





**MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE ȘI CERCETĂRII ȘTIINȚIFICE**  
**UNIVERSITATEA PETROL – GAZE DIN PLOIEȘTI**  
**FACULTATEA DE INGINERIE MECANICĂ ȘI ELECTRICĂ**

**TEZĂ DE DOCTORAT**

**CERCETĂRI PRIVIND CREȘTEREA DURABILITĂȚII**  
**POMPELOR ELICOIDALE PENTRU EXTRAȚIA ȚIȚEIURILOR**  
**VÂSCOASE ȘI CU IMPURITĂȚI MECANICE**

**REZUMAT**

**Conducători de doctorat:**

**Prof.univ.dr.ing. Vlad Ulmanu**

**Prof.univ.dr.ing. Nicolae Napoleon Antonescu**

**Doctorand:**

**ing. Nușa Sandu Mitrașcă, IDT I**

**Ploiești,**

**2017**

## PREFAȚĂ

Teza „Cercetări privind creșterea durabilității pompelor elicoidale pentru extracția țițeiurilor vâscoase și cu impurități mecanice” a fost realizată în cadrul Departamentului de Inginerie Mecanică al Facultății de Inginerie Mecanică și Electrică, cercetările experimentale au fost realizate în Laboratorul de Tribologie Fiabilitate și în Laboratorul de Sudare, pe o temă considerată a fi de un deosebit interes pentru îmbunătățirea calității și creșterea fiabilității pompelor elicoidale utilizate în exploatarea zăcămintelor de țiței vâscos și cu un grad ridicat de impurități mecanice.

Contribuția lucrării, prin volumul, varietatea și calitatea abordărilor desfășurate în activitățile de cercetare științifică a fost posibilă prin îndrumarea și susținerea pe care am primit-o din partea personalului didactic al Departamentului de Inginerie Mecanică.

Îmi exprim recunoștința profundă pentru Domnul Prof. dr. ing. Vlad Ulmanu, coordonatorul meu, pentru expertiza, sfatul, disponibilitatea și înțelegerea pe care le-am primit pe parcursul tezei, și regret mult că nu a fost posibil să finalizez această lucrare mai devreme. Va fi mereu pentru mine un reper de înaltă valoare morală și profesională.

Cu aleasă considerație și profund respect mulțumesc Domnului Prof. dr. ing. Antonescu Nicolae Napoleon pentru că a acceptat să fie Conducător de Doctorat și să mă susțină în finalizarea tezei, cu multă expertiză, înțelegere, blândețe și încurajare.

Îi mulțumesc Domnului Profesor Razvan George Râpeanu și, de asemenea, Domnului Profesor Ioan Tudor pentru primirea în cadrul Laboratorului de Tribologie-Fiabilitate și pentru disponibilitatea de a consilia și urmări activitatea de cercetare științifică pe care am desfășurat-o în cadrul laboratorului. De asemenea, mulțumesc Doamnei Maria Șelaru, care m-a ajutat la realizarea numeroaselor experimente și măsurători.

Mulțumesc echipei Laboratorului de Sudare: Conf. dr. ing. Bădicioiu Marius, Conf. dr. ing. Călțaru Mihaela, Domnului tehnician Bărbulescu Ion, și, în special Domnului tehnician Georgescu Alexandru pentru sprijinul pe care mi l-au acordat pe parcursul realizării experimentelor științifice.

Mulțumesc pentru ajutor și încurajare Domnului Prof. dr. ing. Zecheru Gheorghe, Domnului Dr. ing. Drăghici Gheorghe, Domnului Sef lucr. dr. ing. Diniță Alin și Domnului ing. Neagoe Vasile.

Pe parcursul desfășurării cercetărilor experimentale am primit ajutor de specialitate din partea Domnului Prof. dr. ing. Onuțu Ion și a Domnului tehnician Stan Nicolae Razvan din cadrul Departamentului Ingineria Prelucrării Petrolului și Protecția Mediului precum și a Domnului Prof.dr.ing. Constantin Nicolescu din Departamentul Forajul Sondelor, Extracția și Transportul hidrocarburilor (FETH).

Cercetările științifice experimentale au fost posibile și prin înțelegerea și ajutorul Domnului ing. Dan Olaru, administrator al S.C. AXON S.R.L, fabricant al statoarelor pompelor elicoidale, care mi-a oferit materialul utilizat la realizarea probelor din elastomer și a echipei de conducere a S.N.P PETROM S.A. pentru permisiunea de a utiliza date reale din exploatare în scopul comparării cu datele obținute în laborator, și de asemenea, de a utiliza în cadrul experimentelor patru tipuri de țiteiuri din sondele în exploatare care utilizează pompe elicoidale, și nisip din sondă.

Cu multă recunoștința mulțumesc Domnului Rector Prof. Dr. ing. Coloja Mihai pentru încrederea și sprijinul acordat pe parcursul lucrării. De asemenea pentru îndrumarea și sfaturile pertinente, doresc să mulțumesc Doamnei Anca Popescu.

Sunt recunoscătoare Domnului Decan, Conf. dr. ing. Popa Ioan, pentru onoarea de prezida Comisia de susținere a tezei, și de asemenea Domnului Prof. Dr. ing. Iatan Radu, Universitatea Politehnica București și Domnului Prof. Dr. ing. Petrescu Florin, Universitatea Tehnică de Construcții București, pentru că au acceptat să fie raportorii muncii mele. De asemenea, doresc să mulțumesc și să-mi exprim recunoștința față de Domnul Prof. univ. dr. ing. Pupăzescu Alexandru, pentru că a acceptat să facă parte din Comisia de evaluare, pentru încredere, ajutor și înțelegere.

Această pluridisciplinaritate a fost necesară datorită complexității tematicii abordate. Pentru mine toată perioada lucrărilor a fost extrem de importantă, întrucât mi-a permis să-mi dezvolt cunoștințele științifice și m-a făcut să reflectez asupra necesității colaborării științifice și a confruntărilor de idei, care reprezintă întodeaun a un spirit constructiv.

Drd. ing. Nușa Sandu Mițașcă

# CUPRINS

	Nr. pagină	
	Rezumat	Teză
LISTA SIMBOLURILOR _____	iii	iii
REZUMAT _____	v	v
ABSTRACT _____	vii	vii
INTRODUCERE _____	ix	ix
CAPITOLUL 1 _____	1	1
STADIUL ACTUAL AL CONSTRUCȚIEI ȘI EXPLOATĂRII POMPELOR ELICOIDALE _____	1	1
CAPITOLUL 2 _____	3	8
GEOMETRIA ȘI CINEMATICA POMPELOR ELICOIDALE _____	3	8
CAPITOLUL 3 _____	6	20
PARAMETRII GEOMETRICI CONSTRUCTIVI CARE INFLUENȚEAZĂ PIERDERILE DE FLUID, UZURA CUPLEI ROTOR-STATOR ȘI DIMINUAREA PERFORMANȚELOR POMPELOR _____	6	20
CAPITOLUL 4 _____	9	29
STAREA DE TENSIUNI DIN CUPLA ROTOR STATOR-EVALUAREA PRESIUNII DE CONTACT DINTRE STATORUL ȘI ROTORUL POMPELOR ELICOIDALE FOLOSIND METODA ELEMENTELOR FINITE (MEF) _____	9	29

CAPITOLUL 5_____	13	38
CERCETĂRI ALE ELASTOMERILOR CUPLEI DE FRECARÉ_____	13	38
5.1. Analiza elastomerilor utilizați la fabricarea statoarelor pompelor elicoidale__	13	38
5.2. Forme de deteriorare a cuplei rotor – stator_____	17	48
CAPITOLUL 6_____	19	54
CERCETĂRI EXPERIMENTALE _____	19	54
6. 1. Cercetări privind durificarea rotorului prin procedeul de pulverizare cu flacără de viteză mare – HVOF_____	19	54
6. 2. Cercetări tribologice privind comportarea cuplei de frecare rolă în diferite variante de durificare superficială - sabot elastomer_____	23	81
6. 3. Cercetări tribologice privind comportarea cuplei de frecare inel – pastile elastomeri pe testerul Baroid_____	29	102
CAPITOLUL 7_____	41	122
CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII ȘI PERSPECTIVE_____	41	122
BIBLIOGRAFIE_____	48	129

## LISTA SIMBOLURILOR

### Alfabetul Latin

$A$	Aria cavității pompei.
$A_p$	Adâncimea de așchiere.
$E$	Excentricitatea.
$d_r$	Diametrul minim al rotorului.
$D_r$	Diametrul maxim al rotorului.
$d_s$	Diametrul minim stator.
$D_s$	Diametrul maxim stator.
$D_t$	Diametrul exterior al statorului.
$E$	Modulul de elasticitate longitudinală.
$f$	Coeficient de frecare.
$F$	Forța de tracțiune.
$F_i$	Forța de inerție.
$F_{hr}$	Forța hidraulică radială.
$F_1$	Forța rezultantă dintre forța inerție și forța hidraulică radială.
$F_n$	Forța de normală totală pe linia de contact pe lungimea unui pas al rotorului.
$i$	Raport cinematic al mecanismului pompei.
$n$	Turația pompei.
$Q$	Debitul pompei.
$P_s$	Pasul statorului.
$P_r$	Pasul rotorului.
$r$	Raza proeminenței lobului suprafeței elicoidale a rotorului.
$P_E$	Pasul elicei.
$p_k$	Căderea de presiune în pompă.
$p_r$	Presiunea de refulare.
$p_a$	Presiunea de aspirație.
$R_a$	Media aritmetică a tuturor valorilor măsurate pe profil.



$RS_m$	Lățimea medie a elementelor profilului (media aritmetică a valorilor elementelor de rugozitate din lungimea de evaluare).
$R_t$	Înălțimea maximă a neregularităților a profilului.
$R_z$	Înălțimea maximă a profilului (valoarea medie a celor cinci valori ale $R_z$ ).
$R_{z1max}$	Înălțimea maximă a profilului (cea mai mare valoare a $R_z$ din cele 5 valori de eșantionare).
$tg \delta$	Frecarea internă a cauciucului.
$v_T$	Viteză tangențială.
$v_E$	Viteză tangențială la elice.
$v_A$	Viteză de translație.
$v_{aș}$	Viteză a mișcării de așchiere.
$v_{av}$	Viteză a mișcării de avans.
$V$	Volumul de lucru.
$W$	Forța de apăsare.
$Z$	Axa secțiunii statorului.
$z_1$	Numărul de lobi ai statorului.
$z_2$	Numărul de lobi ai rotorului.

### Alfabetul Grec

$\beta$	Unghiul de înclinare al tangentei la elice în raport cu generatoarea cilindrului.
$\omega_0$	Viteza unghiulară a axei rotorului în raport cu axa statorului.
$\eta_v$	Eficiență volumetrică.
$\sim$	Coeficientul lui Poisson.
$\Psi$	Pasul unghiular al lobului elicei.
$\lambda$	Distanța dintre asperități.
$\rho$	Raza proeminenței lobului suprafeței elicoidale a statorului.
$\varphi$	Unghiul de rotație în raport cu axa secțiunii statorului.
$\tau$	Timpu de relaxare (în procesul de adeziune/ruptură a legăturilor cuplului de materiale elastomer-solid).

## REZUMAT

Abordarea lucrării „Cercetări privind creșterea durabilității pompelor elicoidale pentru extracția țițeiurilor vâscoase și cu impurități mecanice” a plecat de la dorința de a mări performanța pompelor elicoidale prin aprofundarea cunoașterii elementelor active ale suprafețelor de frecare ale cuplei rotor – stator (a interacțiunii acestora în mișcarea relativă între ele, a interacțiunii acestora cu fluidul din sondă) și a cauzelor care conduc la uzura lor.

Pompele elicoidale sunt utilizate în industria petrolieră pentru extracția țițeiurilor grele cu o concentrație mare de nisip. Flancurile rotorului șurub și statorului din elastomer sunt uzate în mod drastic, ca urmare a frecării de alunecare în fluidul abraziv.

Pentru a îmbunătăți performanța pompelor, rotorul este fabricat din oțel aliat de înaltă rezistență, cu acoperiri rezistente la abraziune, cromare dură, precum și prin nitrurare, borurare și pulverizare termică pe bază de carbură de wolfram și pulberi ceramice.

Statorul este realizat dintr-un elastomer turnat în interiorul corpului unui tub metalic. Fabricanții elaborează diferite tipuri de elastomeri în funcție de compoziția și agresivitatea fluidului pompat.

Pentru o aplicație industrială, selectarea celui mai bun cuplu de materiale rezistente la uzură abrazivă se bazează de obicei pe teste de uzură abrazivă.

Testele de uzură abrazivă au fost efectuate prin utilizarea unui Tribometru Amsler și a unui Tester Baroid, utilizate pe scară largă ca metode standard pentru evaluarea comportamentului la uzură a diferitelor cuple de materiale.

Această lucrare, analizează rezistența la uzură abrazivă a două straturi durificate, unul tradițional prin placare cu crom și celălalt prin acoperire cu carbură de wolfram, cu trei tipuri de elastomeri. Procedura de pulverizare termică este propusă ca o modalitate de a îmbunătăți rezistența la uzură a rotoarelor, și de a fi utilizată și pentru recondiționarea rotoarelor.

Cercetarea a arătat că acoperirea cu carbură de wolfram conduce la o îmbunătățire a rezistenței la abraziune, comparativ cu cromarea dură, pentru toate cele trei tipuri de elastomeri testați.

Aceste acoperiri pe bază de carbură de wolfram realizate prin utilizarea procedurii de pulverizare cu flacără cu viteză mare (HVOF), au confirmat avantajele utilizării tehnologiei, și se consideră că poate fi folosită pentru încărcarea rotoarelor.

Problema contactului dintre rotor și stator și determinarea deformațiilor și tensiunilor în zona de contact, au constituit un alt obiectiv major al tezei. Randamentul pompei elicoidale depinde în foarte mare măsură de natura ajustajului stator-rotor, care, pe parcursul funcționării își schimbă starea ca urmare a uzurii, în principal a statorului. Un ajustaj cu strângere mare va conduce la un consum crescut de energie pentru funcționarea pompei și în același timp la o uzare mai rapidă a elementelor în contact, respectiv rotorul și statorul pompei elicoidale. Un ajustaj cu joc va conduce la un randament volumetric scăzut al pompei datorită alunecărilor de fluid dintre rotorul și statorul pompei elicoidale.

S-a considerat necesară determinarea exactă a presiunii de contact între rotorul și statorul pompelor elicoidale pe de o parte pentru a determina natura ajustajului care să conducă la un randament volumetric ridicat și la un consum energetic scăzut, iar pe de altă parte pentru evaluarea vitezei de uzură a statorului, respectiv rotorului.

Lucrarea are un caracter multidisciplinar având în vedere că pe lângă mecanica solidelor și mecanica fluidelor, cu aspectul particular al interacțiunii fluid - structură, sunt implicate și alte domenii ale științelor: fizico – chimia suprafețelor, chimia moleculară, fizica zăcămintelor de petrol și gaze.

***Cuvinte cheie:** pompe elicoidale, pulverizare termică HVOF, elastomeri, presiune de contact, uzare.*

## ABSTRACT

The thesis "Research on increasing the durability of helical pumps for the extraction of viscous crude oils and mechanical impurities" has originated in the desire to enhance the performance of the helical pumps by improving the knowledge of the active elements of the friction surfaces of the rotor-stator couple (their interaction in the relative motion between each other, their interaction with the fluid from the probe) as well as the causes leading to their wear.

The progressive cavity pumps are used in artificial lift in petroleum industry to lift heavy oil with large concentrations of sand. The teeth of the screw rotor and of the elastomer stator are drastically worn as a result of the sliding friction in the abrasive fluid.

To improve the performance of the pump, the rotor is made of high strength hardfaced steel with abrasive resistant coatings, usually chrome plating, but also to a lower extent nitriding, boronizing and thermal spraying with WC-based and ceramic powder.

The stator is made of a molded elastomer inside a metal tube body. To comply with the pumped fluid composition and its aggressivity, the companies elaborate different types of elastomer.

The main purpose of this thesis is to highlight the favourable tribology effects on the helical pumps and their characteristic elements: the friction surface, the topology of the surface, the effective contact area and the tribology effects on the third body, the fluid and its components, as well as on the rotor-stator friction couple surfaces material.

The best abrasive wear resistant couple of materials selection for an industrial application is usually based on abrasive wear tests.

The abrasive wear tests were carried out by using an Amsler tribometer, and a Baroid Lubricity Tester widely used as a standard method for evaluating the wear behaviour of different couple of materials.

This study deals with the influence of two hardfaced coatings, one, traditional chrome plating and one WC-based coating, combined with three types of elastomers on abrasive wear resistance. The WC- thermal spraying procedure is proposed as a way to improve the wear resistance of pump rotors and, at the same time, as a technology to be used for reconditioning of rotors.

The research showed that WC coating led to an improvement of the erosion resistance compared to chrome plating, for all three types of tested elastomers.

The issue of the contact between rotor and stator and the determination of strains and stresses in the contact area, have constituted another major objective of the thesis. The efficiency on the progressive cavity pump depends in a great extend on the nature of fit stator-rotor, which change its state during operation due to wear, the mainly in the stator. A great tight fit will lead to increased energy consumption for the pump operation, and at the same time to a faster wear in contact elements, respectively rotor and stator of the helical pump. A sliding fit will lead to a low volumetric efficiency of the pump due to leakages between the rotor and the stator of the helical pump.

It was deemed necessary to determine the exact contact pressure between the rotor and the stator helical pumps on one hand to determine the nature tight fit leading to the high volumetric efficiency and low energy consumption, and secondly to assess speed of wear of the stator respectively rotor.

This thesis has a multi-disciplinary character, considering that, in addition to the solids mechanics and fluid mechanics, with the particular aspect of the fluid-structure interaction, it involves many other science fields: Physical-Chemistry of surfaces, Molecular Chemistry, Physics of Oil and Gas deposits.

***Keywords:*** *Helical Pumps, HVOF Thermal Spray; Elastomer, Contact Pressure, Wear.*

## INTRODUCERE

Pompele elicoidale sunt utilizate în sistemele de extracția artificială în industria de petrol pentru a extrage țiței cu concentrații mari de nisip. Pompa se compune dintr-un rotor elicoidal rotativ din oțel și un stator elicoidal din elastomer. Flancurile rotorului șurub și statorului din elastomer sunt uzate în mod drastic, ca urmare a frecării de alunecare în fluidul abraziv.

Pentru a îmbunătăți performanța pompelor, rotorul este fabricat din oțel aliat de înaltă rezistență durificat cu acoperiri rezistente la abraziune, placări, de obicei, crom, dar, de asemenea, într-o măsură mai mică nitrurare, borurare și pulverizare termică cu pulberi ceramice pe bază de carbură de wolfram.

Statorul este realizat dintr-un elastomer turnat în interiorul unui corp metalic. Pentru a respecta compatibilitatea elastomerului cu agresivitatea și compoziția fluidului pompat, companiile elaborează diferite tipuri de elastomeri. Munca de cercetare a elastomerilor întreprinsă fie într-o manieră științifică, fie empiric a făcut să crească considerabil performanțele acestora. Astfel, reducerea uzurii, reprezintă un scop important atât din punct de vedere economic cât și ecologic.

În prezent, mecanismele responsabile de uzura elastomerilor nu sunt întotdeauna cunoscute cu precizie în configurațiile simple ale solicitării. În ce privește uzura elastomerilor statoarelor pompelor elicoidale, aceste mecanisme sunt și mai dificil de înțeles, din cauza naturii extrem de complexe a contactului rotor – stator, condițiile tribologice rămânând parțial cunoscute.

Lucrarea și-a propus ca pe această cale să pună în lumină efectele tribologice favorabile pompelor elicoidale, respectiv a elementelor definitorii ale acestora: suprafața de frecare, topologia suprafeței, aria reală de contact și, efectele tribologice asupra celui de-al treilea corp, a fluidului și a componentelor sale, precum și a materialului suprafețelor cuplei de frecare rotor – stator.

În primele capitole s-au prezentat stadiul actual al construcției și exploatării pompelor elicoidale, geometria și cinematica mecanismului elicoidal, parametrii geometrici constructivi care influențează diminuarea performanțelor pompelor. În capitolul 4 s-a evaluat presiunea de contact dintre statorul și rotorul pompelor elicoidale folosind Metoda Elementelor Finite (MEF). În capitolul 5 s-a realizat o sinteză privind fenomenele de frecare-uzare ale elastomerilor folosiți la fabricarea statoarelor pompelor elicoidale, incluzând aspectele legate de frecare și uzură precum și analiza principalelor forme de deteriorare și tipurilor de defecte.

Abordarea acestei lucrări a plecat de la dorința de a mări performanța pompelor elicoidale prin aprofundarea cunoașterii elementelor active ale suprafețelor de frecare ale cuplei rotor – stator (a interacțiunii acestora în mișcarea relativă între ele, a interacțiunii acestora cu fluidul din sondă) și a cauzele care conduc la uzarea lor.

Obiectivul principal al acestei lucrări a fost de a investiga și compara comportamentul tribologic al cuplului de materiale rotor-stator în două variante rotor: epruvete încărcate prin pulverizare cu flacără cu mare viteză (HVOF) și epruvete cromate dur și epruvete realizate din trei tipuri de elastomeri utilizați în fabricarea statoarelor pompelor elicoidale: butadien acrilonitrilic, NBR; butadien acrilonitrilic hidrogenat, HNBR și butadien acrilonitrilic carboxilat, XNBR.

Pentru atingerea acestor obiective, partea experimentală a acestei lucrări s-a împărțit în următoarele faze, cu următoarele rezultate:

- Cercetari experimentale privind durificarea rotorului prin depunerea unui strat rezistent de carbură de wolfram, folosind procedeul de pulverizare cu flacără de viteză mare (HVOF).
- Cercetărilor tribologice experimentale efectuate pentru studierea comportării la frecare și uzare a cuplelor de frecare formate din rolele din oțel de rotor încărcate prin metoda HVOF și sabot executat din elastomeri utilizați la fabricarea statorului pompei specifice mașinii de încercat tip AMSLER.
- Cercetări experimentale efectuate în scopul de a investiga comportarea tribologică a stratului durificat de carbură de wolfram, deșus prin HVOF comparativ cu un strat cromat dur, pentru elementul rotor al cuplei, precum și pentru a verifica compatibilitatea elastomerilor cu tipurile de țitei din sonde, comportamentul cuplei la temperatură și uzura abrazivă, prin utilizarea Testerului Baroid.

Rezultatele cercetărilor efectuate privind caracteristicile metalurgice, caracteristicile de prelucrabilitate și caracteristicile tribologice ale stratului deșus au confirmat aplicabilitatea tehnologiei de durificare prin încărcare cu carbură de wolfram prin procedeul de pulverizare cu flacără cu viteză mare a subansamblului rotor al pompelor elicoidale destinate industriei extractive de petrol. Rezultatele comportării cuplului de materiale oțel –elastomer, în condițiile experimentale de temperatură și uzura abrazivă având ca mediu de lucru țiteiurile reprezentative din sonde, pot fi folosite ca recomandări privind alegerea celei mai bune cuple rotor-stator.

# CAPITOLUL 1

## STADIUL ACTUAL AL CONSTRUCȚIEI ȘI EXPLOATĂRII POMPELOR ELICOIDALE

Scopul acestui capitol este de a prezenta pe scurt stadiul actual al construcției și exploatării pompelor elicoidale utilizate în industria de petrol, care reprezintă punctul central al acestei lucrări.

Pompa elicoidală este o construcție volumetrică folosită în sistemele artificiale de extracție, care a câștigat o atenție deosebită, în principal, datorită capacității sale de a pompa fluide cu vâscozitate mare [3, 6, 7, 12, 15]. Elementele principale ale pompei sunt: un rotor metalic care are rolul de a transforma energia mecanică în energia fluidului deplasat și un stator format dintr-un elastomer turnat într-o carcasă metalică. Pentru sondele cu țigăi grele, care utilizează tehnologii ca: SAGD - Steam Gravity Assisted Drainage, Steam Flood, CSS – Cyclic Steam Simulation, la temperaturi peste 200°C se folosesc statoare metalice [36, 37, 38, 39].

Acționarea pompei se face fie printr-un sistem tehnic de suprafață montat pe capul de pompare al sondei, fie printr-un sistem electric submersibil în sondele deviate și orizontale. Sistemul de acționare de suprafață reprezintă ansamblul format din: reductor de turație, mecanism de transmitere a mișcării și arborele de antrenare. Întregul sistem de acționare poate fi pus în funcțiune fie de un motor electric, fie de un motor cu combustie internă, în cazul zonelor neelectrificate [24, 36, 37, 38, 39]. În ultimii ani, au fost utilizate motoarele sincrone cu magneți permanenți. Firma PCM Vulcain [38], utilizează un reductor cuplat cu un motor magnetic, care permite varierea turației printr-un convertizor de frecvență, cu recuperarea energiei pentru a preveni momentul de rotație inversă.

Pentru sondele deviate și cele orizontale pentru a elimina uzura mecanică dintre prăjinile de pompare și tubing, Firma Baker Hughes încă din anii 1990, a furnizat tehnologia ESPCP, care combină avantajele utilizării pompelor elicoidale cu siguranța în funcționare a motoarelor electrosubmersibile. Echipamentul de adâncime constă din: motor electrosubmersibil cu poli magnetici, protector, reductor, racord flexibil, pompă de admisie și pompa elicoidală.

Selectarea configurației sistemului adecvat de pompaj necesită o analiză amănunțită a condițiilor sondei, a condițiilor impuse de zăcămint, a capacității instalației și a costurilor aferente. Consumul de energie electrică este de multe ori componenta de cost cu ponderea cea mai mare în costul total de producție a petrolului și gazelor naturale [24, 36, 37, 38, 39]. Astfel, indicatorul de bază pentru aprecierea eficacității tehnologice și economice a unei instalații de pompare este consumul specific de energie, raportat la tona de țigăi extras. Acest indicator depinde de un număr mare de factori: adâncimea de pompare, pierderile mecanice și hidraulice din pompă, forțele de frecare (între



garnitura de prăjini și tubing, frecare fluidă în spațiul inelar), randamentul mecanic al echipamentelor de suprafață. Sistemul de pompaj cu pompe cu cavități progresive are mai multe caracteristici care îl fac avantajos (datorită investiției inițiale reduse și a unui consum mic de energie) față de alte metode de extracție artificială, dar cea mai importantă este eficiența mecanică mare a pompelor elicoidale comparativ cu cea a pompelor clasice cu piston, sau a pompelor multietajate submersibile tip REDA [3, 6, 7, 36, 37, 38, 39].

Principalii constructori de pompe elicoidale sunt firmele: Kudu, PCM, Baker Hughes, Netzsch, Robbins & Myers, Weatherford, etc. Fiecare fabricant a dezvoltat propria sa linie de fabricație urmărind în diferitele variante constructive următoarele cerințe: geometria, debitul și presiunea, clasele de elastomeri, durificarea rotorului. În general se fabrică pompe cu raport cinematic 1:2, excepție sunt firmele Baker Hughes, Netzsch, Robbins & Myers, PCM care fabrică și pompe cu raport cinematic 2:3. În Rusia [3], societatea de echipamente petroliere VNIIBT au dezvoltat o serie de pompe cu rapoarte cinematice de la 2:3 la 5:6 pentru debite de la 1-100m<sup>3</sup>/zi și presiuni de 15 MPa. PCM Oil & Gas[38] fabrică pompe cu dimensiuni de la 2 3/8 in până la 6 5/8 in, cu debite până la 950 m<sup>3</sup>/zi, adâncimi maxime de 2200 m, temperaturi până la 120° C, pentru fluide cu greutatea specifică de la 1,28 până la 0,8 kg/dm<sup>3</sup>.

Pentru a îmbunătăți performanța pompelor, rotorul este fabricat din oțel aliat de înaltă rezistență durificat cu acoperiri rezistente la abraziune, cromare dură, precum și, nitrurare, borurare și pulverizare termică pe bază de carbură de wolfram și pulberi ceramice [36, 37, 38, 39].

Firma Kudu [36] folosește o tehnologie proprie de durificare a rotoarelor care și-a dovedit eficiența pentru extracția țițeiurilor ușoare, medii și grele. În comparație cu rotoarele cromate care au o durată de viață între 740 și 950 de zile, această durificare prelungește durata de viață a rotorului la mai mult de 1200 de zile, în condițiile unei eficiențe de 83%.

Statorul este realizat dintr-un elastomer turnat în interiorul corpului unui tub metalic. Numeroase studii au avut ca scop găsirea materialului elastomeric care să satisfacă simultan condițiile de etanșitate și tribologice specifice diferitelor condiții de zăcământ din sondele de petrol și gaze. În prezent pe piața mondială se produce o gamă largă de elastomeri, dar pentru astfel de aplicații, majoritatea producătorilor folosesc elastomeri butadieni acrilonitrilici (NBR) și variante ale acestora [14, 29, 30]. Structura lor este complexă, deși au la bază aceeași copolimeri: butadiena și acrilonitrilul obținuți prin polimerizare.

În concluzie se poate spune că îmbunătățirea eficienței sistemelor de pompare cu pompe elicoidale este unul dintre obiectivele principale industriale, în special în activitățile extractive din industria de petrol. Aceasta a stimulat cercetarea, dezvoltarea și fabricarea unui număr mare de dimensiuni, cu o gamă largă de debite de la 0,5 până la 1000 m<sup>3</sup>/zi și presiuni până la 30 MPa.

Pompele elicoidale au durată de viață destul de lungă, acest lucru este determinat de următorii factori:

- Tipul particular de frecare în cupla rotor – stator, caracterizat prin combinația rulării și alunecării.
- Construcția cuplei rotor – stator cu stator elastic.
- Schimbarea continuă a poziției liniei de contact a organelor de lucru în spațiu: drept rezultat adaosurile mecanice care se află în fluidul pompat capătă posibilitatea de a se impregna în învelisul elastic al statorului, și apoi de a fi scoase afară cu fluxul de fluid din cupla rotor – stator. Acest lucru este posibil datorită particularității cinematicii de lucru a cuplei rotor – stator.
- Un alt aspect, este acela al continuității fluxului de fluid extras, furnizând un debit constant, ceea ce nu se întâmplă în cazul utilizării pompelor de adâncime acționate cu balansier, unde fluidul este adus la suprafață numai la cursa ascendentă.
- Nu are în componență elemente care se pot înfunda sau bloca cu gaze.

Factorii decisivi în alegerea tipului de pompă pentru anumite condiții din sondă sunt fiabilitatea și durabilitatea cuplei de frecare rotor – stator. Condiția pentru o durată mare de viață a pompei este asigurarea unui regim de frecare fluid în cupla rotor - stator. Acest lucru este influențat de parametrii geometrici ai rotorului, ai suprafețelor statorului, de interferența sau ajustajul dintre rotor și stator, de turația rotorului, de caracteristicilor fluidului pompat și de alegerea materialelor cuplei de frecare rotor - stator.

## CAPITOLUL 2

### GEOMETRIA ȘI CINEMATICA POMPELOR ELICOIDALE

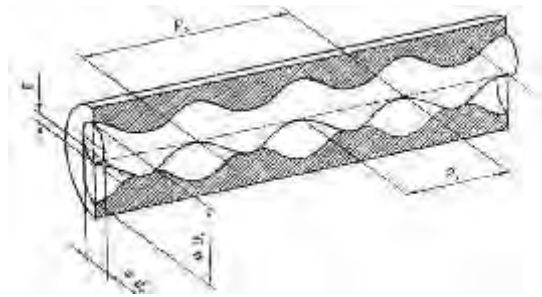
Particularitățile specifice ale pompelor elicoidale constau în principiul de funcționare și în construcția organelor de lucru.

După principiul de funcționare, aceste pompe fac parte din categoria pompelor volumetrice, conform teoriei generale ale mașinilor hidraulice de rotație. Elementele principale ale pompelor elicoidale sunt următoarele: statorul și rotorul (fig.2.1).

Din punct de vedere a cinematicii, organele de lucru se transformă în mecanisme dințate cu angrenare interioară: există un singur element rotativ - rotorul, care execută mișcarea planetară. Rotorul nu este concentric cu statorul. De aceea, mișcarea rotorului în interiorul statorului este o combinație de două mișcări:

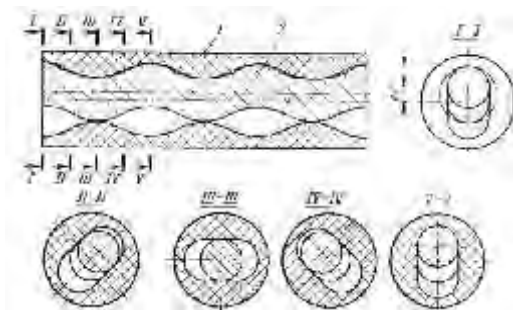
- o rotație în jurul propriei axe, într-un singur sens, și
- o rotație în sens opus axei sale, în jurul axei statorului.

În fiecare secțiune transversală cinematica organelor de lucru este descrisă de două circumferințe inițiale: una din ele (legată de rotor) se rotește în interiorul celeilalte (fixă, legată de stator) fără alunecare, cu viteză unghiulară constantă [3, 7, 12, 15]. Pentru contactul neîntrerupt al cuplei rotor - stator, pentru distribuirea automată a volumului de lucru este necesară asigurarea condițiilor rulajului circumferințelor inițiale, și a profilurilor corespunzătoare ale suprafețelor elicoidale.



**Fig.2.1.** Elementele geometrice ale pompei [35]

Figura 2.2 ilustrează poziția rotorului în raport cu statorul, în timpul unei rotații complete a rotorului, pentru diferite poziții unghiulare ale rotorului din 45 în 45°.



**Fig. 2.2.** Poziția relativă a rotorului în stator, la momentele  $\theta = 0^\circ$  și  $\theta = 45^\circ$  [3]

Pentru crearea în cuplul rotor - stator a volumului de lucru este necesară și suficientă satisfacerea a două condiții:

- numărul de lobi ai statorului,  $z_1$  trebuie să fie cu o unitate mai mare decât numărul de lobi ai rotorului,  $z_2$ .

$$z_1 = z_2 + 1 \quad (2.1)$$

- raportul dintre pașii statorului,  $P_s$  și ai rotorului,  $P_r$  trebuie să fie proporțional cu raportul numărului de lobi.

$$P_s/P_r = z_1/z_2 \quad (2.2)$$

Geometria ansamblului permite să se realizeze o serie de cavități separate. În orice secțiune transversală există  $z_1$  camere de fluid separate reciproc prin liniile de contact. Fiecare din aceste cavități în procesul de lucru al pompei intră în contact periodic cu zonele de presiune joasă sau ridicată. Aria acestor cavități este:

$$A = 4 \cdot E \cdot d_r \quad (2.3)$$

Aria cavităților este constantă, viteza de rotație a pompei este constantă, și drept rezultat fluxul de fluid pompat are un caracter uniform, continuu. Aceasta este una dintre particularitățile importante ale pompelor elicoidale, care le diferențiază de celelalte tipuri de pompe.

Volumul de lucru este dat de aria cavității pe lungimea unui pas al statorului:

$$V = A \cdot P_s = 4 \cdot E \cdot d_r \cdot P_s \quad (2.4)$$

Debitul este direct proporțional cu volumul de fluid și turația rotorului;

$$Q = V n = 4 \cdot E \cdot d_r \cdot P_s \cdot n \quad (2.5)$$

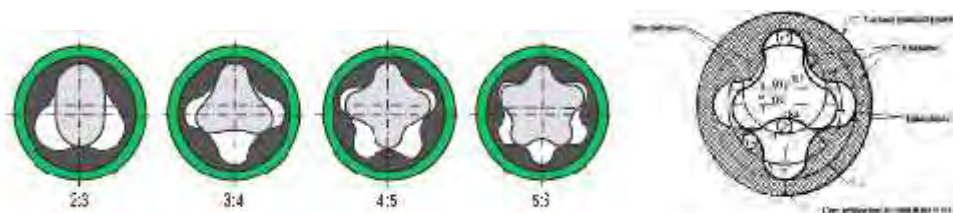
#### Geometrii ale pompelor elicoidale

Există geometrii distincte ale pompelor elicoidale, acestea sunt date de relațiile directe dintre numărul de lobi ai statorului și rotorului. Raportul dintre numărul de lobi ai suprafețelor elicoidale ale rotorului și statorului se numește raport cinematic al mecanismului:

$$i = z_2/z_1 \quad (2.6)$$

Teoretic se pot construi pompe cu oricare raport cinematic, în practică (fig. 2.3), însă se pot grupa astfel:

- Pompe cu un singur lob, al căror raport cinematic este:  $i = 1:2$ ;
- Pompe multilob, cu diferite rapoarte cinematice:  $i = 2:3$ ;  $i = 3:4$  etc.



**Figura 2.3.** Secțiuni transversale ale pompelor elicoidale multilob [3, 17]

## CAPITOLUL 3

### PARAMETRII GEOMETRICI CONSTRUCTIVI CARE INFLUENȚEAZĂ PIERDERILE DE FLUID, UZURA CUPLEI ROTOR – STATOR ȘI DIMINUAREA PERFORMANȚELOR POMPELOR

Pentru prelungi durata de viață a pompei se impune atât cunoașterea din punct de vedere constructiv a pompei, dar și a tuturor fenomenelor care au loc în timpul funcționării. Astfel, se sistematizează următoarele variabile ale pompei elicoidale:

*Variabile de intrare:* temperatura, presiunea și compoziția fluidului, turația pompei, valoarea presiunii de contact dintre rotor și stator.

*Variabile de stare:* materialele cuplei de frecare rotor – stator, geometria suprafețelor de etanșare, starea suprafețelor în contact.

*Variabile de ieșire:* eficiența etanșării cuplei rotor-stator.

Din analiza soluțiilor constructive practicate în fabricarea pompelor elicoidale pe plan mondial [3, 6, 7, 12, 15, 17, 36, 37, 28, 39] a rezultat importanța următoarelor variabile geometrice: diametrul mediu al rotorului, excentricitatea, interferența și pasul statorului. Caracteristicile pompei pot fi definite de: diametrul mediu al rotorului,  $d_m$ , de raportul diametrul mediu al rotorului/excentricitate,  $(d_m/E)$  și de raportul pasul statorului/ excentricitate,  $(P_s/E)$ .

*Diametrul mediu al rotorului* este parametrul care influențează în principal numărul de interferențe, sau strângerea între rotor și stator. Pentru o analiză exactă a relațiilor dintre parametrii geometrici și durata de viață a cuplei rotor - stator se iau în considerare două aspecte. În primul rând se ține cont de temperatura de operare a pompei, care poate cauza expansiunea termică a elastomerului, ce conduce la reducerea *diametrului* interior al statorului. De aceea, rotorul se dimensionează în concordanță cu această reducere pentru a asigura stângerea cea mai potrivită [3]. Un alt aspect este acela al diferenței de grosime a elastomerului (în special pentru pompele cu raport cinematic  $i = 1:2$ ), ce conduce în timpul funcționării pompei, la o încălzire diferențiată a statorului, la o disipare neuniformă a căldurii acumulate și în final la deteriorarea elastomerului. Pentru a elimina degradarea elastomerului s-au dezvoltat pompele cu rapoarte cinematice cu  $z_2 > 2$ , la care variațiile grosimii elastomerului sunt mai mici. Grosimea elastomerului trebuie să fie suficient de mare pentru a asigura amortizarea și reducerea efortului produs de mișcarea rotorului în stator în timpul funcționării. Totuși, dacă grosimea elastomerului este prea mare, nu se asigură etanșarea, rezultând performanțe slabe datorate pierderilor de debit [3, 7, 15].

Alegerea raportului cinematic, a lungimii pompei și a diametrului se face funcție de presiunea diferențială din cavitățile pompei, precum și de randamentul volumetric, de etanșeitatea cuplei rotor – stator, de proprietățile fizice ale fluidului pompat, precum și de turația rotorului.

#### *Influența raportului cinematic*

Raportul cinematic  $i = z_2/z_1$  reprezintă parametrul distinctiv care determină în mare măsură caracteristicile pompei. Performanțele funcționale ale pompelor elicoidale sunt influențate de mecanismul care stă la baza construcției cuplei rotor- stator, care spre deosebire de alte mecanisme, acesta combină caracteristicile mașinilor hidraulice și pe cele ale unui reductor planetar, unde raportul de transmitere este proporțional cu numărul de lobi ai rotorului [3]. Acest lucru are o importanță deosebit de mare pentru parametrii pompei elicoidale. Astfel, unul dintre avantajele unei pompe cu rotor cu secțiune circulară ( $z_2 = 1$ ), este acela că tensiunile de contact în cupla rotor – stator sunt minime datorită curburii optime a suprafeței rotorului. Principalul dezavantaj al pompelor cu raport cinematic  $i = 1:2$ , este că pentru a furniza o presiune ridicată este necesară fabricarea cuplei rotor – stator de lungime mare. Pompele multilob ( $z_2 > 2$ ) prezintă o multitudine de avantaje, date de particularitatea mecanismului planetar, astfel:

- Debitul pompei este mai mare decât al pompelor cu raport cinematic  $i = 1:2$ , deoarece în relația debitului intervine și numărul de lobi ai rotorului;
- Prezintă mai multe linii de contact, efectul fiind menținerea unei presiuni diferențiale constante în cavitățile pompei și de-a lungul lungimii liniei de angrenare; de asemenea, are capacitatea de a menține presiunea ridicată la viteze mici fără a mări lungimea pompei;
- Furnizează presiune mai mare la aceeași lungime a cuplei rotor – stator și aceeași etanșeitate cu a unei pompe cu Raport cinematic  $i = 1:2$ .

#### *Influența ajustajului*

Elementele de lucru ale pompelor elicoidale sunt cuple de frecare “oțel –elastomer”. Pentru obținerea regimului de frecare fluidă sau semi-fluidă, în procesul de lucru al pompelor între rotor și stator există o diferență dimensională (strângere). Cercetările făcute în domeniul pompelor și motoarelor elicoidale au analizat această problemă [3, 7, 15, 33]. Astfel s-a determinat că forțele care acționează în cupla rotor – stator sunt date de momentul de rotație și forța rezultantă care trece prin polul de angrenare a circumferințelor inițiale.

Pompele elicoidale utilizate la extracția țigăiurilor au o interferență mare a liniilor de contact. La pomparea țigăiurilor cu conținut ridicat de particule mecanice în cupla rotor –stator au loc pierderi volumetrice ale fluidului din cavitățile de lucru. Durata de viață a pompelor, este în funcție de mișcarea relativă dintre rotor și stator și de frecarea dintre fluid și cavitățile pompei.

Una din posibilitățile de reducere a efectului abraziv al particulelor solide atât asupra rotorului cât și a statorului pompei, constă în reducerea vitezei de deplasare a particulelor solide, fără a afecta debitul pompei. În acest sens sunt importanți următorii parametri: aria de curgere, volumul cavităților, viteza medie a fluidului, viteza maximă a particulelor și viteza maximă de frecare. *Viteza de frecare* este o sumă sau diferență a două componente: viteza de rotație (care este constantă) și o viteză transversală care este variabilă. *Viteza maximă de frecare* nu este constantă, în timp ce rotorul se rotește în jurul axei sale viteza este maximă, iar când gravitează în diferite puncte de-a lungul axei statorului, este minimă. *Viteza periferică de frecare* este distanța liniară din jurul circumferinței ecluzelor statorului împărțite la timpul în care rotorul face o rotație și este redusă la zero, la extreme. *Viteza maximă de deplasare a particulelor* este un criteriu important ce influențează deplasarea fluidului vâcos și caracteristicile cavităților. Viteza de deplasare a particulelor solide prezente în fluidul pompat este un parametru care influențează uzura elementelor active ale pompei. Reducerea acestui efect poate fi realizată atât prin menținerea unei valori minime a vitezei de deplasare a fluidului, prin alegerea parametrilor geometrici optimi ai pompei de adâncime, cât și printr-o alegere corespunzătoare a pompei în funcție de condițiile de exploatare [3, 7, 15, 36, 37, 38, 39].

*Presiunea diferențială din pompă.* Eficiența volumetrică a pompei tinde să scadă pe măsură ce crește presiunea diferențială în cavitățile pompei. Această scădere se datorează pierderilor de debit prin liniile de etanșare rotor/stator la trecerea din zona de presiune mare către zone de presiune scăzută. Eficiența volumetrică depinde, în egală măsură de: capacitatea de elevație a pompei (presiunea maximă pe numărul de trepte), vâscozitatea fluidului; interferența dintre rotor și stator.

S-a observat faptul că randamentul pompei crește odată cu presiunea diferențială din pompă, iar eficiența volumetrică scade, ca funcție a aceluiași parametru, la o turație constantă a rotorului pompei. În schimb, eficiența volumetrică a pompei crește când viteza de rotație a rotorului pompei crește, randamentul rămânând același. La o anumită presiune diferențială, pierderea de debit și eficiența volumetrică sunt de dependente de interferență dintre rotor și stator. Pierderile de debit accelerează fenomenul de uzură datorită deplasării, cu viteză mare a lichidului și a particulelor solide prin spațiul dintre rotor și stator de-a lungul liniilor de etanșare [3, 7, 15, 36].

*Influența numărului de trepte ale pompei asupra eficienței volumetrice.* Cu creșterea numărului de trepte, pierderile volumetrice se reduc și eficiența pompei crește proporțional.

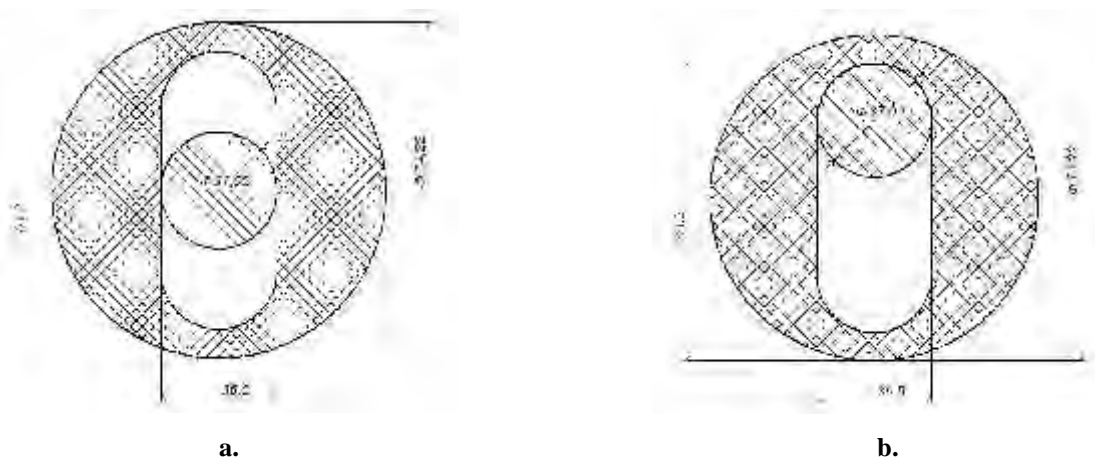
*Vâscozitatea fluidelor influențează proporțional eficiența volumetrică.* Inițial valoare eficienței volumetrice este mai mică, deoarece în cazul pomparii unor fluide vâscoase apare și procesul de adeziune a componentelor fluidului vâcos la suprafețele rotorului și statorului. Cu toate acestea, influența vâscozității asupra eficienței, rămâne constantă la presiuni mai mari ale fluidelor vâscoase.

## CAPITOLUL 4

### STAREA DE TENSIUNI DIN CUPLA ROTOR STATOR-EVALUAREA PRESIUNII DE CONTACT DINTRE STATORUL ȘI ROTORUL POMPELOR ELICOIDALE FOLOSIND METODA ELEMENTELOR FINITE (MEF)

O influență majoră asupra duratei de funcționare în parametrii de proiectare ai pompelor elicoidale o are uzura statorului. Gradul și viteza de uzură a statorului pompelor elicoidale depinde de presiunea de contact ce se realizează între stator și rotor ca urmare a diferenței dimensionale (strângerii) dintre acestea. De interes practic este studiul tensiunilor mecanice în suprafețele de etanșare ale statorului la diferite presiuni și parametrii geometrici ai pompei. [3, 8] Rezolvarea analitică a problemei implică numeroase dificultăți, din punct de vedere al modelării, și din punct de vedere al aparatului matematic utilizat [8]. O posibilitate de evaluare a acestora o reprezintă utilizarea metodei elementelor finite (MEF). În cazul pompei elicoidale s-a recurs la modelarea unui contact de tip rigid-flexibil. În vederea simplificării problemei, cu consecințe favorabile în convergența soluției, s-a considerat un model plan al contactului între statorul și rotorul pompei elicoidale, pentru două poziții relative ale acestora prezentate în fig. 4.1. Din această cauză, elementele finite utilizate au fost:

- pentru realizarea modelului fizic al statorului și al rotorului pompei elicoidale s-a utilizat, din biblioteca de elemente finite a programului ANSYS, elementul finit PLANE183;
- pentru contactul dintre cele două elemente ale pompei elicoidale s-au utilizat elementele TARGE169 și CONTA172.



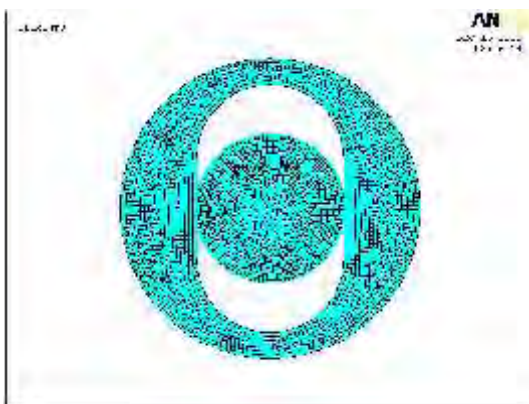
**Fig. 4.1.** Geometria și dimensiunile rotorului și statorului pompei elicoidale pentru cele două poziții relative analizate



După realizarea modelului geometric s-au atribuit caracteristicile mecanice pentru cele două materiale ale statorului, respectiv rotorului pompei elicoidale. Astfel, pentru stator s-au utilizat următoarele valori:  $E_s = 4,9$  MPa pentru modulul de elasticitate longitudinală și  $\mu_s = 0,3919$  pentru coeficientul lui Poisson. Pentru rotor valorile  $E_R = 2,05 \cdot 10^5$  MPa și  $\mu_R = 0,3$  caracteristice oțelului.

După discretizarea structurii, prezentată în Fig. 4.2 s-a realizat modelarea contactului pentru cele două poziții relative ale rotorului și statorului pompei elicoidale prezentate în Fig. 4.1.

Cele două contacte, cu elementele finite respective, sunt prezentate în Fig. 4.2.

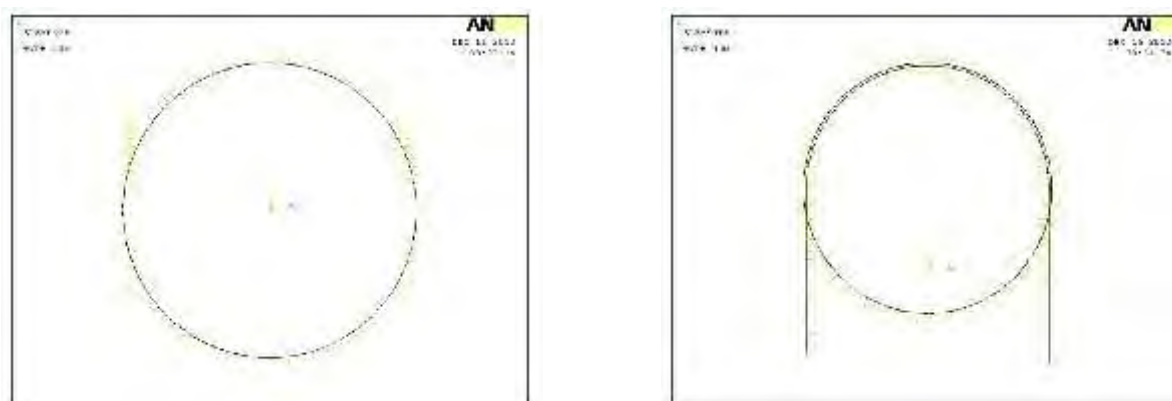


**Fig. 4.2.** Rețeaua de elemente finite PLANE183 pentru modelul considerat

În ceea ce privește constrângerile de natură geometrică (legăturile) considerate s-au blocat deplasările tuturor nodurilor de pe periferia statorului și, de asemenea s-a considerat că rotorul este fix în poziția dată.

Încărcarea (solicitarea) modelului provine numai din diferența dimensională între diametrul rotorului și lățimea canalului statorului, respectiv a strângerii între aceste două elemente ale pompei elicoidale [8, 25, 33].

Modelarea contactului între statorul și rotorul pompei elicoidale cu elementele TARGE169 și CONTA172 se arată în Fig. 4.3.

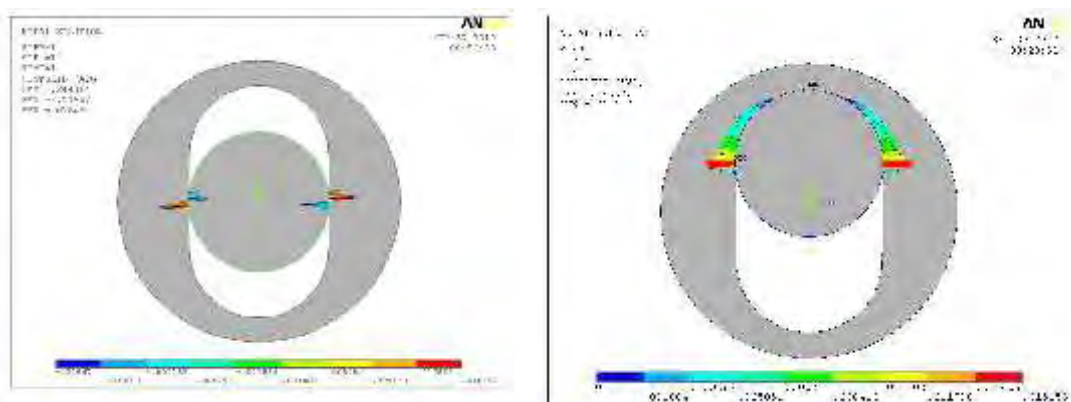


**Fig. 4.3.** Elementele TARGE169 și CONTA172 prin care s-a modelat contactul între statorul și rotorul pompei elicoidale.

Aceste două modele s-au rezolvat pentru mai multe situații și anume:

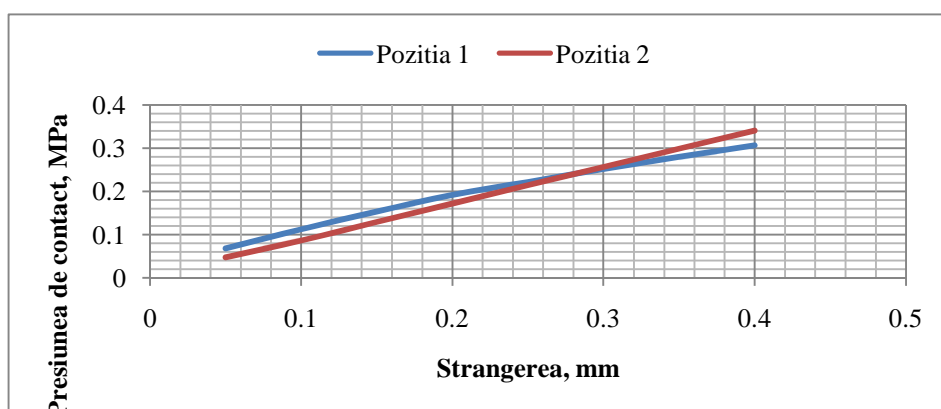
- diferite strângeri;
- anumită strângere și mai multe valori ale modului de elasticitate  $E_s$  al materialului statorului pompei elicoidale;
- anumită strângere și mai multe valori ale coeficientului  $\mu_s$  al materialului statorului pompei elicoidale;
- anumită strângere și mai multe valori ale coeficientului de frecare dintre materialul statorului și materialul rotorului pompei elicoidale.

În urma rulărilor programul furnizează următoarele rezultate: presiunea de contact (fig. 4.4.), tensiunile de contact datorate frecării, tensiunile totale de contact etc.

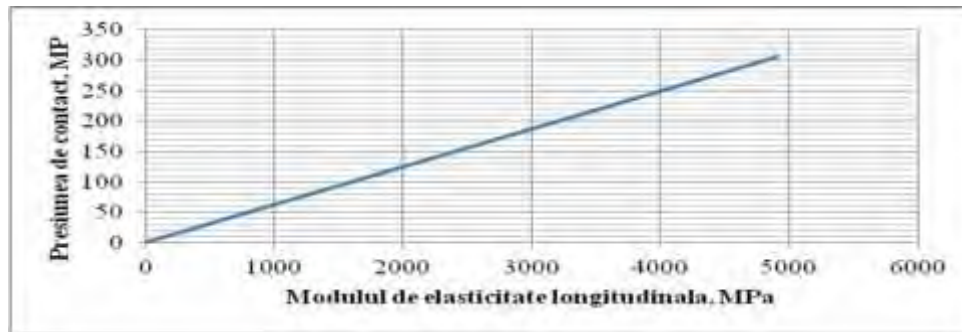


**Fig. 4.4.** Distribuția presiunii de contact între rotorul și statorul pompei elicoidale

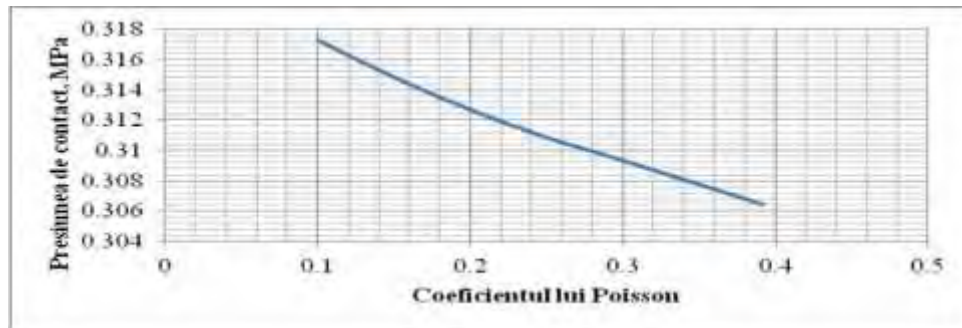
Pe baza rezultatelor obținute s-au trasat graficele din Fig.ile 4.5 – 4.8.



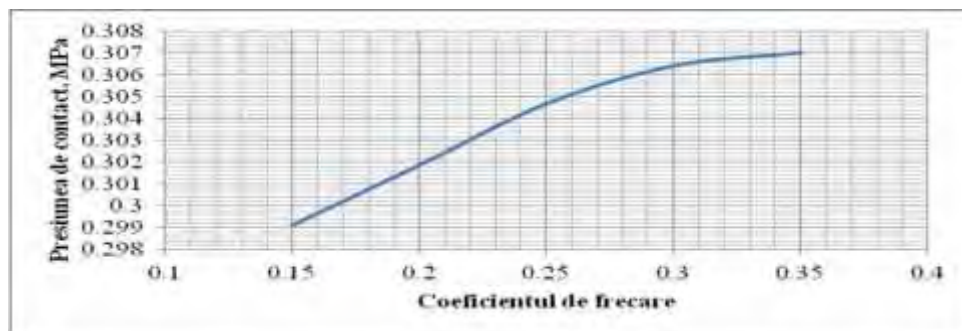
**Fig. 4.5.** Variația presiunii de contact în funcție de valoarea strângerii pentru poziția 1 (fig.4.1, a) respectiv poziția 2 (fig. 4.1, b) a rotorului pompei elicoidale.



**Fig. 4.6.** Variația presiunii de contact în funcție de valoarea modului de elasticitate longitudinală  $E_s$  al materialului satorului pompei elicoidale pentru o valoarea a jocului 0,4 mm și  $\mu_s = 0,3919$ .



**Fig. 4.7.** Variația presiunii de contact în funcție de valoarea coeficientului Poisson al materialului satorului pompei elicoidale pentru o valoarea a jocului de 0,4 mm și  $E_s = 4,9$  MPa a materialului satorului.



**Fig. 4.8.** Variația presiunii de contact în funcție de valoarea coeficientului de frecare dintre materialul rotorului și cel al satorului pompei elicoidale pentru o valoarea a jocului de 0,4 mm și  $E_s = 4,9$  MPa a materialului satorului

În concluzie din analiza rezultatelor au reieșit următoarele:

- Presiunea de contact crește odată cu sporirea strângerii. Acest fapt asigură o eficiență bună pentru pompa elicoidală, însă conduce la mărirea consumului de energie necesară acționării pompei ca urmare a creșterii frecărilor;
- Presiunea de contact crește rapid cu mărirea valorii modului de elasticitate longitudinală al materialului satorului pompei  $E_s$  (fig.4.1, b) și se diminuează odată cu sporirea coeficientului Poisson al materialului satorului  $\mu_s$  (fig.4.1, a). Pentru realizarea unei eficiențe ridicate este necesar să se realizeze un optim între  $E_s$  și  $\mu_s$ ;

- Presiunea de contact crește odată cu valoarea coeficientului de frecare dintre stator și rotor. Este deci necesar să se determine ce influență are asupra vitezei de uzare coeficientul de frecare dintre materialul statorului și cel al rotorului.

Din cele prezentate reiese necesitatea determinării exacte a presiunii de contact între rotorul și statorul pompelor elicoidale pentru a determina natura ajustajului care să conducă la o eficiență ridicată și la un consum energetic scăzut și pentru a evalua viteza de uzare a cuplei rotor-stator.

## CAPITOLUL 5

### CERCETĂRI ALE ELASTOMERILOR CUPLEI DE FRECARĂ

#### 5.1 ANALIZA ELASTOMERILOR UTILIZAȚI LA FABRICAREA STATORULUI POMPELOR ELICOIDALE

Elastomerul butadienă acrilonitrilic (NBR) este în prezent considerat materialul adecvat pentru realizarea statoarelor pompelor elicoidale. Matricea elastomerului cuprinde copolimerii de butadienă și de acrilonitril. Aceștia sunt obținuți prin copolimerizare în emulsie, în prezența radicalilor liberi. Proprietățile lor sunt determinate de natura chimică și de structura lanțurilor macromoleculare. Structura este complexă, monomerii sunt distribuiți statistic în copolimer, dar pe lângă această polimerizare liniară sau de legare a monomerilor de partea stabilă formată din butadienă (cis, trans), de formă 1,4, prezintă și legături de tipul 1, 2, care determină reacții vinilice numai cu una din cele două legături duble, cealaltă grupă vinilică rămânând intactă. Grupările vinilice libere au o puternică polaritate (azotul dezvoltă un potențial mare pentru legăturile cu hidrogenul), pot polimeriza formând lanțuri laterale. Distribuția monomerilor în copolimerul butadienacrilonitrilic, depinde foarte mult de proporțiile monomerilor și de temperatură [29]. Cele mai multe tipuri au un conținut de 18-48% acrilonitril, iar cele mai utilizate sunt cele cu 26-40% acrilonitril [29, 36, 37, 38, 39]. Variația conținutului în cei doi monomeri ai copolimerului influențează o parte din proprietățile mecanice ale acestuia, precum: rezistența la tracțiune, sfâșiere și abraziune și termostabilitatea. Alte proprietăți importante sunt afectate puternic de raportul celor doi monomeri în copolimer. Creșterea conținutului de acrilonitril scade capacitatea de dizolvare în hidrocarburi, uleiuri minerale, uleiuri vegetale, în timp ce solubilitatea crește în solvenți puternic polari (acetona, metanolul, clorura de metilen). La creștere conținutului de acrilonitril scade elasticitatea și rezistența la temperaturi joase și crește deformare remanentă.

### *Proprietățile mecanice ale elastomerilor*

Elastomerul butadien acrilonitrilic prezintă interes datorită compozițiilor șarjate, cu negru de fum, șarje albe, sau diferite rășini care-i conferă proprietăți mecanice superioare. În cazul șarjării cu rășini rezistența la tracțiune este mai redusă datorită polarității ridicate. De asemenea, rezistența la inițierea fisurilor este mai mică decât cea a cauciucului natural, chiar și în cazul utilizării șarjelor active. Duritatea este dată de șarjarea și utilizarea unor cantități corespunzătoare de sulf [30, 34, 36].

#### *Prezentarea viscoelasticității*

Elastomerii au particularitatea de a prezenta simultan două comportamente mecanice:

- un comportament elastic specific stării solide caracterizat prin modul de elasticitate de natură entropică, și
- un comportament vâscos, caracteristic stării fluide, care se manifestă printr-o întârziere a răspunsului și o pierdere de energie la fiecare ciclu de deformație.

În cazul solicitării unui elastomer, nu se atinge instantaneu starea de echilibru termodinamic, există o întârziere între timpul în care a fost aplicată forța și apariția efectului [29, 30, 34, 36].

Această întârziere se caracterizează prin trei factori:

- Variația în timp a deformării în urma efortului aplicat, realizat cu o forță constantă;
- Variația în timp a forței necesare pentru a menține o deformare constantă, cunoscut ca fenomen sau timp de relaxare a forței;
- Diferența de fază între efort și deformare, când un material vâscoelastic este supus la o oscilație sinusoidală.

#### *Elasticitatea cauciucului*

Studiile făcute privind elasticitatea elastomerilor au avut mai multe ipoteze. Analizând comportarea la lungire și revenire a cauciucului a rezultat că are loc o variație a energiei libere a sistemului. Important în teoria elasticității cauciucului este flexibilitatea lanțului lung molecular. Prin vulcanizare se realizează legături transversale între lanțurile rețelei, ceea ce împiedică curgerea materialului [29, 30, 34].

### **FRECAREA ELASTOMERILOR.**

#### **Abordarea fizică a frecării**

Frecarea elastomerilor diferă în multe privințe de frecarea altor solide. Acest lucru poate fi explicat prin modulul de elasticitate foarte scăzut și frecarea internă ( $tg \delta$ ) ridicată pe o gamă largă de frecvențe. Se admite că frecarea este o proprietate intrinsecă a materialului [29, 30, 34].

#### **Aria de contact și fenomene specifice.**

Prin observarea zonei de contact dintre un elastomer și un transparent (o sferă de sticlă), au fost observate unele fenomene specifice frecării elastomerilor: undele Schallamach, faldurile de lipire

[29, 30]. O nouă abordare a studiului tribologiei a arătat că zona de contact dintre o sferă rigidă static și suprafața unui elastomer a fost mai mare decât cea dedusă din legile mecanicii clasice ale contactului elastic stabilite de Hertz. Acest efect rezultă din participarea forțelor de atracție moleculară adesea de tip Van der Waals pentru elastomeri, și, astfel, contactul este menținut printr-o sarcină aparentă mai mare decât sarcina aplicată [16, 29, 30, 31].

În timpul studiului de stabilire a frecării, s-a demonstrat că, sub acțiunea unei forțe tangențiale progresive, zona de contact devine mai mică și pierde simetria sa circulară [29]. În același timp, micro-alunecări apar în dreptul contactului frontal. Odată ce forța tangențială depășește o valoare critică, micro-alunecări invadează întreaga suprafață de contact și începe frecarea totală.

Prin studierea comportamentului tribologic al elastomerilor s-a constatat că la viteza zero, coeficientul de frecare poate lua o valoare finită [16, 29, 30, 34].

### **Studiul mecanismelor de frecare, relația cu vâscoelasticitatea**

Studiile în domeniu au pus în evidență existența a două componente principale în acest tip de frecare: componenta de aderență și componenta de histerezis sau de deformație [16, 29, 30, 34].

Componenta de aderență pune în evidență forfecarea legăturilor provenite din forțele intermoleculare între suprafețe și este semnificativă în cazul suprafețelor foarte netede ale corpului cu care vine în contact elastomerul; A doua componentă provine din trecerea repetată a asperităților suprafeței rigide ruгоase pe suprafața elastomerului foarte netedă și au loc pierderi de histerezis prin deformare ciclică [9, 16].

### **B. UZAREA ELASTOMERILOR**

Uzarea elastomerilor este un fenomen complex care pune în joc o combinație de procese mecanice, mecanochemice și termochimice [1, 2, 5, 12, 14, 16, 29, 30, 31]. În urma testelor de frecare și uzare ale elastomerilor, s-au identificat patru tipuri principale de efecte: striurile, ridurile, ruloarele și craterile. Din aceste fenomene elementare rezultă cinci moduri principale de uzură, care sunt în general combinate:

- **uzura adezivă:** această uzura este datorată forțelor de atracție existente între atomii de la suprafața solidelor. Uzura adezivă se caracterizează printr-o puternică rată de uzură și un coeficient de frecare instabil. Particulele de uzură sunt mici și adesea transferate pe un alt solid aflat în contact;
- **uzura abrazivă:** Puternicile concentrări de tensiuni inițiază fisuri, care au drept consecință desprinderea de resturi de material. Prejudiciul suportat de către suprafață se prezintă sub formă de striuri paralele în direcția de alunecare.

- **uzura corozivă (tribocoroziunea)** ea este produsă de atacul chimic al suprafeței de către mediul înconjurător, uzura prin oboseală: sub efectul solicitărilor variabile apare oboseala straturilor superficiale.
- **uzura prin degradare mecano – chimică.** Combinațiile tensiunilor mecanice aplicate pe suprafețe în prezența oxigenului provoacă o degradare rapidă sau o protecție a suprafețelor.

Potrivit amplasării, se disting:

- **uzura interfacială**- o puternică disipare de energie de frecare rămâne localizată într-o zonă superficială, de grosime mică, unde este constatată o importantă creștere de temperatură. Uzura de coroziune și de abraziune corespunde acestei clase;
- **uzura coezivă:** este vorba despre un mecanism controlat de către proprietățile volumice ale materialului. Disiparea energiei de frecare și prejudiciile legate de marile volume adiacente la interfață, prin urmare dimensiunile zonei de contact sunt ample. Uzurile prin abraziune și prin oboseală, induc tensiuni la tracțiune, sunt incluse în această categorie [5].

### **Influența diverșilor parametri asupra uzurii**

În literatură sunt prezentate numeroase experiențe care vizează identificarea parametrilor care influențează pierderea de masă [2,5, 29, 30].

#### ***Parametrii materialelor - Proprietățile mecanice- efectul temperaturii***

Proprietățile vâscoelastice ale elastomerilor depind de frecvența și de temperatura solicitării. Studiile au arătat că raportul dintre volumul de material îndepărtat și lucrul mecanic disipat prin frecare-a urmat variațiilor inverse ale factorului de frecare și că uzura prezintă același caracter vâscoelastic.

#### ***Adaosul de agenți de umplere în amestec pentru consolidarea matricei***

Adaosul de agenți de umplere consolidanți într-un elastomer are efecte care nu sunt de neglijat asupra proprietăților mecanice ale amestecului. S-a studiat, de asemenea rolul agenților de consolidare în uzura de abraziune. S-a ajuns la concluzia că există o rată critică de consolidare, de la care rata de uzură crește considerabil. Pentru rate scăzute de consolidare, se regăsește efectul benefic al consolidării [29, 34].

#### ***Condițiile experimentale***

**Sarcina aplicată.** S-a studiat influența sarcinii aplicate asupra uzurii diferiților elastomeri și s-a găsit o relație între volumul pierdut,  $V$  (pe unitatea de suprafață de contact, pe unitatea distanței de alunecare) în funcție de presiune, de formula elastomerului și de natura suprafeței.

**Compoziția atmosferei.** Prezența oxigenului crește rata de uzură și coeficientul de frecare, prin crearea unui strat suplu de elastomer oxidat [34].

*Ungerea.* Funcția principală a lubrifiantului este de a diminua viteza de abraziune, facilitând alunecarea între cele două suprafețe. De asemenea, permite sistemului să se răcească prin absorbția căldurii, servește la protecția contra oxidării, și permite evacuarea particulelor de uzură create.

*Uzura cu cel de-al treilea corp exterior (cu sau fără lubrifiere).* În studiile de uzură între un elastomer și un material rigid, este cel mai adesea uzura între două corpuri. Totuși, uzura la această interfață poate apărea ca rezultat al intervenției particulelor, care pot fi resturi ale suprafeței metalice sau elastomerului, sau provenind din surse exterioare (particule mecanice).

## **5.2. FORME DE DETERIORARE A CUPLEI ROTOR –STATOR**

Elementele principale de care depinde etanșeitarea și buna funcționare a unui pompe cu cavități progresive sunt rotorul și statorul. Deoarece subansamblurile rotor și stator lucrează în condiții grele (în medii puternic abrazive și corozive), apar procese de uzare a suprafețelor de lucru, care duc la pierderea etanșeității și scoaterea prematură din uz a pompei [6, 12]. Se prezintă formele de deteriorare ale cuplei rotor –stator, stator din elastomer, rotor din aliaj special durificat prin cromare.

### **A. FORME DE DETERIORARE ALE ROTOARELOR POMPELOR ELICOIDALE**

**Uzarea de abraziune.** Uzura abrazivă se formează la interfața cuplei rotor-stator, în prezența fluidului și a conținutului de particule abrazive. Formele de uzare abrazivă sunt funcție și de rugozitățile celor două suprafețe aflate în contact și de variabilele «celui de-al treilea corp», respectiv: dimensiunile, formele (unghiulare, rotunjite) și mișcarea particulelor abrazive.

**Atacul acid.** Atacul acid afectează stratul de crom, dar nu atacă materialul de bază. Această uzură are loc de obicei în partea de sus a rotorului, în zona care se află în afara statorului [ 12, 36].

**Fisurarea (crăparea) suprafeței cromate.** Cromul cu care este placat rotorul prezintă fisuri, concentrate pe diametrul mare (vârful epicycloidei), cu unele crăpături extinse către baza danturii elicoidale. Aceste fisuri în materialul de bază al rotorului sunt rezultatul: frecării la interfața de contact între rotor și stator, a presiunii diferențiale ridicate din pompă [ 12, 33].

### **B. FORME DE DETERIORARE ALE STATOARELOR POMPELOR ELICOIDALE**

**Uzura abrazivă.** Mișcarea forțată a solidelor abrazive de-a lungul cavitățile statorului, se caracterizează prin prezența unor suprafețe aspre, uzate, de obicei de-a lungul diametrului minim. Influența majoră asupra uzurii abrazive este legată de mărimea, forma, duritatea și cantitatea particulelor solide conținute în fluidul produs. Tipul elastomerului, are de asemenea un rol important, astfel statoarele fabricate din elastomeri cu un conținut mai scăzut de ACN, se rup mai greu, ele sunt susceptibile la deformare. Cercetările efectuate [12, 29] arată că uzura prin abraziune este rezultatul dintre o fisurare mecanică locală și o degradare generală mecano-chimică (aparitia fenomenului de oxidare a elastomerului, concomitent cu sollicitările mecanice mari).



**Fenomenul de histerezis.** Elastomerul statorului este supus temperaturii sondei și compoziției fluidului, care provoacă umflarea elastomerului și creșterea ulterioară a interferenței între rotor și stator. La rotirea rotorului în interiorul statorului acesta din urmă este supus unei deformări ciclice (solicitare-deformare), unde o parte din energie este recuperată elastic, iar pierderea acesteia este stocată sub formă de căldură. Interacțiunea moleculară în lobii statorului și conductivitatea termică scăzută au ca rezultat creșterea temperaturii în interiorul elastomerului. Acest proces dinamic de stocare a energiei este numit histerezis [9, 12, 15]. Printre cele mai importante variabile care influențează manifestarea efectului de histerezis sunt:

- Interferența între rotor și stator (ajustajul) determină mărimea deformării;
- Turația rotorului stabilește frecvența deformării;
- Diferența de presiune din pompă determină comprimarea lobilor statorului;
- Debitul de fluid și procentul apă controlează disiparea căldurii.

Ciclul se repetă până când cauciucul se desprinde și se rupe.

**Desprinderile masive ale materialului elastomerului.** Acest tip de avarie se caracterizează [12, 36, 37, 38, 39] printr-o suprafață întărită, lucioasă și de formă neregulată a materialului elastomerului în zona de desprindere. Acesta este produs și de strângerea excesivă între stator și rotor. Se generează căldură, care nu este disipată (elastomerul nu este bun conducător de căldură), la care se adaugă căldura generată de frecare. Repetarea acestui ciclu duce la desprinderea și ruperea elastomerului.

**Incompatibilitatea dintre elastomer și fluidul pompat** determină gradul de umflare al elastomerului, care ulterior, este susceptibil la deteriorarea proprietăților mecanice. Semnele de deteriorare includ umflarea, înmuiere sau blisterele apărute pe suprafața elastomerului statorului. Țițeiurile ușoare conțin aproape întotdeauna aromatice. Acțiunea solvenților aromatici (benzen, toluen, xilen) conținuți în țițeiurile cu greutate specifică mai mare de 30 °API, este agresivă și crește cu cât temperatura este mai mare (presiunea de vapori este mare și evaporarea se face cu ușurință).

Toți elastomerii sunt permeabili la gaze. Elastomerii NBR care au conținutul ridicat grupărilor ACN au permeabilitatea mică, în schimb elastomerii HNBR și FPM au o permeabilitate ridicată, dar rezistență mică la CO<sub>2</sub>. În unele zone concentrația ridicată de CO<sub>2</sub> în fluidul produs poate provoca decompresia explozivă a elastomerului statorului. Producătorii au dezvoltat rețete speciale de elastomeri pentru a atenua daunele cauzate de decompresia explozivă [36]. În cele mai multe operații (cazul opririlor), la scăderea presiunii, gazele ies din soluție și se manifestă ca gaze libere. În funcție de proprietățile fluidului și de volumul de gaz, gazul liber poate să curgă ca o fază separată, sau, ca în cazul multor puțuri petroliere grele, ar putea rămâne prins ca bule discrete în faza lichidă (țitei spumos). Gazul care intră în pompa determină o scădere evidentă a eficienței

pompei deoarece gazul care ocupă o porțiune a cavităților pompei, nu se însumează în calculele volumului de fluid. Pompa trebuie să comprime gazul până când fie devine din nou gaz în soluție sau până va ajunge la presiunea necesară de refulare a pompei.

Acțiunea hidrogenului sulfurat  $H_2S$  se manifestă prin atacul legăturilor triple de ACN și al legăturilor duble de butadienă. Efectul este acela că legăturile tetravalente restrâng rezistența elastomerului, conducând la fragilizare și la rupere.

## CAPITOLUL 6

### CERCETĂRI EXPERIMENTALE

#### 6.1. CERCETĂRI PRIVIND DURIFICAREA ROTORULUI PRIN PULVERIZARE CU FLACĂRĂ CU VITEZĂ MARE (HVOF)

În cadrul acestei etape a cercetărilor s-a experimentat posibilitatea durificării rotorului prin procedeul de pulverizare cu flacără cu mare viteză (HVOF) cu carbură de wolfram, cunoscând cerințele de calitate impuse suprafețelor subansamblului rotor.

Operația de încărcare a pieselor prin pulverizare cu flacără cu viteză mare (HVOF), a fost realizată cu ajutorul pistolului de pulverizare tip 2700DJH, deplasat controlat de către robotul industrial FANUC M-16iB/20 (Fig. 6.1) pe suprafața probelor supuse încărcării. Energia termică și cinetică a flăcării a fost produsă prin arderea amestecurilor de gaz combustibil și oxigen. Gazul folosit drept combustibil în timpul procesului de ardere a fost propilena. Sistemul este prevăzut cu o unitate de alimentare a pulberii, care furnizează pistolului pulberea necesară, la un debit precis, prin intermediul unui gaz transportor (azot).



**Fig. 6.1.** Procesul de încărcare a probelor tip rolă

#### **Probe utilizate în cercetările experimentale**

Oțelul din care s-au realizat probele tip rolă este 42CrMo04, un aliaj frecvent utilizat în construcția utilajului petrolier, supus unor condiții dure de lucru cum ar fi temperatura înaltă,

coroziunea și medii agresive [17, 21, 22]. Compoziția chimică este și caracteristicile mecanice sunt conform SR EN 10 083/3-2007/AC-2009.

### **Tehnologia încărcării probelor prin pulverizare cu flacără cu viteză mare (HVOF)**

Încărcarea probelor tip rolă prin pulverizare cu flacără cu viteză mare (HVOF) a presupus parcurgerea următoarelor etape tehnologice: pregătirea suprafețelor supuse încărcării, încărcarea prin pulverizare și tratamentul termic final.

#### ***Pregătirea suprafeței***

Operațiile de pregătire ale probelor în vederea încărcării prin pulverizare au constat în: curățirea suprafețelor, sablare prin erodarea cu electrocorindon ( $\varnothing 1,5\text{mm}$ ), folosind mașina de sablat SAPI PR-50. S-a obținut o rugozitate medie a suprafețelor probelor  $R_a=2,53\ \mu\text{m}$ , respectiv  $R_a=4,3\ \mu\text{m}$ .

#### ***Materiale***

Pulberea utilizată în cadrul experimentelor a fost AMDRY 5843, WC10Co4Cr. Morfologia pulberii sinterizată și măcinată permite acoperiri cu o densitate mai mare, comparativ cu cea a pulberilor aglomerate și sinterizate. Rezistența mare la uzare se datorează particulelor de carbură dure care sunt distribuite în matricea metalică [22, 23, 26, 32].

#### ***Încărcarea prin pulverizare***

Pulverizarea HVOF este un proces foarte complex, cu un număr mare de variabile care influențează formarea depunerii și, prin urmare, proprietățile de acoperire [21, 22, 32]. Aceste variabile includ caracteristicile echipamentului (geometria duzei și distanța de pulverizare) și parametrii de proces (gaz combustibil, densitatea fluxului de gaz, și materia primă de pulbere). Imediat după operația de preîncălzire a suprafeței s-a executat depunerea stratului de carbură de wolfram utilizând pulberea AMDRY 5843, . Depunerea stratului de carbură de wolfram s-a realizat cu pistolul de încărcare prin pulverizare HVOF tip 2700DJH, deplasat controlat de către robotul industrial FANUC M-16iB/20. După cinci straturi depuse succesiv, s-a oprit procesul de încărcare al suprafeței timp de 20 secunde pentru a preveni supraîncălzirea probelor. Temperatura suprafeței probelor după cinci straturi depuse succesiv s-a menținut în intervalul de temperatură  $283\dots 385^\circ\text{C}$ . Parametrii operaționali independenți au fost oxigenul, combustibilul, azotul și fluxul de aer.

#### ***Prelucrarea suprafețelor probelor încărcate cu carburi de wolfram***

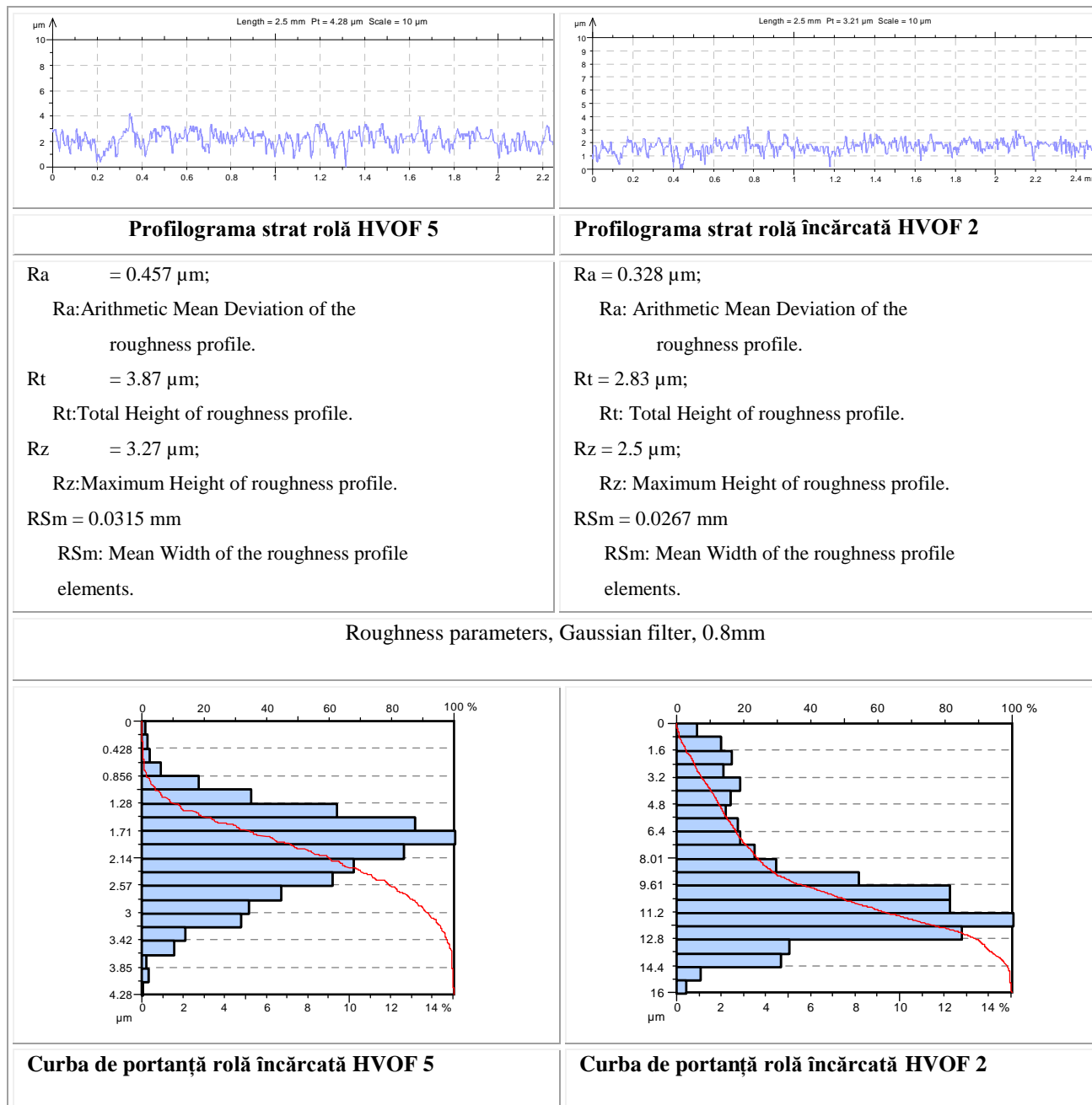
Cercetările experimentale au avut ca scop stabilirea parametrilor regimului de prelucrare prin rectificare cu discuri abrazive ale suprafețelor încărcate cu carburi de wolfram și influența lor asupra calității suprafețelor prelucrate. Prelucrarea probelor prin rectificare s-a efectuat în două operații: una de degroșare și una de finisare pentru a evita degradarea stratului superficial și deformația elastică a piesei [4]. Rectificarea probelor tip rolă s-a făcut pe o mașină de rectificat din cadrul societății Uztel S.A. Evaluarea caracteristicilor de prelucrabilitate ale stratului depus s-a efectuat

prin determinarea rugozității, grosimii și durității stratului prelucrat, precum și prin determinarea eventualelor defecte de suprafață, astfel:

***Determinarea rugozității stratului prelucrat prin rectificare***

Pentru determinarea rugozității suprafețelor prelucrate ale probelor încărcate cu carburi de wolfram s-a utilizat profilometrul de tip SURTRONIC.

Valorile obținute au fost prelucrate cu ajutorul programului TalyProfile Lite 2.1. În urma operațiilor de rectificare realizate pe cele cinci probe tip rolă s-au obținut profilurile suprafețelor prezentate în Fig. 6.2.



**Fig. 6.2.** Profilul suprafețelor și curbele de portanță ale probelor prelucrate prin rectificare

Pentru acuratețea evaluării microstructurii stratului superficial s-au utilizat tehnicile metalografice. În acest sens, s-au pregătit eșantioane de testare din probele tip rolă, urmând etapele procesului (tăiere, montare, șlefuire și lustruire).

Verificarea calității stratului depus s-a început cu analizele macroscopice, care a inclus inspecția vizuală și inspecția cu lichide penetrante.

**Determinarea grosimii stratului prelucrat prin rectificare.** măsurătorile de grosime ale stratului de carbură de wolfram prelucrat prin rectificare au fost efectuate prin analiză metalografică și au evidențiat o grosime de aproximativ 0,20 mm, corespunzând condițiilor tehnice impuse stratului.

**Determinarea defectelor de suprafață.** Pentru determinarea defectelor de suprafață s-a aplicat controlul nedistructiv al pieselor prin defectoscopia cu lichide penetrante. examinarea a arătat că nu apar defecte de suprafață specifice prelucrării prin rectificare (arderea suprafeței, fisuri în stratul prelucrat etc.);

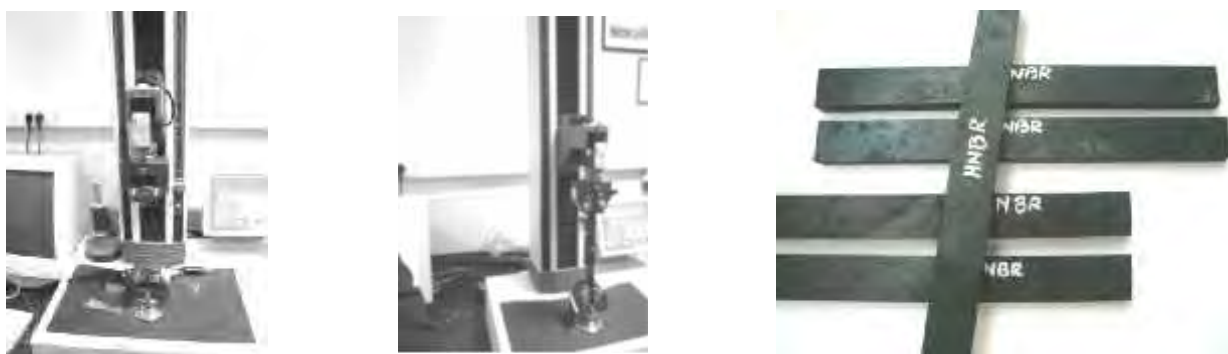
**Determinarea durității suprafețelor.** Măsurătorile de duritate efectuate pe suprafețele probelor cu durimetrul tip EMCO TEST M4C 025G 3M au relevat valori ale durităților situate în intervalul 57...65 HRC îndeplinind astfel condițiile de calitate impuse suprafeței de lucru a rotorului

În cadrul cercetărilor experimentale s-au analizat și trei tipuri de elastomeri utilizați la fabricarea pompelor elicoidale.

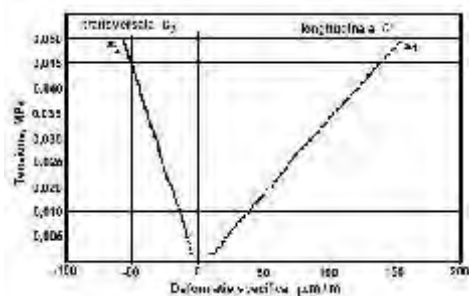
**Încercări pentru caracterizarea elastomerului** utilizat la fabricarea statorului pompei pentru determinarea deformațiilor specifice elastomerului HNBR.

Ca un prim pas pentru analiza comportării elastomerilor a fost necesară determinarea deplasărilor specifice (longitudinale și transversale) și determinarea modulului lui Poisson.

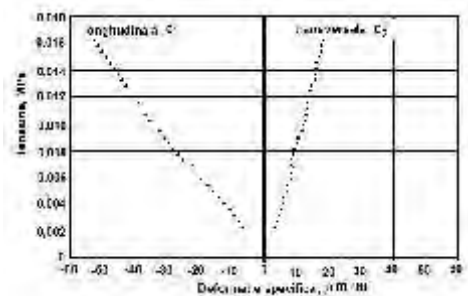
Testările s-au făcut pe mașina AMETEK LLOYD (fig. 6.3), utilizând epruvete din elastomer HNBR, deformațiile specifice determinându-se cu ajutorul unui traductor tensometric XY lipit pe epruvetă ( fig. 6.4- 6.7).



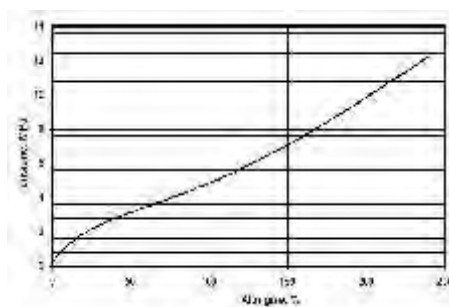
**Fig. 6.3.** Mașina AMETEK LLOYD și epruvete din elastomer HNBR



**Fig. 6.4.** Deformații specifice la tracțiune ale elastomerului HNBR

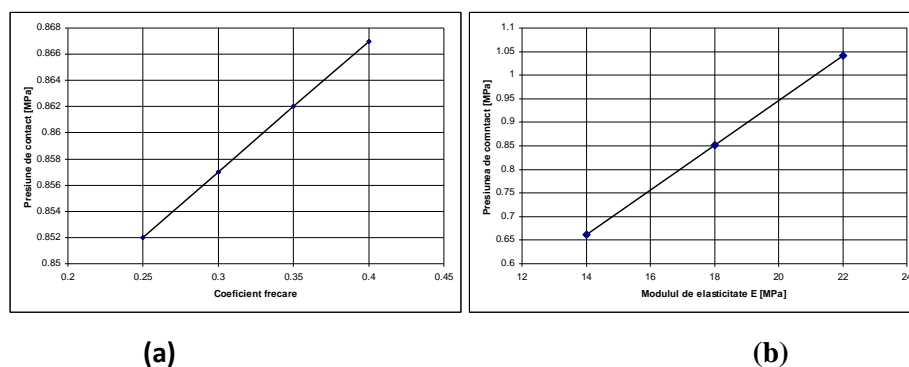


**Fig. 6.5.** Deformații specifice la compresiune ale elastomerului HNBR.



**Fig. 6.6.** Curba tensiune deformație a elastomerului HBNR

Menținerea etanșării pompei este posibilă prin asigurarea presiunii de contact între rotor și stator.



**Fig. 6.7.** Influența coeficientului de frecare (a) și a modului de elasticitate (b) asupra presiunii de contact.

Problema contactului dintre rotor și stator, determinarea deformațiilor și tensiunilor în zona de contact, s-a realizat și prin utilizarea analizei cu element finit, cu ajutorul programului ANSYS.

## 6.2. CERCETĂRI TRIBOLOGICE PRIVIND COMPORTAREA CUPLEI DE FRECARĂ ROLĂ ÎN DIFERITE VARIANTE DE DURIFICARE SUPERFICIALĂ - SABOT ELASTOMER

Scopul acestor cercetări a fost acela de a analiza comportarea cuplei de materiale rotor- stator în două variante rotor, s-au utilizat probe tip rolă durificate cu carbură de wolfram prin procedeul de pulverizare cu viteză mare HVOF și role cromate dur, cu probe tip sabot realizate din trei tipuri de

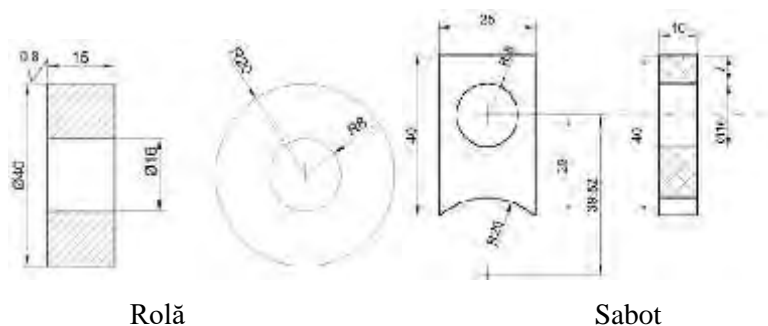
elastomeri utilizați la fabricarea statoarelor pompelor elicoidale: butadien acrilonitrilic, NBR; butadien acrilonitrilic hidrogenat, HNBR și butadien acrilonitrilic carboxilat, XNBR.

Caracteristicile celor trei tipuri de elastomeri utilizați la realizarea probelor tip sabot sunt prezentate în tabelul 6.1.

**Tabelul 6.1.** Caracteristicile elastomerilor

Caracteristici	Elastomer NBR	Elastomer HNBR	Elastomer XNBR
Modulul 100%, [MPa]	7,7	4,6	9,1
Modulul 300%, [MPa]	16,8	21,0	19,8
Rezistența la rupere, [MPa]	17,4	29,8	20,2
Lungirea la rupere, [%]	327	420	310
Duritatea, [°Sh]	81	78	87
Rezistența la uzură abrazivă, [g]			
- gr = 800g	0,0078	0,0258	0,0055
- gr =1300g	0,0745	0,0434	0,0246

Setul de epruvete folosit în cadrul lucrării este prezentat în Fig. 6.8. Suprafețele active ale acestora sunt: suprafața cilindrică exterioară a rolei și suprafața curbă a sabotului.

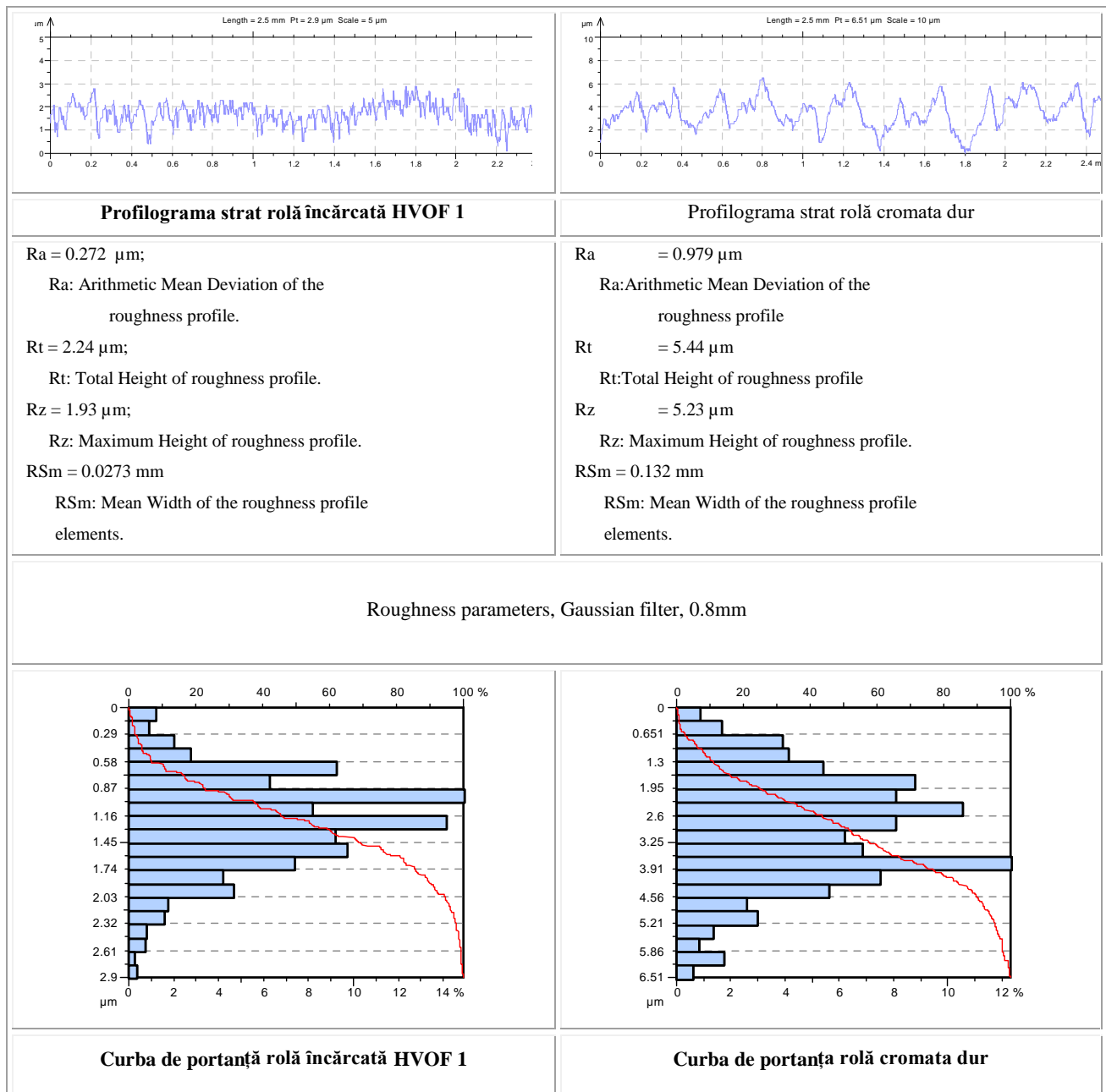


**Fig. 6.8.** Schița epruvetelor pentru încercare

Rolele reprezintă materialul rotorului, iar saboții reprezintă elastomerul statorului. La executarea rolei a trebuit să se respecte condiția ca bătaia radială a suprafeței cilindrice exterioare în raport cu alezajul să nu fie mai mare de 0,02 mm.

Pentru aprecierea calității suprafețelor probelor tip rolă s-au efectuat verificări și încercări în vederea determinării rugozității stratului superficial, a grosimii stratului prelucrat, a defectelor de suprafață și a durității acesteia.

Pentru determinarea rugozității suprafețelor prelucrate ale probelor încărcate cu carburi de wolfram s-a utilizat profilometrul de tip SURTRONIC. Valorile obținute (fig. 6.9) au fost prelucrate cu ajutorul programului TalyProfile Lite 2.1.



**Fig. 6.9.** Profilul suprafețelor probelor încărcate dur.

### ***Descrierea mașinii de încercare la uzare***

Coeficientul de frecare și uzura s-au stabilit în condiții de alunecare pură pentru cuple de frecare Amsler. Principalele date tehnice ale mașinii Amsler sunt următoarele:

- sarcina maximă de încărcare 200 kgf;
- vitezele de rotație ale arborele inferior 200 sau 400 rot/min;
- vitezele de rotație ale arborelui superior 0 sau 180 și 360 rot/min;
- sensul de rotație al arborilor: același sau contrar.

Condițiile de testare tribologice de încercare sunt prezentate în tabelul 6.2.

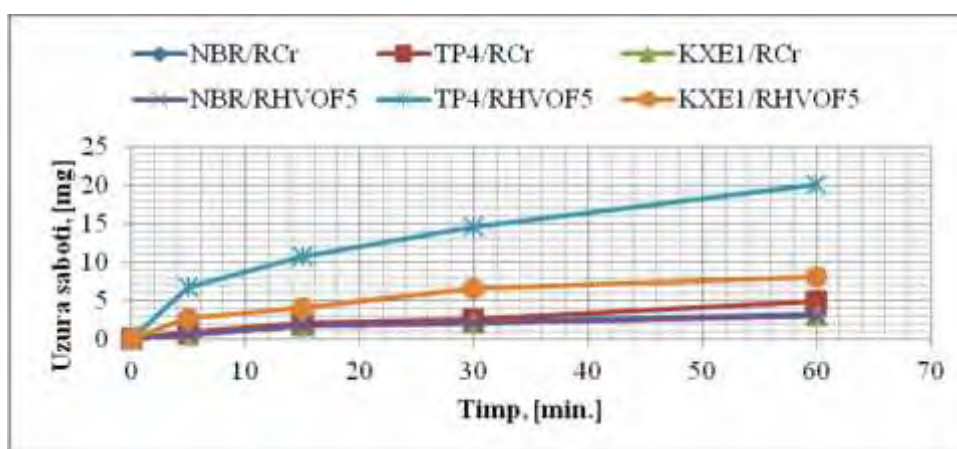


**Tabelul 6.2.** Condițiile de testare tribologice

Condiții de lucru		Dimensiunea eprubetelor	Material	Duritatea Rockwell HRC	Duritatea Shore A, °Sh	Coefficient de frecare	
Cupla de frecare 1	Rolă încărcată cu WC	Φ40x15	Oțel 42CrMo4 încărcat cu WC	59	-		
	Sabot elastomer	NBR	40x25x10	Butadien acrilonitrilic	-	81	0,62-0,47
		TP4	40x25x10	Butadien acrilonitrilic hidrogenat	-	87	0,66-0,47
		KXE1	40x25x10	Butadien acrilonitrilic carboxilat	-	78	0,62-0,47
Cupla de frecare 2	Rolă cromată dur	Φ40x15	Oțel 42CrMo4 cromat dur	56	-		
	Sabot elastomer	NBR	40x25x10	Butadien acrilonitrilic	-	81	0,6-0,37
		TP4	40x25x10	Butadien acrilonitrilic hidrogenat	-	87	0,62-0,35
		KXE1	40x25x10	Butadien acrilonitrilic carboxilat	-	78	0,6-0,47
<b>Mediul de lucru: apa</b> <b>Viteza de rotație: 0,418 m / s</b> <b>Sarcina de încărcare: 300 N</b> <b>Timpul de testare: 60 min</b>							

### Rezultate obținute.

În fig. 6.10 - 6.11 sunt prezentate variațiile uzurilor gravimetrice ale saboților din cuplele: elastomeri - rolă cromată dur și elastomeri-rolă încărcată prin pulverizare termică (HVOF). Elastomeri: NBR – butadien acrilonitrilic; TP4 – butadien acrilonitrilic hidrogenat; KXE1 – butadien acrilonitrilic carboxilat



**Fig. 6.10.** Variația uzurii gravimetrice a saboților funcție de timp.

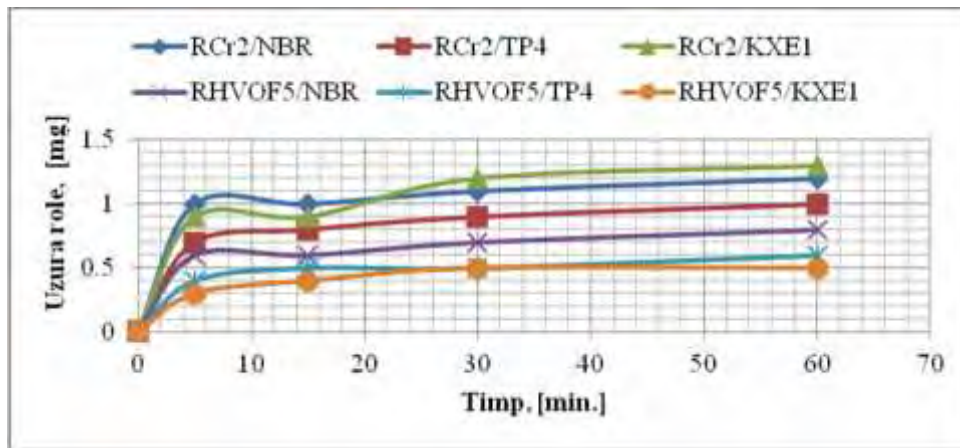


Fig. 6.11. Variația uzurii gravimetrice a rolor funcție de timp

În Fig. 6.12 se prezintă valorile temperaturilor dezvoltate măsurate la încercarea setului cuplelor Amsler role-sabot. Măsurarea s-a făcut în apropierea suprafeței de frecare cu un termocuplu tip J și utilizarea unui multimetru digital tip APPA 306, precizia de măsurare a temperaturii fiind de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

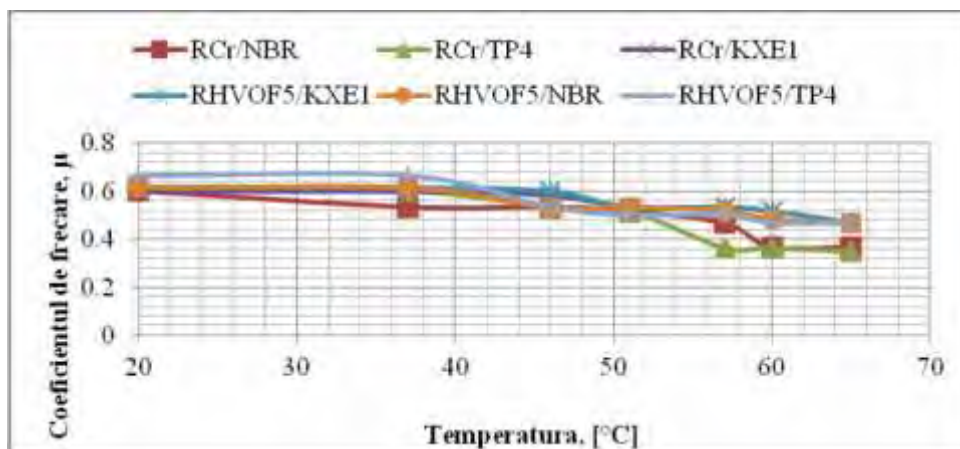
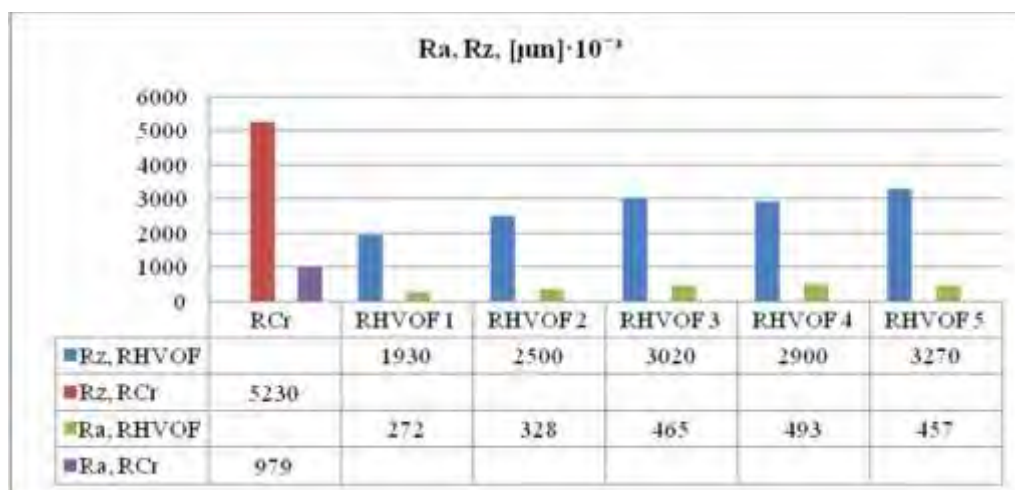


Fig. 6.12. Variația coeficienților de frecare ai cuplelor Amsler funcție de temperatură.

*Determinarea parametrilor microgeometrici* ale suprafețelor s-a realizat cu profilometrul de tip SURTRONIC 3+, valorile obținute fiind prelucrate cu ajutorul programului TalyProfile Lite 2.1. În figurile 6.13 sunt arătate în comparație criteriile de rugozitate pentru cele două cuple.



**Fig. 6.13.** Grafic comparativ pentru rugozitățile măsurate  $R_a$ ,  $R_z$  pentru rola cromată dur și rola încărcată prin pulverizare termică (HVOF)

### Concluziile experimentelor tribologice pe tribometrul AMSLER

- În cadrul lucrării s-a cercetat comportarea la uzare a epruvetelor corespunzătoare rotorului și statorului pompelor elicoidale.
- S-au cercetat comparativ două tehnologii de durificare a rotorului: tehnologia durificării prin cromare dură și tehnologia încărcării prin procedeul de pulverizare cu viteză mare HVOF în cuplu cu trei tipuri de elastomeri.
- *Cupla 1:* rolă durificat prin pulverizare cu flacără cu viteză mare (HVOF) - rotor, sabot din elastomer NBR, HNBR, XNBR - stator;
- *Cupla 2:* rolă cromată dur- rotor, sabot din elastomer NBR, HNBR, XNBR - stator .
- Frecarea cuplei 1-rolă durificată prin HVOF-sabot elastomer (NBR, HNBR, XNBR) prezintă uzura adezivă și abrazivă, caracterizată prin importante amprente apărute pe ambele suprafețe de contact;
- Frecare cuplei 2- rolă cromată dur - sabot elastomer (NBR, HNBR, XNBR), prezintă o uzură adezivă de rezervă, fără amprente importante pe ambele suprafețe de contact de alunecare;
- Din cauza procesului de uzură pierderile de greutate în cazul cuplei de frecare cuplu 1 sunt mai mici comparativ cu pierdea in greutate în cazul cuplei 2;
- Coeficientul de frecare, în cazul cuplei 1 este de 0,6 – 0,4 și, în cazul cuplei 2 este de 0,6 -0,3, ceea ce indică comportarea mai bună la frecare a cuplei 2.
- Aceste experimente oferă date și contribuie la o alegere adecvată a cuplei de materiale rotor-stator, în scopul măririi duratei de viața a pompei.

### 6.3. CERCETĂRI TRIBOLOGICE PRIVIND COMPORTAREA CUPLEI DE FRECARE INEL METALIC – PASTILE ELASTOMERI PE TESTERUL BAROID

Sistemul tribologic în pompele elicoidale de adâncime este caracterizat în principal prin contactul cu alunecare și prin uzura abrazivă în condiții elastohidrodinamice. Obiectivele acestei faze au fost.

- Cercetări tribologice privind comportarea cuplului de materiale în condiții de lubrifiere având ca mediu de lucru patru probe reprezentative de țiței, din sondele aflate în exploatare.
- Cercetări tribologice privind comportarea cuplurilor de materiale rotor - stator, în condiții de lubrifiere, la temperatura de lucru de 70°C.
- Cercetarea tribologică privind comportarea cuplurilor de materiale rotor - stator în cazul frecării uscate.

Încercările s-au efectuat pe Testerul Baroid ( Fig. 6.14).



**Fig. 6.14.** Testerul Baroid

Principalele caracteristici tehnice ale mașinii sunt:

- Momentul  $M = 16,95 \text{ N}\cdot\text{m}$ ;
- Turația,  $N = 60 \text{ rot/min}$ ;
- Presiunea,  $p = (34,47 \div 68,94) \text{ Mpa}$

#### **Materiale**

Oțelul din care s-au realizat probele tip inel este 42CrMo4, un aliaj frecvent utilizat în construcția utilajului petrolier. Compoziția chimică și caracteristicile mecanice ale oțelului 42CrMo4 sunt arătate în tabelele: 6.1, 6.2; caracteristicile celor trei tipuri de elastomeri sunt prezentați în tabel 6.7.

Lubrifiantii utilizați în cadrul acestor experimente sunt patru tipuri de țiței din sondele aflate în exploatare, ale căror caracteristici fizice sunt arătate în tabelul 6.9.

Eșantioanele de nisip utilizate în realizarea experimentelor sunt dintr-un nisip de sondă, obținut din operațiile de lăcăr și de la spălarea intervalelor perforate.

## Construcția și pregătirea epruvetelor

În cadrul acestei cercetări, coeficientul de frecare și uzura s-au stabilit în condiții de alunecare pură pentru cuple de frecare tip Timken. Setul de epruvete folosit în cadrul lucrării este prezentat în Fig. 6.15. Suprafețele active ale acestora sunt: suprafața cilindrică exterioară a inelului ( $\Phi 40 \times 8,5$  mm) și suprafața plană a pastilei ( $\Phi 16 \times 12$  mm).



Fig. 6.15. Cuplele de frecare pentru testerul Baroid

Inelele reprezintă materialul rotorului, pastilele reprezintă elastomerul statorului. Probele tip pastilă s-au fixat într-o casetă metalică, cu dimensiunile 20 mm x 20 mm x 9,3 mm.

Pregătirea epruvetelor a constat în degresarea tuturor suprafețelor prin imersare în etil-metil-cetonă, urmată de ștergerea cu un material textil neplușat și uscare în aer.

### Rezultatele obținute

#### Analiza granulometrică

Analiza granulometrică s-a făcut în scopul obținerii informațiilor necesare calculării parametrilor granulometrici și a distribuției pe dimensiuni a claselor sedimentare.

Metoda de analiză granulometrică utilizată a fost metoda clasică de cernere a nisipului prin site. Experimentele s-au realizat în laboratoarele Universității Petrol Gaze din Ploiești. Datele au fost reprezentate prin histograme, curba granulometrică cumulativă (fig. 6.16) și curba granulometrică de frecvență (fig. 6.17). Pentru ușurința reprezentării s-au folosit unitățile phi [ $\phi = -\log_2 d$  (mm)]

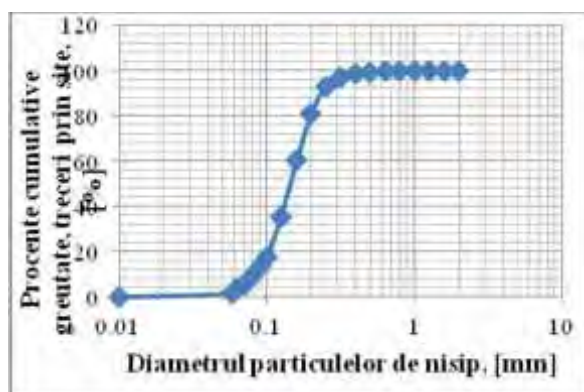


Fig. 6.16. Curba granulometrică cumulativă

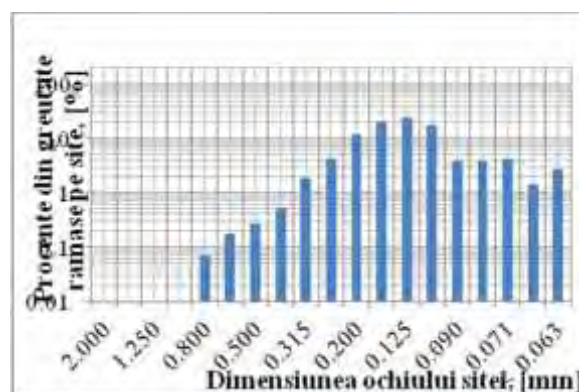


Fig. 6.17. Curba granulometrică de frecvență

***Cercetări tribologice privind comportarea cuplului de materiale în condiții de lubrifiere având ca mediu de lucru patru probe reprezentative de țitei, din sondele aflate în exploatare.***

Pastilele din elastomeri au fost condiționate timp de 72 de ore în țitei cu caracteristicile arătate în tabelul 6.3. Timp de probă 60 de minute, la temperatura de 23°C. Sarcina de încărcare 30 N.

**Tabel 6.3.** Caracteristicile fizico- chimice ale probelor de țitei

Caracteristici fizice		Proba de țitei			
		I	II	III	IV
Densitate, $\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]		906,9	940,2	851,0	830
Viscozitate cinematică, $\eta$ [cP]	20°C	60,42	714,54	15,24	18,89
	30°C	36,13	354,57	9,748	11,86
	40°C	23,22	157,83	6,510	8,858
	50°C	15,91	91,89	5,168	6,812
	60°C	11,39	52,97	4,171	5,453
Punctul de congelare, [°C]		-12	-15	13	5
Continutul în sulf total, [% gr]		0,466	-	0,329	0,27
Conținutul în parafina, [% gr]		-	0,18	2,82	2,72
Conținutul în asfaltene, [% gr]		-	0,25	0,26	0,41
Conținutul în rășini, [% gr]		-	18,78	8	8,42
Temperatura de congelare a rezidului, [°C]		-	+30		
Conținutul în apă și sediment (metoda prin centrifugare)	Apă, [% vol]	60,0	20,0	16,0	40,0
	Sediment, [% vol]	5,0	20,0	2,0	4,0

Comportarea la frecare a cuplelor inel încărcat prin pulverizare (HVOF)-elastomeri (fig. 6.18).

În *proba 1 de țitei*, care este un țitei mediu, cel mai bun comportament la frecare l-a avut cupla inel pulverizat HVOF–pastilă elastomer NBR.

În *proba 2 de țitei*, care este un țitei greu ,cuplele inel HVOF-pastilă NBR și inel HVOF- pastilă XNBR au avut cel mai mic coeficient de frecare.

În *proba 3 de țitei* (este țitei ușor), cel mai bine s-a comportat cupla inel HVOF –pastilă HNBR.

În *proba 4 de țitei*, care este un țitei ușor ,comportamente bune la frecare l-au avut cuplele inel HVOF- pastilă HNBR și inel HVOF- pastilă XNBR. Comportamentul la frecare al cuplei inel HVOF- pastilă NBR s-a modificat față de comportamentul în probele anterioare de țitei.

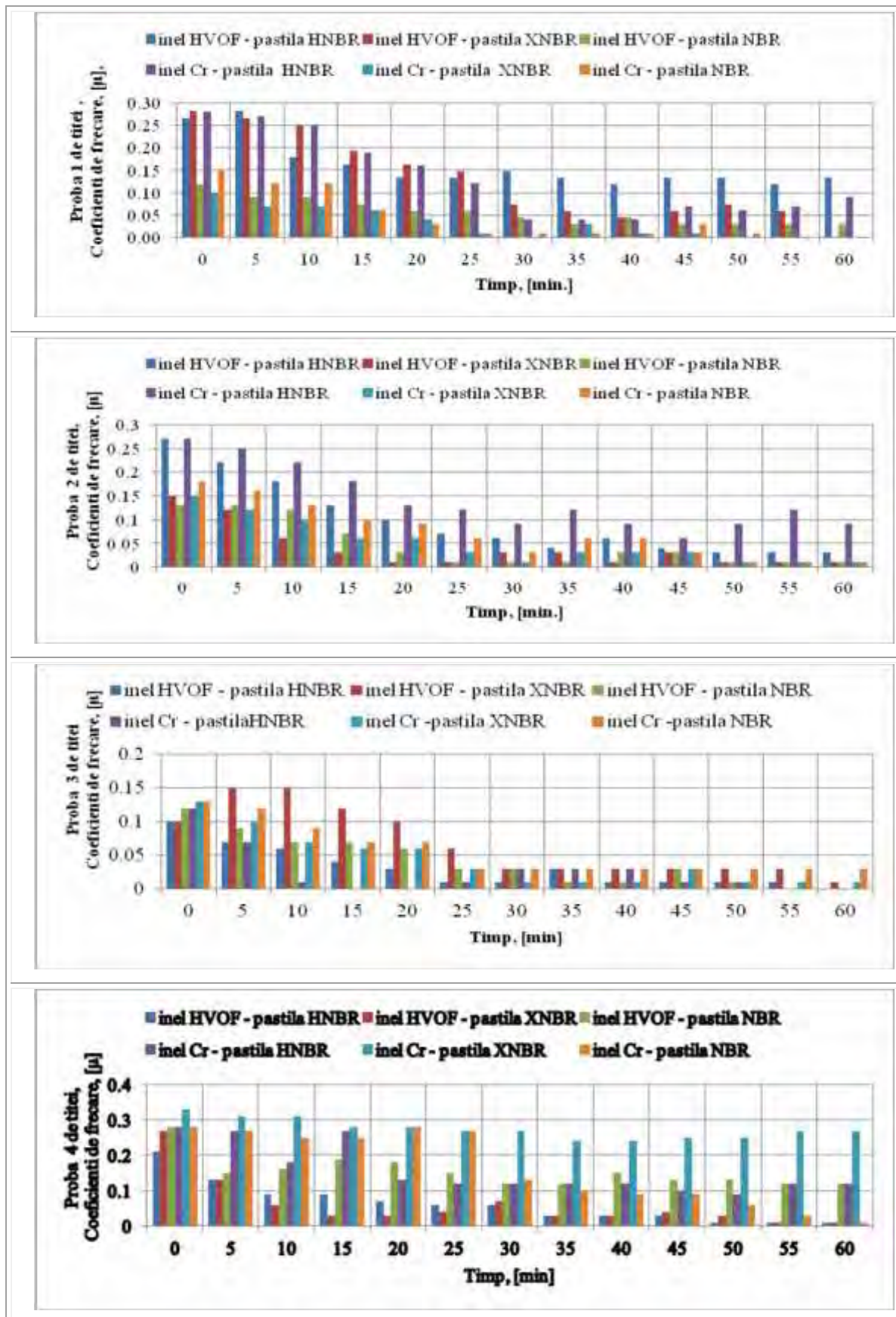


Fig. 6. 18. Comparație între variația coeficienților de frecare ai cuplelor: inel cromat dur-pastile elastomeri și inel încărcat prin pulverizare termică (HVOF)-elastomeri, imersate în țigeti, funcție de timp.

Comportamentul cuplelor: inel cromat dur-elastomeri, funcție de timp, se prezintă astfel:

În *proba 1 de țitei*, care este un țitei mediu, cel mai bun comportament la frecare l-a avut cupla inel cromat dur – pastilă elastomer XNBR. Cel mai slab cupla inel cromat dur - pastilă HNBR.

În *proba 2 de țitei*, care este un țitei greu, cuplele inel cromat dur - pastilă XNBR și cuplele inel cromat dur-pastilă NBR și au avut cel mai mic coeficient de frecare.

În *proba 3 de țitei*, care este un țitei ușor, cel mai bine s-a comportat cupla inel cromat dur – pastilă HNBR, urmată de cupla inel cromat dur – pastilă XNBR.

În *proba 4 de țitei*, care este un țitei ușor, comportamente bune la frecare l-au avut cuplele inel cromat dur - pastilă XNBR și inel cromat dur - pastilă NBR.

În concluzie se poate spune că într-un țitei ușor (proba 3), comportarea cuplei inel cromat – pastilă HNBR a avut cel mai bun comportament, iar în celelalte trei probe de țitei cel mai slab.

În concluzie în urma analizei rezultatelor se poate spune că: creșterile valorilor coeficienților de frecare în a doua parte a experimentului, în cadrul aceleiași probe, se poate datora extragerii unor constituenți din elastomer (de exemplu plastifianții), iar scăderea coeficienților de frecare are loc datorită absorbției țiteiului.

Variația uzurii gravimetrice a pastilelor din elastomer este arătată în figura 6.19.

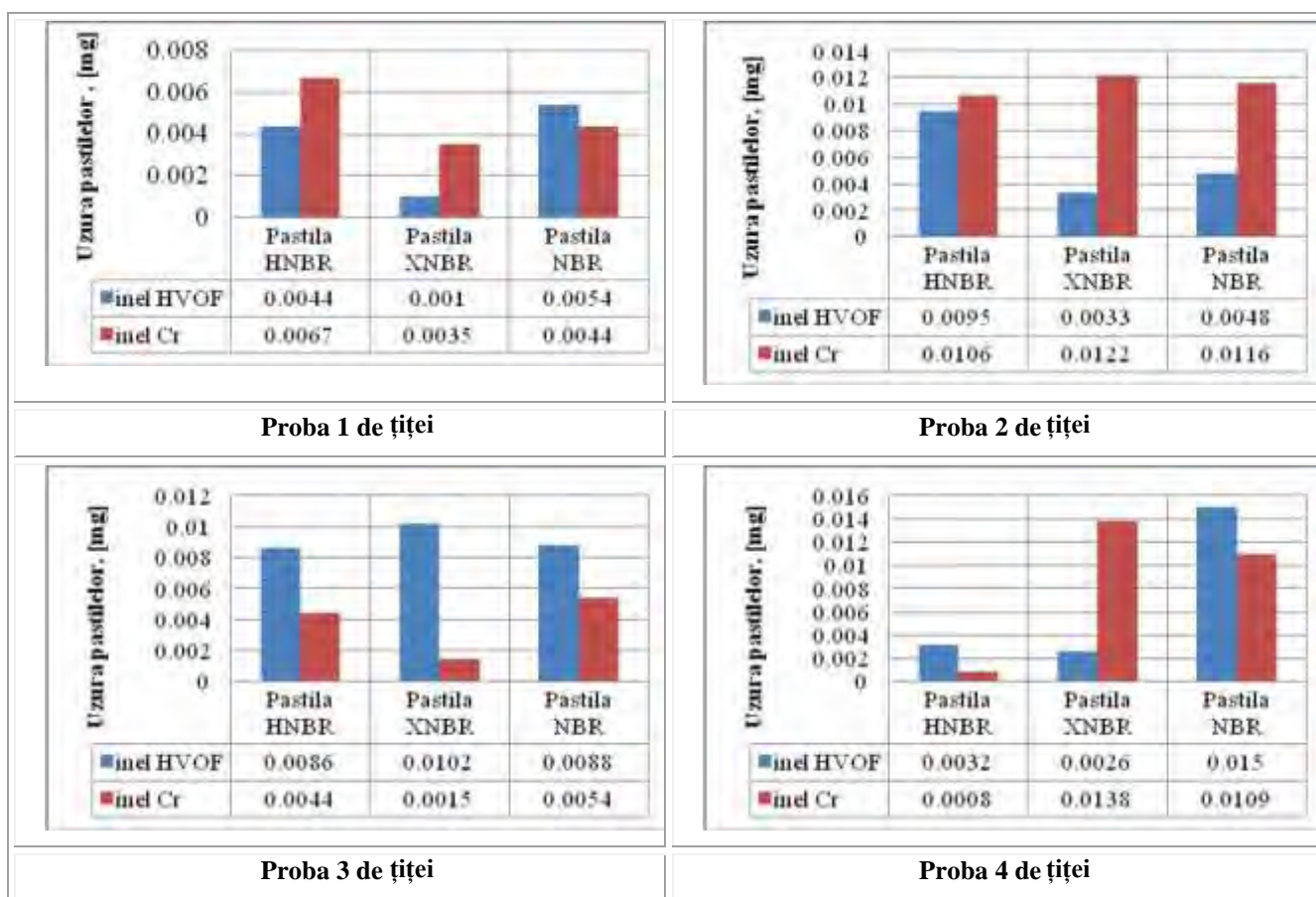


Fig. 6.19. Variația uzurii gravimetrice a pastilelor imersate în țitei, funcție de timp.



În ce privește variația uzurii gravimetrice a pastilelor din elastomer se constată următoarele:

Pentru elastomerii din care sunt realizate pastilele cuplelor, în funcție de probele de țitei și de tipul de acoperire al inelelor s-au remarcat următoarele:

Elastomerul HNBR a prezentat o uzură mică în proba 4 de țitei în cupla pastilă HNBR-inel HVOH, iar o uzură nesemnificativă în cupla pastilă HNBR-inel HVOH. În celelalte probe de țitei uzura a fost medie.

Elastomerul XNBR a avut cea mai mică uzură în cupla pastilă XNBR-inel HVOF, în proba 1 de țitei, care este un țitei mediu. În celelalte probe de țitei, uzura a fost mare, atât în cupla pastilă XNBR-inel HVOF (proba 3 de țitei) cât și în cupla pastilă XNBR- inel cromat dur în toate probele de țitei.

Elastomerul NBR are cea mai mică uzură în cupla pastilă NBR-inel HVOH, în proba 2 de țitei, care este un țitei greu. În țiteiurile ușoare (probele 3 și 4) elastomerul NBR are cel mai slab comportament, probabil datorită compoziției acestora (continut de aromatice) sau posibil, extragerii unor constituenți din elastomer.

Inelele (fig. 6.20) acoperite atât cele prin pulverizare cât și cele cromate dur, nu au suferit deteriorări ca urmare a contactului cu pastilele de elastomeri, filmul de ungere a protejat în mod eficient suprafețele metalice ale inelelor.

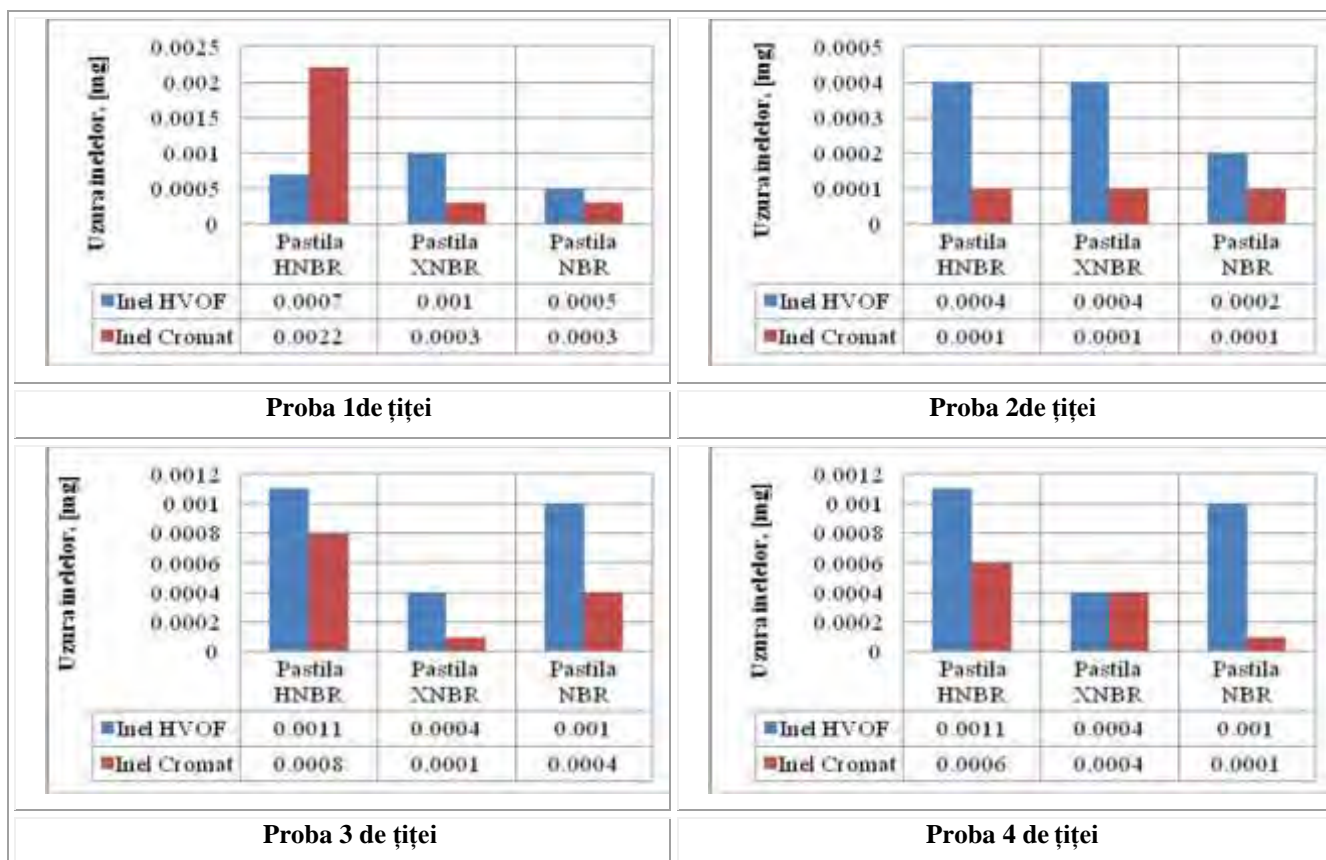


Fig. 6.20. Variația uzurii gravimetrice a inelelor imersate în țitei, funcție de timp.

***Cercetari tribologice privind comportarea cuplurilor de materiale rotor - stator, în condiții de lubrifiere, la temperatura de lucru de 70°C.***

Temperatura este una dintre cele mai importante variabile care să ia în considerare atunci când se urmărește comportamentul elastomerului statoarelor pompelor elicoidale deoarece afectează în mod considerabil proprietățile materialului.

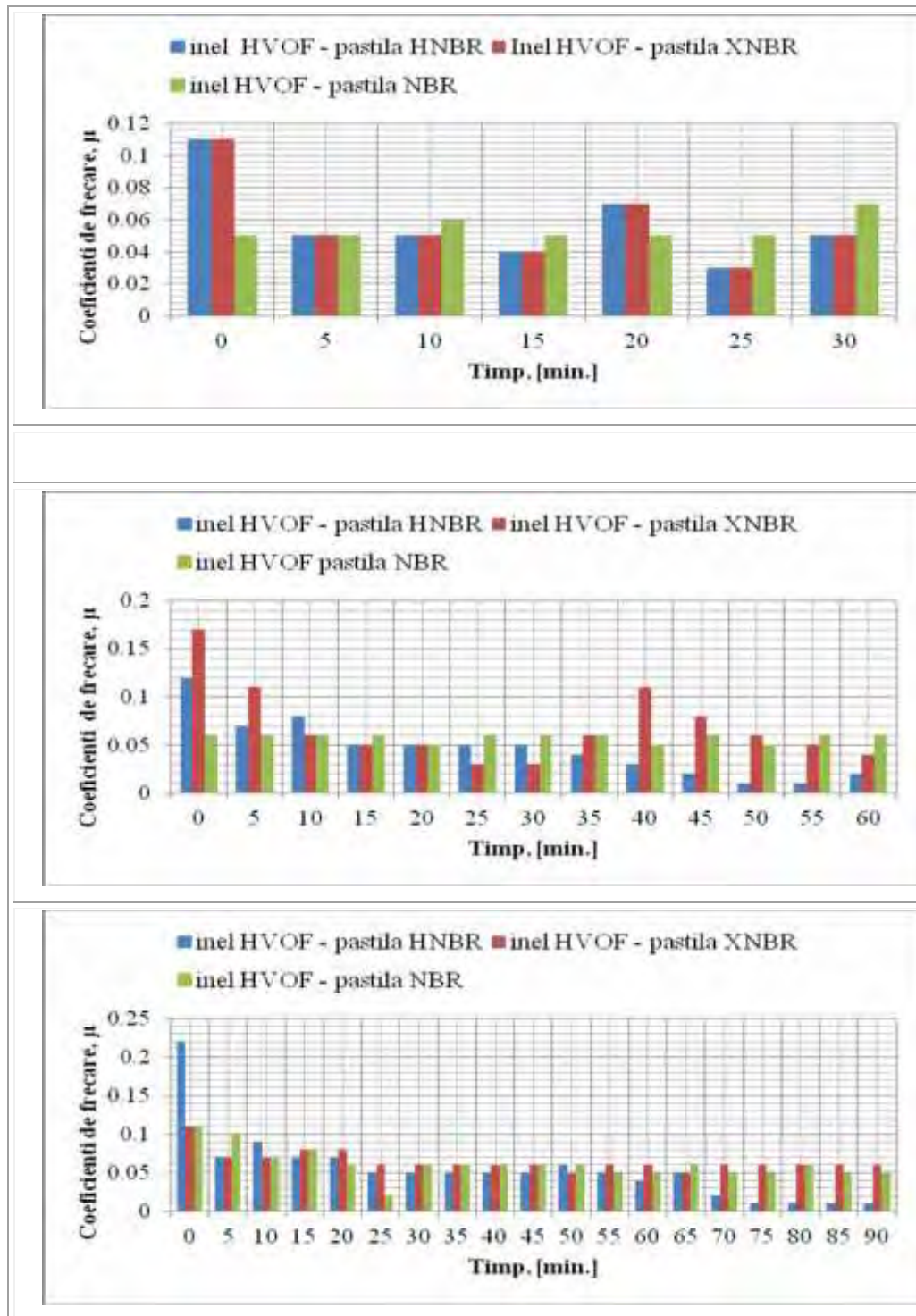
În tab. 6.4 sunt arătate condițiile de testare pentru cuplele de frecare la sarcina maximă de 160 N.

Tabelul 6.4.Valorile coeficienților de frecare funcție de temperatură și timp.

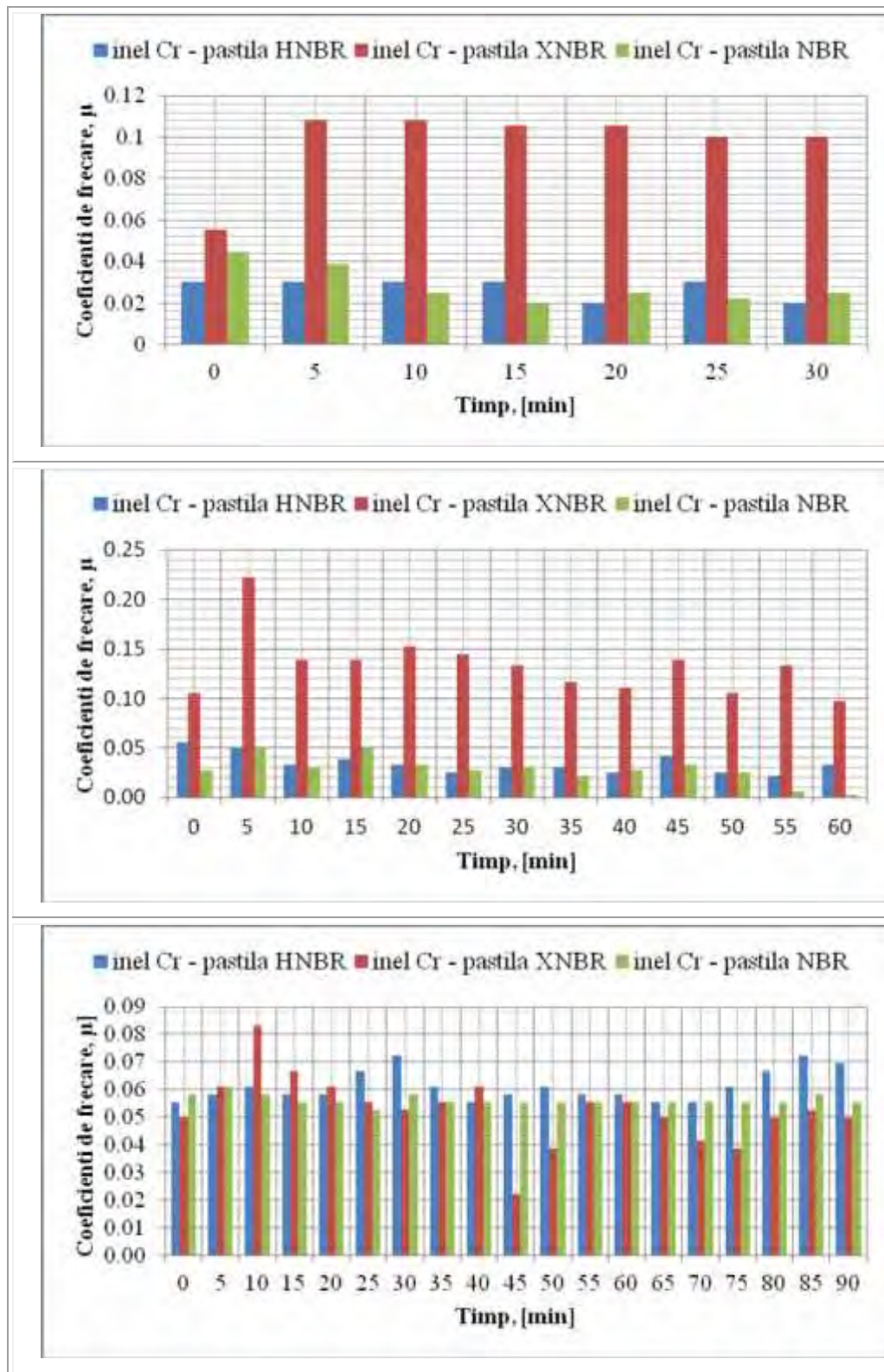
Condiții de lucru		Dimensiune probe	Material	Coeficientul de frecare			
				30 min	60 min	90 min	
Cupla de frecare 1	Inel încarcat cu carbură de wolfram	Φ 40 x 8,5	Otel 42CrMo4 încarcat cu WC	-	-	-	
	Pastilă elastomer	NBR	Φ16 x 12	Butadien acrilonitrilic	0.05–0.07	0.06-0.05	0.11-0.05
		HNBR	Φ16 x 12	Butadien acrilonitrilic hidrogenat	0.11- 0.05	0.12-0.02	0.22-0.01
		XNBR	Φ16 x 12	Butadien acrilonitrilic carboxilat	0.11- 0.06	0.17-0.04	0.11-0.06
Cupla de frecare 2	Inel cromt dur	Φ40x15	Oțel 42CrMo4 cromat dur	-	-	-	
	Pastilă elastomer	NBR	Φ16 x 12	Butadien acrilonitrilic	0.04-0.03	0.03-0.01	0.06-0.06
		HNBR	Φ16 x 12	Butadien acrilonitrilic hidrogenat	0.03-0.02	0.06-0.03	0.06-0.07
		XNBR	Φ16 x 12	Butadien acrilonitrilic carboxilat	0.06-0.01	0.11-0.01	0.05-0.05

Mediu de lucru: Proba 1 de țitei cu adaosuri de nisip în concentrație de 5% părți volumice;  
Viteza de lunecare: 0,5 m / s;  
Sarcinile de încercare: 160 N;  
Timpi de încercare: 30; 60; 90 min;  
Temperatura 70 °C;  
Probele de elastomer au fost condiționate 72 h la tempertura de 70°C.

În figurile 6.21-6.22 sunt arătate variațiile coeficienților de frecare ai cuplelor inele metalice pastile elastomeri, funcție de timp (30; 60; 90 minute), la temperatuta de 70°C.



**Fig. 6.21.** Variația coeficienților de frecare a inelului pulverizat termic (HVOF) cu pastile elastomeri, functie de timp (30; 60; 90 minute), la temperatura de 70°C.



**Fig. 6.22.** Variația coeficienților de frecare a inelului cromat dur cu pastile elastomeri, funcție de timp (30; 60; 90 minute), la temperatura de 70°C.

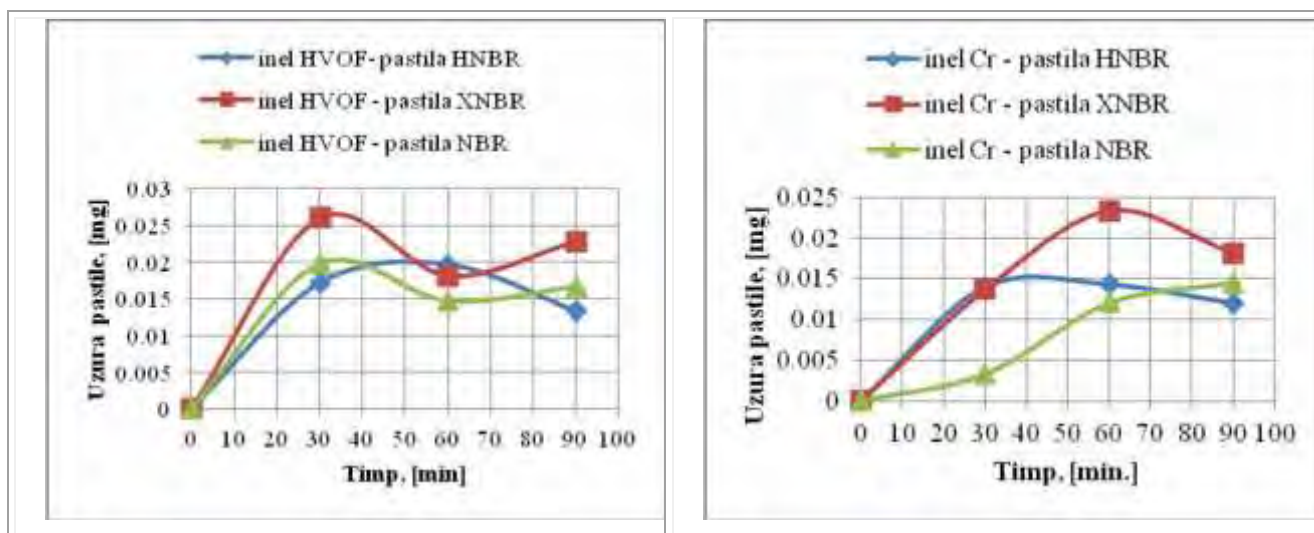


Fig. 6.23. Variația uzurii gravimetrice a pastilelor imersate în țiței, funcție de timp;

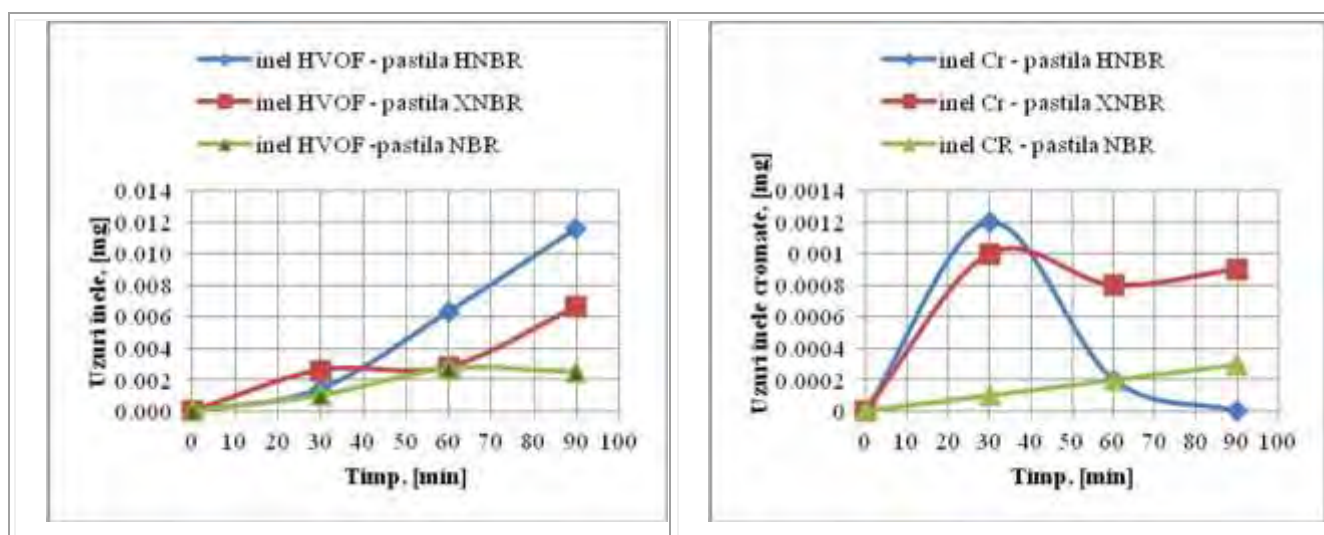


Fig. 6.24. Variația uzurii gravimetrice a inelelor imersate în țiței, funcție de timp;

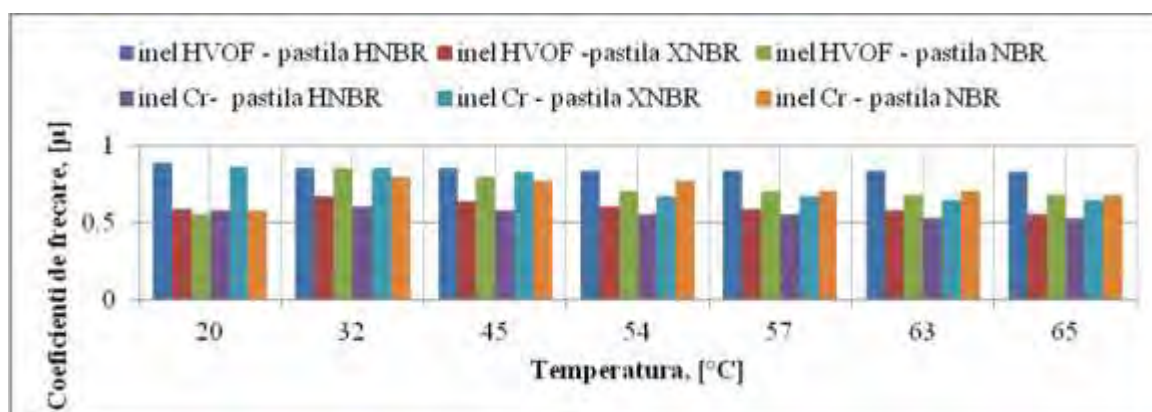
Fig. 6.23 prezintă variația uzurii gravimetrice a pastilelor imersate în țiței, funcție de timp. Datorită abrazivității nisipului din țiței, s-au produs mici tăieturi pe suprafața de pastilei elastomer și o uzură a elastomerului foarte mică.

Fig. 6.24 prezintă variația uzurii gravimetrice a inelelor imersate în țiței, funcție de timp. Prezența lubrifiantului scade greutatea pierdută în majoritatea condițiilor de testare, dar aceasta nu înseamnă că uzura elastomerului în stare lubrifiată este mai mică decât cea în stare uscată. Este importantă influența lubrifiantului asupra uzurii abrazive.

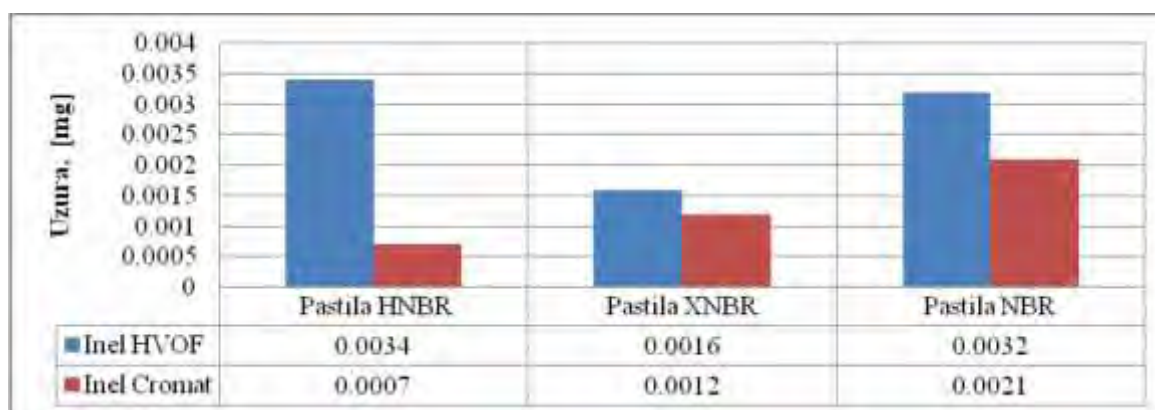
**Cercetarea tribologică privind comportarea cuplurilor de materiale rotor - stator în cazul frecării uscate.**

S-a investigat comportarea tribologică a cuplei rotor- stator în două variante rotor, s-au utilizat probe tip inel durificate cu carbură de wolfram prin procedeul de pulverizare cu viteză mare HVOF și inele cromate dur, cu probe tip pastilă realizate din trei tipuri de elastomeri utilizați la fabricarea statoarelor pompelor elicoidale: butadien acrilonitrilic, NBR; butadien acrilonitrilic hidrogenat, HNBR și butadien acrilonitrilic carboxilat, XNBR în condiții de frecare uscată, sarcină de 30 N, timp de 30 minute pentru fiecare proba, cu citiri din cinci în cinci minute.

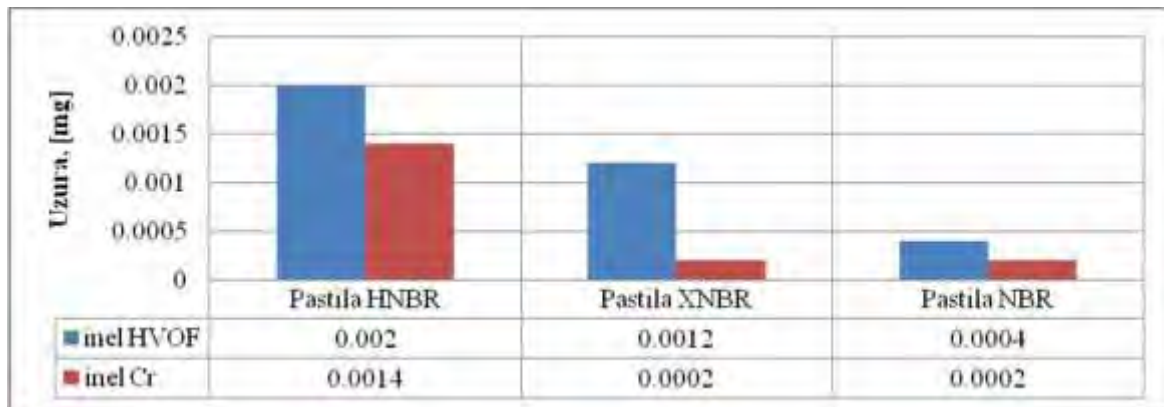
Coeficienții de frecare și uzurile gravimetrice ale cuplelor sunt arătate în figurile 6.25-6.27. Rezultatele acestor experimente se pot considera etalon în analiza comportării tribologice a cuplei de frecare rotor –stator în condiții de lubrifiere.



**Fig. 6.25.** Comparație între variațiile coeficienților de frecare ai pastilelor din elastomeri : HNBR, XNBR, NBR cu inel încărcat prin pulverizare termică (HVOF) și inel cromat dur.



**Fig.6.26.** Comparație între uzura pastilelor din elastomeri (HNBR, XNBR, NBR) în contact cu inel încărcat prin pulverizare termică HVOF și inel cromat dur, în cazul frecării uscate, timp de 30 min.



**Fig. 6.27.** Comparație între uzura inelului încărcat prin pulverizare termică (HVOF) și uzura inelului cromat dur, în contact cu pastilele din elastomeri: HNBR, XNBR, NBR, în cazul frecării uscate, timp de 30 min.

Variațiile uzurii pastilelor elastomer au fost mici, iar cele ale inelelor nesemnificative. Luând în considerare ipoteza transferului de material de la un element la altul al cuplei, direct proporțional cu sarcina aplicată, se pot explica aceste valori scăzute ale uzurii în condiții de frecare uscată.

Se pot trage unele concluziile importante din cercetările experimentale realizate în cadrul acestei lucrări, care pot contribui la înțelegerea mecanismului de uzare abrazivă din pompele elicoidale. Pentru asigurarea unui regim fluid continuu în pompă următorii parametrii sunt importanți: asigurarea ajustajului rotor-stator, aderența, vâscozitatea fluidului,

Foarte importante sunt materialele suprafețelor active ale pompei, respectiv materialul elastomerului statorului precum și, materialul și tehnologia de durificare ale rotorului de care depind: procesele de ancorare fluid-metal, fluid –elastomer, variația vâscozității, dependența de temperatură, care depind de natura chimică, de microgeometria suprafețelor, de calitățile elastice ale materialelor și de capacitatea lor de preluare și de transmitere a căldurii [12, 13, 34, 36, 37, 38, 39].

Datorită interacțiunii moleculare dintre metal și fluid, acesta din urmă aderă puternic la suprafața în mișcare a rotorului. Straturile aderente de fluid, prin acțiunea vâscozității, pun succesiv în mișcare straturile vecine. Ca urmare, apare rezistența opusă de tensiunile de alunecare internă din fluid, aria reală de contact este mai mare decât în cazul frecării uscate, astfel încât apar în măsură redusă, deformații remanente ale asperităților, frecarea rezultată fiind mult inferioară frecării uscate. Sarcina exterioară este suportată forță rezultată din presiunile existente în fluid (de portanță). În aceste condiții fluidul din sondă, trece prin ajustajul rotor –stator, de-a lungul liniilor de contact, din camerele (cavitățile) cu presiune mare în camerele cu presiune joasă. În funcție de asigurarea unei valori adecvate a ajustajului fluidul își menține o capacitate portantă mai mare. Acești doi parametrii sunt hotărâtori pentru a menține o eficiență ridicată pompei elicoidale.

Sunt situații în exploatare în care, din diferite motive: diminuarea debitului de fluid, reducerii turației de antrenare (care duce la o viteză relativă mai mică a suprafeței active a rotorului ș.a.) se poate ajunge la întreruperea curgerii continue a fluidului. În acest caz, frecarea este asigurată de stratul de molecule de fluid adsorbite la suprafața rotorului, care asigură rezistența la forfecare. Alunecarea are loc cu o frecare redusă frecării uscate, dar superioară frecării fluide, frecarea fiind influențată în largă măsură de natura, proprietățile chimice, fizice și mecanice ale suprafețelor cuplei rotor -stator. În cadrul acestui regim de frecare, coeficientul de frecare variază și cu temperatura. Variațiile nu sunt considerabile, dar când stratul adsorbit este distrus are loc deteriorarea elementelor cuplei rotor-stator.

Dependența frecării de alunecare de temperatură poate fi înțeleasă și ca dependența frecării interne a elastomerului funcție de temperatură. Astfel, cu creșterea temperaturii elastomerul devine mai elastic și frecare lui internă scade [9, 12, 14, 16, 30]. Presiunea de contact este relativ scăzută, vârfurile profilului suprafeței elastomerului nu vor fi complet aplatizate și, drept urmare între văile și vârfurile formate stratul de lubrifiant va fi capturat, iar în cadrul fiecărei oscilații va fi tras în zona de contact. Acest lucru are ca rezultat asigurarea unui film de fluid, care reduce, contribuția vâscoelastică a frecării.

## CAPITOLUL 7

### CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII ȘI PERSPECTIVE

#### Concluzii generale

Lucrarea a abordat o problemă actuală și de mare importanță, dacă se ține seama de rolul deosebit pe care îl are petrolul în cadrul industriei în general și al celei energetice în special atât ca sursă de energie primară, cât și ca materie de bază pentru prelucrarea/fabricarea combustibililor și lubrifianților pentru motoare cu ardere internă, mașini, utilaje de diverse tipuri, petrochimie ș.a.

Scopul lucrării a fost orientat spre cercetarea căilor de creștere a rezistenței la uzură a cuplei rotor stator, considerând că aceasta reprezintă elementul hotărâtor ce determină etanșeitatea, performanța și durabilitatea pompelor elicoidale.

În continuare se arată pe capitole, problemele abordate în lucrare, cu specificarea principalelor aspecte, teoretice și experimentale realizate.



În primul capitol, intitulat „Stadiul actual al construcției și exploatării pompelor elicoidale” s-au prezentat principalele aspecte privind construcția și exploatarea pompelor elicoidale utilizate în industria de petrol. S-au prezentat principalele elemente constructive ale pompei, modul de funcționare și antrenarea pompei, alegerea configurației sistemului de pompaj, principalii fabricanți și tipurile de pompe elicoidale, comparație între diverse tipuri/sisteme de pompare, materialele din care se fabrică rotoarele și statoarele, probleme tehnologice de fabricație.

În capitolul doi, intitulat „Geometria și cinematica pompelor elicoidale”, s-a descris modul de obținere geometrică a traiectoriei elicoidale, respectiv geometria elicei cilindrice și modul de obținere, inclusiv pentru alte curbe (epicicloidă și hipocicloidă). S-a prezentat o secțiune transversală printr-o pompă elicoidală cu un rotor cu un singur început. S-au prezentat parametrii de rotație ai pompei, poziția relativă a rotorului în stator la diverse momente (unghiuri), elementele geometrice ale pompei.

În capitolul trei, intitulat: „Parametrii geometrici constructivi care influențează pierderile de fluid, uzura cuplei rotor-stator și diminuarea performanțelor pompelor”, s-a cercetat influența raportului cinematic al mecanismului elicoidal asupra caracteristicilor de lucru ale pompelor, forțele care acționează în cupla rotor-stator care este și o cuplă de frecare oțel-elastomer, strângerea dintre rotor și stator, variația pe lungimea unui pas ș.a. De asemenea, s-au analizat parametrii care influențează eficiența volumetrică a pompei funcție de pierderile de debit, numărul de trepte, vâscozitatea fluidului, mărime/felul ajustajului (strângerea rotor-stator) ș.a.

În capitolul patru, intitulat “Starea de tensiuni din cupla rotor-stator- Evaluarea presiunii de contact dintre statorul și rotorul pompelor elicoidale prin metoda elementelor finite (MEF)”, s-a evaluat presiunea de contact pentru diferite valori ale strângerii dintre rotor și stator, în funcție de dimensiunile acestora, materialele din care sunt confecționate și coeficientul de frecare. Pentru studiu s-a folosit un program ANSYS, care permite modelarea și rezolvarea unei game largi de probleme de contact. În cadrul programului sunt tratate două tipuri de contact și anume rigid-flexibil și flexibil-flexibil, primul tip fiind cel mai potrivit pentru cazul pompelor elicoidale care au rotorul din oțel (rigid) și statorul din elastomer (flexibil). Pentru realizarea modelului fizic al cuplei rotor-stator s-au utilizat elemente de tip Plane 183, iar pentru contactul dintre rotor și stator s-au utilizat elemente finite de tip TARGE 169 și CONTA 172. Problema s-a rezolvat pentru mai multe cazuri, respectiv: diferite valori ale strângerii, o anumită strângere și mai multe valori ale modulului de elasticitate sau ale coeficientului lui Poisson al materialelor/elastomerilor din care se poate confecționa statorul, respectiv pentru o anumită strângere și mai multe valori ale coeficientului de frecare dintre materialele rotorului și statorului pompei elicoidale. Pentru toate aceste situații, au fost stabilite presiunile de contact, tensiunile (eforturile unitare) de contact datorate frecării,

respectiv s-au determinat stările de tensiuni și deformații precum și valorile maxime datorate strângerii dintre rotor și stator, iar pe această bază alegerea ajustajului dintre acestea care să conducă la un randament volumetric optim la un consum de energie cât mai mic.

În capitolul cinci, intitulat “Cercetări ale elastomerilor cuplei de frecare” s-au cercetat elastomerii utilizați la fabricarea statorului pompei elicoidale. Au fost analizate o serie de probleme cum sunt: abordarea fizică a frecării, aria de contact și fenomene specifice, alunecarea la viteză mică și fenomenul stick-slip, frecarea la viteze mari, mecanismul de frecare, influența diverșilor parametri asupra frecării ș.a. În continuare s-au analizat/studiat uzura elastomerilor (forme de uzare), fenomenele de bază și modurile de uzare, influența diverșilor parametri asupra uzurii, proprietățile fizico-mecanice ale materialelor, temperatură, consolidarea matricei cu agenți de umplere, regimul de lucru, mediul de functionare ș.a.

În ultima parte s-au prezentat diferite forme de deteriorare a rotorului și statorului pompelor elicoidale datorate principalelor tipuri de uzură ce apar în acest caz și anume: adezivă, abrazivă, erozivă, histerezis și desprinderile de material sau exfolieri (oboseală).

Capitolul șase, intitulat “Cercetări experimentale” cuprinde o cercetare experimentală amplă privind comportarea tribologică la uzură a materialelor folosite la confecționarea rotorului și statorului pompelor elicoidale pentru extracția țițeiurilor vâscoase și cu impurități mecanice, în condiții de laborator și medii reale sau apropiate celor din sondele de petrol. De fapt, acest capitol constituie o cercetare complexă și cu un caracter de noutate al cuplei rotor - stator.

În prima parte, s-au prezentat rezultatele cercetărilor experimentale privind durificarea rotorului prin depunerea unui strat rezistent la uzură folosind procedeul de pulverizare cu flacără de viteză mare (HVOF). Pentru realizarea acestor acoperiri s-a utilizat instalația modernă care există în cadrul laboratoarelor de specialitate din Universitatea Petro-Gaze din Ploiești, prezentată în cadrul lucrării. În lucrare s-a prezentat complet modul de realizare a depunerilor, materialele utilizate, parametrii tehnologici de pulverizare, prelucrarea suprafețelor probelor durificate cu discuri abrazive, profilogramele rugozităților suprafețelor probelor, grosimea stratului depus și controlul nedistructiv al acestuia, microduritatea straturilor depuse, pregătirea metalografică a probelor, analiza macro și microscopică a probelor, defectele care apar ș.a.

În continuare s-au arătat rezultatele cercetărilor experimentale tribologice efectuate pentru studierea comportării la frecare și uzare a cuplelor de frecare formate din rolele din oțel de rotor încărcate prin metoda HVOF și sabot executat din elastomeri utilizați la fabricarea statorului pompei-respectiv a cuplei de frecare rolă-sabot specifică mașinii de încercat tip AMSLER existent în laboratorul de Tribologie din UPG Ploiești. Proprietățile elastomerilor utilizați au fost verificate prin măsurători experimentale specifice. În lucrare, s-au prezentat pe larg și complet metodologia de

efectuare a cercetărilor precum și rezultatele (tabelar și prin diagrame), obținute prin variația în timp a uzurii, temperaturii și coeficientului de frecare. S-a realizat și un studiu tehnico-experimental pentru studiul stării suprafețelor (rugozitate/microgeometria suprafețelor) utilizând un profilometru tip SURTRONIC 3+, valorile obținute fiind apoi prelucrate cu ajutorul programului TalyProfile Lite 2.1. Rezultatele pentru principalii parametri ai rugozității s-au prezentat în lucrare (tabelar și graphic). Principalele concluzii rezultate în urma cercetării tribologice efectuate s-au prezentat, sistematic în lucrare. Acestea, contribuie la o alegere corespunzătoare a oțelului și tratamentului pentru rotor, respectiv a elastomerului optim pentru stator.

În ultima parte a capitolului sunt prezentate rezultatele și concluziile obținute prin studiu experimental tribologic privind comportarea la uzare-frecare a unor cuple inel din oțel de rotor și pastilă din elastomeri din care se fabrică statoarele, utilizând testerul Baroid (BAROID LUBRICITY TESTER). Cercetările ample și complexe s-au efectuat în scopul analizei comportării tribologice a stratului durificat depus prin HVOF comparativ cu un strat cromat dur, pentru elementul rotor al cuplei precum și pentru a verifica compatibilitatea elastomerilor cu tipurile de țitei din sonde, respectiv comportamentul cuplei la temperatură și uzura abrazivă. Testerul utilizat permite măsurarea capacității de lubrifiere a fluidelor de foraj, furnizarea de date pentru a evalua tipul și cantitatea aditivilor de lubrifiere necesari și prezicerea ratelor de uzură a cuplelor de frecare mecanică în sisteme de fluide cunoscute. Testele tribologice au fost efectuate cu patru tipuri de țitei, prezentate în lucrare. S-a făcut analiza granulometrică a nisipului dintr-un țitei de sondă în scopul obținerii informațiilor/datelor necesare calculării parametrilor granulometrice și a distribuției funcție de dimensiunile granulelor. A fost utilizată metoda clasică (standardizată), de cernere a nisipului prin site cu ochiuri de dimensiuni specifice (0,063-2,0 mm respective 10-230 mesh). Rezultatele obținute au fost prezentate tabelar și grafic (digrama frecvenței cumulate, respectiv poligonul de frecvență). De asemenea, au fost calculați parametrii statistici respectiv valoarea medie aritmetică, dispersia, respectiv abaterea medie pătratică (deviația standard și coeficientul de împrăștiere, care permit aproximarea curbei (poligonului real) în raport cu o lege teoretică (între normal și triunghiulară).

Pentru testele de uzură s-au folosit pastile executate din trei tipuri de elastomeri (aceeași ca și în cazul studiului realizat cu tribometrul Amsler) și inele din oțelul de rotor cromate dur, respective încărcate prin HVOF. Experimentele s-au realizat în condiții de frecare uscată, în condiții de lubrifiere în țitei cu pastille de elastomeri condiționați în țitei la 23°C timp de 72 de ore, respectiv cu pastile condiționate în țitei la 70°C timp de 72 de ore, în țitei cu ados de nisip (5% părți volumice) la diferite sarcini (30, 70, 100 și 160 N) respectiv timpi de 30, 60 și 90 min. Rezultatele obținute

experimental au fost prezentate tabelar cât și grafic, pentru uzură și coeficienți de frecare pentru toate situațiile (condiții de testare), respectiv toate combinațiile de inel-pastilă.

În ciuda avantajelor inerente pe care le au pompele elicoidale, în aplicațiile din industria extractivă de petrol față de agresivitatea mediului abraziv, s-a considerat necesar a se continua cercetările pentru a extinde durata de viață a acestora, prin îmbunătățirea elementelor de lucru ale acestora, respectiv rotorul și statorul. Durata de viață poate, prin urmare, să fie extinsă cel mai eficient prin duritatea materialului rotorului. Uzura abrazivă este determinată în principal de raportul dintre duritatea materialului rotorului față de duritatea particulelor mecanice din sondă

În urma investigațiilor efectuate pe Testerul Baroid a reieșit că următorii parametrii pot fi optimizați pentru a mări durata de viață a pompei în mediul abraziv, caracteristic sondelor de petrol aflate în ultima fază de exploatare: reducerea valorilor interferenței, a presiunii de contact, a vitezei de rotație, alegerea elastomerilor cu duritate mai mică și mărirea durității rotorului, prin aplicarea unui strat de acoperire de carbură de wolfram, prin utilizarea tehnologiei de pulverizare cu flacără de viteză mare (HVOF).

Acest studiu a fost destinat pentru a investiga parametrii care influențează performanța de bază și să contribuie la înțelegerea caracteristicilor tipice ale acestui tip de pompă.

Procesul de uzură abrazivă în pompă a trebuit să fie simulate într-un tribometru potrivit pentru a determina influențele parametrilor operaționali. Aceste date pot furniza potențiale opțiuni pentru optimizarea pompei, pentru a permite prelungirea duratei de viață a pompei, în funcție de condițiile de funcționare.

### **Contribuții personale**

Lucrarea abordează o problemă actuală și de mare importanță, dacă se ține seama de rolul deosebit pe care îl are petrolul în cadrul industriei în general și al celei energetice în special. Ținând seama de faptul că, cea mai mare cantitate de țiței, pe plan mondial, se extrage prin pompajul de adâncime, este foarte importantă alegerea celei mai potrivite și eficiente metode de pompaj de adâncime, respectiv de pompă, în funcție de caracteristicile sondei și condițiile geologice, tehnice, economice și de siguranță, pentru fiecare caz în parte. Actualmente, pe lângă utilizarea în cea mai mare măsură a pompelor de adâncime cu piston, se impune, din ce în ce mai mult, extragerea țițeiului cu ajutorul pompelor elicoidale, care s-au dovedit mult mai performante și eficiente în cazul exploatării multor zăcăminte de petrol. În acest context, lucrarea și-a propus să aducă o serie de contribuții originale privind unele probleme importante legate, în special de creșterea durabilității pompelor elicoidale, și în special al celui mai important component al acestora, respectiv cupla rotor-stator, pornind de la constatările și observațiile făcute în schelele petroliere în general și în

particular din România, în care se utilizează atât pompe din import cât și indigene (UPETROM Ploiești, CONFIND Câmpina).

În cadrul cercetărilor pentru realizarea tezei, s-au distins o serie de contribuții personale, dintre care cele mai importante sunt menționate în continuare.

- Realizarea unui studiu bibliografic la zi, privind principalele probleme constructive, tehnologice, funcționale și de exploatare, ale pompelor elicoidale, utilizate în general și în particular pentru extragerea țițeiului.
- Prezentarea și analiza completă a problemelor geometriei și cinematicii pompelor elicoidale și influența acestora asupra debitului realizat.
- Analiza parametrilor geometrici constructivi care influențează pierderile de fluid (eficiența volumetrică a pompelor) respectiv uzura cuplei rotor-stator și efectul acesteia asupra performanțelor pompei.
- Evaluarea presiunii de contact, respectiv a stărilor de tensiuni și deformări din cupla rotor-stator, datorită strângerii dintre acestea, prin Metoda Elementului Finit, folosind diverse modele, elemente de contact și valori ale strângerii optime pentru acest caz.
- Realizarea unei sinteze privind fenomenele de frecare-uzare ale elastomerilor folosiți la fabricarea statoarelor pompelor elicoidale, incluzând aspectele legate de frecare și uzură precum și analiza principalelor forme de deteriorare și tipurilor de defecte constatate la rotoarele și statoarele pompelor elicoidale care au lucrat în schelele petroliere din țara noastră.
- Realizarea unui amplu studiu experimental privind încărcarea suprafeței rotoarelor din oțel de îmbunătățire, cu pulberi din carburi de wolfram prin procedeul HVOF, utilizând o instalație modernă existent la laboratoarele UPG Ploiești.
- Efectuarea unor ample cercetări tribologice de laborator prin metoda AMSLER, privind comportarea la frecare și uzare a materialelor rotorului în variantele încărcat dur prin procedeul HVOF și cromat dur în cuple cu trei tipuri de elastomeri, din care rezultă avantajul semnificativ privind creșterea durabilității pentru varianta încărcării cu HVOF a rotorului, respectiv cea mai bună combinație de material rotor-elastomer.
- Efectuarea analizei granulometrice a nisipurilor din țițeiul extras din sonde, cu stabilirea compoziției, stabilirea dimensiunilor particulelor componente, poligonului de frecvență și curbei de frecvență cumulată precum și calculul parametrilor statistici specifici (valorile maxime și minime, valoarea medie pătratică, dispersia și abaterea medie pătratică și coeficientul de împrăștiere).

- Realizarea unei cercetări tribologice experimentale, ample și complexe folosind cupla inel din material de rotor încărcat dur HVOF respectiv, cromat dur și pastilă din elastomeri folosiți la execuția statoarelor.

Încercările au fost realizate cu un aparat Baroid Lubricity Tester, în condiții de frecare uscată, frecare în condiții de lubrifiere cu pastile din cei trei elastomeri condiționați în țitei, la 23°C timp de 72 ore respectiv în condiții de lubrifiere cu pastile din elastomeri, în țitei cu adaos cu de nisip în concentrație de 5% părți volumice, condiționați în țitei la 70 °C timp de 72 ore, la sarcini de 30, 70, 100 și 160 N, timp de 30, 60 și 90 minute. Pentru toate cazurile studiate au fost stabilite variațiile coeficientului de frecare funcție de temperatură și timp, respectiv variațiile uzurii inelului (oțel durificat) și pastilei (elastomer) în timp funcție condițiile de testare. Acest rezultate obținute (investigațiile inițiale, analiza cu element finit a pompei (MEF), a cuplei a pompei și coeficienții de frecare printr-o abordare tribometrică permit o estimare preliminară bazată pe performanță. Valorile colectate în acest fel pot fi aplicate față de dinamica de funcționare a pompei reale cu o precizie satisfăcătoare.

Elaborarea a patru articole, publicate (2) și două în curs de publicare precum și a trei studii de cercetare în cadrul unor programe naționale de cercetare- dezvoltare, toate privind instalațiile de pompaj de adâncime cu pompe elicoidale.

Lucrarea este deosebit de utilă atât pentru proiectanții și fabricanții de pompe elicoidale cât și pentru utilizatorii acestor produse din sectorul petrolier. Cercetările efectuate se pot finaliza cu studii tehnologice conținând soluții tehnice noi și modernizate utilizate la proiectarea de echipamente comandate de diverși beneficiari. De asemenea, studiile tehnologice furnizează soluții pentru remedierea defecțiunilor apărute în exploatarea pompelor elicoidale.

### **Perspective**

Frecarea, proprietățile celui de-al treilea corp și uzura sunt în interdependență de natură cauză-efect și reprezintă un domeniu actual de cercetare. Având în vedere complexitatea acestor aspecte, cât și diversitatea extrem de mare a modului de comportare a materialelor elementelor cuplei de frecare rotor-stator a pompelor elicoidale, în special al elastomerilor statoarelor în cazul predominant al deformărilor de contact, lucrarea poate continua cu cercetări prin metoda elementului finit a încărcărilor dinamice specifice pompelor elicoidale. Având în vedere că deformarea vâscoelastică a elastomerului statoarelor pompelor elicoidale, include și faza de rupere, este necesară abordarea și completarea teoriei cinetice a elasticității cu aspecte reologice pentru a corela datele de rupere ale elastomerului cu rezistența adeziunii.

## BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

1. ANDREI, T. *Contactul real al suprafețelor de frecare*. Editura Academiei Române, București, 1990, ISBN 973-27-0107-2;
2. ANTONESCU, N.,N., ULMANU, V. *Fabricarea repararea si întreținerea utilajului chimic și petrochimic*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1981;
3. BALDENKO, D. F. *Multilobe progressing cavity pump operating process, particularities geometrical parameters optimization and field of application*. Progressing Cavity Pump, Workshop, November 19, Tulsa,1996;
4. BEJAN, V. *Bazele fabricării și a reparării utilajelor tehnologice*, Oficiul de informare documentară pentru industria construcțiilor de mașini, 1991;
5. BRISCOE, B. J., SINHA, S. K. *Wear of polymers*. Proc Instn mech Engrs Vol 216 Part J: J Engineering Tribology, pg. 401-412, 2002;
6. CHITU-MILITARU, P., FIRU, L., TANASESCU, I., MANOLACHE, V., MOCANESCU, F. *Pompajul cu pompe cu cavități progresive*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 2005;
7. CHOLET, H. *Les Pompes a Cavities Progressantes*. Paris, Ed. Technip, 1997;
8. CREIȚARU, A., PUPĂZESCU, AL. *Calculul asamblărilor filetate cu umăr prin metode numerice*, Jurnalul de Petrol și Gaze, 5(35), mai, 2002;
9. GREENWOOD, J. A., MINSHALL, M., TABOR, D. *Hysteresis losses in rolling and sliding friction*. Research laboratory for the physics and chemistry of solids, Departament of Physics, Cambridge University, Communicated by BOWDEN, F.P., F.R.S. –Receviad 1 June 1960– Revised 20 July 1960), article in Proceedings of The Royal Society A, January 1961, downloaded from <http://rspa.royalsocietypublishing.org>, 25 December 2015;
10. HEISSE, R. *Friction between a temperature dependent viscoelastic body and a rough surface* *Friction*; 4(1): 50–64 (2016); ISSN 2223-7690; DOI 10.1007/s40544-016-0103-0;
11. HÉROUX DEVTEK INC CANADA. *Producibility testing on WC-Co-Cr HVOF coating for landing gears application: surface finishing*, Héroux Devtek Material Report, 2003;
12. HIRSCHFELDT, M. *Manual de bombeo de cavidades progresivas*. OilProduction.net, 2008;
13. MANEA, GH. *Organe de masini*, Vol. I, Bucuresti, Editura Tehnica, 1970;
14. MOFIDI, M., PRAKASH, B. *The influence of lubrication on two body abrasive wear of sealing elastomers*; Division of Machine Elements, Luleå University of Technology Luleå SE-971 87, Sweden, NT2008-115-20, p10, 2008;
15. NELIK, L., BRENNAN, J. *Progressing cavity pumps, downhole pumps, and mudmotors*. Houston, Texas, 2005;

16. PERSSON, B. N. J., VOLOKITIN, A. I. *Rubber friction on smooth surfaces*, The European Physical Journal E 21, EDP Sciences/ Springer Verlag, 9 November 2006;
17. SANDU (MITRAȘCĂ) N., NICOLESCU, B., MINCU, A., GHINEA, T. *Instalație de pompaj cu pompe elicoidale de fund pentru titeiuri vâscoase și cu impurități mecanice*, Studiu Tehnico-Economic-Gama de Pompe Elicoidale; Beneficiar: Ministerul Petrolului-Trustul foraj-extracție Boldești. Contract cercetare: 8416/1987;
18. SANDU (MITRAȘCĂ), N. PAVEL, I., MINCU, A. *Studii și cercetări privind realizarea unei instalații de pompare cu pompă elicoidală pentru extracția apelor termale*. Beneficiar: Ministerul Educației și Cercetării. Contract cercetare: 27C/1994; 268B/ 1995;
19. SANDU (MITRAȘCĂ), N. PAVEL, I., GOLEANU, B. *Studii și cercetări privind modernizarea și diversificarea pompelor elicoidale pentru extracția țiteiurilor vâscoase și cu un conținut ridicat de impurități mecanice*; Beneficiar: Ministerul Educației și Cercetării. Contract cercetare: 268B/1995; 21/1996;
20. SANDU (MITRAȘCĂ), N. *Studiul și analiza critică a formelor constructive, materialelor și soluțiilor tehnologice practicate pe plan mondial la fabricarea cuplei rotor-stator a pompelor elicoidale pentru extracția țiteiurilor vâscoase și cu impurități mecanice*; Referat 1, Teză de doctorat, Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești, 2009;
21. SANDU (MITRAȘCĂ), N. *Studiul și analiza critică comparativă a procedeeelor și tehnologiilor uzuale de încărcare a suprafeței de lucru ale cuplei rotor-stator a pompelor elicoidale pentru extracția țiteiurilor vâscoase și cu impurități mecanice*, Referat 2, Teză de doctorat; Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești, 2009;
22. SANDU (MITRAȘCĂ), N. *Cercetări experimentale privind tehnologia de durificare a rotorului pompei elicoidale și comportarea la uzare*; Referat 3, Teză de doctorat; Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești, 2010;
23. SANDU (MITRAȘCĂ), N., ULMANU, V. *Abrasive wear resistance of the rotor-elastomer couple of materials used by progressive cavity pumps*, Proceedings of the Balkantrib'14 8th International Conference On Tribology, 30thoct.-1stnov.2014, Sinaia, Romania;
24. SANDU (MITRAȘCĂ), N., POPESCU, M., IANACHE, C., IONESCU, D. *Creșterea eficienței sistemelor de antrenare ale echipamentelor de pompaj cu pompe cu cavități progresive, utilizate în exploatarea zăcămintelor de petrol și gaze*; Beneficiar: UEFISCDI. Program NUCLEU. Contract cercetare: PN 09350201/2014;
25. SANDU (MITRAȘCĂ), N., ULMANU, V. PUPĂZESCU, AL. *Contact analysis between the rotor and the stator of a progressive cavity pump*; Buletinul UPG, Seria Tehnica, Vol. LXVIII, nr.1/2016, pg. 7 – 12;



26. SANDU (MITRAȘCĂ), N.; IANACHE, C., IONESCU, D. *Soluții performante de creștere a rezistenței la uzură a componentelor cuplei de frecare rotor – stator a pompelor cu cavități progresive*; Beneficiar: UEFISCDI. Program NUCLEU. Contract cercetare: 14 N/2016;
27. SANDU (MITRAȘCĂ), N., ANTONESCU, N., N., ULMANU, V. *Cercetări experimentale privind comportarea la uzare abrazivă a cuplei rotor-stator a pompelor elicoidale*. Articol în curs de apariție în Balkantrib'17, 9th International Conference On Tribology, 13-15 september 2017, Cappadocia, Turcia
28. SANDU (MITRAȘCĂ), N., ANTONESCU, N., N., ULMANU, V. *Considerații asupra aspectelor care influențează comportarea cuplului de materiale metal-elastomer al pompelor elicoidale*. Articol în curs de apariție în Balkantrib'17, 9th International Conference On Tribology, 13-15 september 2017, Cappadocia, Turcia;
29. THOMINE, M. *Relation viscoelasticite/tribologie des elastomeres charges,aplication aux joints d'etancheite dans les roulements a billes*. Disertation. L'Institut National des Sciences Appliquees de Lyon, 2004;
30. TUDOR, I. *Tribologie*. Editura Universitatii din Ploiesti, 2001;
31. TUDOR, A., *Frecarea si uzarea materialelor*, Ed. BREN, Bucuresti, pp.93-96 2002.
32. ULMANU, V., BADICIOIU, M., CALTARU, M., ZECHERU, GH., DRAGHICI, GH., MINESCU, M., PREDA C.F. *Research regarding the hardfacing of petroleum gate valves by using high velocity oxygen fuel technology*. Proceeding of the 7th International Conference „THE” Coatings, Chalkidiki, Greece, 2008, p. 289-294;
33. VETTER, G., WIRTH, W., KÖRNER, H., PREGLER, S. *Multiphase pumping with twin-screw pumps—understand and model hydrodynamics and hydroabrasive wear*, Proceedings of the 17th International Pump Users Symposium, 2000, Houston;
34. VOLINTIRU, T., IVAN, GH. *Bazele tehnologice ale prelucrării elastomerilor*. Editura Tehnică, București, 1974;
35. ISO 15136-1. *Downhole equipment for petroleum and natural gas industries-progressing cavity pump system for artificial lift-Part 1: Pumps*, First Edition 15-07-2001.
36. \*\*\*[www.kudupump.com](http://www.kudupump.com).
37. \*\*\*[www.oilproduction.net](http://www.oilproduction.net).
38. \*\*\*[www.pcm.eu](http://www.pcm.eu)
39. \*\*\*[www.weatherford.com](http://www.weatherford.com).