri de solicitare. Astfel, în figura 5.14, se prezintă schematic efectul de indentare la trei nivele de rugozitate și după trei durate ale ciclurilor de solicitare.



**Figura 5.14.** Reprezentarea efectului de indentare:

a)  $N1 = 9 \times 10^4$  cicluri, b)  $N2 = 1,3 \times 10^5$  cicluri, c)  $N3 = 1,8 \times 10^5$  cicluri

Așa cum era de așteptat efectul de indentare se manifestă la valori mici ale sarcinii aplicate indenterului.

Se remarcă faptul că, pentru toate probele analizate, microduritatea păstrează o tendință de scădere odată cu creșterea sarcinii aplicate în intervalul 25÷200gf. Se constată că la valori mai mari ale forței aplicate indenterului, în acest caz 100gf, la același număr de cicluri de solicitare, diferența între valorile microdurității sunt mai mici față de diferențele obținute în cazul sarcinilor de indentare mai mici de 100gf.

Cercetările experimentale confirmă observațiile [187] care separă domeniul sarcinilor de indentare pe două nivele, domeniul până la 100gf și domeniul peste 100gf.

În domeniul până la 100gf microduritatea evoluează cu intensitate mai ridicată decât domeniul cu valori peste 100gf, unde evoluția acesteia este mult mai lentă. Scăderea gradului de degradare  $DGR$  conduce la intensificarea fenomenului.

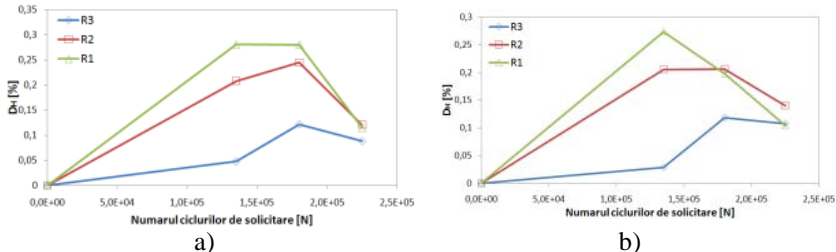
În ce privește influența duratei solicitării se constată că la nivele scăzute ale  $DGR$  această influență asupra microdurității este mai mare decât la nivele ridicate ale  $DGR$ .

#### 5.5.5. Caracterizarea influenței nivelului rugozității stratului superficial asupra comportării la solicitări variabile pe baza parametrului Deteriorare

Legat de nivelul microdurității stratului superficial s-a definit parametrul evolutiv *Deteriorare*,  $D_H$ .

Aprecierea stării de degradare prin oboseală cu ajutorul acestui parametru se face la valori ale sarcinii de indentare de 200gf, la care efectul de indentare,  $ISE$ , nu se manifestă. În această situație caracterizarea influenței stării de integritate a stratului superficial asupra comportării la solicitări variabile s-a evaluat baza parametrului *Deteriorare*,  $D_H$ .

În lucrarea de față aprecierea acestui parametru s-a realizat la o sarcină de indentare de prag de 100gf și la sarcina de 200gf. S-a trasat astfel, la această sarcină, evoluția *Deteriorării*,  $D_H$ , în funcție de nivelul rugozității obținut în urma prelucrării, odată cu numărul ciclurilor de solicitare (fig. 5.15).



**Figura 5.15.** Evoluția *Deteriorării*,  $D_H$  cu numărul ciclurilor de solicitare și nivelul  $DGR$ : a) 100gf, b) 200gf

Se constată evoluția în două etape a gradului de deteriorare odată cu numărul ciclurilor de solicitare. Valoarea gradului de deteriorare,  $D_H$ , crește constant până la o valoare maximă după care are un traseu descendent. De asemenea se constată valori mari ale parametrului  $D_H$  la nivele scăzute ale rugozității. Nivele mari ale rugozității determină o scădere a gradului de deteriorare  $D_H$ , însă maximul acestuia se deplasează către valori mai mari ale duratei de solicitare.

După cum se remarcă și evoluția acestui parametru confirmă evoluția parametrilor de rugozitate, atingerea maximului corespunzând momentului la care

microgeometria poate constitui un concentrator de tensiune cu posibilitatea de inițiere a microfisurii de oboseală. Evoluția descendentă ulterioară poate fi explicată pe baza fenomenului de închidere a fisurii.

#### 5.5.6. Concluzii privind analiza evoluției microdurității stratului superficial

- Fenomenele în stratul superficial pot fi caracterizate prin mai mulți parametri printre care: *microduritatea Vickers  $MH_v$* , *factorul de degradare a suprafeței prin prelucrare mecanică DGR*, efectul de indentare, *ISE* și parametrul *Deteriorare,  $D_H$* .
- Realizarea mai multor niveluri de prelucrare, de la rugozități mari (degroșare), către rugozități mici (lustruire), conduc la creșteri ale microdurității în stratul superficial, ceea ce indică apariția unor procese de ecruisare.
- Microduritatea Vickers scade odată cu creșterea adâncimii în strat, la același nivel al gradului de degradare, *DGR*.
- În intervalul sarcinilor de indentare între 25÷100gf microduritatea are tendință de scădere odată cu creșterea sarcinii de indentare fenomen denumit, *Efect de indentare, (Indentation Size Effect)*. Deasupra valorii de 100gf microduritatea se menține la valori aproximativ constante, efectul sus amintit nemanifestându-se.
- În timpul procesului de oboseală, legat de influența nivelului rugozității, (grad de prelucrare mecanică, *DGR*), se constată experimental existența efectului de indentare.
- Evoluția microdurității în stratul superficial, în procesul de oboseală, legat și de evoluția nivelului rugozității, poate fi evaluată în două domenii de valori ale sarcinii de indentare: domeniul cu valori între 25÷100gf și domeniul peste 100gf.
- În domeniul sarcinilor de indentare 25÷100gf, procesul de degradare poate fi evaluat prin efectul de indentare, (*ISE*), iar peste valori de 100gf procesul de degradare poate fi evaluat cu ajutorul parametrului *Deteriorare,  $D_H$* .
- Gradul de deteriorare,  *$D_H$*  evoluează în două etape odată cu numărul ciclurilor de solicitare, creștere constantă, până la o valoare maximă, urmată de un traseu descendent.
- Odată cu scăderea nivelului rugozității crește gradul de deteriorare,  *$D_H$* .
- Evoluția parametrului *Deteriorare,  $D_H$*  confirmă evoluția parametrilor de rugozitate, la care valorile maxime corespund transformării microgeometriei în concentratori de tensiune care pot iniția microfisura de oboseală

## **5.6. Influența rugozității ca defect de suprafață asupra comportării la solicitări variabile. Validarea modelelor existente pe baza datelor experimentale folosind parametrii de rugozitate 3D**

Procesul de deteriorare prin oboseală are loc prin inițierea și evoluția fisurilor având ca sursă primară parametrii care caracterizează integritatea suprafețelor. Fisurile provocate de solicitarea de oboseală se inițiază, în cea mai mare parte, în stratul superficial al materialului, integritatea suprafeței având o influență considerabilă asupra acestui proces. Discontinuitățile structurale, cum ar fi: microcavități, creștături, (așa cum poate fi considerată și rugozitatea) pot fi considerate ca amorse ale fisurilor de oboseală.

Așa cum s-a arătat, în procesul solicitărilor variabile, neregularitatea suprafețelor nu rămâne la valoarea constantă rezultată în urma procesului de prelucrare. Neregularitățile suprafeței evoluează odată cu numărul ciclurilor de solicitare, până la o valoare la care acestea conduc la un grad ridicat de concentrare a tensiunilor la care factorul  $\Delta K$  atinge valoarea de prag  $\Delta K_{th}$ , de la care începe procesul de evoluție a fisurii de oboseală.

Pe baza faptului că defectele de suprafață pot fi considerate amorse ale inițierii fisurilor de oboseală studiile lui Murakami și alții [80, 82, 83] au arătat că limita de rezistență la oboseală poate fi determinată matematic.

$$\sigma_w = \frac{1.43(MH_V + 120)}{(\overline{\text{aria}})^{1/6}} \quad (5.1)$$

unde:

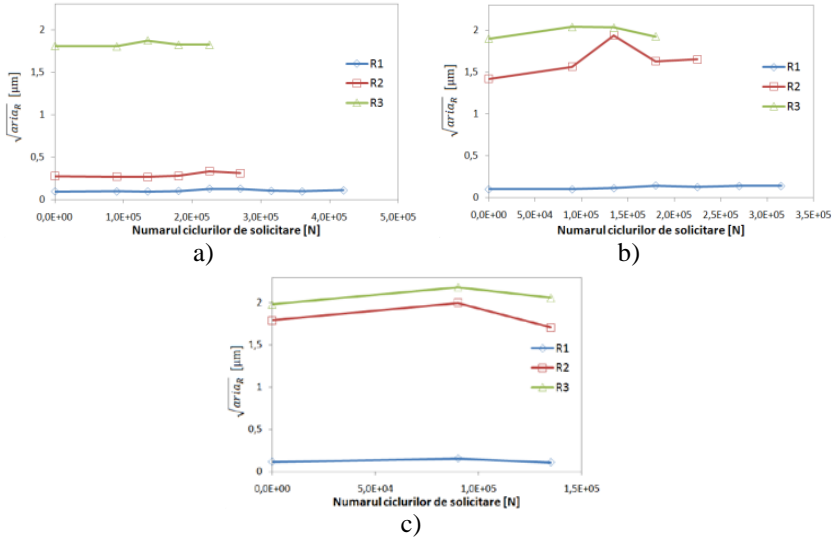
$MH_V$  este microdurețea Vickers;

$\overline{\text{aria}}$  - parametrul definit ca mărimea zonei de defect proiectată pe un plan perpendicular pe direcția de aplicare a sarcinii.

### 5.6.1. Rezultate experimentale

Pe baza considerentelor de mai sus, privind comportarea la oboseală considerând rugozitatea ca defect de suprafață, s-a urmărit stabilirea factorilor care influențează nivelul evoluției factorului de prag al intensității tensiunii în condițiile unor nivele diferite de prelucrare a suprafeței solicitată variabil.

În vederea îmbunătățirii modelului Murakami, care utilizează parametrii de rugozitate 2D, prin creșterea gradului de precizie a rezultatelor, s-au utilizat parametrii de amplitudine a rugozității 3D.



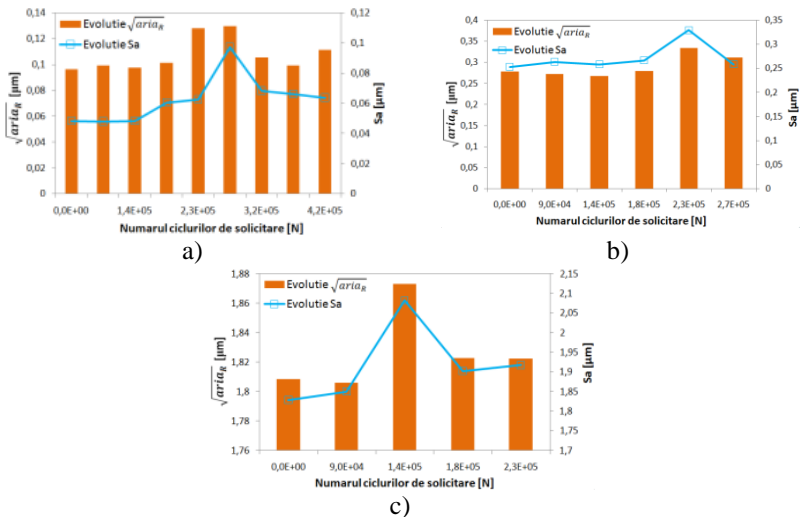
**Figura 5.16.** Evoluția parametrului  $\sqrt{aria_R}$  cu numărul ciclurilor de solicitare: a) S1=345MPa, b) S2=450MPa, c) S3=540MPa

Pe baza valorilor experimentale s-a trasat evoluția parametrului  $\sqrt{aria_R}$ , (fig. 5.16), pentru cele trei niveluri de rugozitate și cele trei sarcini de solicitare și s-a remarcat faptul că parametrul  $\sqrt{aria_R}$  evoluează odată cu durata de solicitare și cu nivelul de rugozitate. Se poate observa că indiferent de nivelul de rugozitate acest parametru păstrează același caracter al evoluției.

Parametrul  $\sqrt{aria_R}$  are un parcurs evolutiv odată cu durata de solicitare, atingând o valoare maximă urmată de o scădere a acestei valori. Se remarcă faptul că numărul de cicluri la care se înregistrează valoarea maximă variază în funcție de nivelul de prelucrare al probelor. Odată cu creșterea nivelului de prelucrare numărul de cicluri până la atingerea valorii maxime este mai mare.

Figura 5.17, prezintă evoluția parametrului  $\sqrt{aria_R}$  și a parametrului de rugozitate  $S_a$  cu numărul ciclurilor de solicitare pentru cele trei nivele de prelucrare a suprafeței și pentru sarcina de solicitare S=345 MPa. Se remarcă evoluția similară a parametrului  $\sqrt{aria_R}$ , cu aceea a parametrului de amplitudine a rugozității,  $S_a$ .

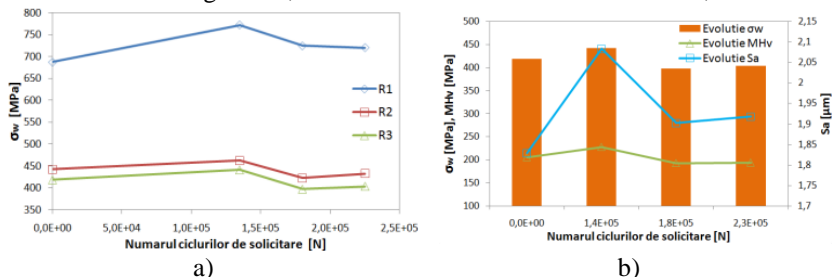




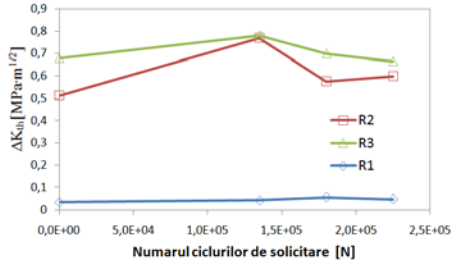
**Figura 5.17.** Evoluția parametrilor  $\sqrt{aria_R}$  și  $S_a$ ,  $S=345\text{MPa}$ :  
a) rugozitatea R1, b) rugozitatea R2, c) rugozitatea R3

Astfel, evoluția parametrilor de amplitudine a rugozității, în timpul procesului de oboseală, poate fi o măsură a evoluției defectelor în timpul acestui proces.

În conformitate cu relația lui Murakami, evoluția parametrilor  $\sqrt{aria_R}$  și  $MHV$  pe parcursul solicitării conduce și la modificarea instantanee a limitei de rezistență la oboseală precum și a factorului de intensitate a tensiunilor,  $\Delta K_{th}$ . Astfel, în figurile 5.18 și 5.19, este prezentată evoluția acestor caracteristici pentru cele trei nivele de rugozitate, la nivelul tensiunii medii de solicitare,  $S2=450\text{MPa}$ .



**Figura 5.18.** Evoluția rezistenței la oboseală conform modelului Murakami:  
a) rugozitatea R1, R2, R3, b) influența parametrilor  $S_a$  și  $MHV$ , (rugozitatea R3)



**Figura 5.19.** Evoluția factorului de prag  $\Delta K_{th}$ , cu numărul ciclurilor de solicitare pentru cele trei niveluri de rugozitate

Pe de altă parte se remarcă și fluctuații în evoluția factorului de intensitate a tensiunilor,  $\Delta K_{th}$ .

Se constată că nivele mai mici de rugozitate conduc la valori scăzute ale factorului  $\Delta K_{th}$ , iar nivele mai ridicate de rugozitate la valori mai mari ale acestui factor (fig. 5.19).

Gradul ridicat de treceri de prelucrare pentru atingerea unui nivel scăzut de rugozitate conduce local, în substrat, la o fărâmițare a stratului sub forma unui număr ridicat de microfisuri, cu potențial evolutiv [198].

Astfel nivele de rugozitate mici, (grad ridicat de prelucrare), conduc la valori mai mici ale factorului  $\Delta K_{th}$ , aceasta semnificând un proces de inițiere mai rapidă a microfisurilor de oboseală, care pot, sau nu, evolua într-o fisură de mărime critică.

Nivele ridicate ale rugozității, cu grad de prelucrare a suprafeței mai mic, (număr de treceri mic), conduc la valori mai mari ale factorului  $\Delta K_{th}$ . Aceasta implică o întârziere în inițierea microfisurilor.

În acest caz valoarea maximă a evoluției acestui factor semnifică numărul de cicluri la care nivelul microgeometriei are potențial mai ridicat de concentrare a tensiunilor.

Existența unui nivel de rugozitate mai mic presupune formal la ideea unui factor  $\Delta K_{th}$  mai mare.

Se remarcă, totuși că acest aspect este contrazis de determinările experimentale, ceea ce duce la concluzia că nivelul prelucrării mecanice (influența numărului de etape de prelucrare) constituie factorul predominant de influență al acestui fenomen. Acest factor predominant este evidențiat în final și de nivelul microdurității stratului superficial.

La valori scăzute ale factorului  $\Delta K_{th}$ , inițierea fisurilor de oboseală se poate realiza pe baza numărului mare de microfisuri potențiale. La valori ridicate ale factorului  $\Delta K_{th}$ , inițierea fisurii se face ca urmare a unui număr redus de microfisuri, dar cu dimensiuni mai mari, care duc la concentrarea tensiunilor.

### 5.6.2. Influența rugozității ca factor de concentrare a tensiunilor asupra comportării la solicitări variabile

#### *Modelul Neuber*

Coeficientul teoretic de concentrare a tensiunilor,  $K_t$ , este definit de către valorile globale și locale ale tensiunilor [1]. Odată cu creșterea valorii tensiunii, factorul teoretic de concentrare a tensiunilor,  $K_t$ , rămâne constant până la atingerea limitei de curgere.

Neuber arată că *factorul teoretic de concentrare a tensiunilor* la încărcări monotone este egal cu media geometrică a factorului de concentrare a tensiunilor și a factorului de concentrare a deformațiilor specifice [199].

O relație asemănătoare care ia în considerare rugozitatea suprafeței în calitate de concentrator de tensiune este dezvoltată de Neuber:

$$K_t = 1 + n \cdot \sqrt{\lambda \frac{R_z}{\rho}} \quad (5.2)$$

unde:

$n$  este o constantă empirică, pentru tensiuni uniforme  $n=2$ ;

$\lambda$  - raportul dintre distanța și înălțimea neregularităților. Pentru suprafețe prelucrate mecanic  $\lambda = 1$  [36].

$R_z$ - Rugozitatea în 10 puncte;

$\bar{\rho}$ - raza văii profilului, fiind raza medie determinată din văile dominante ale profilului.

În condițiile solicitărilor variabile, așa cum s-a demonstrat experimental în lucrarea de față, variația în timp a parametrilor de amplitudine a rugozității conduce corespunzător și la variația factorului efectiv de concentrare a tensiunilor  $K_f$  (rel. 5.3), care poate fi determinat prin intermediul factorului de sensibilitate la concentrare a tensiunilor  $q$ .

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad (5.3)$$

$$q = \frac{1}{(1 + \frac{\gamma}{\rho})} \quad (5.4)$$

unde:  $\gamma$  este constantă de material, pentru oțel:

$$\gamma = 0.025 \left( \frac{2070 \text{ MPa}}{\sigma_r} \right)^{1/3} \quad (5.5)$$

Înlocuind (5.2) în (5.3) ecuația devine:

$$K_f = 1 + q \cdot n \cdot \sqrt{\lambda \frac{R_z}{\rho}} \quad (5.6)$$

Luând în considerare aceste aspecte legate de rugozitatea suprafeței în calitate de concentrator de tensiune și modificările structurale locale, în acest subcapitol se propune un studiu privind evoluția factorului teoretic și a celui efectiv de concentrare în timpul procesului de oboseală.

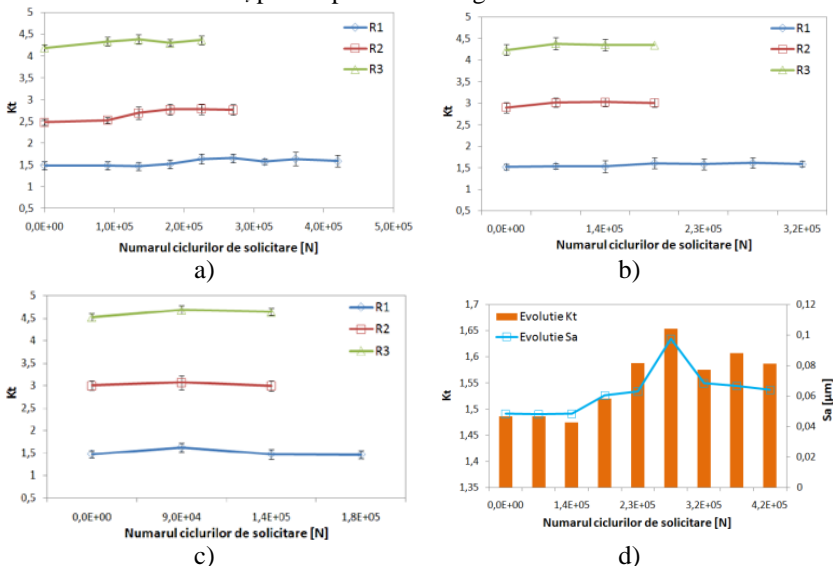
În scopul obținerii unor rezultate mai precise în ceea ce privește evoluția factorilor de concentrare a tensiunilor în ecuațiile (5.2) și (5.6) parametrul de rugozitate  $2D$ ,  $R_z$ , a fost înlocuit cu echivalentul  $3D$ ,  $S_z$ . Relațiile se pot scrie sub forma:

$$K_t = 1 + n \cdot \sqrt{\lambda \frac{S_z}{\rho}} \quad (5.7)$$

$$K_f = 1 + q \cdot n \cdot \sqrt{\lambda \frac{S_z}{\rho}} \quad (5.8)$$

Astfel pe baza măsurătorilor experimentale privind evoluția parametrilor de amplitudine a rugozității, cu ajutorul relației (5.7), s-a obținut evoluția, odată cu numărul ciclurilor de solicitare, a factorului teoretic de concentrare a tensiunilor  $K_t$ , la nivele de solicitare variabilă  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  și cele trei nivele de rugozitate  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  (fig. 5.20).

Se constată că evoluția parametrilor de amplitudine a rugozității, în timpul solicitării de oboseală, determină o variație asemănătoare a factorului teoretic de concentrare a tensiunilor. Acest aspect este reliefat în figura 5.20, d, unde este prezentată evoluția parametrului de amplitudine  $S_a$  și a factorului teoretic de concentrare  $K_t$  pentru probele cu rugozitatea  $R_1$ .

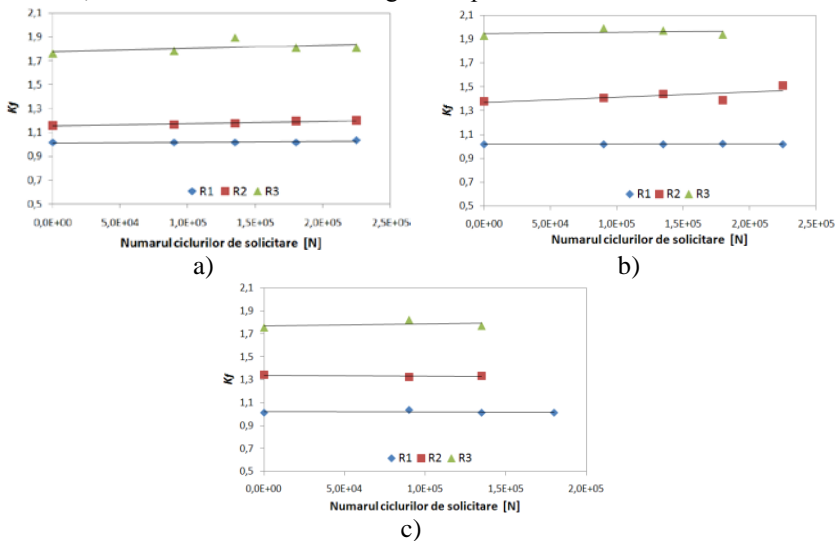


**Figura 5.20.** Evoluția factorului teoretic de concentrare a tensiunilor  $K_t$ : a)  $S_1=345$  MPa, b)  $S_2=450$  MPa, c)  $S_3=540$  MPa, d) evoluție  $K_t$  și  $S_a$ , ( $S_1$ ,  $R_1$ )

Analiza datelor experimentale arată că evoluția factorului teoretic de concentrare a tensiunilor  $K_t$  este influențată de nivelul rugozității suprafeței, aceasta fiind în concordanță cu evoluția parametrilor de amplitudine a rugozității. Nivelul sarcinii de solicitare are o influență mai mică asupra evoluției factorului teoretic  $K_t$ , comparativ cu influența nivelului rugozității ceea ce arată că modificările rugozității influențează semnificativ modificarea factorului teoretic de concentrare a tensiunilor.

Acest lucru confirmă și determinările anterioare făcute pe baza modelului Murakami, după care rugozitatea suprafeței este un factor hotărâtor în ceea ce privește comportarea la oboseală.

În ceea ce privește evoluția factorului efectiv de concentrare a tensiunilor,  $K_f$ , în timpul solicitării de oboseală, pentru cele trei nivele ale rugozității și cele trei sarcini de solicitare, relația (5.8) permite obținerea diagramelor din figura 5.21. Se poate observa că o influență importantă în evoluția acestui factor o are nivelul de prelucrare a suprafeței, nivelul sarcinii de solicitare având o influență mai mică, valoarea maximă fiind înregistrată pentru sarcina S2.



**Figura 5.21.** Evoluția factorului efectiv de concentrare a tensiunilor la oboseală  $K_f$   
a) S1=345MPa, b) S2=450MPa, c) S3=540MPa

Astfel, factorul efectiv de concentrare a tensiunilor  $K_f$  înregistrează, în condițiile unei solicitări variabile, o evoluție în timp, în concordanță cu aceea a parametrilor de amplitudine a rugozității. Creșterea nivelului rugozității conduce la creșterea valorii factorului efectiv de concentrare a tensiunilor  $K_f$ , la același nivel al solicitării.

Pe de altă parte, variația parametrilor de rugozitate, în timpul solicitării de oboseală, are drept consecință modificarea în timp a valorilor factorului efectiv de concentrare a tensiunilor. Acest aspect indică faptul că o bună cunoaștere a evoluției parametrilor de rugozitate poate da informații despre factorul efectiv de concentrare a tensiunilor la oboseală  $K_f$ .

### Modelul Arola-Ramulu

O metodă de investigare a rezistenței la oboseală este cea utilizată în modelul propus de Arola și Williams [92] care au investigat efectele microgeometriei suprafeței pe un oțel de înaltă rezistență slab aliat. În lucrarea lor, parametrii de rugozitate a suprafeței au fost utilizați pentru a calcula factorul teoretic de concentrare a tensiunilor, care a fost apoi utilizat pentru a determina un factor de concentrare local.

Considerarea rugozității suprafeței ca o serie de creștături a permis definirea unui factor echivalent al tensiunilor  $K_t$  (rel. 5.9) utilizat în calculul unui factor echivalent de concentrare a tensiunilor la oboseală  $K_f$ .

$$\bar{K}_t = 1 + n \left( \frac{R_a}{\bar{\rho}} \right) \left( \frac{R_y}{R_z} \right) \quad (5.9)$$

unde:  $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_{10z}$  sunt parametrii de amplitudine a rugozității:  $R_a$  este abaterea medie aritmetică a rugozității;  $R_y$  - adâncimea totală a rugozității;  $R_{10z}$  - rugozitatea în 10 puncte. Acești parametri sunt definiți în funcție de înălțimea profilului înregistrat peste lungimea de referință;  $\bar{\rho}$  - raza medie din vâile dominante ale profilului;  $n$  – constantă empirică.

Pe baza cercetărilor experimentale, Arola precizează că  $\lambda=1$ , pentru suprafețele prelucrate mecanic, iar parametrul  $n$  are valoarea 2. Factorul efectiv de concentrare a tensiunilor la oboseală  $K_f$ , se obține prin înlocuirea ecuațiilor (5.9) în (5.3), obținându-se o relație de forma:

$$K_f = 1 + q \cdot n \cdot \left( \frac{R_a}{\bar{\rho}} \right) \cdot \left( \frac{R_y}{R_z} \right) \quad (5.10)$$

În lucrare, în studiul modelului Arola-Ramulu, parametrii de rugozitate 2D au fost înlocuiți cu parametrii, de amplitudine a rugozității, 3D echivalenți. Astfel relațiile (5.9) și (5.10) se pot scrie sub forma:

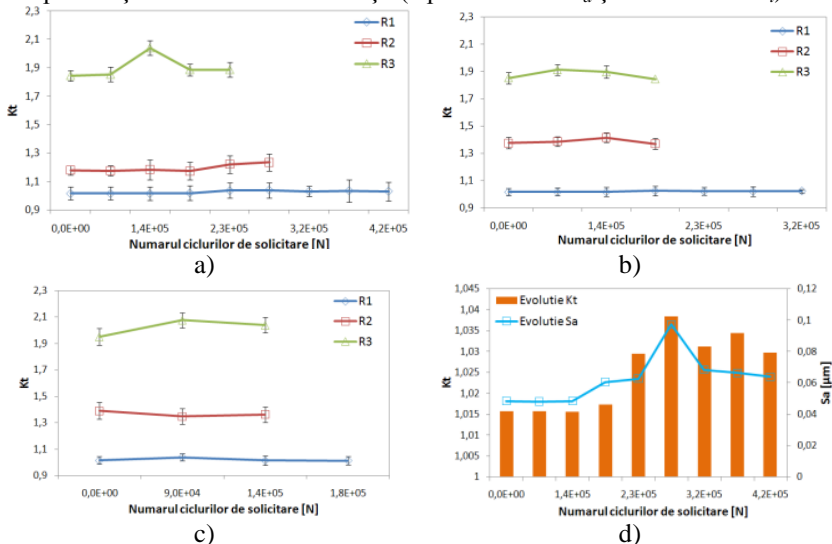
$$\bar{K}_t = 1 + n \left( \frac{S_a}{\bar{\rho}} \right) \left( \frac{S_y}{S_z} \right) \quad (5.11)$$

$$K_f = 1 + q \cdot n \cdot \left( \frac{S_a}{\bar{\rho}} \right) \cdot \left( \frac{S_y}{S_z} \right) \quad (5.12)$$

Evoluția factorului teoretic de concentrare a tensiunilor  $K_t$ , conform modelului propus de Arola-Ramulu, pentru cele trei sarcini de solicitare ( $S_1=345\text{MPa}$ ,  $S_2 = 450\text{MPa}$  și  $S_3 = 540\text{MPa}$ ) și cele trei niveluri de rugozitate ( $R_1$ ,  $R_2$  și  $R_3$ ), este prezentată în figura 5.22.

Se remarcă faptul că nivelul sarcinii de solicitare are o influență mai mică comparativ cu nivelul de rugozitate asupra evoluției factorului teoretic de concentrare a tensiunilor,  $K_t$ . Acest lucru indică faptul că modificările microgeometriei influențează semnificativ modificarea factorului teoretic de concentrare a tensiunilor.

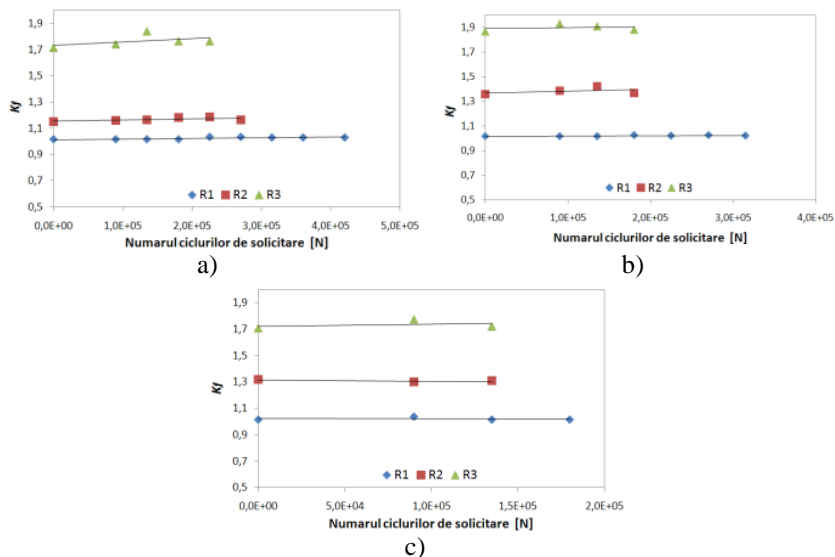
La fel ca în cazul modelului propus de Neuber și în studiul modelului Arola-Ramulu s-a urmărit influența parametrilor de rugozitate asupra evoluției factorului teoretic de concentrare a tensiunilor (fig. 5.22) și s-a observat aceeași corespondență între cele două evoluții (a parametrului  $S_a$  și a factorului  $K_t$ ).



**Figura 5.22.** Evoluția factorului teoretic de concentrare a tensiunilor  $K_t$ :  
a)  $S_1=345$  MPa, b)  $S_2=450$ MPa, c)  $S_3=540$ MPa, d) evoluție  $K_t$  și  $S_a$ , ( $S_1$ , R1)

Evoluția factorului efectiv de concentrare a tensiunilor la oboseală,  $K_f$ , la trei sarcini de solicitare și cele trei nivele ale rugozității (fig. 5.23), în cazul modelului Arola-Ramulu, este influențată de nivelul rugozității suprafețelor obținându-se valori maxime ale acestui parametru pentru nivele scăzute ale gradului de finisare a suprafeței pentru toate nivelele sarcinii de solicitare.

Se observă și în cazul modelului propus de Arola-Ramulu că, în condițiile unor solicitări variabile, variația în timp a rugozității suprafeței conduce corespunzător și la variația factorului teoretic de concentrare a tensiunilor care determină, în final, evoluția factorului efectiv de concentrare a tensiunilor la oboseală  $K_f$ .



**Figura 5.23.** Evoluția factorului efectiv de concentrare a tensiunilor la oboseală  $K_f$   
a) rugozitatea R1, b) rugozitatea R2, c) rugozitatea R3

### 5.6.3. Concluzii privind modelele analizate

- Folosirea parametrilor de amplitudine a rugozității 3D, în modelele analizate, conduce la creșterea gradului de precizie a determinărilor experimentale.
- Rugozitatea suprafeței poate fi considerată ca defect de suprafață evaluat prin intermediul parametrului  $\sqrt{aria_R}$ . Acest parametru poate fi folosit în analiza comportării la oboseală a materialelor.
- Parametrul  $\sqrt{aria_R}$  și microduritatea  $MHV_s$ , evoluează pe parcursul procesului de oboseală conducând și la modificarea instantanee a rezistenței la oboseală  $\sigma_w$  și a factorului de intensitate a tensiunilor,  $K_{th}$ .
- Nivel de rugozitate mic, conduce la valori mici ale factorului  $K_{th}$ , iar un nivel ridicat al rugozității, conduce la valori mai mari ale factorului  $K_{th}$ , producându-se o întârziere a procesului de inițiere a fisurii de oboseală.
- Valoarea de prag a factorului de intensitate a tensiunilor,  $K_{th}$  are o variație liniară funcție de parametrul  $\sqrt{aria_R}$ . Factorul  $K_{th}$  nu depinde numai de mărimea defectului sau a fisurii ci și de parametrii microstructurali cuantificați fizic prin modificarea microdurității.
- Evaluarea gradului de influență a parametrilor  $\sqrt{aria_R}$  și  $MHV_s$ , asupra evoluției valorii de prag a factorului de intensitate a tensiunilor  $K_{th}$  arată



că pentru același nivel de rugozitate parametrul  $\sqrt{aria_R}$  are o influență mai mare. Gradul de influență al parametrului  $\sqrt{aria_R}$  crește odată cu creșterea nivelului rugozității.

- La nivele scăzute ale rugozității, (număr mare de treceri la prelucrare), valoarea de prag a factorului de intensitate a tensiunilor  $K_{th}$  este mai mică, procesul de inițiere a fisurii are loc mai rapid, ca urmare a influenței modificărilor structurale apărute, cuantificate prin evoluția microdurității  $MHV$ .
- Evoluția factorului teoretic de concentrare a tensiunilor  $K_t$  este influențată de nivelul rugozității suprafeței, fiind în concordanță cu variația parametrilor de amplitudine a rugozității.
- Nivelul rugozității are o influență mai mare asupra evoluției factorului teoretic de concentrare a tensiunilor  $K_t$ , comparativ cu influența nivelului sarcinii de solicitare.
- În condițiile solicitărilor variabile, variația în timp a parametrilor de amplitudine a rugozității conduce corespunzător și la variația factorului efectiv de concentrare a tensiunilor  $K_f$ . Nivele de rugozități mari conduc la valori ridicate ale factorului efectiv de concentrare a tensiunilor  $K_f$  la același nivel al solicitării.
- Se confirmă faptul că valorile factorului teoretic de concentrare a tensiunilor,  $K_t$  și ale factorului efectiv de concentrare a tensiunilor,  $K_f$  sunt mai mari, în cazul modelului Neuber comparativ modelul Arola-Ramulu pentru modelul original cât și în cazul utilizării valorilor experimentale obținute de autorul lucrării.
- Diferențierea între cele două modele crește odată cu creșterea nivelului rugozității, sarcina aplicată având o importanță minoră în această evoluție.

## **Capitolul 6. Modele propuse pentru studiul degradării prin oboseală pe baza stării de integritate a suprafeței**

### **6.1. Modele propuse pentru studiul degradării prin oboseală**

O serie de cercetători [82, 202] au încercat realizarea unor modele unde prin legarea între ei a parametrilor de rugozitate să se poată determina valoarea factorilor de concentrare a tensiunilor teoretic și cel efectiv.

Aceste modele utilizează parametrii de rugozitate 2D (*Abateră medie aritmetică*  $R_a$ , *Înălțimea maximă a profilului*  $R_y$ , *Adâncimea medie în 10 puncte a rugozității*,  $R_z$ ).

Deoarece parametrii de amplitudine a rugozității 3D oferă o caracterizare mai bună a suprafeței comparativ cu cei 2D [53], s-a propus în lucrarea de față

utilizarea parametrilor de amplitudine a rugozității 3D care reflectă mai bine starea locală a microgeometriei suprafeței. Pe de altă parte, modelarea, proceselor de degradare, prin utilizarea rețelelor neuronale a arătat care dintre parametrii de rugozitate 3D au o influență semnificativă asupra procesului de oboseală.

Astfel în lucrarea de față se propune un set de modele obținute prin modificarea modelelor Neuber și Arola-Ramulu. În aceste modele propuse se utilizează parametrii de rugozitate 3D ( $S_a$ ,  $S_y$ ) în locul parametrilor 2D ( $R_a$ ,  $R_y$ ) și se înlocuiește parametrul  $R_z$  cu parametrul de rugozitate  $S_v$ . S-a propus înlocuirea acestui parametru deoarece în urma modelării cu rețele neuronale s-a constatat că acesta are ponderea cea mai ridicată de influență asupra procesului de oboseală, fiind considerat ca o măsură a performanței acestui proces. Relațiile astfel modificate vor deveni:

$$\bar{K}_t = 1 + n \left( \frac{S_a}{\bar{\rho}} \right) \left( \frac{S_y}{S_v} \right) \quad (6.1)$$

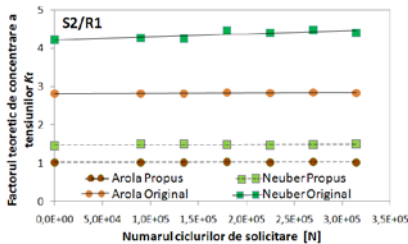
$$K_t = 1 + n \cdot \sqrt{\lambda \frac{S_v}{\rho}} \quad (6.2)$$

În aceste relații parametrii de amplitudine a rugozității 3D, au caracter evolutiv ceea ce va conduce la faptul că și factorii de concentrare a tensiunilor vor avea valori evolutive.

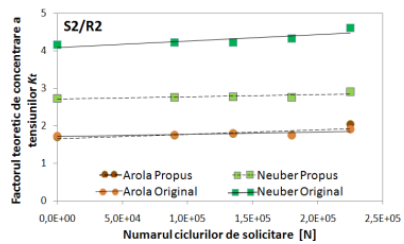
Astfel pe baza datelor experimentale privind evoluția factorilor  $S_a$ ,  $S_y$ ,  $S_v$  cu numărul ciclurilor de solicitare s-a trasat evoluția factorului teoretic de concentrare a tensiunilor pentru modelele Arola-Ramulu și Neuber (relațiile 5.11 și 5.7) și modelele propuse (relațiile 6.1 și 6.2).

Se constată, (fig. 6.1), că utilizarea datelor experimentale obținute în lucrarea de față în cele două modele originale conduc la valori ale factorului teoretic de concentrare mai mari în cazul modelului Neuber față de modelul Arola (relațiile 5.7 și 5.11). Același lucru se remarcă și în cazul modelelor propuse, în care au fost folosiți parametrii 3D de amplitudine a rugozității și parametrul  $S_v$  (relațiile 6.2 și 6.1).

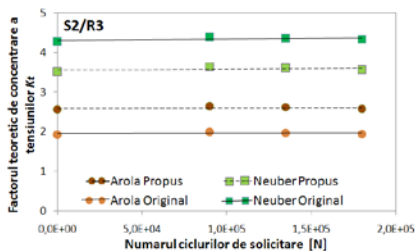
La toate nivelele ale sarcinilor de solicitare odată cu creșterea nivelului rugozității se manifestă o tendință de apropiere a evoluțiilor valorilor factorului teoretic de concentrare a tensiunilor,  $K_t$ , între modelele originale și cele propuse.



a)



b)



c)

**Figura 6.1.** Evoluția factorului teoretic de concentrare a tensiunilor ( $S_2=450$  MPa):

a) rugozitatea R1, b) rugozitatea R2, c) rugozitatea R3

Modelul Neuber propus conduce la valori mai mici pentru factorul teoretic de concentrare a tensiunilor,  $K_t$ , decât modelul original la toate nivelele sarcinilor de solicitare și de rugozitate. În condițiile utilizării modelelor Arola-Ramulu situația se inversează în special în cazul nivelelor mai ridicate de rugozitate.

Se remarcă faptul că nivelul sarcinii de solicitare are o influență minoră asupra evoluției factorului teoretic  $K_t$  atât pentru modelele originale cât și pentru cele propuse. Acest lucru indică faptul că modificarea microgeometriei este factorul hotărâtor în evoluția factorului teoretic de concentrare a tensiunilor.

În mod analog obținerii relațiilor pentru factorul teoretic de concentrare a tensiunilor,  $K_t$ , se procedează și pentru factorul efectiv de concentrare a tensiunilor,  $K_f$ .

Relațiile astfel modificate vor deveni:

$$K_f = 1 + q \cdot n \cdot \left(\frac{S_a}{\bar{\rho}}\right) \cdot \left(\frac{S_y}{S_v}\right) \quad (6.3)$$

$$K_f = 1 + q \cdot n \cdot \sqrt{\lambda \frac{S_v}{\rho}} \quad (6.4)$$

Evoluția factorului efectiv de concentrare a tensiunilor la oboseală atât pentru cazul modelelor originale cât și pentru modelele propuse este prezentată în figura 6.2.

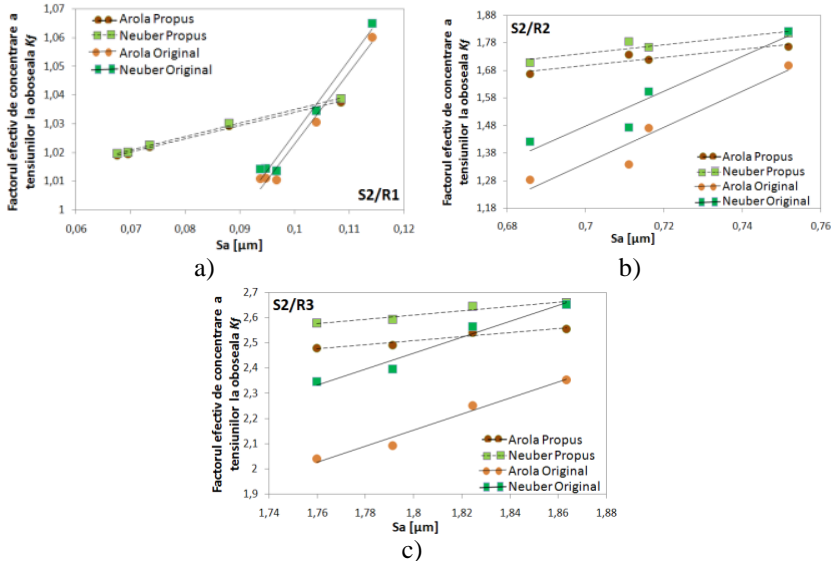
Se constată, similar factorului teoretic de concentrare  $K_t$ , că prin utilizarea datelor experimentale proprii în relațiile Arola-Ramulu și Neuber s-au obținut valori ale factorului efectiv de concentrare la oboseală mai mari în cazul modelului Neuber original față de modelul Arola original. Același lucru se remarcă și pentru modelele propuse.

Se remarcă faptul că la nivele scăzute ale rugozității se înregistrează diferențe mici între valorile obținute pentru factorul efectiv de concentrare la

oboseală utilizând cele două modele atât în cazul celor originale cât și în cazul celor propuse.

Odată cu creșterea nivelului rugozității diferențele valorice între valorile factorului efectiv de concentrare a tensiunilor,  $K_f$ , cresc atât pentru modelele originale cât și pentru cele propuse.

Creșterea nivelului sarcinii de solicitare conduce la valori ale factorului efectiv de concentrare la oboseală mai mari în cazul modelului Neuber față de modelul Arola.



**Figura 6.2.** Evoluția factorului efectiv de concentrare a tensiunilor ( $S_2=450$  MPa): a) rugozitatea R1, b) rugozitatea R2, c) rugozitatea R3

Un set de modele mai complexe decât cel propus anterior este acela în care se ține seama de caracteristicile de rezistență la oboseală:

$$\bar{K}_t = 1 + n \cdot \left(\frac{S_a}{\rho}\right) \cdot \left(\frac{S_y}{S_v}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_w}{S}\right) \quad (6.5)$$

$$K_t = 1 + n \cdot \left(\frac{\sigma_w}{S}\right) \cdot \sqrt{\lambda \frac{S_v}{\rho}} \quad (6.6)$$

unde:

$\sigma_w$ , valoarea instantanee a rezistenței la oboseală determinată cu ajutorul relației Murakami;

S – valoarea sarcinii de solicitare aplicată.

Pentru determinarea evoluției factorului efectiv de concentrare a tensiunilor s-au folosit relațiile:

$$K_f = 1 + q \cdot n \cdot \left(\frac{S_a}{\rho}\right) \cdot \left(\frac{S_y}{S_v}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_w}{S}\right) \quad (6.7)$$

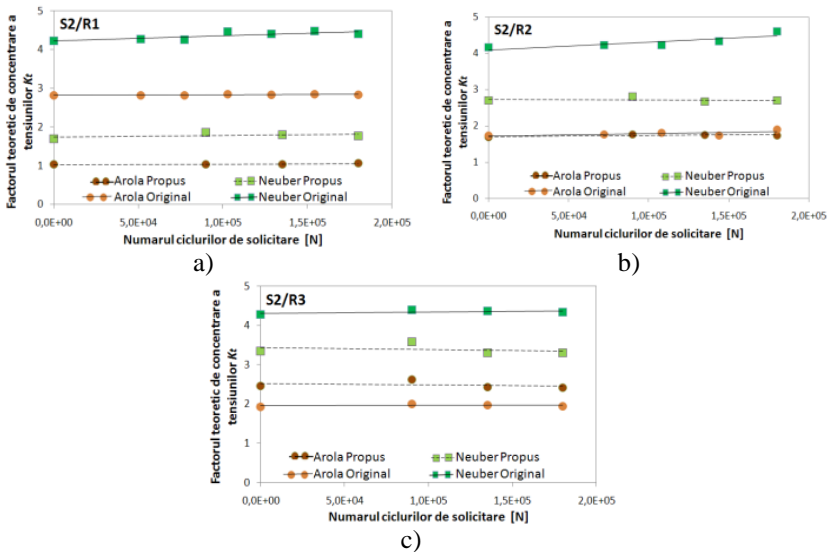
$$K_f = 1 + q \cdot n \cdot \left(\frac{\sigma_w}{S}\right) \cdot \sqrt{\lambda \frac{S_v}{\rho}} \quad (6.8)$$

Utilizând relațiile (6.5) și (6.6) s-au determinat valorile factorului teoretic de concentrare a tensiunilor la oboseală pentru cazul modelelor originale și pentru modelele propuse, figura 6.3 prezentând evoluția acestui factor în cazul sarcinii de solicitare de 450 MPa.

Modelul Arola-Ramulu propus de această dată, în cazul nivelelor de rugozitate mai mari, duce la obținerea unor valori mai apropiate de cele obținute utilizând modelul original, comparativ cu primul model propus.

Pentru nivele de rugozitate mici se obțin valori comparabile ale factorului teoretic de concentrare a tensiunilor pentru cele două modele propuse.

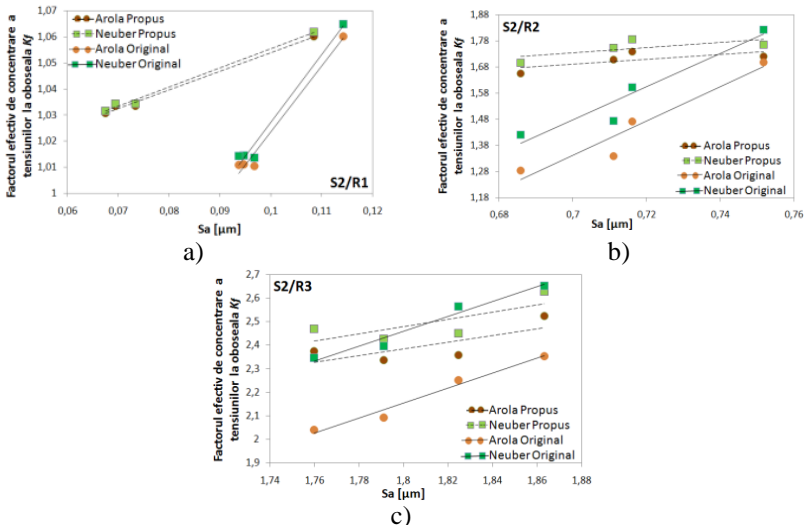
Se constată o evoluție similară a factorului teoretic  $K_t$  pentru modelele originale și cele propuse, la cele trei nivele de rugozitate, valorile obținute cu cel de al doilea model propus fiind mai mari comparativ cu cele obținute cu ajutorul primului model.



**Figura 6.3.** Evoluția factorului teoretic de concentrare a tensiunilor ( $S_2=450$  MPa):

a) rugozitatea R1, b) rugozitatea R2, c) rugozitatea R3

Evoluția factorului efectiv de concentrare a tensiunilor la oboesală atât pentru cazul modelelor originale cât și pentru modelele propuse (rel. 6.7, 6.8) este prezentată în figura 6.4.



**Figura 6.4.** Evoluția factorului efectiv de concentrare a tensiunilor ( $S_2=450$  MPa):

a) rugozitatea R1, b) rugozitatea R2, c) rugozitatea R3

Se constată, de această dată, pentru cele două modele propuse, Arola-Ramulu și Neuber, obținerea unor valori mai apropiate de cele înregistrate cu ajutorul modelelor originale, comparativ cu primul model propus în cazul nivelelor de rugozitate mari. Pentru nivele de rugozitate mici se obțin valori comparabile cu cele originale ale factorului efectiv de concentrare a tensiunilor pentru cele două modele propuse.

## 6.2. Concluzii privind modelele propuse pentru determinarea factorului teoretic de concentrare a tensiunilor, $K_t$ și a factorului efectiv de concentrare a tensiunilor, $K_f$

- În lucrarea de față s-au propus mai multe modele de evaluare ale factorului teoretic de concentrare a tensiunilor  $K_t$  și ale factorului efectiv de concentrare a tensiunilor  $K_f$ . Modelele au fost realizate prin modificarea unor modele existente în literatura de specialitate.

- Modelele propuse în lucrarea de față permit analiza evolutivă, pe parcursul solicitării de oboseală, a factorilor analizați.
- Au fost realizate două tipuri de modele: modele în care în relațiile Arola-Ramulu și Neuber s-au utilizat parametrii de amplitudine a rugozității 3D și parametrul *Adâncimea maximă a văii*,  $S_v$ ; modele unde în afara parametrilor de amplitudine a rugozității 3D au fost utilizate valorile instantanee ale rezistenței la oboseală Murakami,  $\sigma_w$  și sarcina de solicitare.
- Modelele propuse prin utilizarea parametrilor de rugozitate 3D caracterizează mai precis evoluția factorilor de concentrare a tensiunilor. Parametrii de rugozitate 3D descriu cu precizie starea locală a microgeometriei suprafeței.
- Modelele propuse utilizând ca bază relația Neuber conduc pentru toate nivelele de rugozitate și sarcini la valori mai mici ale factorului teoretic de concentrare a tensiunilor  $K_t$ .
- Modelele propuse, care utilizează atât parametrii de rugozitate 3D cât și valorile instantanee ale rezistenței la oboseală Murakami  $\sigma_w$  și ale sarcinii de solicitare, duc la valori mai apropiate cu modelele originale, în cazul nivelelor de rugozitate mai mari.
- Nivele scăzute de rugozitate determină diferențe mici între modelele propuse (ambele tipuri de modele) care utilizează ca bază fie relațiile Arola-Ramulu fie relațiile Neuber.
- Odată cu creșterea nivelului sarcinii de solicitare se obțin valori mai mari pentru factorul efectiv de concentrare a tensiunilor,  $K_f$ , în cazul modelului propus care are ca bază relația lui Neuber față de modelul propus pe baza relației Arola-Ramulu.
- Modelele propuse care utilizează parametrii de rugozitate 3D, comparativ cu modelele existente conduc la valori comparabile în domeniul rugozităților scăzute.
- Modelele propuse care utilizează parametrii de rugozitate 3D, valorile instantanee ale rezistenței la oboseală Murakami  $\sigma_w$  și ale sarcinii de solicitare comparativ cu modelele existente conduc la valori comparabile în domeniul rugozităților ridicate.
- Modelele propuse permit caracterizarea factorului teoretic de concentrare a tensiunilor  $K_t$  și a factorului efectiv de concentrare a tensiunilor  $K_f$  într-un domeniu mai larg de nivele ale rugozității.

## Capitolul 7. Concluzii generale și contribuții originale

### 7.1. Concluzii generale

Studiul de față a fost îndreptat către analiza influenței stării de integritate a suprafeței oțelului de construcții metalice *S355JR EN 10025* asupra comportării la oboseală. S-au luat în studiu parametrii care caracterizează stratul superficial: geometric, caracterizat prin rugozitate și parametrii de amplitudine ai acesteia; metalurgic, caracterizat prin structură fină și parametrul mecanic, evaluat prin microduritate și tensiunile interne de ordinul I. În urma analizei efectuate rezultă următoarele concluzii generale:

- Parametrii de amplitudine a rugozității evoluează pe parcursul procesului de oboseală. Acești parametri pe lângă alte caracteristici pot caracteriza la un moment dat starea de degradare prin oboseală a elementului analizat.
- Evoluția parametrilor de amplitudine a rugozității poate caracteriza o etapă principală a dinamicii procesului de degradare prin oboseală și anume aceea a probabilității inițierii fisurii de oboseală.
- Analizele realizate pe baza rețelelor neuronale arată că dintre parametrii de amplitudine a rugozității, *Valoarea maximă a adâncimii văii  $S_v$* , poate caracteriza cel mai bine dinamica evoluției rugozității în timpul procesului de oboseală.
- Nivelul rugozității suprafeței influențează modificările la nivel structural în timpul procesului de oboseală. Astfel, dimensiunea medie a blocurilor de mozaic, distanța interplanară, densitatea de dislocații, evoluează și se modifică odată cu nivelul rugozității suprafeței și cu nivelul sarcinii aplicate.
- Studiile arată că nivelul rugozității are o influență predominantă asupra modificărilor structurale comparativ cu influența sarcinilor de solicitare.
- Starea de integritate a suprafeței evaluată prin rugozitate poate fi caracterizată și prin evoluția microdurității în stratul superficial.
- În timpul procesului de oboseală legat de evoluția rugozității și a microdurității se constată manifestarea efectului de indentare.
- Caracterizarea procesului de oboseală pe baza evoluției rugozității și legat de aceasta a microdurității poate fi realizată în două domenii ale sarcinii de indentare: domeniul de manifestare a efectului de indentare (*ISE*) și domeniul în care degradarea poate fi caracterizată prin factorul *Deteriorare,  $D_H$* .
- Aceași parametri evolutivi permit determinarea valorii de prag a factorului de intensitate a tensiunilor  $K_{th}$ .



- Aprecierea stării de degradare prin oboseală poate fi realizată și pe baza conceptului după care rugozitatea suprafeței poate fi considerată ca defect de suprafață evolutiv, caracterizat prin parametrul  $\sqrt{aria_R}$ .
- Parametrii  $\sqrt{aria_R}$  și  $MH_V$ , legat de nivelul rugozității, permit determinarea limitei de rezistență la oboseală  $\sigma_w$ .
- Nivele de rugozitate mici conduc la valori mici ale factorului de intensitate a tensiunilor  $K_{th}$  cu inițierea timpurie a fisurilor, iar valori ridicate ale rugozității conduc la valori mai mari ale factorului  $K_{th}$  cu întârzierea inițierii fisurii. Asupra acestui factor rol predominant are nivelul rugozității care determină parametrul  $\sqrt{aria_R}$ .
- Microgeometria suprafeței determină mărimea factorului teoretic de concentrare a tensiunilor  $K_t$  și a factorului efectiv de concentrare a tensiunilor  $K_f$  care influențează rezistența la oboseală.
- Determinările experimentale au validat o serie de modele existente în literatură referitoare la evoluția factorului teoretic de concentrare a tensiunilor  $K_t$  și a factorului efectiv de concentrare a tensiunilor  $K_f$ .
- Cercetările experimentale au permis elaborarea unor modele cu care se poate determina, spre deosebire de modelele existente, evoluția factorului teoretic de concentrare a tensiunilor  $K_t$  și a factorului efectiv de concentrare a tensiunilor  $K_f$ , pe baza procesului evolutiv al modificării rugozității în timpul procesului de oboseală.
- Comparativ cu modelele existente, modelele propuse, evaluând procesele de oboseală pe baza parametrilor de amplitudine a rugozității 3D și a caracteristicilor de rezistență la oboseală, permit o determinare mai precisă a evoluției factorului teoretic de concentrare a tensiunilor  $K_t$  și a factorului efectiv de concentrare a tensiunilor  $K_f$ .
- Modelele propuse pot caracteriza factorul teoretic de concentrare a tensiunilor  $K_t$  și factorul efectiv de concentrare a tensiunilor  $K_f$  într-un domeniu mai larg de nivele ale rugozității.

## 7.2. Contribuții originale

Activitatea de cercetare desfășurată pe parcursul elaborării lucrării și rezultatele experimentale prezentate, au permis formularea concluziilor finale și sublinierea următoarelor contribuții originale ale autorului:

Elaborarea metodologiei pentru studiul influenței stării de integritate a suprafeței asupra degradării prin oboseală.

Evidențierea evoluției parametrilor de amplitudine a rugozității în timpul solicitării de oboseală la diferite nivele de rugozitate și solicitare.

Stabilirea ponderii factorului predominant în procesele de oboseală.

Stabilirea legăturii dintre evoluția parametrilor de structură fină, determinată pe bază difractometrică, și evoluția parametrilor de amplitudine a rugozității.

Împărțirea în două domenii ale sarcinii de indentare, (domeniul de manifestare a efectului de indentare și domeniul caracterizat prin factorul *Deteriorare*,  $D_H$ ), pentru caracterizarea procesului de oboseală pe baza evoluției rugozității și a microdurității.

Evaluarea dinamicii procesului de oboseală pe baza considerării microgeometriei ca defect de suprafață.

Stabilirea influenței rugozității și a parametrilor de amplitudine a rugozității asupra valorii de prag a factorului de concentrare a tensiunilor și implicit asupra dinamicii procesului de inițiere a fisurii de oboseală.

Elaborarea unei metodologii de evaluare a parametrului  $\sqrt{aria_R}$ .

Analiza dinamicii evoluției rugozității cu evidențierea momentului în care microgeometria devine concentrator de tensiune cu potențial de inițiere a fisurii de oboseală.

Validarea unor modele privind determinarea factorului teoretic de concentrare a tensiunilor  $K_t$  și a factorului efectiv de concentrare a tensiunilor  $K_f$  prin utilizarea datelor experimentale proprii.

Elaborarea unor modele privind evoluția în timpul procesului de oboseală a factorului teoretic de concentrare a tensiunilor  $K_t$  și a factorului efectiv de concentrare a tensiunilor  $K_f$  prin utilizarea parametrilor de amplitudine a rugozității 3D și a caracteristicilor de rezistență la oboseală.

### **7.3. Direcții viitoare de cercetare**

Aceast studiu poate fi aprofundat în viitor, sugestiile ulterioare de cercetare vizează următoarele aspecte:

Studiul influenței stării de integritate a suprafeței asupra degradării prin oboseală a epruvetelor din oțel solificate la temperaturi joase și ridicate.

Analiza dinamicii procesului de oboseală în stadiul de inițiere a fisurii de oboseală ca urmare a nivelului de integritate a suprafeței.

Studiul influenței și a altor parametri care caracterizează starea de integritate a suprafeței asupra rezistenței la oboseală: suprafețe obținute prin turnare, forjare, laminare, etc.

Elaborarea unui model și a unui program de calcul care să reproducă cu exactitate evoluția factorilor de concentrare a tensiunilor în procesul de oboseală.

## BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [1] Palaghian L., 2007, *Siguranță, durabilitate și fiabilitate la oboseală*, Editura Tehnică, București 2007.
- [2] M'Saoubi R., Outeiro J.C., Chandrasekaran H., Dillon Jr, O.W. and Jawahir I.S., 2008, *A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products*, Int. J. Sustainable Manufacturing 1(1/2): 203-236.
- [5] Field M., Kahles J.F., Cammett J.T., 1972, *Review of measuring methods for surface integrity*. Annals of the CIRP 21: 219–238.
- [7] Henaff G., Morel F., 2005, *Fatigue des structures: endurance, criteres de dimensionnement, propagation des fissures, rupture*, Technosup, Ellipses, 275
- [8] Griffiths B., 2001, *Manufacturing Surface Technology-Surface Integrity and Functional Performance*, Prenton Press, ISBN 1-8571-8029-1.
- [11] Tonshoff H.K., Brinksmeier E., 1980, *Determination of the mechanical and thermal influences on machined surfaces by microhardness and residual stress analysis*, Ann CIRP 29/2:519–530.
- [13] Seiler W., Reilhan F., Gounet-Lespinasse F., Lebrun J.L., 1998, *Détermination du profil de contraintes résiduelles dans les gorges galetées de vilebrequins*. J Phys 8:139–146.
- [19] Kwai S. Chan, 2010, *Roles of microstructure in fatigue crack initiation*, International Journal of Fatigue 32, 1428–1447.
- [22] Meggiolaro M.A., Oliveira Miranda A.C., Jaime Tupiassu Pinho de Castro, 2007, *Short crack threshold estimates to predict notch sensitivity factors in fatigue*, International Journal of Fatigue 29, 2022–2031.
- [32] Macurova A., 2010, *The roughness surface expressed by the mathematical model*, Applied Surface Science 256, 5656-5658.
- [33] Pan M.Q., Chi G.X., Wei D.B., Di S.C., 2009, *Influence of processing parameters on coating surface roughness of aluminum alloy*, Trans. Nonferrous Met. Soc. China 19, 392-397.
- [36] Field M., et al., 1970, *Machining of high strength steels with emphasis on surface integrity*. Air Force Machinability Data Center, Metcut Research Association, 1-229.
- [38] Fluck P.G., 1951, *The influence of surface roughness on the fatigue life and scatter of test results of two steels*. Proc ASTM, 51:584-592.
- [42] Siebel E., Gaier M., 1957, *The influence of surface roughness on the fatigue strength of steels and non-ferrous alloys*, *The Engineers' Digest*, Vol. 18, No. 3, pp. 109-112.
- [45] Taylor D., Clancy O.M., 1991, *Fatigue performance of machined surfaces*, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures 14 (2-3) 329-336.
- [64] Salio M., Berruti T., De Poli G., 2006, *Prediction of residual stress distribution after turning in turbine disks*, International Journal of Machine Tools and Manufacture 44 (48), 976-984.
- [68] Koster W., 1991, *Effect of residual stress on fatigue of structural alloys*, Proceedings of the Third International Conference, ASM International, Indianapolis, Indiana, USA, pp.1-9.

- [69] El-Helieby S.O.A., Rowe G.W., 1980, *Influence of surface roughness and residual stress on fatigue life of ground steel components*, Metals Technology, 221-225
- [70] Leverant G.R., Langer B.S., Yuen A., Hopkins S.W., 1979, *Surface residual stresses, surface topography and the fatigue behaviour of Ti6/4*, Metallurgical and Material Transactions A10, 251-257.
- [80] Murakami Y., Endo M., 1994, *Effect of defects, inclusions and inhomogenities on fatigue strength*, International Journal of Fatigue, Vol.16, No. 3, pp. 163-182.
- [82] Murakami Y., 2002, *Effect of surface roughness on fatigue strength, Metal Fatigue: Effect of Small Defects and Non Metallic Inclusions*, Elsevier, Kidlington, Oxford, UK, ISBN 0-08-044064-9.
- [83] Murakami Y., 1987, *Stress intensity factors handbook*, Vol. 1-2. Pergamon Press, Oxford, 1456 p. ISBN 0-08-034809-2.
- [92] Arola D., Williams C.L., 2002, *Estimating the fatigue stress concentration factor of machined surfaces*, International Journal of Fatigue 24, 923-930.
- [108] Ilze M., Janis M., 2006, *Size effects in micro- and nanoscale indentation*. Acta Mater, 54: 2049-2056.
- [115] Wellman R.G., Tourmente H., Impey S., Nicholls J.R., 2004, *Nano and microhardness testing of aged EB PVD TBCs*. Surf Coat Technol, 188/189: 79-84
- [116] Abu Al-Rub R.K., Voyiadjis G.Z., 2004, *Analytical and experimental determination of the material intrinsic length scale of strain gradient plasticity theory from micro- and nano-indentation experiments*, Int. J. Plast. 20, 1139-1182.
- [120] Huber N., Nix W.D., Gao H., 2002, *Identification of elastic-plastic material parameters from pyramidal indentation of thin films*, Proc. Roy. Soc. London Ser. A 458 (2023), 1593-1620.
- [122] Arsenlis A., Parks D.M., 1999, *Crystallographic aspects of geometrically-necessary and statistically-stored dislocation density*, Acta Mater. 47, 1597-1611.
- [136] Shintani T., Murata Y., 2011, *Evaluation of the dislocation density and dislocation character in cold rolled Type 304 steel determined by profile analysis of X-ray diffraction*, Acta Materialia 59, pp. 4314-4322;
- [140] Levine L.E., Larson B.C., Yang W., Kassner M.E., Tischler J.Z., Delos-Reyes M.A., Fields R.J., Liu W., 2006, *X-ray microdiffraction measurements of individual dislocation cell elastic strains in deformed single-crystal copper*. Nature Materials 5, 619-622.
- [144] Gurtin M.E., 2008, *A finite-deformation, gradient theory of single-crystal plasticity with free energy dependent on densities of geometrically necessary dislocations*, International Journal of Plasticity 24, 702-725.
- [146] **Mereuță V.**, Palaghian L., 2010, *Surface roughness parameters evolution under fatigue loading*, In: The Annals of University "Dunarea de Jos" of Galati, Fascicle VIII Tribology, vol.1, ISSN 1221-4590 Issue 1, pp. 31-35, indexed CSA.
- [149] **Mereuță V.**, Palaghian L., Buciumeanu M., 2010, *Surface roughness parameters under fatigue loading*, In: Proceedings of 11-th International Conference

- Tribology, Iasi 4-6 Nov., pag. 2.3-8-2.3-, ISSN 1843-6501.
- [150] **Mereuță V.**, Palaghian L., 2012, *Variable Loads and Surface Roughness Evolution*, The 3<sup>rd</sup> International Conference on Diagnosis and Prediction in Mechanical Engineering Systems Dipre 12, 31may-1june, ISBN 978-606-8008-33-2, p83 pp1-5.
- [151] Palaghian L.; Ciortan S. & Bucsa M., 2004, *Fatigue Damage Analysis of Gear Box Using Artificial Neural Networks – A Preliminary Study*, Proceedings of Unitech'04 Conference, Gabrovo, (18-19 November), pp. II 149-II 153.
- [152] Palaghian L.; Ciortan S., Bucșă M., 2006, *About Using the neural network for establishing the fatigue characteristics of steel*, Proceedings of International Conference RADMI, Budva, (13-17 sept.), pp. 222- 229.
- [153] Palaghian L., Ciortan S., Bucșă M., 2004, *Artificial neural networks tool for fatigue damage modeling*, Proceedings of Manufacturing in 21-st Century, Scopje, Macedonia, pp. 15- 23.
- [155] Spănu C., Ciortan S., Bîrsan I., **Mereuță V.**, 2010, *Method for Optimizing Machine Parts Design Based on Artificial Neural Networks (vol.I)*, In: Proceedings of 10-th International Conf. Research and Development in Mechanical Industry RaDMI, Donji Milanovac, Serbia 16-19 sept, pp. 431-437, ISBN 978-86-6075-017-6.
- [167] Spănu C., Teletin C., Crudu I., **Mereuță V.**, 2009, *Sliding indentation behaviour of the X 65 hydroginate steel*. In: The Annals of University "Dunarea de Jos" of Galati, Fascicle VIII Tribology, ISSN 1221-4590 Issue 2, pp. 109-114, indexed CSA.
- [172] Kug H.K., Young C.K., Eun J., 2011, *Evaluation of indentation tensile properties of Ti alloys by considering plastic constraint effect*. Materials Science and Engineering A 528, 5259-5263.
- [176] De Castro V., Leguey T., Munoz A., Monge M.A., Pareja R., 2005, *Relationship between hardness and tensile test in titanium reinforced with yttria nanoparticles*, Materials Science and Engineering A 400- 401, 345- 348.
- [179] Pawade R.S., Joshi S.S., Brahmankar P.K., 2008, *Effect of machining parameters and cutting edge geometry on surface integrity of high-speed turned Inconel 718*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 48, 15-28.
- [181] **Mereuță V.**, Ripă M., Palaghian L., 2012, *Roughness Evolution and Indentation Size Effect in Superficial Layers Under Plane Fatigue Loading*, International Conference on Frontiers of Mechanical Engineering, Materials and Energy, 20-21 Dec., Beijing, China, papers will be published in international journal Advanced Materials Research (ISSN: 1022-6680), indexed by Elsevier: SCOPUS, (CPX), (CSA), ISI (ISTP, CPCI, Web of Science).
- [182] Fuqian Y., Lingling P., Kenji O., 2006, *Effect of the indenter size on the indentation of aluminum*, Materials Characterization 57, 321-325.
- [187] Florea B., **Mereuță V.**, 2012, *Fatigue Damage Characterization of Metallic Surfaces on the Link Between Surface Geometry and Microhardness*, Metalurgia International Vol. XVII, No. 6 ISSN 1582-2214, pp. 76-81.
- [189] **Mereuță V.**, Alexandru P., Palaghian L., 2011, *Microhardness a possible characteristic of fatigue damage of metallic surfaces*, Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium, Volume 22,

- No. 1, ISSN 1726-9679, pp. 905-906.
- [190] **Mereuță V.**, Gheorghieș C., Palaghian L., 2011, *Roughness as small surface defects and microstructure changes in fatigue process*, In: The Annals of University "Dunarea de Jos" of Galati, Fascicle VIII Tribology, vol.1, ISSN 1221-4590 Issue 1, pp. 52-57, indexed CSA.
- [191] **Mereuță V.**, Gheorghieș C., Ciortan S., Palaghian L., 2011, *Assesing the link between surface processing and fine structural parameter in fatigue damage evolution using neural network*, In: The Annals of University „Dunarea de Jos” of Galati, Fascicle VIII Tribology, vol.2, ISSN 1221-4590 Issue 1, pp. 32-36, indexed CSA.
- [192] Băicean S., Palaghian L., Buciumeanu M., **Mereuță V.**, 2009, *Damage prediction in fatigue corrosion processes*, In: The Annals of University "Dunarea de Jos" of Galati, Fascicle VIII Tribology, ISSN 1221-4590 Issue 1, pp. 59-63, indexed CSA.
- [198] **Mereuță V.** Florea B., 2012, *Influence of Roughness Evolution As a Surface Defect on Fatigue Crack Initiation Process*, Metalurgia International Vol. XVII, No. 11 ISSN 1582-2214, pp. 5-10.
- [199] Neuber H.P., 1958, *Kerbspannungslehre*, 2nd ed., Springer, New York.
- [202] **Mereuță V.**, Buciumeanu M., Palaghian L., 2012, *3D Roughness Parameters as Factors in Determining the Evolution of Effective Stress Concentration Factors in Fatigue Processes*, International Conference on Mechanical Materials and Manufacturing Engineering, 5-6 Oct., Dalian, China, paper will be published by the international journal: Applied Mechanics and Materials, ISSN: 1660-9336, which will be indexed in EI Compendex, ISI Proceedings (ISTP), Scopus.
- [203] **Mereuță V.**, Palaghian L., 2010, *Comparison between two methods in assesing the surface quality for different manufacture process*, In: Annals of DAAM for 2010&Proceedings of 21 st. International DAAM Symposium 20-23 oct. 2010, Zadar Croatia, ISSN 1726-9679, pp. 1459-1460.

